

MEMS системы

(или вездесущие микромашины)

миниобзор

Олег Сеньков (os4506@spb.edu)

Представьте себе машины такого размера, что человеческий глаз не в состоянии их увидеть. Представьте работающие механизмы этих машин с шестеренками, пружинами и приводами не больше пыльцевого зернышка. Представьте, что приводят в движение эти машины двигатели, работающие на энергии статических разрядов. Представьте, что они изготавливаются десятками тысяч за один производственный цикл и стоят всего несколько центов каждая. Вообразите мир, где инерция и гравитация не играют большого значения, а погодой управляют атомарные силы и молекулярный рельеф поверхностей. Ну что, вообразили?!

Добро пожаловать в мир MEMS (Microelectromechanical Systems), в мир микроэлектромеханических систем, в мир микромашин.

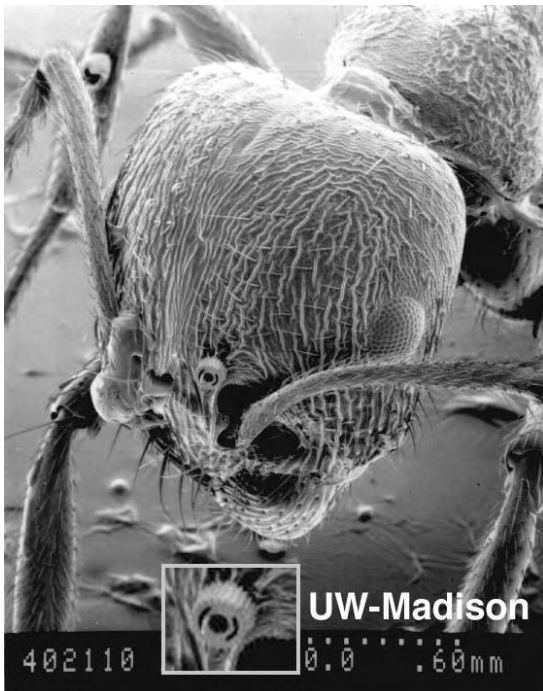


Фото.1. MEMS-шестеренка, надетая на лобный волосок головы муравья

Введение

Если коротко и попроще, то MEMS – это та же процессороподобная микроэлектроника, только с ультрамелкими механическими движущимися элементами, интегрированными в единую систему с электроникой. Насколько мелкими, можно судить по сканирующей фотографии (см. фото.1), где шестеренка, с почти тремя десятками зубцами, надета на кутикулярный волосок головы муравья.

Если строго и научно, то MEMS - это механические структуры, созданные в ограниченном объеме твердого тела или на его поверхности в виде сложных микросистем субмиллиметрового размера, представляющих собой упорядоченные композиции областей материала с заданным составом, структурой и геометрией, статическая или динамическая совокупность которых обеспечивает реализацию процессов генерации, преобразования и передачи энергии в тесной интеграции с восприятием, обработкой, трансляцией и хранением

информации при выполнении запрограммированных операций и действий в требуемых условиях эксплуатации с заданными функциональными, энергетическими, временными и надежностными показателями. Это – хоть и достаточно длинное, и на первый взгляд сложноватое определение, но зато, самое полное из всех, которые я сумел найти в специализированной литературе по MEMS системам. Но начнем, пожалуй, с небольшого

Характеристики MEMS систем

размеры – от микрона до нескольких миллиметров;
сложность – от 1 детали до миллиона;
скорость движения деталей – от 100 наносекунд до 1 секунды;
интегрируемость – с электроникой и оптикой;
энергия для движения – электростатическая ($CV^2/2$);
стоимость – соизмерима со стоимостью процессоров.

экскурса в прошлое, и проследим цепь событий с самого начала, с изобретения транзистора и первых простых MEMS конструкций – микросенсоров давления.

Как это было

Сначала был германиевый транзистор. Хотя он и не имел никаких механических частей, но его изобретение 23 декабря 1947 г. американскими исследователями Дж.Бардином (J.Bardeen), У.Шокли (W.Shockley) и У.Браттейном (W.H.Brattain)^{1,2} из Bell Telephone Laboratories³ и получившим за это Нобелевскую премию в 1948 г., и наши аналогичные разработки 1953 г. под руководством А.В.Красилова, инициировали начало лавиноподобной микроэлектротехнологической революции, повлиявшей на все стороны жизни человека и цивилизацию в целом. И на MEMS тоже. Почему, спросите вы, - да потому, что создав первый транзистор, человечество научилось создавать очень мелкие конструкции заданной формы из полупроводниковых материалов, и управлять движением электронов и поведением дырок на микроуровне. Сейчас многие усматривают экспансию и влияние MEMS на микроэлектронику очень схожим с транзисторной в начале 50-х годов.



Фото 2. Миниатюрное зеркальце на салазках

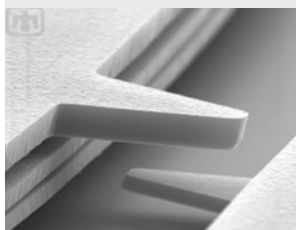


Фото 3. Зубцы счетного механизма

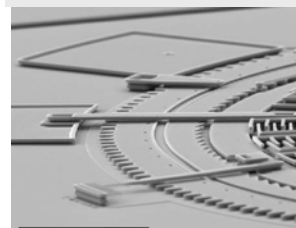


Фото 4.
Многослойный движок

На переход от первых германиевых транзисторов со сплавленными контактами к планарным кремниевым политранзисторным структурам потребовалось примерно десять лет. В эти годы одновременно в нескольких научно-исследовательских группах зародилась гениальная концепция интеграции токов нескольких транзисторных элементов на одном кристалле (integrated circuit, IC). Первый германиевый IC-процессор, т.е. по сути первый чип, был создан Дж.Килби (Jack Kilby) из Texas Instruments в 1958 г., а спустя несколько месяцев, был сделан и кремниевый, физиком Робертом Нойсом (Robert Noyce) из Fairchild Semiconductor.

Начиная с 1958 г. сложность IC устройств удваивалась каждые два-три года. Минимальный размер элементов IC-процессоров с тех времен начал неуклонно уменьшаться с 20-30 микрон, до субмикронного уровня. На данный момент плотность интеграции IC-устройств (транзисторов, конденсаторов, резисторов) на одном кристалле уже перевалила за десятиmillionную отметку.

Однако, контролирующие, измерительные и автоматизационные системы, использующие только IC-устройства были бы слепы, глухи и немые без сенсоров, обеспечивающих вход и кодирование информации из окружающей среды. Схожим образом без актуаторов и приводов, IC-системы были бы бессильны выполнять

требуемые функции и влиять на окружающую среду. С тех пор, как IC-технологии и микропроизводство обеспечили высокую скорость работы, миниатюрность и низкую стоимость устройств обрабатывающих разнообразные сигналы, обычные сенсоры и приводы, т.е. те, которые не MEMS, далеко отстали в производительности, размерах и цене. И интегрировать вместе сегодняшние, даже самые простые DSP, контроллеры и процессоры с приводами и сенсорами «домешной» эпохи, все равно, что на суперкомпьютере в 10 Tflops рисовать в «Пэйнтбраше», - крайне не эффективно.

Кремниевые MEMS сенсоры изначально создавались для измерения физических величин, потом их использование расширилось и на исследование, анализ и контроль химических веществ в жидких средах, сегодня, они уже совершают революционный переворот в медицине, молекулярной биологии и генетике.

Первым микросенсором конечно же был кремниевый сенсор давления. Его создал ученый Чарльз Смит (Charles Smith) из Case Institute of Technology⁴ в далеком 1953 г., позже переманенный в Bell Labs. Работа MEMS сенсора давления была основана на пьезорезистивном эффекте некоторых материалов, которые под воздействием механических сил могли изменять свое сопротивление.

Первый коммерческий вариант сенсора появился только в 1958 г. благодаря таким компаниям, как Kulite, Honeywell и Microsystems. А улучшенная его модификация с тонкой чувствительной «силиконовой» диафрагмой появилась на рубеже 70-х годов. Дальнейшая модернизация MEMS сенсоров давления двигалась в направлении как миниатюризации устройств, так и в «навешивании» им дополнительных функций, таких как контроль температуры, измерение скорости и угла давления, и т.д. В настоящий момент, MEMS кремниевые сенсоры давления – это многомиллиардная индустрия, взаимодействующая почти со всеми отраслями промышленности, от авто и авиокосмической, до биомедицинской.

Первый гибридный пьезокерамический IC-MEMS сенсор давления с цифровым выходом был разработан тремя инженерами из Невады - Е.Блазером (E.Blaser), У.Ко (W.Ko) и Е.Йоном (E.Yon) в 1971 г. в Case Western Reserve University для биомедицинского применения. Но как оказалось позже, данный сенсор ведет себя не очень стабильно при боковых нагрузках и очень чувствительный к интерференциям. По этой причине его перестали использовать в качестве имплантируемых внутрь сердца и мышц датчиков напряжения. В 1977 г. ученые из Stanford University разработали первый MEMS сенсор на основе не резистора, а конденсатора, который был лишен всех недостатков, описанных выше, и в 1980 г. он был интегрирован в монокристалльный кремниевый кристалл учеными из все той же лаборатории в Case Western Reserve University.

На сегодняшний день разработано и коммерциализовано великое множество разнообразных микросенсоров, они измеряют положение в пространстве по трем осям, скорость, ускорение, давление, силу, натяжение, ток жидкости, магнитное поле, температуру, состав газов, влажность, pH, ионную концентрацию растворов, молекулярный состав крови и лимфы человека и т.д.

Впервые, термин MEMS выкристаллизовался в самостоятельное научное направление с таким же названием не так давно, в 1987 г. в городе «соленого озера» (Salt Lake City), штата Юта, на одной из конференций по твердотельной микродинамике. До этого момента были лишь отдельные разрозненные технологические приемы, позволяющие создавать на микроуровне простые в функциональном смысле механические структуры, несколько десятков удачных вариантов незамысловатых полустатичных конструкций из MEMS, и все, -

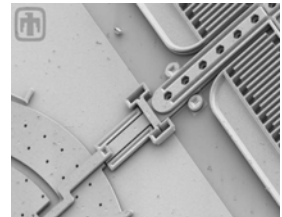


Фото 5. Шпилечный замок

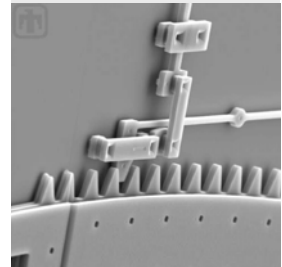


Фото 6. Антиреверсный механизм

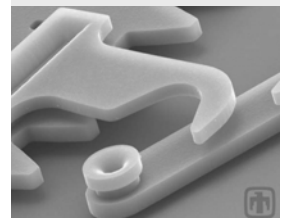


Фото 7. Щеколда-крючок

цельной концепции MEMS, научно-технического направления, как такового - не было.

Материалы, структуры и технологии

Материалы. При создании MEMS систем используется огромное количество разнообразных материалов. Их можно разделить на две группы. Первую группу составляют конструкционные (композиционные) материалы, выполняющие функции несущих конструкций для механических подвижных частей, опор, токоразводки или смазки. В нее входят: стекло, некоторые виды пластика, монокристаллический кремний, поликристаллический кремний, пористый кремний, диоксид и нитрид кремния, полиамид, вольфрам, никель, медь, золото и углерод.

Для длительного функционирования MEMS машин в агрессивных средах несомненный интерес представляет композиция «карбид кремния на нитриде алюминия», где карбид кремния является отличным полупроводником, а нитрид алюминия – диэлектриком с пьезоэлектрическими свойствами. К тому же, оба материала оптически активны, в том числе в УФ области спектра, имеют высокую теплопроводность и температуру Дебая, характеризующую стойкость материала к внешним воздействиям (термическим, химическим, радиационным).

Вторую группу образуют так называемые активные или «интеллектуальные» материалы, выполняющие в MEMS системах функции источников движения, механизмов передачи движения, сенсорных и активирующих сред, геометрической и объемной памяти, и выполняющие данные функции за счет электростатических, электромеханических, пьезоэлектрических, магнитных и оптических явлений и сил. К этим «умным» материалам можно отнести различные сплавы титана и никеля, окись цинка, кварц, пьезокерамику.

Структуры. Что же на сегодняшний день по MEMS технологиям создается? Какие структуры? Ответу, - очень и очень многое. Судите сами:

Микросенсоры

- **механические** (на давление, ускорение, гравитацию, вибрацию, инфра-, и ультразвук);
- **лазерно-оптические** (на движение, изменение электромагнитного спектра излучения);
- **термические** (на изменения в широком диапазоне температур);
- **радиоционные** (на рентгеновское, α -, β -, γ -излучения);
- **магниторезистивные** (на изменение магнитного поля);
- **химические** (на токсины, яды и примеси);
- **биохимические** (на ДНК, белки, вирусы и бактерии);
- **иммунологические** (на иммуноглобулины и антитела);
- **генные** (на определенные гены или участки генов).

Приводы (актуаторы)

- **термические приводы** (выполняют механическую работу за счет расширения, искривления или выпрямления материала под действием нагревания или охлаждения);
- **электростатические актуаторы** (выполняют механическую работу за счет отталкивания подвижных элементов конструкций, заряженных одноименными зарядами или притягивания – разноименными);
- **электромагнитные приводы** (совершают механическую работу за счет сил индуктивности);
- **вибрационные** (переводят колебательные, вибрационные движения в линейные).

Моторы (двигатели)

- **электромагнитные микромоторы** (обеспечивают продолжительное циклическое круговое вращение элементов конструкций за счет сил индуктивности).

Преобразователи и генераторы

- света в электричество;
- электричества в свет;
- температурной разницы в электричество;
- электричества в высокочастотный звук.

Насосы и фильтры

- **насосы** (обеспечивают нагнетательное движение жидкостей и газов по микрополостям);
- **фильтры** (обеспечивают жидкостную и газовую фильтрацию и абсорбцию веществ в микроаналитических системах).

Элементы сопряжения MEMS конструкций

- шестеренки;
- рычаги и кронштейны;
- реверсные механизмы;
- замочные механизмы.

Где же применяются все эти замысловатые электромеханические микроконструкции, организованные в MEMS системы? Приведу лишь некоторые, самые яркие примеры: в «in vitro» портативных диагностических приборах (в том числе, в так называемых, лабораториях на чипе), в хроматографических анализаторах высокого разрешения, в пьезосоплах струйных принтеров и в магнитооптических головах накопителей на жестких, CD/DVD дисках, в излучающих матрицах проекционных аппаратов, гироскопах, акселерометрах, инклинометрах, динамометрах и микроспектрометрах, в медицинских зондах кардиопейсмерных стимуляторов и кохлеарных имплантантов слуховых аппаратов, в микросистемах подачи лекарственных сред, в военных и гражданских микророботах.

Технологии.

На сегодняшний день, за почти двадцатилетний период существования микромеханики, разными академическими лабораториями и коммерческими компаниями создано, наверно, несколько сот самых разнообразных технологий и методов конструирования MEMS систем.

Все они носят названия либо той лаборатории, где были разработаны, либо аббревиатуру слов, обозначающих те или иные стадии технологического процесса, либо и первое и второе вместе. Расскажу лишь о некоторых из них.

EFAB. Технология **EFAB**⁵ (Electrochemical **FAB**rication) – новая технология, основанная на гальваническом осаждении металлов на изолирующих поверхностях, и с последующим растворением изоляционного материала, позволяет создавать трехмерные механические микроструктуры, сложно переплетенные между собой, разработана двумя научными учреждениями - Information Sciences Institute (ISI) и University of Southern California, при финансировании военного агентства DARPA.

В отличие от традиционных методов (см. ниже), EFAB-технология позволяет формировать трехмерные микроструктуры с сумасшедшим количеством независимых 5-микронных слоев, до 1000, как заявляют разработчики EFAB, к тому же, она не требует сверхчистых помещений, полностью автоматизирована

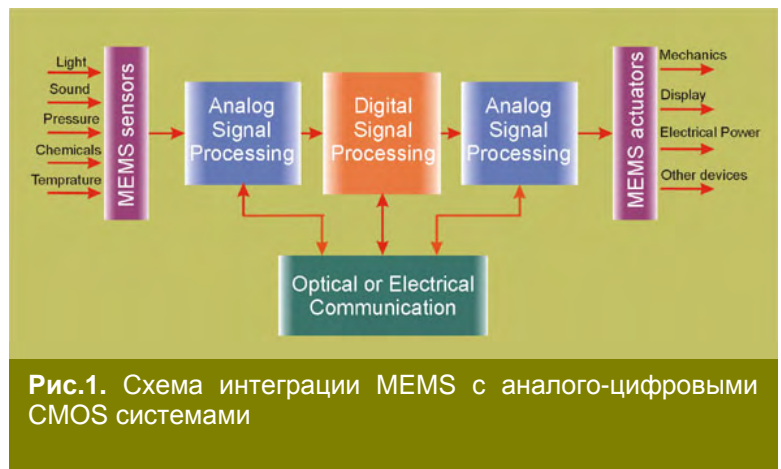


Рис.1. Схема интеграции MEMS с аналого-цифровыми CMOS системами

и с меньшим количеством технологических этапов, и занимает на создание каждого слоя всего несколько минут, в отличие от других методов, где на постройку одного слоя может уходить и несколько дней.

LIGA технология. В начале 80-х годов в германском Центре ядерных исследований в Карлсруэ (Karlsruhe Nuclear Research Center) была разработана первая технология формирования объемных структур высотой в несколько миллиметров с очень ровными прямоугольными гранями, и при поперечном сечении MEMS-детали от всего в 5-7 микрон, до 300-500, с использованием жесткого излучения, прецизионного литья полимерами по заданной форме и гальванического осаждения металлов на микроповерхностях, получившей название **LIGA-технология**⁶ (LIGA – аббревиатура немецких слов «**L**itographie» - литография, «**G**alvano**f**ormung» – гальванообработка, «**A**bformung» – прессование).

Сущность метода заключается в использовании не простого рентгеновского излучения от рентгеновской лампы, а полученного при помощи ускорителя элементарных частиц – **синхротрона**. Синхротронное рентгеновское излучение является очень мощным, и имеет сверхмалое расхождение электромагнитного пучка (не больше $0,006^\circ$), т.е. фактически, формируется пучок параллельных лучей, отсюда и очень ровные отвесные стенки у MEMS-конструкций. Глубина проникновения такого рентгеновского излучения в полимерный материал может достигать нескольких миллиметров. Это очень много. Микродетали, полученные этим методом, выходят очень объемными, лишенные планарности.



Фото 8. Инженеры над разработкой сложной маски для MEMS-устройства при помощи CAD-системы

Если вкратце, то этапы LIGA-технологии следующие: берется пластик PMMA (polymethylmethacrylate) и через маску заданной формы⁷, т.е. с топологическим рисунком нашей будущей детали (см. фото 8), пропускается синхротронное рентгеновское излучение. Так как хромированная маска сама не пропускает излучения, рентгеновские лучи попадают на пластик только по профилю рисунка, разрушая его, и делая в нем утопленную форму детали. Далее наносится тонкий слой металла, например, никеля, после чего химически удаляется весь полимер, обнажая трехмерную металлическую форму детали, которая в дальнейшем будет служить в качестве пресс-формы. В такую пресс-форму заливаются разные расплавленные полимеры, после остывания их извлекают и шлифуют на очень мелких абразивах. В итоге получается MEMS-деталь, например, шестеренка или реверсная балка с зубцами.

SUMMIT технология. Эта технология (см. схему на рис.2) помоложе, чем LIGA, была разработана ведущей лабораторией по производству MEMS систем – Национальной Лабораторией Сандия. Технология SUMMIT (Sandia Ultra-planar Multi-level MEMS Technology) – основана на создании четырехслойных поликристаллических кремниевых механических структур, где первый неподвижный слой (**Silicon substrate**) образует механическую и электрическую основу для остальных трех подвижных слоев.

Самым идеальным на сегодняшний день материалом для создания MEMS машин является поликристаллический кремний (поликремний, **Poly-0,1,2,3**). Его механические свойства превосходны: он прочнее стали в 100 раз (2-3 ГПа, а

сталь – 200МПа-1ГПа), более гибче и меньше изнашивается. Производство его полностью совместимо с современными IC-технологиями создания чипов, более того он используется при изготовлении электродов транзисторных элементов процессоров. Конвейерное производство MEMS систем возможно в больших объемах и очень низкой себестоимостью изделия. Благодаря этому, поликремний интенсивно используется при создании микромашин во всем мире.

Механические структуры MEMS систем создаются при помощи методов тонкопленочной фотолитографии и химического травления. Повторяя эти процедуры от слоя к слою, как со структурами из поликристаллического кремния, так и с изолирующими SiO_2 -слоями (**Oxide-1,2,3**), формируются 11 сложных трехмерных масок, то же количество, что и в более простом CMOS IC-процессе. Далее SiO_2 химически удаляется травлением, оголяя наружу механические структуры из поликристаллического кремния (см. рис.2., на схеме 7 стадия).

Чем больше слоев в планарной микромашине, тем более она сложна, и тем больше задач и функций она может выполнять. Например, свободно вращающиеся шестеренки изготавливаются на двух механических слоях, лежащих на одном основном - субстратном, а более сложно устроенный электростатический движок – уже на трех слоях.

Технология SUMMiT-V. Эта технология SUMMiT-V (Sandia Ultra-planar Multi-level MEMS Technology for 5 levels) уже использует пять слоев, один из которых, самый нижний, образует неподвижную платформу. При использовании этой технологии удастся создать более усовершенствованные микромашины с одной или более подвижной платформой-слоем, более высокие, до 12 микрон в высоту, более жесткие и механически прочные, а дополнительная масса подвижных деталей может быть использована, чтобы достичь большей мощности приводов. Показательным устройством, где используется эта усовершенствованная технология, может служить микроскопический 24-битный механо-оптический замок (см. фото 5 и 6).

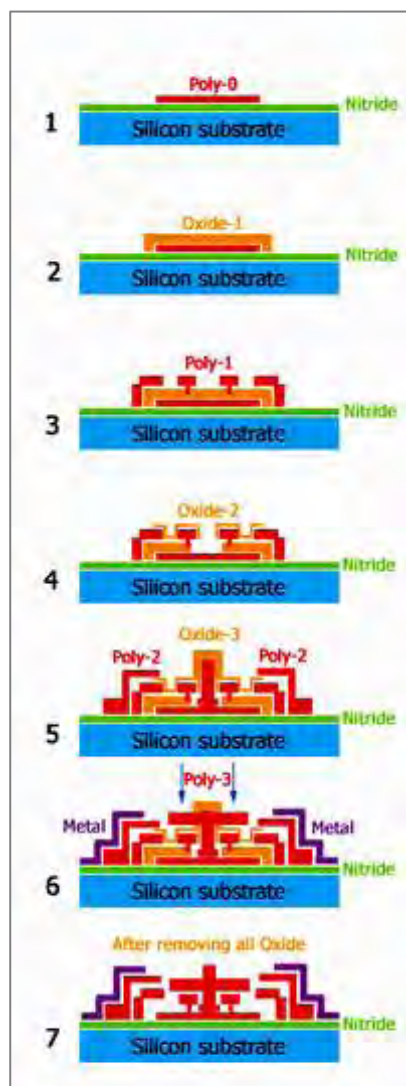


Рис.2. Схема процесса из 7 стадий создания насаженной на ось шестеренки, внешнего кожуха и токопроводящей металлической обкладки.

«Живые» примеры

Какие же микромашины уже построены по MEMS технологиям?

Сенсоры. Это целая плеяда специализированных устройств, способных воспринимать изменения в окружающем пространстве и перекодировать (транзюсировать, преобразовывать) полученную информацию в оптические или электрические сигналы, реже в механическое движение каких-то элементов MEMS конструкций. По сложности своей сенсоры - самые простые

микромашины, зачастую представляют собой просто тонкие металлические или «силиконовые» мембранки (см. рис. 9), небольшие чувствительные волоски или намагниченные запиратели. По этой причине, они первыми из всех MEMS систем перебрались из-под бинокля экспериментальных лабораторий на поточные промышленные конвейеры фабрик и заводов. Особенно запали на них



Фото 9. Поликремневый мембранный сенсор давления на восьми чувствительных резисторах

военные; ими просто напичканы последние разработки реактивных двигателей новейших истребителей, таких как «Mirage-III-Fighter», «F-19» или пассажирских лайнеров «Boeing», внутренности тепловых ракет и разведывательных космических спутников. Их активно используют в датчиках движения, вибрации, высоты и глубины, давления, магнитодатчиках современных подрывных устройств, минах, торпедах, в детонаторах и т.д. И причин этому несколько. Во-первых, из-за своих небольших размеров, MEMS сенсоры способны улавливать мельчайшие изменения в окружающей среде и быстро реагировать на них, зачастую не тратя на это никакой энергии. Во-вторых, благодаря несложным

схемам конструкций, сенсоры довольно просто интегрируются с микроэлектроникой, встраиваясь в CMOS процессоры и контроллеры в виде небольших механических придатков на общей подложке кристалла. Ну, и в третьих, несколько десятков лет назад, была довольно быстро разработана технология промышленного производства MEMS сенсоров (см. выше в главе «как это было»), которая могла применяться на тех же производственных площадях, что и микропроцессорная IC-технология, и не требовала сильных изменений в CMOS-технологическом процессе.

Актуаторы (приводы), моторы и генераторы. Термические приводы. Микромашины, способные производить линейные или циклические движения в сотни микрон за счет термического расширения материала под действием тока, мощностью всего в несколько мВат.



Фото 10. Микромотор на пьезоэлементах с ведущей звездочкой в 8 мм, создан в лаборатории университета UMR

Например, термический актуатор, созданный в университете Висконсин-Мэдисон, замыкает контакты двух подвижных эластичных полосок, искривляя их в направлении друг друга за счет прохождения по ним тока, образующегося на фотодиодных

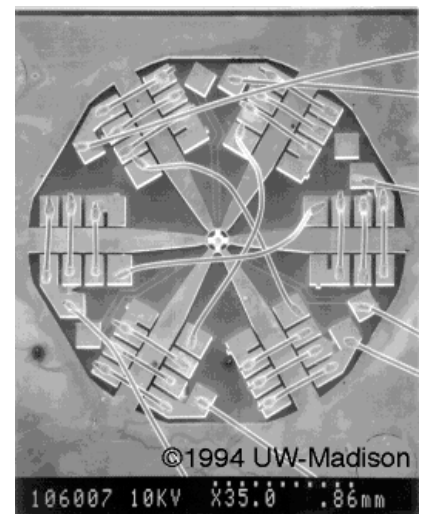


Фото 11. Миниатюрный электромоторчик с ротором в 140 микрон и скоростью вращения в 150 тысяч оборотов



Фото 12. Индуктивные катушки микромоторчика с 6.800 витками провода на каждой

площадках под действием света.

Электромагнитные моторы. Это довольно сложные MEMS машины, преобразующие электрическую энергию во вращательное движение ротора микроэлектромотора. На фотографиях 11 и 12 показан микромоторчик с небольшой роторной массой и скоростью вращения порядка 150 тысяч оборотов в минуту. Диаметр ротора не превышает 140 микрон, статора с шестью лучами - 2.5 мм. Для оживления этой «блохи» может использоваться ток двух видов – двухполярный с трехфазными неперекрывающимися прямоугольными импульсами, и синусоидальный ток с силой в 0.6 А. Скорость вращения ротора постоянно сверяется тремя фотодиодами, размещенными на статоре. Минимальный ток, необходимый для стабильной работы моторчика равен всего 150 мА. Интересно, что в вакууме в 10 мТорр, микродвигатель способен непрерывно работать больше суток на скорости в 20 тысяч оборотов в минуту.

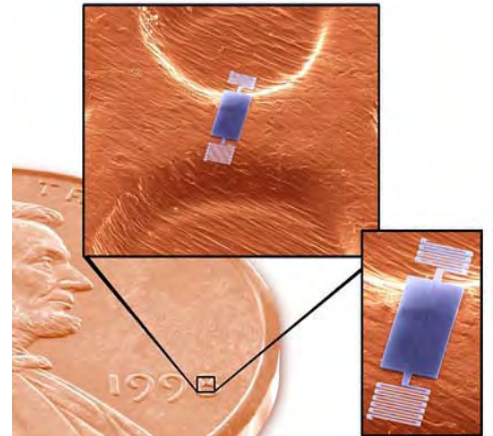


Фото 13. Электромагнитный вибратор, лежащий на восьмерке монеты в одну пенни

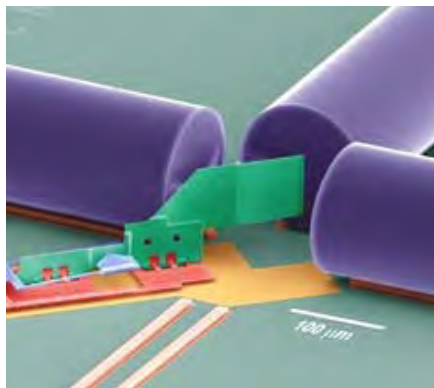


Фото 14. Миниатюрное механическое зеркальце (~60 микрон) молниеносно переводит луч света в соседнее поперечное оптоволокно

Генераторы. Созданный лабораторией Bell Labs миниатюрный электромагнитный вибратор (см. фото 13) имеет поистине пылеподобные размеры: его длина равна толщине человеческого волоса, а ширина – вдвое меньше. Осциллятор под действием внешнего электромагнитного поля может генерировать колебания с частотой 50 кГц. Компания Lucent Technologies, владелец Bell Labs, планирует применять такого рода вибраторы в MEMS переключающих устройствах

оптических коммутаторах телекоммуникационных сетей нового поколения. Например, в таком, как на фотографии 14.

Данный экспериментальный образец оптического переключателя, рожденный во все той же легендарной Bell Labs, имеет длину всего 300 микрон. Его позолоченное зеркальце под действием электростатических сил за сотые доли секунды переходит в вертикальное положение, переводя тем самым луч света в левое оптоволокно.

Зеркала. Миниатюрное гексагональное зеркальце, состоящее из 127 более мелких подвижных зеркалец, интегрировано на управляющую плату (см. фото 15, в центре). Такой сотовый вариант MEMS-зеркал был разработан авиационным институтом – Air Force Institute of Technology (AFIT)⁸ для военных нужд.



Фото 15. Гексагональное зеркало, созданное из более мелких микрозеркалец-ячеек

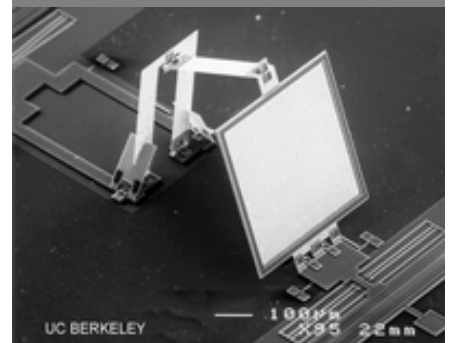


Фото 16. Раскладное 300 микронное зеркальце с двумя степенями свободы, управляется поперечными и продольными актуаторами

Раскладное поликремниевое зеркало (см. фото 16), размером чуть больше 300 микрон (0.3 мм) имеет две степени свободы, и управляется электростатическими комбинированными приводами, позиционирующими отражающую поверхность зеркала с очень большой скоростью и точностью. Зеркало создано в университете Беркли (США) для внешнего полостного лазера, в качестве MEMS-модуля, интегрированного на том же кристалле, что и полупроводниковый лазер.

Конвертеры. Гибридная CMOS-MEMS система термического RMS-конвертера на диодах с двумя термоэлементами (Фото 17., слева на верхней фотографии) и контролирующей электроникой (справа) имеет размер всего в 600 на 600 микрон.

Работает она довольно хитро. Входной сигнал, проходя через поликремниевый резистор, попадает на один из термоэлементов. За этим следит диод, определяя изменения в температурах во время теплового рассеивания на этом резисторе. Далее миниатюрный сервоусилитель сравнивает температуры на двух термоэлементах, измеряя напряжения на входных диодах. Если температура разная, то он подусиливает сигнал до уровня эквивалентному разнице температур. Таким образом, происходит, как бы, балансировка напряжений на двух термоэлементах при разной температуре на них.

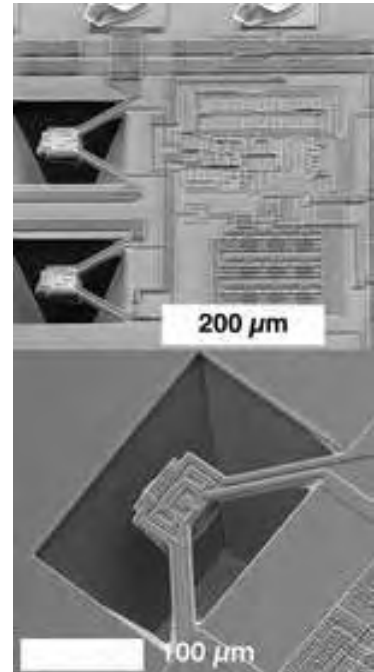


Фото 17. CMOS-MEMS конвертер с двумя термоэлементами.

Когда-нибудь...

Представьте, что через год, а может три, вы сели за компьютер немного поиграть в одном из интернет-кафе. Запустили свою любимую игрушку... И о диво, пробираясь через густые заросли диких тропиков на одной из далеких планет системы «Альфа-Центавра», вы вдруг ощущаете, всю какофонию таинственных запахов цветущих джунглей. Еще не понимая, что же случилось с вашим обонянием, вы натываетесь на засаду неприятеля – отвратительных лохматых монстров с планеты «Крэг». В нос ударил их животный запах, но вы не растерялись, и начали кормить их под завязку градом огня, уклоняясь в мощных прыжках от острых клыков. Желтый дым завалок лесную прогалину с едким запахом пороха. Глаза начали слезиться, еще очередь, еще выстрел, и вы лежите, уткнувшись лицом в грязь, да, это была грязь, да еще какая, - пропитанная сальерой...

Вы думаете, что вас кто-то разыгрывает, спрятавшись под столом или за стенкой с дюжиной пульверизаторов с одорантами внутри? Нет, это не розыгрыш, это одна из крутых геймерных компаний взяла, да и вставила в видеоконтроллер синтезатор запахов с тысячей MEMS микрорезервуаров, фильтров, микронасосов, вентелей и распылителей, дабы добавить элемент реализма и эффект присутствия к вашим любимым играм.

И будьте уверены, так оно и будет...

Компании	www	MEMS технологии
Boeing Motorola Delco Honeywell Allied Signals Analog Devices	www.boeing.com www.motorola.com www.delco.com www.honeywell.com www.alliedsignals.com www.analog.com	Инерционные измерительные технологии: <ul style="list-style-type: none"> • акселерометры, • сенсоры скорости, • вибрасенсоры
Integrated Sensing Systems (ISSYS) Hewlett Packard Xerox Canon Epson Caliper Technologies	www.mems-issys.com www.hp.com www.parc.xerox.com www.canon.com www.epson.com www.calipertech.com	Микрожидкостные MEMS технологии: <ul style="list-style-type: none"> • генные процессоры, • ДНК/РНК процессоры, • лаборатории на чипе, • химические сенсоры, • контроллеры микротоков жидкостей, • микросопла, • микровентили
Lucent Technologies Silicon Light Machines Seagate Technology Texas Instruments	www.lucent.com www.siliconlight.com www.seagate.com www.ti.com	Оптические MEMS (MOEMS): <ul style="list-style-type: none"> • дисплеи, • оптические переключатели, • адаптивная оптика
Goodyear Delco Ford Siemens	www.goodyear.com www.delco.com www.ford.com www.siemens.com	Технологии измерения давления и нагрузок: <ul style="list-style-type: none"> • сенсоры давления для автомашин, • сенсоры давления для медицинского применения, • промышленные сенсоры
IBM TRW BF Goodrich Rockwell Standard Microsystems Corporation (SMC)	www.ibm.com www.trw.com www.bfgoodrich.com www.rockwell.com www.smc.com	Другие MEMS технологии: <ul style="list-style-type: none"> • актуаторы, • сенсоры влажности, • микротрансляторы, • сенсоры напряжения, • устройства хранения данных, • микрокомпоненты спутников, • аэрокосмические сенсоры

Исследовательские лаборатории	www
<ul style="list-style-type: none"> • MIT Microsystems Technology Laboratories • Case Western Reserve University MEMS Labs • Southern California's Information Sciences Institute MEMS Lab • University of Wisconsin-Madison MEMS Lab • Sandia National Laboratories • NASA Labs • DARPA MEMS Labs • UCLA MEMS Labs • Stanford University 	www.mtl.mit.edu www.mems.cwru.edu www.mems.isi.edu www.mems.engr.wisc.edu www.mdl.sandia.gov www.nasa.org www.darpa.mil/MTO/MEMS www.icsl.ucla.edu/~mems www.stanford.edu

Примечания

1. J. Bardeen and W.H. Brattain (1948), "The transistors, a semiconductor triode," *Phys. Rev.*, 74, 230.
2. W. Shockley, J. Bardeen and W.H. Brattain (1948), "Electronic theory of the transistor," *Science*, 108 678-679.
3. Ныне лаборатория называется – Bell Labs и принадлежит компании Lucent Technologies.
4. Сейчас институт является подразделением Case Western Reserve University.
5. Информация о технологии EFAB www.isi.edu/efab/home.html
6. Для более детального ознакомления с «LIGA» посетите страничку разработчика этой технологии в интернете www.daytona.ca.sandia.gov/LIGA/index1.html
7. Рисунки масок бывают разные, и простые, и очень сложные. Все они проектируются на компьютерах, при помощи специализированных CAD-систем.
8. www.afit.af.mil

* * *