

*И.Н. Баринов, В.С. Волков*

## **МИКРОМЕХАНИКА ВОКРУГ НАС**

## Содержание

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Основные понятия МЭМС-технологии .....                                         | 3  |
| 2 История развития МЭМС .....                                                    | 4  |
| 3 Технологические вопросы. Микроактюаторы .....                                  | 6  |
| 4 DMD для DLP .....                                                              | 8  |
| 5 Электромеханическая память .....                                               | 10 |
| 6 МЭМС в телекоммуникациях .....                                                 | 13 |
| 7 Перспективы MEMS - дисплеев .....                                              | 15 |
| 8 MEMS - источники питания для портативных устройств .....                       | 18 |
| 9 MEMS - матрицы .....                                                           | 20 |
| 10 Датчики на основе МЭМС .....                                                  | 26 |
| 11 Датчики для измерения параметров движения на основе MEMS-<br>технологии ..... | 32 |
| 12 Современный рынок MEMS .....                                                  | 35 |
| 13 МЭМС технологии в России .....                                                | 38 |
| Литература .....                                                                 | 45 |

## 1 Основные понятия МЭМС-технологии

На сегодняшний день одной из инновационных технологий является *технология* микроэлектромеханических систем - *MEMS* (Micro-Electro-Mechanical Systems).

**Определение:** Под технологией MEMS понимают технологию микрообработки, позволяющую изготавливать кремниевые микросхемы с крошечными механическими элементами – интеллектуальными машинами с самыми различными функциями.

**Определение:** Соответственно MEMS – это объединение механических элементов, датчиков, приводов и электроники на одном кремниевом основании (подложке).

Мировой рынок MEMS является очень динамичным и согласно последним прогнозам растет на 13,2% каждый год. Кстати, эту отрасль индустрии в Японии называют *микромашинами* (Micromachines), а в Европе - *микросистемными технологиями* (Micro System Technology).

Фундаментальные и поисковые исследования, проводимые в США, Японии, странах Европы и Юго-Восточной Азии, успешно сочетаются с разработками и производством *MEMS* и объектов вооружения и военной техники на их основе. При этом одновременно решаются вопросы унификации, стандартизации изделий *MEMS* для эффективного использования в разрабатываемой аппаратуре нового поколения.

Начиная с 2001 г. в России развернуты работы по данному направлению, в частности были открыты свыше 100 НИОКР в области исследований и разработке MEMS. В настоящее время акцент в проведении работ по тематике с фундаментальной и поисковой направленности в прикладную [7].

Все элементы микроэлектромеханических систем могут быть реализованы в виде единого изделия, причем сразу *десятками или сотнями*, как микросхемы на кремниевой пластине, в основе этого лежит

апробированная традиционная технология производства полупроводниковых интегральных микросхем.

Можно сказать, что MEMS - это множество микроустройств самой разнообразной конструкции и назначения, в производстве которых используются модифицированные технологические приемы микроэлектроники. Действительно, микроэлектромеханические системы получают путем комбинирования механических элементов, датчиков и электроники на общем кремниевом основании посредством технологий микропроизводства. Все элементы могут быть реализованы в виде единого изделия, причем сразу десятками или сотнями, как микросхемы на кремниевой пластине. В основе этого лежит апробированная традиционная технология производства полупроводниковых интегральных микросхем. MEMS уже используются в нишевых приложениях, таких, как пассивные фильтры высокой частоты в терминалах беспроводной и сотовой связи, системы подвижных зеркал для мультимедийных проекторов, микрофоны. Число этих ниш и их размер растет сообразно рыночным потребностям.

## **2 История развития МЭМС**

В истории развития MEMS-технологии, по мнению ведущих современных специалистов, можно выделить четыре уже пройденных этапа [8]. На **первом** непродолжительном этапе - исследовательском (с середины 50-х до начала 60-х годов прошлого столетия) основные усилия к формированию облика будущей технологии приложили как научные подразделения крупных компаний (в первую очередь знаменитая Bell Laboratories), так и собственно промышленные компании и академическая наука. Специфика этого периода заключается в том, что главное внимание уделялось востребованным во времена холодной войны технологиям двойного назначения, прежде всего созданию точных и дешевых датчиков различных типов (проектирование перспективных реактивных боевых

самолетов, например, требовало значительного числа экспериментов), пригодных к массовому производству.

Неудивительно, что **второй этап** развития технологии связывают исключительно с мощными промышленными (точнее, с военно-промышленными) компаниями: такие гранды, как Fairchild, Westinghouse, Honeywell, спешили коммерциализовать первые экспериментальные наработки. На коммерциализацию ушло довольно много времени, и только **к началу 70-х годов** академическая наука стала получать целевое финансирование от промышленности для решения задач сокращения стоимости и расширения областей применения MEMS-устройств.

Еще через десять лет этот этап также был преодолен - и наступила пора **микромашинного производства**. Можно считать, что с конца девяностых годов прошлого века началась микромеханическая эпоха.

Многие эксперты, включая специалистов одной из ведущих фирм в этой области - Integrated Sensing Systems (<http://www.mems-issys.com>), - 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). 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), микромашинны (моторы, насосы, турбины величиной с горошину), микророботы, микродатчики и исполнительные устройства, аналитические микролаборатории (на одном кристалле) и т. д.

### 3 Технологические вопросы. Микроактюаторы

Вообще говоря, микросистема предполагает интеграцию ряда различных технологий (MEMS, КМОП, оптической, гидравлической и т. д.) в одном модуле [8]. Например, технологии изготовления MEMS-устройств для СВЧ-применений (катушки индуктивности, варакторы, коммутаторы, резонаторы) подразумевают традиционные технологические циклы изготовления интегральных схем, адаптированные для создания трехмерных механических структур (это, например, объемная микрообработка, поверхностная микрообработка и так называемая технология LIGA).

Кремниевая объемная микрообработка включает технологию глубинного объемного травления. При таком процессе объемная структура получается внутри подложки благодаря ее анизотропным свойствам, т. е. различной скорости травления кристалла в зависимости от направления кристаллографических осей. Объемную структуру можно получить и методом наращивания, когда несколько подложек сплавляются и образуют вертикальные связи на атомарном уровне.

При поверхностной микромеханической обработке трехмерная структура образуется за счет последовательного наложения основных тонких пленок и удаления вспомогательных слоев в соответствии с требуемой топологией. Преимущество данной технологии - возможность многократного удаления (растворения) вспомогательных слоев без повреждения взаимосвязей базовых слоев. А главная ее особенность состоит в том, что она совместима с полупроводниковой технологией, поскольку для микрообработки используется обычная КМОП-технология [8].

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 процесса заключается в использовании рентгеновского излучения от синхротрона для получения глубоких, с отвесными стенками топологических картин в полимерном материале. Излучение синхротрона имеет сверхмалый угол расходимости пучка. Источником излучения служат высокоэнергетические электроны (с энергией более 1 ГэВ), движущиеся с релятивистскими скоростями. Глубина проникновения излучения достигает нескольких миллиметров. Это обуславливает высокую эффективность экспонирования при малых временных затратах. Считается, что данная технология обеспечивает наилучшее отношение воспроизводимой ширины канала к его длине (при минимальных размерах).

Важнейшая составная часть большинства MEMS - микроактюатор. Обычно данное устройство преобразует энергию в управляемое движение (рис. 1).

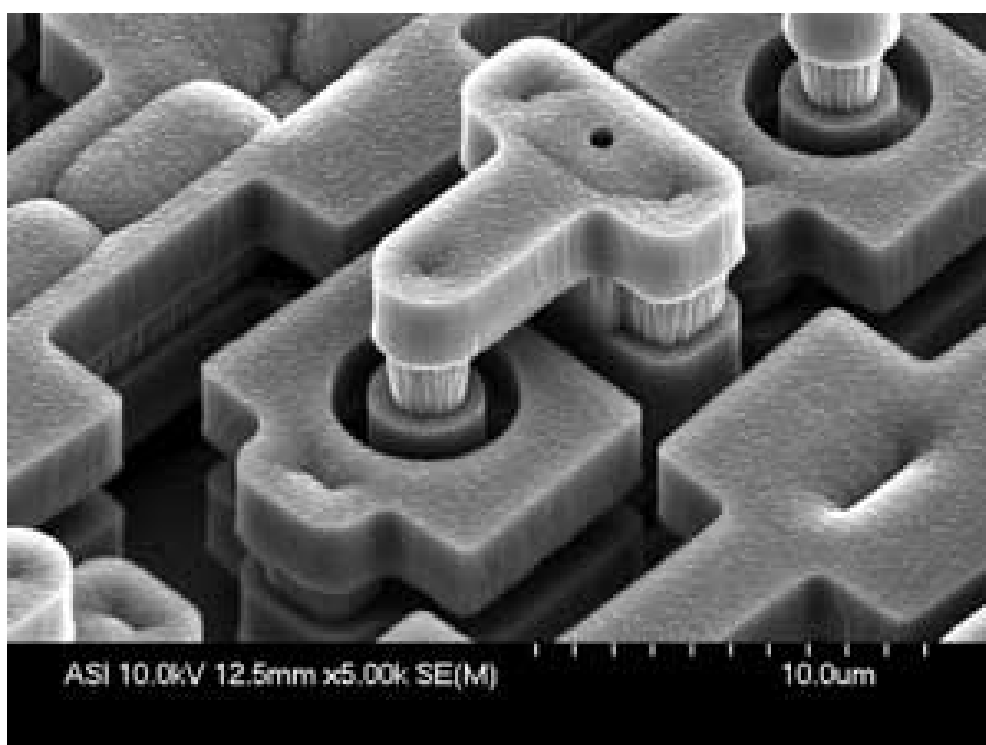


Рис.1 Микроактюатор

Размеры микроактюаторов могут довольно сильно варьироваться. Диапазон применения этих устройств чрезвычайно широк и при этом

постоянно растет. Все методы активации (движение, деформация, приведение в действие) в таких устройствах кратко можно свести к следующим: электростатический, магнитный, пьезоэлектрический, гидравлический и тепловой. При оценке использования того или иного метода часто применяют законы пропорционального уменьшения размеров. Наиболее перспективными методами считаются пьезоэлектрический и гидравлический, хотя и другие имеют большое значение. Электростатическая активация применяется примерно в одной трети микроактюаторов, и это, вероятно, наиболее общий и хорошо разработанный метод; главные его недостатки - износ и слипание. Магнитные микроактюаторы обычно требуют относительно большого электрического тока, также на микроскопическом уровне. При использовании электростатических методов активации получаемый выходной сигнал на относительную единицу размерности лучше, чем при использовании магнитных методов. Иными словами, при одном и том же размере электростатическое устройство выдает несколько лучший выходной сигнал. Тепловые микроактюаторы тоже потребляют относительно много электрической энергии; главный их недостаток состоит в том, что генерируемое тепло приходится рассеивать.

Для оценки микроактюаторов используют такие критерии качества, как линейность, точность, погрешность, повторяемость, разрешение, гистерезис, пороговое значение, люфт, шум, сдвиг, несущая способность, амплитуда, чувствительность, скорость, переходная характеристика, масштабируемость, выход по энергии [8].

#### **4 DMD для DLP**

Лежащая в основе любого проектора DLP (Digital Light Processing) технология цифровой обработки света базируется на разработках корпорации Texas Instruments, создавшей новый тип формирователя изображения на основе MEMS. Еще в 1987 г. изобретенное Ларри Хорнбеком (Larry J.

Hornbeck) цифровое мультизеркальное устройство DMD (Digital Micromirror Device) завершило десятилетние исследования Texas Instruments в области микромеханических деформируемых зеркальных устройств. Суть открытия состояла в отказе от гибких зеркал в пользу матрицы жестких зеркал, имеющих всего два устойчивых положения. DMD-кристалл - это матрица высокой точности, осуществляющая цифровое преобразование света (рис. 2).

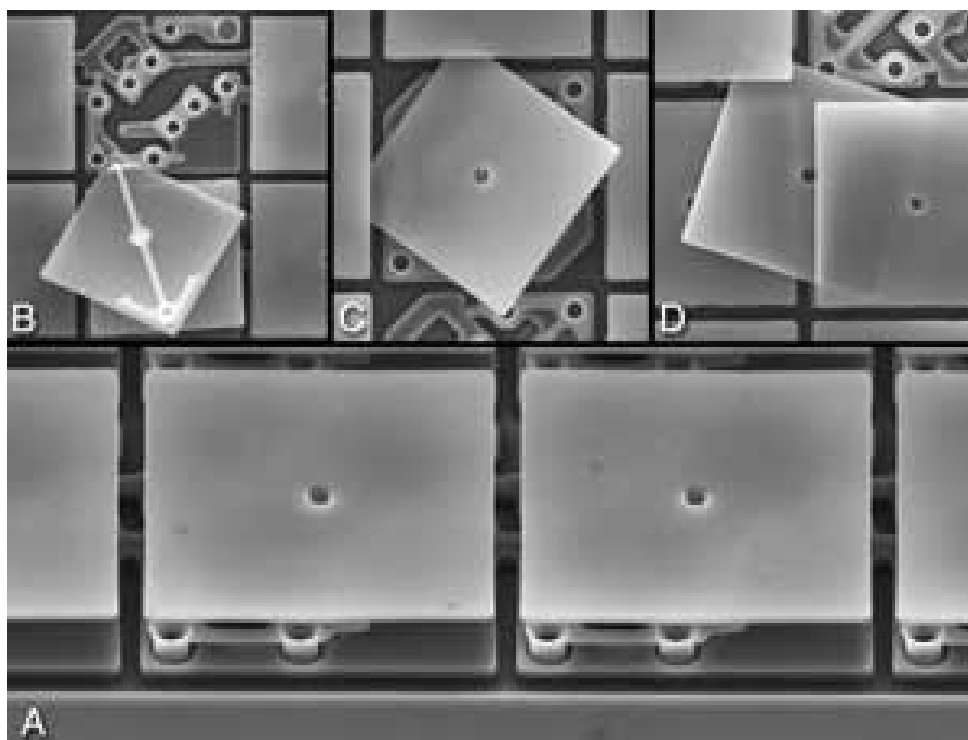


Рис.2 DMD матрица

DMD-кристалл по сути представляет собой полупроводниковую микросхему статической оперативной памяти (SRAM), каждая ячейка которой (точнее, ее содержимое) определяет положение одного из множества (от нескольких сотен тысяч до миллиона и более) размещенных на поверхности подложки микрозеркал размером  $16 \times 16$  мкм. Как и управляющая ячейка памяти, микрозеркало имеет два состояния, отличающихся направлением поворота зеркальной плоскости вокруг оси, проходящей по диагонали зеркала.

С помощью массива микроскопических зеркал формируется луч, причем каждое такое зеркало соответствует одному пикселу света в проецируемом изображении. В сочетании с цифровым сигналом, источником света и проекционным объективом эти зеркала обеспечивают самое высокое качество воспроизведения видео и графических изображений.

## 5 Электромеханическая память

Сегодня и припомнить-то трудно, сколько было разных идей по поводу того, что использовать для запоминающих устройств. А компания Cavendish Kinetics предложила еще один подход к созданию энергонезависимых запоминающих устройств. В основе ее подхода лежат микроэлектронные механические системы с возможностью интеграции в КМОП-процессы. Память Cavendish Kinetics может выпускаться в двух вариантах, с возможностью однократной записи и со способностью перезаписи.

Как полагает компания, ее технология, названная Nanomech, обладает самым низким энергопотреблением среди встраиваемых типов памяти, а по скорости работы сравнима с флэш-памятью. Название Nanomech иллюстрирует ее принцип действия (рис. 3).

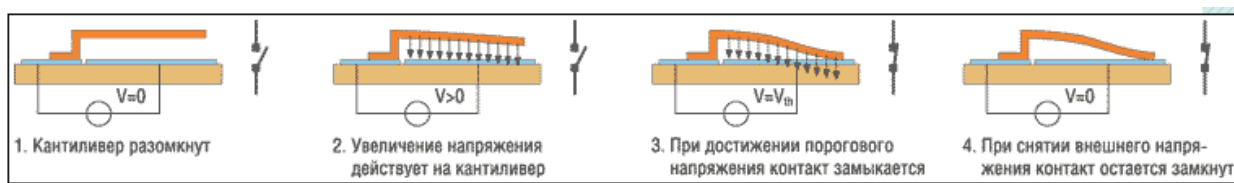


Рис.3 Электромеханическая память

Запоминающая ячейка представляет собой проводящую (металлическую) пластину - кантиливер (микроэлектромеханический актюатор), закрепленный над контактом. Если между контактным электродом и пластиной создать разность потенциалов, пластина изогнется и коснется контакта, в результате чего электрическое сопротивление упадет практически до нуля. Что любопытно, этот эффект обладает гистерезисом,

так как после касания пластинки контакта происходит "залипание" - для разрыва контакта необходима дополнительная энергия. Таким образом, возможно создать память типа ПЗУ, в которую что-либо записать можно лишь однажды. Для перезаписи над пластинкой достаточно поставить дополнительный электрод, приложив к которому потенциал можно разомкнуть контакт.

Действующие прототипы были созданы по КМОП-технологии с учетом проектных норм 0,35 мкм, однако компания уверяет, что такие ячейки памяти можно создавать при соблюдении проектных норм 45 нм. К преимуществам нового типа памяти следует отнести и то, что ток в режиме ожидания отсутствует, а для записи требуется затратить механическую энергию величиной всего 25 пкДж. Устройство остается работоспособным даже при температуре 200 град., при этом количество циклов записи-перезаписи может достигать 20 млн.

На СеBIT'2005 IBM продемонстрировала накопитель, обеспечивающий плотность записи данных свыше 19,2 Гбайт на 1 см<sup>2</sup>. Специалисты утверждают, что этот прототип микроэлектромеханической системы MEMS способен записать на площади размером с почтовую марку информацию, примерно эквивалентную емкости 25 DVD-дисков. Сотрудники IBM ласково назвали свое устройство Millipede ("многоножка"), потому что у него тысячи очень мелких кремниевых шипов, которые могут "прошивать" рисунок из отдельных битов в тонкой полимерной пленке.

Вообще говоря, технологию "многоножек" предложил несколько лет назад нобелевский лауреат Герд Бинниг, автор сканирующего туннельного микроскопа и сотрудник исследовательского института IBM. Он обратил внимание на способность микроскопа формировать в полимерах ямки наноразмера, наличие которых в определенных точках вещества можно трактовать как единичное значение бита. Бинниг, стараясь приспособить свое открытие к нуждам промышленности, научился одновременно сканировать множество подобных ямок. Таким образом, принцип работы Millipede

напоминает всем хорошо известные перфокарты. Ключевым элементом новой технологии служит массив V-образных кремниевых кронштейнов (cantilever), на конце каждого из которых находится миниатюрная микронная игла. Данные записываются на носители, представляющие собой очень тонкий слой полимерного материала на кремниевой подложке. Наконечник каждого V-образного кронштейна с размещенной на нем иглой одновременно служит зоной повышенного сопротивления. При пропускании через него импульса электрического тока игла разогревается до температуры, превышающей температуру плавления полимера, и "выплавляет" в носителе воронку диаметром около 10 нм. Когда ток прерывается, игла остывает, а полимер затвердевает. Для считывания данных измеряют сопротивление "рабочей части" кронштейна. В этом случае игла также разогревается, но только до меньшей температуры, при которой полимер, используемый в носителе, еще не размягчается. Поверхность носителя сканируется, и при попадании иглы в воронку интенсивность теплоотвода от нее резко увеличивается, температура уменьшается, в результате сопротивление изменяется скачкообразно, за счет чего и фиксируется бит информации.

Возможность многократной записи обеспечивается особенностями вязкоупругих свойств полимерных систем. Дело в том, что в области воронки-бита полимер находится в так называемом метастабильном состоянии, из которого его можно вывести неким внешним воздействием, например, с помощью все того же разогрева до определенной температуры. Выполняется это путем прохода нагретой иглы над воронкой, после чего последняя исчезает, т. е. данные стираются. По заявлению специалистов IBM, на сегодняшний день им удалось достичь долговечности носителя, превышающей 100 тыс. циклов перезаписи.

Управление массивом игольчатых кронштейнов в Millipede осуществляется с помощью электронных цепей с временным мультиплексированием - подобно тому, как это делается в микросхемах DRAM. Перемещение носителя вдоль массива и его точное

позиционирование обеспечиваются электромагнитным приводом. IBM утверждает, что Millipede подходит для мобильных устройств: цифровых камер, мобильных телефонов и USB-карт. Однако пока речь идет только о лабораторном образце, а до выхода на рынок Millipede дозреет года через два, не раньше.

Как отмечает аналитическая компания NanoMarkets в своем отчете по рынку памяти, сегмент энергонезависимой памяти к 2011 г. будет оцениваться в 65,7 млрд долл. При этом в понятие "энергонезависимой памяти" компания включила MRAM, FRAM, голографическую память, а также MEMS-разработки, выполненные с использованием новых технологий. По оценкам специалистов, рыночные доли типов энергонезависимой памяти, именуемых в обзоре Nanostorage (устройства хранения, выполненные с использованием микротехнологий), могут составить 40% как в секторе обычной памяти, так и в секторе дисковых устройств.

## **6 МЭМС в телекоммуникациях**

Одной из самых перспективных областей внедрения MEMS многие эксперты в настоящее время считают рынок телекоммуникаций. Еще в конце 2000 г. от Национальной лаборатории Sandia, принадлежащей министерству энергетики США, отпочковалась частная компания MEMX, занимающаяся вопросами коммерческого применения создаваемых в лаборатории MEMS-технологий. Компания сфокусировалась в своей деятельности на оптических коммутаторах для оптоволоконных телекоммуникационных систем. В их основу положена фирменная технология Sandia под названием SUMMiT V (от Sandia Ultraplanar Multilevel MEMS Technology). Это микромашинный процесс обработки поверхности кристалла напылением и травлением, охватывающий пять независимых слоев поликристаллического кремния - четыре "механических" слоя для построения механизмов и один

электрический для обеспечения межсоединений всей системы. Технология позволяет доводить размеры механических элементов до 1 мкм.

Что же касается одного из электронных гигантов - корпорации Intel, то решение о развитии технологий MEMS было принято ею еще в 1999 г. На весеннем Форуме Intel для разработчиков в 2002 г. было не только официально заявлено об интересе к микроэлектромеханическим устройствам, но и провозглашена стратегическая важность этого направления. Учитывая потенциал корпорации как в сфере разработок, так и в производстве, значение этого заявления для рынка MEMS переоценить было трудно. Примерно в это же время на заводе Intel Fab 8 была внедрена микроэлектромеханическая технология, позволяющая формировать внутри или на поверхности полупроводниковых кристаллов крошечные механические устройства - датчики, клапаны, шестерни, зеркала, исполнительные элементы. Для Intel MEMS это скорее микроэлектронные механические системы - микроскопические механические компоненты для устройств, которые отличаются пониженным энергопотреблением и сверхкомпактными конструктивными характеристиками и выполняют вычислительные и коммуникационные функции. Корпорация ведет исследования возможных применений этих технологий в антеннах, экранах, настраиваемых фильтрах, конденсаторах, индукторах и микрокоммутаторах.

Весной 2004 г. Intel начала предлагать своим партнерам для интеграции в сотовые телефоны радиочастотные front-end-модули, построенные по технологии MEMS. В подобный модуль интегрировано около 40 пассивных элементов, что позволяет сэкономить до двух третей пространства в сотовом телефоне. Количество и состав модулей зависят от нужд заказчиков, которым предлагается использовать такие MEMS-модули для миниатюризации пассивных фильтров, резистивных и емкостных цепей. В будущем в аналогичные модули планируется интегрировать низкоскоростные коммутаторы, а в перспективе, возможно, высокочастотные коммутаторы передачи/приема и фильтры на поверхностных акустических волнах SAW

(Surface Acoustic Wave). Существующие дискретные SAW-фильтры хотя и довольно громоздки в сравнении с интегральными микросхемами, однако показатель качества фильтрации у них выше примерно на два порядка. К тому же, если размер SAW-фильтров измеряется в сантиметрах, то MEMS-резонаторов на 1 см<sup>2</sup> площади можно разместить несколько десятков тысяч штук. Нынешнее поколение MEMS-модулей производится на фабрике Intel Fab 8 в Израиле на 200-мм пластинах с учетом проектных норм 0,25 и 0,35 мкм.

На последней конференции по интегральным схемам ISSCC'2005 были отмечены большие возможности рынка ВЧ-фильтров преселектора. Ученые из Мичиганского университета отметили, что такие фильтры найдут применение в телефонах для выбора нужного ВЧ-канала и устройствах ВЧ будущих поколений, где MEMS предоставляют решение с фактором качества  $Q$  выше 10 000, что значительно лучше показателя обычных керамических фильтров. Их коллеги из Texas Instruments, в свою очередь, сообщили о том, что MEMS ВЧ-фильтры можно использовать в малошумящих усилителях. Проблемой остается то, что MEMS-приборы дороги и их внедрение на промышленный рынок пока довольно затруднительно. Представитель фирмы XCom Wireless, выпускающей подсистемы на базе MEMS-реле и варакторов, считает перспективным их использование в программируемых радиоустройствах, а также в радиолокационных станциях с фазированными антенными решетками на спутниках.

## **7 Перспективы MEMS - дисплеев**

По сообщению агентства DigiTimes, тайваньский производитель небольших панелей компания Prime View International (PVI) установила долгосрочные стратегические отношения с американской компанией Qualcomm MEMS Technologies (QMT, Основная область сотрудничества -

разработка коммерческих решений на базе iMod-дисплеев, которые планирует выпускать QMT.

Вообще говоря, технология iMod Display основана на микроэлектронных механических системах MEMS и предпочтительна пока для мобильных устройств. Экран хорошо отображает информацию даже под прямым воздействием яркого солнечного света. Как заявляют представители Qualcomm, сегодня решены и многие проблемы, касающиеся энергопотребления. На ближайшие два года, в соответствии с подписанным контрактом, PVI заявлена как основной производитель подобных дисплеев. Руководители компаний оптимистично высказываются о развитии продвигаемой технологии. Ведь, помимо улучшения вышеназванных технических характеристик, решены и некоторые проблемы производственного процесса. Технология такова, что нет никакой необходимости в добавлении в панель ламп подсветки и цветовых фильтров. Интересно, что эти экраны будут даже тоньше TFT ЖК-панелей.

Стоит отметить, что используемое ныне ноу-хау QMT приобрела вместе с компанией Iridigm в сентябре 2004 г. Вообще говоря, идея данной технологии заключается в том, чтобы формировать цветные изображения методом интерференции световых волн - точно так же, как это происходит, к примеру, в крыльях бабочки или перьях павлина. Из сказанного выше сразу вытекает первое достоинство разработки Iridigm, состоящее в том, что она изначально не предполагала использования красителей. Именно поэтому дисплеи на ее основе со временем не должны утратить яркость и цветовую насыщенность. Ключевым элементом технологии, получившей в то время название iMoD Matrix, выступает интерференционный модулятор iMoD (Interference Modulator). Он представляет собой образец микроэлектромеханической MEMS-системы и состоит из полупрозрачной пленки на стеклянной подложке, способной частично отражать, а частично пропускать свет, и гибкой металлической мембраны. Последняя может находиться в двух состояниях: в первом случае между ней и пленкой есть

воздушный зазор, во втором - нет. Переход из одного состояния в другое осуществляется за счет электростатического взаимодействия в результате приложения внешнего напряжения различной полярности, причем после его снятия мембрана сохраняет новую конфигурацию.

Когда пленка и мембрана разделены воздушным зазором, световые волны, отразившиеся от пленки, интерферируют с волнами, прошедшими сквозь нее и затем отразившимися от мембраны, в результате чего выделяется излучение определенного цвета. Если же зазор отсутствует, то никакой интерференции не происходит. Варьируя величину зазора, можно получить три основных цвета: при наибольшей толщине воздушной прослойки - красный, при средней - зеленый и при наименьшей - синий. Размеры одного интерференционного модулятора составляют всего десятки микрон. Один пиксел в дисплее на основе iMoD Matrix состоит из трех субпикселов - красного, зеленого и синего, каждый из которых образован несколькими рядами модуляторов. При этом управляющие схемы располагаются по краям дисплея.

В числе достоинств предлагаемого решения, помимо хорошего качества изображения, специалисты отмечают и очень малый уровень энергопотребления, что в случае коммерческой реализации технологии может сделать ее оптимальным выбором для разнообразных мобильных устройств. Хотя вопрос об объемах производства еще обсуждается, PVI уже разослала выпущенные прототипы будущих устройств компаниям-партнерам, работающим в сфере мобильных телефонов, смартфонов и портативных компьютеров. Чем быстрее технология будет принята для маленьких и средних экранов, тем скорее она может появиться и в более крупных устройствах, таких, как телевизионные панели.

## **8 MEMS - источники питания для портативных устройств**

Одно из новых и перспективных направлений - использование MEMS для создания топливных элементов и генераторов питания, которые предназначены для портативных электронных приборов будущих поколений (CD-проигрыватели, цифровые камеры, персональные цифровые секретари). Достаточно сказать, что по этой теме на конференции IEEE в феврале прошлого года было представлено более 200 докладов.

Корпорация Toshiba выпускает топливный элемент с прямым использованием метанола на базе MEMS емкостью 140 см<sup>3</sup>, с выходной мощностью 1 Вт, рассчитанный на 20 ч работы. Микронасос был разработан для подкачки газов и жидкостей и для поддержания потребляемой мощности и размеров в приемлемых пределах. В конструкции используется полимерный мембранный электролитический узел с катодом и анодом для выполнения функций топливного элемента. Каждый электрод имеет каталитический и газодиффузионный слой. Размеры устройства примерно соответствуют габаритам обычного сотового телефона.

Большой интерес вызвала совместная разработка мощного генератора питания усилиями разработчиков Технологических институтов штатов Массачусетс и Джорджия. Эта технология основана на микромеханической MEMS-структуре с использованием постоянного магнита. Генераторы представляют собой трехфазные, осевые, синхронные машины. При этом каждый из них состоит из многополюсного статора с поверхностной намоткой и ротора на базе постоянного магнита. Микромеханические витки с малыми зазорами между проводниками и с геометрией переменной ширины служат ключевыми элементами, обеспечивающими высокую плотность мощности. При скорости вращения 120 тысяч об./мин генератор продемонстрировал преобразование механической энергии в электрическую на уровне 2,6 Вт. Связанный с трансформатором и выпрямителем генератор обеспечивает на постоянном токе мощность 1,1 Вт на резистивной нагрузке.

Для случая активной машины с габаритными размерами 9,5 мм (внешний диаметр), 5,5 мм (внутренний диаметр), 2,3 мм (толщина) это соответствует мощности 10 МВт/м<sup>3</sup>. Разработчики полагают, что такого рода MEMS-генераторы могут обеспечить мощность от 10 до 100 Вт. Они также считают, что генерирование электрической мощности на данном уровне создает предпосылки для создания масштабируемых устройств с использованием постоянных магнитов для практических применений. Подобные электрические генераторы могут приводиться в действие различными первичными источниками, включая поток жидкости, сжатый газ или небольшие двигатели внутреннего сгорания, например, газовые турбины микронных размеров.

Разработчики из Массачусетского технологического института совместно с Линкольновской лабораторией создали электроквазистатический индукционный турбинный электрогенератор. При саморезонирующем возбуждении была достигнута выходная мощность 192 МВт. Генератор состоит из пяти кремниевых слоев, сплавленных при 700 град. Статор представляет собой структуру из оксидноплатинового электрода, сформированного на углубленном островке оксида, а ротор - это тонкая пленка из слаболегированного поликремния, расположенного также на островке оксида. Генерирование мощности ограничивается внутренними и внешними емкостями, поэтому для достижения более высоких уровней мощности необходимо моделирование.

Новый подход, предложенный сотрудниками Калифорнийского технологического института, заключается в использовании MEMS-матриц жидкостных роторных электретных генераторов питания. Эти устройства представляют собой конденсаторы статического заряда, покрытые тефлоном, с зазорами, заполненными воздухом и жидкими капельками, которые перемещаются при вибрации. При перемещении жидкости между зазорами на конденсаторе генерируется результирующее напряжение, в то время как

зеркальный заряд перераспределяется на электроде в соответствии с положением капелек.

MEMS также перспективны для выпуска инструментов в помощь созданию миниатюрных топливных элементов и каталитических химических микрореакторов. Один из инструментов представляет собой пассивный микрорегулятор для контроля потока газа в миниатюрных топливных элементах. Первая такая разработка выполнена совместно корпорацией Canon и Токийским университетом.

## **9 MEMS - матрицы**

Самый распространенный МЭМС-переключатель - двух- или трехмерная матрица (2D или 3D) мельчайших зеркал, отражающих падающее на них излучение оптоволокну входного порта в оптоволокну выходного порта. Нужно оптоволокну задается углом поворота зеркала, регулируемого актюатором. Для управления актюатором можно применять магнитный или электростатический принцип. Во втором случае угол поворота зеркала задается напряжением между электродом зеркала и электродом, расположенным на его основании. В 2D-матрице зеркала поворачиваются в одной плоскости, в более сложной 3D-матрице - в двух плоскостях (рис.4), т.е., по образному выражению аналитиков In-Stat, различие между этими двумя типами матриц то же, что между качелями и гироскопом. Но, несмотря на то, что по сравнению с 2D-матрицей в трехмерной аналогичной емкости используется меньшее число зеркал, изготовить ее сложнее, а для управления требуется более сложное программное обеспечение. Поэтому она дороже.

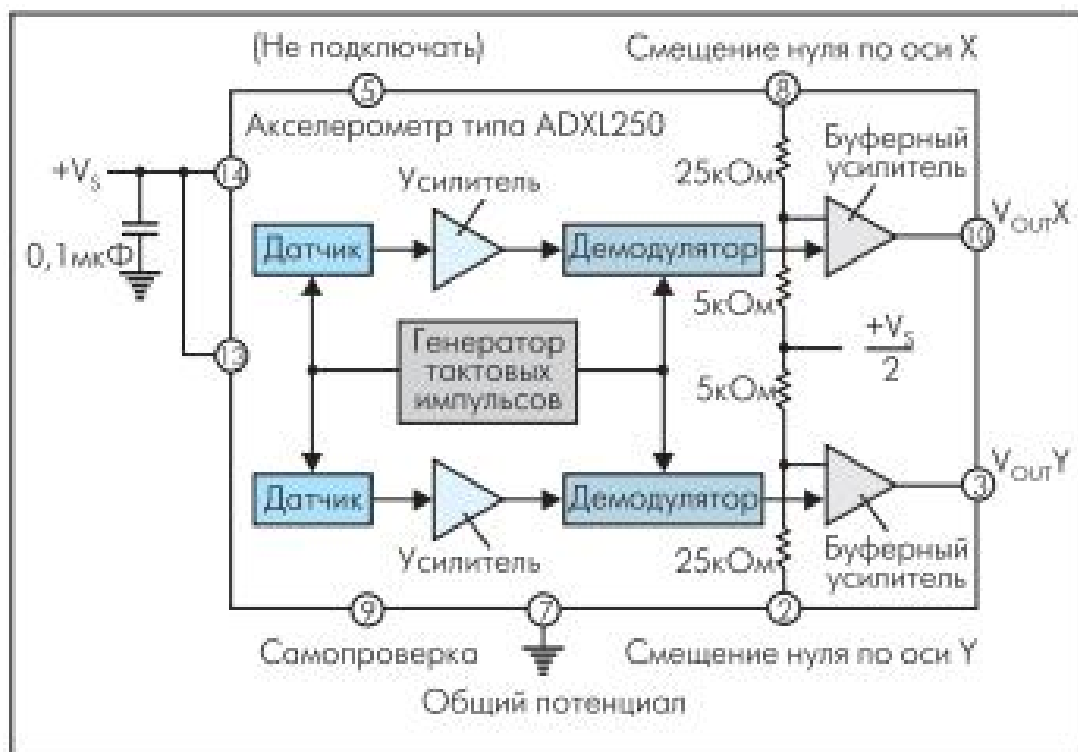


Рис.4. Блок-схема акселерометра типа ADXL250

На заре развития технологии оптических МЭМС-коммутационных матриц разработчики утверждали, что их изделия смогут обеспечить переключение нескольких тысяч каналов, и производители телекоммуникационного оборудования, стремясь первыми приобрести столь перспективные оптические устройства, вложили в их разработку немалые средства. Но затем стало ясно, что полностью оптическая сеть пока не выполнима. Это привело к созданию "гибридных" коммутаторов значительно меньшей емкости, чем утверждалось ранее. Сократилось и число фирм, занятых созданием оптических МЭМС-коммутаторов. Если на ранних этапах освоения технологии разработкой 3D-матричных устройств занимались около 10 фирм, то сегодня в этом секторе рынка остались только два крупных поставщика - Integrated Micromachines Inc. (IMMI) и Agere (бывшее отделение Microelectronics Group фирмы Lucent Technologies). Правда, работы в этой области продолжают более мелкие фирмы - Tellium, MEMX (группа, отделившаяся от Сандийской национальной лаборатории), C Speed

(численность занятых 54 человека). И президент компании IMMI Д. Миу прав, утверждая, что для 3D-систем существуют хорошие перспективы и они, конечно, будут востребованы, как только подтвердится надежность гибридных систем. Таков и прогноз фирмы Communications Industry Researchers, согласно которому до 2006 года самые большие доходы будут приносить 2D-переключатели, а самые высокие темпы прироста продаж будут иметь 3D-устройства.

Основной поставщик оптических 2D-коммутаторных матриц - компания OMM, выпускающая 4x4, 8x8, 16x16 и 32x32 модули для коммутаторов и мультиплексоров ввода-вывода (Optical Add-Drop Multiplexers - OADM). В конце 2001 года фирма выпустила 32x32 МЭМС-оптический модуль в специальном запатентованном фирмой корпусе. Он содержит четыре переключателя OMM 16x16 и рассчитан на работу в диапазоне длин волн 1290-1610 нм. Вносимые потери его не превышают 6 дБ, время переключения - 13 мс, потребляемая мощность - 500 мВт. Напряжение питания - 5 В. По оценкам разработчиков, применение такого полностью оптического переключателя позволяет снизить стоимость системы коммутации более чем на 70%.

Новейшие разработки OMM - OMM2x16 оптический дву-направленный модуль, переключающий любое из двух входных опто-волокон на любое из 16 выходных, и OADM модуль OADS-8. Они также работают в диапазоне длин волн 1290-1610 нм. Модули, монтируемые в корпус размером 91x81x7,6 мм, предназначены для замены используемых в современном оборудовании оптомеханических коммутаторов. На создание семейства МЭМС-переключателей фирма получила от инвесторов более 150 млн. долл. Один из крупнейших инвесторов - компания Siemens Information and Communication Networks (США) намерена использовать переключатели OMM в кросс-коммутаторах протяженной оптической сети.

Но и разработчики 3D-матричных элементов не складывают оружие. В марте Agere и IMMI объявили о создании новых 3D-коммутаторов. Agere

приступила к типовым испытаниям модуля S5200 с конфигурацией 64x64 и 32x32 портов и встроенными электронными схемами управления. Габариты переключателя - 23x25x10 см. Его 3D-архитектура разработана специалистами Bell Labs. Начало массового производства планируется на лето 2002 года. Переключатель предназначен для оптических OADM-систем.

Оптический кросс-коммутатор IMX-80 фирмы IMMI на базе 3D МЭМС-матрицы достаточно легко объединяется с существующими электронными коммутаторами, что облегчает создание "гибридного" сетевого элемента. Это позволит операторам использовать оптический блок для быстрого назначения тракта передачи основной сети, не "поступаясь" дорогостоящим ОС-192 трансивером. Главное достоинство коммутаторов семейства IMX (ведется разработка новых его изделий, в частности IMX-40 и IMX-256) - низкие вносимые потери, равные 1,7 дБ при числе портов 256. МЭМС-зеркала управляются тремя широкополосными контурами обратной связи на базе ASIC, объединяющими оптические датчики и датчики положения зеркал и обеспечивающими время переключения менее 10 мс.

Но 2D- и 3D-матричные устройства не единственные типы МЭМС-переключателей, используемых в оптических коммутаторах. Фирма Network Photonics в начале года сообщила о выпуске оптических подсистем CrossWave 1200 и CrossWave 2200, выполненных на базе разработанной ее специалистами одномерной линейки МЭМС-зеркал и фильтра типов волн по их длине на решетке. Применение линейной матрицы позволило отказаться от сложных сервосистем управления в 2D- и 3D-матрицах. Тем самым им удалось существенно снизить габариты, стоимость и потребляемую мощность коммутатора, улучшив его надежность и оптические характеристики. Подсистемы CrossWave - четырехпортовые (с конфигурацией 2x2) OADM-модули, оперирующие с сигналами на 96 различных длинах волн и обеспечивающие кросс-коммутацию по 192x192 длинам волн. Рассчитаны они на применение в DWDM-системах. Потребляемая ими мощность 8 Вт.

Интересен оптический переключатель без МЭМС-зеркал фирмы Agilent, в котором использован актюатор, подобный устройствам, применяемым в системах впрыскивания краски принтеров материнской фирмы Hewlett-Packard. Переключатель представляет собой пленарную схему пересекающихся световодов на основе двуокиси кремния. В каждом пересечении вытравлено углубление, заполняемое жидкостью с тем же коэффициентом пропускания на длинах волн 1300 и 1550 нм, что и у материала световода. Для изменения направления распространения света в нужное пересечение подается напряжение. Это вызывает нагрев жидкости и образование пузырька, отражающего излучение в требуемый канал. По утверждению разработчиков, на основе этого переключателя можно легко реализовать NxN кросс-коммутаторы с низкими потерями ( в среднем 5 дБ). Время переключения - менее 10 мс. Достоинство переключателя - отсутствие регулируемых зеркал, систем управления и высоких требований к защите от загрязнений. В мае 2000 года Agilent заключила договор с компанией STMicroelectronics на производство "пузырьковых" МЭМС-переключателей с 32x32 портами. Габариты переключателя - 16,5x30,4x4,8 см, напряжение питания  $5\pm 5\%$  В и  $15\pm 10\%$  В (при максимальном токе 6 и 1 А, соответственно). Интерес к этому переключателю проявила и фирма Alcatel, но о других приверженцах пузырьковой технологии пока неизвестно. Большинство потенциальных потребителей отдадут предпочтение технологии матриц МЭМС-зеркал. Что же, проживем, увидим, кто выиграет.

МЭМС находят применение не только в переключателях - все большее внимание разработчиков оптической сетевой инфраструктуры привлекают МЭМС регулируемых оптических аттенюаторов, перестраиваемых фильтров и лазеров. Именно на такое применение рассчитан МЭМС-линейный микродвигатель фирмы Agilent. Двигатель не вращается, а перемещается в одной плоскости (вперед-назад, влево-вправо) на расстояние до 50 мкм шагами в 1,5 нм за 2,5 мс.

Для DWDM-систем предназначен и перестраиваемый поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором фирмы Nortel Networks. Полусимметричный МЭМС-резонатор обеспечивает непрерывную перестройку по длинам волн. Лазер смонтирован в корпусе с широкополосным фиксатором частоты для ее стабилизации на протяжении жизненного цикла и с прецизионным термистором с отрицательным температурным коэффициентом для контроля рабочей температуры. Минимальная выходная мощность лазера равна 20 мВт, стабильность - 0,3 дБ, потребляемая мощность 7 Вт. Скорость перестройки излучения по длинам волн в зависимости от применения не превышает 10 мс при точности  $\pm 3$  ГГц. Разнос каналов - от 25 до 200 ГГц.

Фирма Solus Micro Technologies в стремлении создать "послушные" оптические МЭМС (compliant MEMS - CMEMS) обратилась к полимерному материалу, а не кремнию. Специалисты объясняют свой выбор чрезвычайно низким выходом годных при производстве кремниевых МЭМС (около 2%). К тому же, кремний легко раскалывается при изгибе или растяжении. В качестве исходного материала был выбран эластомер на основе кремния, характеризующийся отличными механическими и химическими свойствами, а также высокой термостабильностью и благодаря этому выдерживающий чрезвычайно большие механические и термические нагрузки. А поскольку жесткость этих материалов на шесть порядков меньше, чем у кремния, структуры на них могут иметь большую толщину. Отклонение этих материалов под воздействием приложенного напряжения также значительно больше, чем у элементов кремниевых МЭМС. И наконец, в отличие от кремниевых устройств, основной метод изготовления которых - химическое осаждение из газовой фазы, эластомерные структуры можно формировать более дешевым методом центрифугирования.

Специалистами фирмы изготовлен перестраиваемый интерференционный CMEMS-фильтр Фабри-Перо, который отличается высокой точностью настройки (характеризующей ширину фильтруемой

спектральной линии) при шаге настройки 50 и 25 ГГц, возможностью прецизионного измерения оптической мощности и отношения сигнал-шум. Вносимые потери фильтра не превышают 2,5 дБ. Фильтр образован тремя соединенными вместе кремниевыми пластинами. На внутреннюю поверхность первой нанесен диэлектрический слой с высокой отражательной способностью, на внешнюю - высокоэффективное антиотражающее покрытие. Эта пластина выполняет функцию фиксированного зеркала. Вторая пластина с диэлектрическим слоем с высоким коэффициентом отражения крепится с помощью эластомера к периметру рамы и представляет собой подвижное зеркало. На третью пластину нанесены электроды, положение которых соответствует расположению электродов на эластомерном слое. Напряжение, приложенное между второй и третьей пластинами, управляет зазором между первыми двумя. CMEMS-фильтр предназначен для контроля функционирования различных DWDM-систем (убыток провайдера при нарушениях в их работе может достигать 10 тыс. долл./час на канал), работающих в С- и Р-диапазонах (1500 и 1630 нм). Время перехода с одного канала на другой занимает несколько миллисекунд. Время жизни фильтра, по оценкам разработчиков, превысит 10 лет.

## **10 Датчики на основе МЭМС**

Сегодня по-прежнему наиболее популярны разнообразные МЭМС-датчики. Практически каждая новая модель американского автомобиля оснащена МЭМС-элементами - от датчиков давления в трубопроводе двигателя до датчиков ускорения (МЭМС-акселерометры), используемых в активных системах подвески, автоматических дверных замках, противоугонных системах, системах воздушных подушек. Акселерометры начинают находить применение и в сейсмических системах записи, мониторах станков и механизмов, диагностических системах, т.е. там, где необходимо измерять ускорение, удар или вибрацию. Первые выпущенные

на рынок в 1993 году акселерометры типа ADXL50, занимающие совместно со схемой формирования сигнала площадь кристалла в 5 мм<sup>2</sup>, были разработаны фирмой Analog Devices в 1991-м. Цена акселерометра составляла 12 долл. против 200 долл. для применявшихся тогда датчиков на базе подшипников и трубок из нержавеющей стали. Благодаря появлению дешевых датчиков ускорения стоимость системы управления воздушной подушкой сегодня равна -30 долл. Сейчас фирма ежегодно продает около 50 млн. МЭМС. Причем на долю акселерометров приходится почти 50% общего дохода от их продаж.

Датчики изготавливаются методом поверхностной обработки, предусматривающей осаждение тонких пьезорезистивных пленок на подложку с последующим вытравливанием требуемого рисунка подвижной диафрагмы (зазор между диафрагмой и поверхностью пластины и, следовательно, емкость образуемого ими конденсатора, зависит от значения ускорения). Таким образом, для изготовления МЭМС-акселерометров применяются те же процессы, что и в полупроводниковой технологии. Достоинства таких приборов, в отличие от устройств, формируемых методом объемной обработки, предусматривающей вытравливание подвижной диафрагмы в достаточно толстой пластине, - гибкость конструкции, возможность построения датчика ускорения по трем осям (объемная обработка допускает создание лишь двухосевого датчика) и формирования схемы считывания на одном с ним кристалле. Последнее обстоятельство нашло отражение и в названии технологии фирмы - integrated MEMS, или iMEMS.

В сентябре 1996 года Analog Devices выпустила третье поколение акселерометров - ADXL150/ADXL250, на одном кристалле с которыми размещены схемы-формирования сигнала, генератор тактовых импульсов, демодулятор и таймер (рис.4). ADXL150 измеряет ускорение по одной оси, ADXL250 - по двум взаимно перпендикулярным осям в плоскости кристалла. Эти датчики характеризуются низким уровнем шумов (плотность шума 1

mg/Hz<sup>1/2</sup>), широким динамическим диапазоном (80 дБ), малой потребляемой мощностью (1,8 мА/ось, напряжение питания 4 В) и низким дрейфом при нулевом ускорении (0,4 д) в промышленном диапазоне температур (-40...+85°C). Разрешение их в диапазоне измерений  $\pm 50$  g составляет 10 mg. Единственный внешний прибор, необходимый для нормальной работы акселерометра, - развязывающий конденсатор источника питания. Поставляются датчики в 14-выводном керамическом монтируемом на поверхность корпусе. Стоимость при закупке OEM-партий - 10 долл.

Следует отметить, что поскольку масса и размеры поверхностно обработанной структуры малы, схема считывания должна регистрировать чрезвычайно незначительные изменения емкости. Так что точность измерений ограничена разрешением схемы считывания. Поэтому следующим этапом развития технологии МЭМС-акселерометров стало появление датчиков серии ADXL202 с плотностью шумов 200 mg/Hz<sup>1/2</sup> и разрешением не хуже 2 mg в диапазоне 60 Гц (для последнего датчика серии - ADXL202E). При этом датчик измеряет ускорение в динамическом (вибрации) и статическом (непосредственно ускорение) режимах. Предусмотрен интерфейс с микропроцессором или микроконтроллером (рис.5). Ускорение измеряется по коэффициенту заполнения (отношению ширины импульса к его периоду) выходного сигнала датчика (аналогового или цифрового), т.е. на выходе имеем ШИМ-сигнал. Этот сигнал непосредственно регистрируется счетчиком процессора, т.е. АЦП или какие-либо дополнительные логические устройства не нужны. С помощью резистора  $R_{уст}$  можно регулировать период сигнала в пределах 0,5-10 мкс. Напряжение питания акселерометра ADXL202E - 5 В, ток - менее 0,6 мА, ширина полосы аналогового сигнала - 50 Гц, тактовая частота микроконтроллера - 1 МГц, дрейф при нулевом ускорении в диапазоне температур 0-50°C - 0,05 д. Поставляется он в 8-выводном LCC-корпусе размером 5x5x2 мм. ADXL202E находит применение не только в системах управления воздушными подушками, но и в оборудовании обнаружения перемещений и сигнализации, драйверах

дисковых накопителей, для измерения углов наклона (с точностью лучше 1,12°). Рассматривается возможность применения МЭМС акселерометров в системах управления воздушными подушками для защиты от боковых ударов. Совершенствование этих датчиков позволит создать устройства, способные устанавливать размер и вес пассажира и рассчитывать оптимальную реакцию системы с тем, чтобы снизить риск нанесения увечья при раскрытии подушки.

Другой крупный производитель МЭМС - фирма Motorola - отдала предпочтение датчикам давления, изготавливаемым методом объемной обработки. С 1980 года фирмой отгружено свыше 350 млн. МЭМС-датчиков давлений для автомобильной и медицинской отраслей промышленности. В начале 90-х годов были усовершенствованы конструкция самого датчика и биполярной схемы формирования сигнала, изготавливаемых на одном кристалле. Это позволило уменьшить размеры ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ к давлению пьезорезистивной диафрагмы, а также общую площадь датчика (на 30% - с 3,05x3,05 мм до 2,67x2,76 мм), улучшить чувствительность преобразователя и повысить его робостность. Так, диафрагма датчиков серии MPX5100, рассчитанных на измерение дифференциального давления в пределах до 100 кПа, выдерживает импульс давления до 1000 кПа. Среднее значение выходного напряжения составляет 4,7 В, в отсутствие давления - 0,2 В, точность измерения +1,5% в температурном диапазоне 0-85°C.

Одним из перспективных направлений развития своей технологии фирма считает создание датчиков давления шин автомобилей, поскольку, согласно принятому Конгрессом США закону, с 2004 года все новые американские модели автомобилей должны быть оснащены устройствами дистанционного измерения давления шин.

Число фирм, выпускающих разнообразные датчики, непрерывно растет. Среди последних разработок уместно отметить 64-позиционный сверхминиатюрный кодировщик углового положения на элементах Холла типа AS5020 фирмы Austria Micro Systems (Австрия) (рис. 5).

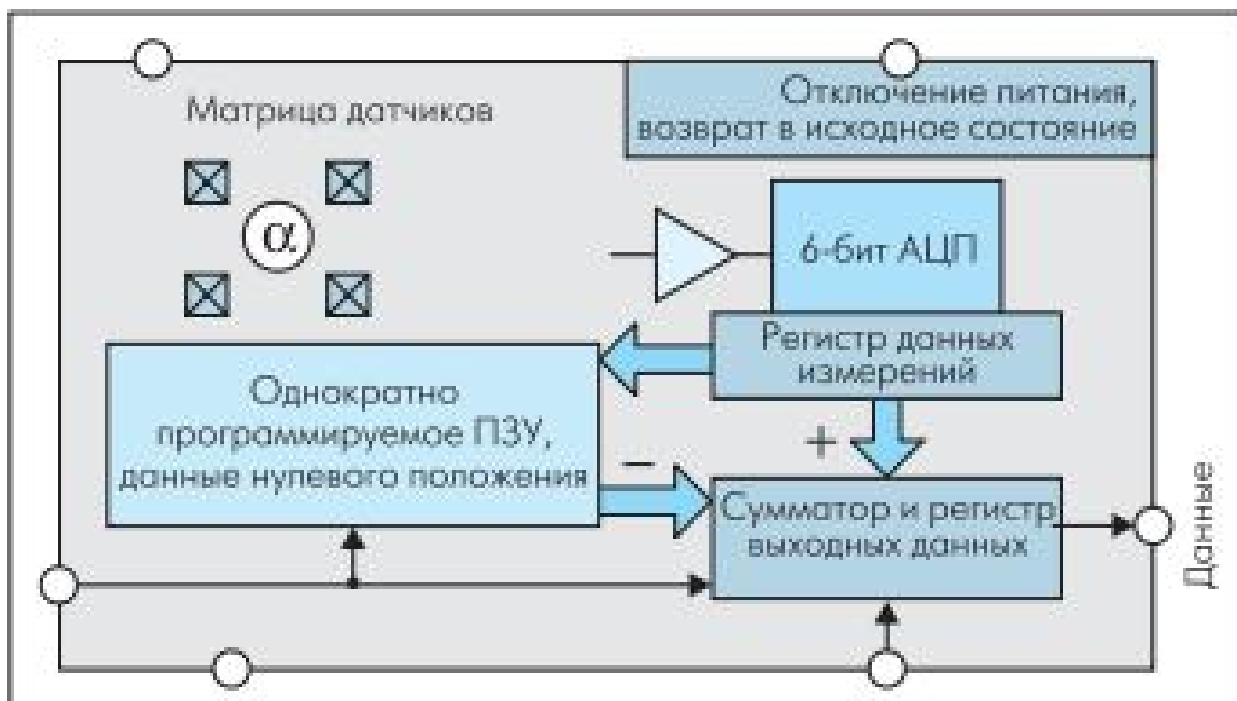


Рис.6. Блок-схема кодировщика углового положения типа AS5020.

На кристалле совместно со специализированной КМОП-схемой (ASIC) размещены матрица датчиков на элементах Холла, АЦП, два регистра, однократно программируемое ПЗУ и трехпроводная синхронная последовательная шина (рис.3). Схема располагается над или под двухполюсным постоянным магнитом (обычно диаметром 3-6 мм и высотой 2-3 мм, напряженность магнитного поля  $\pm 40$  мТ) и кодирует его абсолютное угловое положение при вращении (скорость до 30 тыс. об/мин). Единственные внешние устройства, необходимые для измерения углового положения, - магнит и развязывающий конденсатор. Схема датчика совместима с любой микроконтроллерной системой, причем число датчиков, подключаемых к микроконтроллеру, не ограничено. Точность измерения положения составляет  $1,5^\circ$ . Напряжение питания датчика 4,5-5,5 В, потребляемый ток 17 мА. Монтируется он в корпус типа SOIC-8 размером 4,93x3,94x1,48 мм. Предназначен датчик для замены механических поворотных переключателей и потенциометров в системах, работающих в агрессивной среде. Он может найти применение и в устройствах управления

и остановки двигателей, в джойстиках, робототехнических системах, программируемых выключателях домашнего электронного оборудования.

Для регистрации сейсмической активности при газовых и нефтяных разработках предназначен сверхпрочный малощумящий сервоакселерометр типа SF1500-UNLD фирмы Applied MEMS (США). Трехвыходной емкостный МЭМС-датчик с четырехслойной структурой изготовлен методом объемной обработки. Его размер - 6,5x5,5x2 мм. Динамический диапазон этого 24-разрядного дельта-сигма датчика превышает 115 дБ, искажение сигнала во всем диапазоне измерений не превышает 10-4%. Плотность шума его необычайно низка - 100 ng/Hz<sup>1/2</sup>. Потребляемая мощность - менее 200 мВт. Монтируется датчик в заказной керамический корпус. Для управления его работой разработана ASIC, содержащая более 30 тыс. КМОП-транзисторов и монтируемая в 44-выводной керамический корпус. Схема работает в режиме мультиплексной передачи с временным разделением каналов. К 2001 году фирма поставила более 10 тыс. таких датчиков.

Фирма TNO TPD (Нидерланды) создала термодинамический измеритель направления и скорости потока газов и жидкостей, реализовав с помощью МЭМС-технологии на одном кристалле множество нагревателей и датчиков температуры. Скорость потока определяется путем "введения" в контролируемый поток вещества с известной тепловой энергией и последующего измерения поверхностной температуры потока, зависящей от его скорости, - чем скорость выше, тем меньше поглощение тепловой энергии. Направление потока определяется по распределению поверхностной температуры. Датчик измеряет скорость потока в пределах от 0 до 100 миль/с (в среднем от 0 до 25 миль/с) при частоте изменения скорости 80 Гц, что позволяет использовать его для определения скорости пульсирующих или вибрирующих потоков. Благодаря малым размерам датчик может монтироваться на стенке трубопровода компрессоров, насосов и турбин. Он перспективен для применения в оборудовании пищевой и фармацевтической промышленности.

Множество привлекательных МЭМС-устройств было представлено на выставке Sensors Expo 2002 года. Не простая задача, например, увидеть Интернет-страницу на экране 3G сотового телефона (5х5 см). Но она легко решается с помощью МЭМС-датчика фирмы Memsic, позволяющего воспроизводить левую сторону страницы при наклоне трубки влево и правую сторону - при наклоне вправо, и даже увеличивать изображение, приближая трубку к лицу. Для определения угла наклона и ускорения в датчике используется нагреваемый пузырек газа и преобразователи температуры. Изготавливается он по стандартной КМОП-технологии, за исключением элементов преобразователей, требующих специальных этапов обработки. Разрешение датчика 1 mg в диапазоне измерений 10 д. Стоит он 3 долл. при закупке больших партий. А МЭМС-преобразователь све-та-в-напряжение или света-в-частоту фирмы Optical Solutions уже используется для проверки евро-банкнот на подделку.

Конечно, МЭМС-датчики находят самое разнообразное применение, но для успешного развития МЭМС-технологии нужны новые "продвинутые" области применения, и ими могут стать оптические и беспроводные средства связи

## **11 Датчики для измерения параметров движения на основе MEMS-технологии**

Рассмотрим датчики и инерциальные измерительные модули, уже доступные российским разработчикам. Причем основное внимание уделим моделям с высокими точностными характеристиками и хорошей стабильностью показаний. Продукция Silicon Sensing Systems

Гироскопы компании Silicon Sensing в качестве чувствительного элемента используют вибрирующее кремниевое кольцо. Одноосевой гироскоп CRG20 выполнен в виде микросхемы в корпусе LCC с 36 выводами. Гироскоп имеет как аналоговый (ратиометрический), так и

цифровой (SPI) выходы для измеренной угловой скорости и выпускается в модификациях с различными пределами измерения угловой скорости.

### Гироскопы Sensoror Technologies AS

В основе чувствительных элементов гироскопов компании Sensoror Technologies AS лежит измерение параметров движения асимметричной инерциальной массы (двух миниатюрных кремниевых пластин по форме похожих на кремниевых пластин – крылья бабочки), на которой принудительно поддерживается вибрация. Весьма интересны для отечественных разработчиков две новые модели гироскопов производства норвежской компании Sensoror Technologies AS — SAR100 и SAR150. Различные по точностным характеристикам и по цене, эти модели выполнены в одинаковых герметичных керамических корпусах оригинальной конструкции. Корпус этих датчиков может паяться на плату как параллельно ее плоскости, так и перпендикулярно, что позволяет на миниатюрной печатной плате собрать двух- и трехосевую гироскопические системы. Выход микросхем SAR100 и SAR150 — SPI, 12 разрядов .

В середине 2010 года компания Silicon Sensing Systems начала производство новой модели гироскопов, ориентированных на массовый рынок, предлагая, с одной стороны, не- дорогое устройство, а с другой, – достаточно стабильный в реальных условиях эксплуатации гироскоп. Этот прибор PinPoint производится в двух модификациях – CRM100 и CRM200 – с абсолютно одинаковыми характеристиками , но разными способами монтажа на печатную плату. Корпус модели CRM100 предназначен для пайки параллельно плоскости печатной платы, а модель CRM200 паяется перпендикулярно плоскости платы. Это сделано для того, чтобы комбинируя гироскопы CRM100 и CRM200 на одной печатной плате, можно было разрабатывать двух- и трехосевые гироскопические измерительные модули с очень малыми габаритами. У гироскопов PinPoint можно использовать либо аналоговый выход, либо цифровой (задается программно). Также сам пользователь может устанавливать предел измерения угло- вой скорости и

ширину полосы пропускания. Доступные пределы измерения:  $\pm 75$  ,  $\pm 150$ ,  $\pm 300$  и  $\pm 900$  °/с.

Компания Silicon Sensing Systems производит малыми партиями ознакомительные платы с установленными гироскопами CRM100 и CRM200 и всеми необходимыми для их работы дополнительными компонентами как в одноосевом, так и в трехосевом исполнении. Чертежи этих печатных плат и примеры программ обращения к гироскопам подробно представлены на сайте поддержки фирмы-производителя, что является хорошим подспорьем разработчикам. По отзывам тех, кто уже протестировал образцы CRM100 и CRM200, у этих приборов чувствительность лучше, чем у CRG20, но лучше, чем у CRG20, но лучше, чем у CRG20, но несколько больший временной уход.

Акселерометры Colibrys Швейцарская компания Colibrys — известный в мире производитель высокоточных MEMS-акселерометров для применения в сейсмических измерениях, для измерения параметров буровых скважин в нефтегазовой промышленности, для авиационных, космических и военных изделий. Компания производит как акселерометры общего назначения, так и модели, устойчивые к сильным ударам (серия HS). Кроме акселерометров для измерения линейного ускорения Colibrys изготавливает на их основе датчики вибрации, наклона и сейсмические акселерометры. Все приборы Colibrys представляют собой законченное устройство с емкостным чувствительным элементом (две емкости, включенные по полумостовой схеме с общей средней обкладкой). При возникновении ускорения вдоль оси, перпендикулярной обкладкам, средняя обкладка отклоняется в сторону, противоположную движению, в результате чего емкость одного из конденсаторов системы увеличивается, а другого — уменьшается. В конструкцию датчика, кроме первичного чувствительного элемента, входит также чип для сигнальной обработки и датчик температуры для внешней температурной стабилизации. Все приборы Colibrys имеют аналоговый выход (напряжение выходного сигнала линейно зависит от величины

ускорения). На основе той же технологии Colibrys производит датчики наклона, которые с высокой точностью измеряют в статике угол наклона относительно местной вертикали. Это модели MS9001 D (диапазон измерения  $\pm 1g$ , угол  $\pm 30^\circ$  с точностью  $0,003^\circ$ ) и MS900.5.D (диапазон  $0,5g$ , угол измерения  $\pm 15^\circ$  с точностью  $0,0015^\circ$ ). Навигационные системы на основе датчиков средней точности. Описанные датчики средней степени точности широко используются во всем мире. Надежность этих приборов и стабильная работа в реальных условиях позволяют их применять в жизненно важных узлах автомобилей, отвечающих за безопасность или жизнь людей. В авиационных моделях инерциальные датчики позволяют сглаживать ошибки пилотов и сохраняют модели стоимостью в несколько тысяч евро.

## **12 Современный рынок MEMS**

Рынок микроэлектромеханических (MEMS) систем является наиболее быстро растущей частью полупроводниковой отрасли, утверждают эксперты агентства IC Insights. Движимый MEMS-технологиями, сектор оптоэлектроники, сенсоров и дискретных компонентов (O-S-D) по темпам роста заметно опередит своего старшего брата и соратника по полупроводниковой отрасли – сектор интегральных схем (IC). Среднегодовой рост сектора в течение ближайших пяти лет составит 15%. К 2012 году рынок O-S-D достигнет отметки 66,3 миллиарда долларов США, что составит 15% от всего рынка полупроводников.

По оценкам Промышленной группы МЭМС (MEMS Industrial Group - MIG), мировые продажи МЭМС за период 2010-2012 годы возрастут с 2-5 млрд. до 8-15 млрд. долл. Прогноз европейской организации изучения рынка многофункциональных МЭМС-систем -Network of Excellence in Multifunctional Microsystems (NEXUS)" более оптимистичен - с 30 млрд. в 2010-м до 68 млрд. в 2012 году. Это объясняется тем, что оценка MIG проводится на уровне элемента, а NEXUS - на системном уровне. Если же

учесть, что на долю собственно МЭМС приходится -1-10% стоимости системы, в которой они использованы, оценки оказываются сопоставимыми. Правда, пока МЭМС по темпам развития существенно отстают от изделий микроэлектроники. Так, фирма Texas Instruments лишь в 2000 году начала получать прибыль от продажи разработанных в 1996 году МЭМС цифровой обработки светового излучения (Digital Light Processing -DLP), достаточно широко используемых в современных проекционных системах. А фирме Analog Devices потребовалось девять лет, чтобы окупить затраты на разработку и производство МЭМС-акселе-рометра, которым оснащены большинство выпускаемых в США систем управления подушкой безопасности новых моделей автомобилей. Аналогичная ситуация была характерна для полупроводниковой промышленности 20 лет назад, а сейчас новые изделия окупаются за полтора-два года. По-видимому, и дальнейшее развитие МЭМС будет значительно более быстрым (рис. 6).

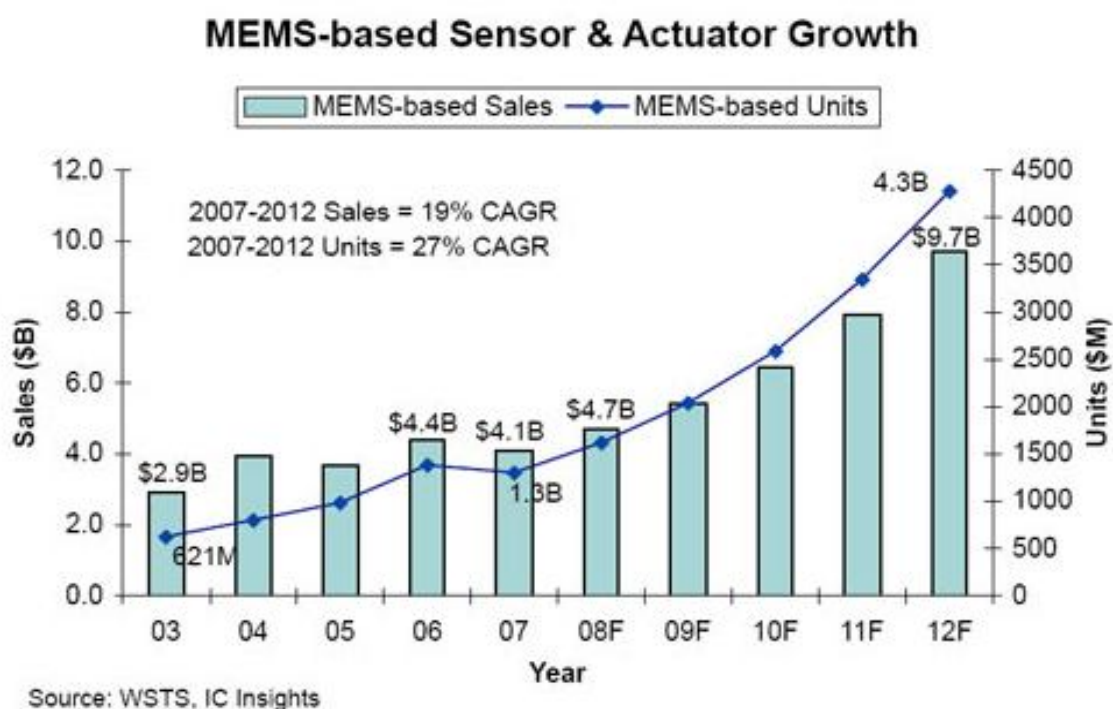


Рис. 6 Динамика роста рынка МЭМС-устройств

О справедливости этого утверждения свидетельствует рост объема инвестиций в отрасль, которая до недавнего времени существовала в основном на средства, выделяемые государством (в 1991 году они составили

3 млн. долл., в 1995-м - около 35 млн., из которых почти 30 млн. долл. отчислило DARPA) и высшими учебными заведениями. По данным IntelliSense (с 2000 года производственное и программное МЭМС-подразделение компании Corning), еще три года назад практически никаких инвестиций венчурного капитала в эту отрасль не производилось. В 2000 году компании, разрабатывающие МЭМС-устройства, получили инвестиции в размере -500 млн. долл. В первое полугодие 2001 года, по данным прогностического отделения In-Stat Group издательства Cahners, объем венчурного капитала, вложенного в развитие МЭМС, уже превысил эту сумму. Появление инвесторов, требующих быстрой окупаемости вложенных денежных средств, приводит к интенсификации работ в области МЭМС. И в результате с 2000 года на рынке МЭМС-изделий появилось около 300 новых фирм. Эта технология привлекает внимание и крупнейших полупроводниковых производителей - Analog Devices, Texas Instruments, Intel, Motorola, Lucent Technologies. Уровень занятости в этой отрасли американской промышленности в 2001 году увеличился по сравнению с 1985 годом в 30 раз. Если в 1999 году представители МЭМС-промышленности могли назвать лишь двух крупнейших "чистых" производителей (foundries) - Cronos Integrated Microsystems и IntelliSense, то сегодня число независимых производителей МЭМС растет. Это - Standard MEMS (поверхностная обработка), Applied MEMS (объемная обработка), тайваньская Walsin Lihwa (ВЧ МЭМС для систем связи).

Но для быстрого продвижения МЭМС-устройств на рынок существует еще немало препятствий. Прежде всего - это проблемы, связанные с освоением их массового производства. Современные МЭМС - сформированные на одной подложке датчики, актюаторы (исполнительные механизмы), устройства управления с размерами элементов до нескольких единиц микрон и менее, - как правило, имеют трехмерную структуру. И хотя большей частью они изготавливаются по полупроводниковой технологии, для их производства зачастую необходимо совершенно новое

промышленное, контрольно-измерительное оборудование и методы корпусирования. При этом следует учесть, что на долю исходного материала приходится лишь незначительная часть всей стоимости МЭМС-элемента, тогда как на корпусирование и тестирование - до 90-60% их стоимости. При этом в производство МЭМС вовлечено множество поставщиков различных материалов и оборудования, требуемых для создания разнообразных устройств.

В соответствии с недавним прогнозом, производство микроэлектромеханических (MEMS) сенсоров и актуаторов (сенсоры со встроенным исполнительным механизмом, активные сенсоры) будет ежегодно прирастать, в среднем, на 27% годовых и достигнет к 2012 году уровня в 4,3 миллиарда устройств. В денежном выражении рост будет немного спокойнее – "всего" 19% годовых, при том, что за последние пять лет он прирастал в среднем на 9%. По подсчетам специалистов агентства, объем рынка MEMS-сенсоров и актуаторов к 2012 году достигнет отметки 9,7 миллиарда долларов США. Рынок сенсоров и актуаторов всех технологий (главными представителями "не MEMS"-сектора являются сенсоры магнитного поля, не нуждающиеся в механических частях) достигнет к тому же времени 11,9 миллиарда долларов США.

### **13 МЭМС технологии в России**

Уникальность МЭМС-устройств заключается в том, что они способны не просто улучшать технические характеристики электронных изделий, но и «оживлять» их, делать восприимчивыми к происходящему. Благодаря новейшим разработкам сейчас становятся реальными казавшиеся ранее невозможными функции техники. Теперь она «воспринимает» звуковую информацию, «читает» тексты, а встроенные в нее микродатчики позволяют принимать сигналы человеческого мозга, реагировать на движения, распознавать лица, предметы и многое другое. Кроме того, потребность в

развитии МЭМС-технологий обуславливается их широкой областью применения, сочетанием высокой надежности и приемлемой стоимости, а также чрезвычайно маленьким размером, который позволяет использовать их в различных миниатюрных устройствах: от механических часов до имплантатов для человека.

Сейчас рынок МЭМС становится одним из наиболее быстрорастущих в электронной области, хотя его зарождение можно отнести еще к концу 80-х – началу 90-х годов прошлого века, когда благодаря тенденции к микроминиатюризации началась интеграция достижений в области электроники, механики, информатики и измерительной техники. В то время огромное число университетов и коммерческих компаний США и Японии сконцентрировало свои усилия на развитии МЭМС-технологий. Позже к ним активно подключились страны Европы и Юго-Восточной Азии.

В России же развитие данной области и в настоящее время находится на не достаточно высоком уровне. В 2008 году объем рынка электронных компонентов в нашей стране составил чуть более 1 млрд. долларов, причем на отечественные компоненты из них пришлось менее 20%. В свою очередь, в этом количестве доля МЭМС-изделий российского производства минимальна.

В связи с этой ситуацией Правительством РФ было поручено всем заинтересованным ведомствам обеспечить реализацию Программы развития nanoиндустрии Российской Федерации до 2015 года. К этому же времени планируется сформировать в нашей стране все необходимые условия для наращивания объемов производства новых видов продукции nanoиндустрии и выхода профильных российских компаний на мировой рынок высоких технологий.

В рамках этой программы в 2009 году группа российских предприятий начала совместную работу по созданию Ассоциации, которая спустя год была официально зарегистрирована как «Русская Ассоциация МЭМС» . Сейчас ее можно считать одним из основных связующих звеньев между

российскими специалистами-разработчиками МЭМС-технологий и их зарубежными коллегами. Под эгидой Ассоциации для обмена информацией, опытом и знаниями в сфере инновационных технологий объединены крупнейшие компании и предприятия нашей страны, связанные с разработкой и производством изделий на основе МЭМС-устройств, а также мировые корпорации, успешно развивающиеся в данной области.

Главной целью РАМЭМС на сегодняшний день является образование в России единого информационного поля по тематике МЭМС, которое могло бы обеспечить эффективный информационный обмен, как между внутренними, так и с внешними партнерами Ассоциации. Сейчас руководство Ассоциации ведет активную деятельность по привлечению к сотрудничеству российских специалистов и разработчиков в сфере микроэлектроники, в том числе из высших учебных заведений нашей страны. На данный момент установлено тесное взаимодействие с научными сотрудниками Санкт-Петербургского государственного политехнического университета и Московского государственного института электронной техники.

В конечном итоге все это должно способствовать увеличению объемов разработки и производства МЭМС в нашей стране, а также появлению на их основе новых изделий, предназначенных для конечного потребителя. Кроме того, налаживание контактов российских производителей МЭМС с иностранными партнерами позволит увеличить долю российской электроники, как на зарубежном, так и на российском рынке, что очень важно для выполнения поручений Правительства РФ в сфере импортозамещения.

Необходимость создания подобной ассоциации в России была подтверждена и итогами международной конференции «Современные тенденции и технологии производства МЭМС-устройств», которая состоялась в марте 2010 года в Москве. По ее результатам 84% присутствующих предприятий выразили заинтересованность в такой

организации. Это говорит о том, что в настоящее время у российских предприятий есть острая необходимость в доступе к достоверной информации о новых продуктах, технологиях производства, требованиях стандартизации и сертификации в сфере МЭМС. Они осознают, что, став участниками информационного обмена в Ассоциации, смогут найти себе новых российских и зарубежных партнеров, взглянуть на решение старых проблем по-новому, повысить уровень компетенции в производственно-технологических вопросах за счет участия в различных мероприятиях Ассоциации.

«Русская Ассоциация МЭМС» развивает свою деятельность сразу по нескольким направлениям. Занимается организацией специальных учебных программ по тематике МЭМС с привлечением зарубежных специалистов, готовит семинары и тренинги для персонала предприятий, организует стажировки по микроэлектронике на ведущих европейских предприятиях по производству микроэлектроники, а также оказывает содействие в разработке и реализации совместных проектов в сфере МЭМС.

Так у сотрудников российских предприятий появилась возможность в рамках Меморандума о сотрудничестве в сфере МЭМС-технологий, RFID-устройств и проектов по 3D-интеграции, подписанного с немецким научным сообществом Fraunhofer-Gesellschaft в лице Института Fraunhofer IZM (Мюнхен) проходить обучение в Германии по этим направлениям. Наши специалисты могут сотрудничать и реализовывать совместные проекты с любым из 56 институтов, входящих в состав сообщества. Подобное взаимодействие дает российским специалистам уникальную возможность прикоснуться к современным знаниям в области микроэлектроники и нанотехнологий мирового масштаба, использовать опыт зарубежных специалистов в своих разработках и, возможно, делать на их основе собственные открытия.

В 2010 году Ассоциация приняла участие в нескольких мероприятиях. Последнее из них – выставка «Датчики и измерения 2010» в Москве, которая

является специализированным мероприятием, посвященным различным датчикам, в том числе изготовленным на базе МЭМС. В ходе ее работы на стенде Ассоциации все желающие получили подробную информацию о принципах работы Ассоциации, смогли обсудить возможность сотрудничества с ней по тому или иному направлению и узнали, какие преимущества может получить предприятие от подобного взаимодействия. Участники выставки получили возможность начать переговоры о реализации совместных проектов в сфере МЭМС или подобрать для себя интересующую учебную программу по МЭМС.

Важным событием для Ассоциации станет и участие в крупнейшей международной выставке «Electronica-2010» (Мюнхен, Германия), которая соберет профессионалов и специалистов в области электроники со всего мира. Это эффективная площадка для налаживания деловых контактов с крупнейшими мировыми игроками в сфере микроэлектроники, что в настоящей момент является одной из приоритетных задач руководства «Русской Ассоциации МЭМС». Ведь увеличение числа партнеров, в том числе и зарубежных, позволит открыть новые горизонты для развития МЭМС-технологий в России.

В 2010 году Ассоциация уже заключила несколько важных соглашений по сотрудничеству в сфере МЭМС. Одним из наиболее значимых на данный момент является соглашение о сотрудничестве между Ассоциацией и крупнейшей в Европе торговой Ассоциацией предприятий полупроводниковой, электронной и микросистемной индустрии «Silicon Saxony e.V.» (Германия). Она была создана в 2000 году на базе предприятий, расположенных в «Немецкой силиконовой долине», также известной как федеральная земля «Саксония». Сегодня годовой оборот Silicon Saxony e.V. составляет 4 млрд. евро, и в ее состав входят уже 270 организаций, специализирующихся в сфере микроэлектроники.

Подписанное соглашение охватывает широкий круг вопросов и открывает большие возможности для динамичного российско-германского

сотрудничества в сфере микроэлектроники. На основе международной кооперации между Ассоциациями будут развиваться различные виды взаимодействия. Уже сейчас в качестве подтверждения их эффективности «Русская Ассоциация МЭМС» готова предложить российским предприятиям оптимальные решения в области микроэлектроники, а также новейшие технологии развития бизнеса, как в нашей стране, так и за ее пределами.

В настоящее время Ассоциация ведет переговоры о начале сотрудничества еще с рядом зарубежных организаций. Одной из целей переговоров является возможность установить партнерские взаимоотношения с ведущими мировыми разработчиками и производителями современных МЭМС-устройств (гироскопов, акселерометров, датчиков давления и т.д.) из США, Франции, Швейцарии, Бельгии, Германии и ряда других стран.

Ассоциация также прилагает усилия по поиску партнеров для совместной работы в России. Ведь взаимовыгодное сотрудничество ускорит распространение МЭМС-технологий и продуктов на их основе в нашей стране, а значит, в конечном итоге сделает жизнь россиян более удобной, безопасной, интересной и даст конечным потребителям такие новые возможности, о которых они раньше и не думали. Для России это способ приблизиться к современным мировым технологиям в области микроэлектроники, что будет способствовать выводу нашей страны на новый уровень инновационного прогресса.

Так при поддержке Ассоциации ведется разработка проекта о создании базовых технологий микромагнитомеханических актюаторов на основе наноструктурированных пленок для автомобильной и авиационной промышленности

Краткое описание представляемого проекта

Описание товара, технологии, продукта, услуги (далее - продукт)

Опытные образцы, программы, методики, акты и протоколы испытаний МЭМС актюаторов на основе наноструктурированных пленок

интерметаллидов с гигантской магнитострикцией и памятью формы, магнитно управляемых пульсирующих и синтетических газовых микроинжекторов и МММС-элементов систем контроля давления и расхода газоздушных смесей.

#### Описание рынка продукта

Тенденцией последних лет стало возрастающее внимание к использованию технологий МЭМС в автомобильной и авиационной промышленности. По экспертным оценкам автомобилестроению принадлежит свыше тридцати процентов потенциального рынка МЭМС. При этом основная масса разработок относится к созданию датчиков и сенсоров различного назначения. В то же время МЭМС технологии открывают разнообразные возможности создания микроактюаторов от микромоторов и активных элементов адаптивных микрозеркал и микроантенн до микроконвейеров и микророботов. МЭМС-актюаторы имеют широкие перспективы применений в автомобилестроении в исполнительных элементах различного назначения. Так в Японии и странах Евросоюза разрабатываются МЭМС-актюаторы для сканирующих антиколлизийных систем автомобилей. Особое место в области применений МЭМС отводится технологии МММС актюаторов для газовых микроклапанов и микроинжекторов. В рамках европейских научно-технических программ ведутся разработки микроинжекторов для управления воздушными потоками вблизи пограничного слоя крыльев и турбин летательных аппаратов.

#### На какой стадии находится проект в настоящее время

Были проведены численные расчёты процесса функционирования образцов. На основе расчётов были созданы первые образцы материалов для исследований. Были проведены первичные исследования.

#### Описание организации выполнения проекта и вывода продукта на рынок

После завершения исследований будут выпущены опытные образцы материалов. Далее будут проведены испытания на технологической базе

потенциального потребителя. Затем данная технология будет внедряться в технологический процесс конечного потребителя.

## Литература

1. Алексей Борзенко, Технология MEMS // BYTE / Россия. - 2006. - № 1. - С. 26-32.
2. MEMS компоненты, датчики движения, беспроводные применения, энергосбережение и технологические инновации — в фокусе выставки Sensors Expo&Conference 2008
3. [www.monufacturing.net](http://www.monufacturing.net)
4. Материалы фирм Analog Devices, Motorola, Austria Micro Systems, Applied MEMS и др.
5. Внедрение MEMS компонентов в навигационных системах. Tracking MEMS In Navigation Systems By Kathleen Kocks Avionics Magazine, January, 2006
6. Датчики для измерения параметров движения на основе MEMS-технологии. Часть 1. Инерциальные датчики средней точности. А. Тузов. //Электроника:наука, технология, бизнес. №1, 2011
7. Бёрд Киви; «Микроботы: технология будущего сегодня» ; Журнал «Компьютера» <http://www.computerra.ru/offline/2002/439/17343/>
8. [www.mems-russia.ru](http://www.mems-russia.ru)
9. [http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2008\\_3\\_44.php](http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2008_3_44.php)
10. <http://www.inno.ru/project/29323/>
11. <http://www.bytemag.ru/articles/detail.php?ID=6756>
12. [http://www.radioradar.net/articles/scientific\\_technical/mems.html](http://www.radioradar.net/articles/scientific_technical/mems.html)
13. <http://www.electronics.ru/issue/2002/4/2>
14. <http://www.sovtest.ru/ru/publication/%C2%ABrusskaya-assotsiatsiya-mems%C2%BB-shag-vpe>

15. [http://www.3dnews.ru/news/mems\\_tehnologii\\_glavnii\\_lokomotiv\\_rinka\\_sensorov/](http://www.3dnews.ru/news/mems_tehnologii_glavnii_lokomotiv_rinka_sensorov/)
16. <http://home.arcor.de/uffmann/ARTIST2.htm>
17. [http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/june\\_08/Angular\\_rate\\_sensors.htm](http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/june_08/Angular_rate_sensors.htm)
18. <http://www.radiant.su/rus/articles/?action=show&id=421>