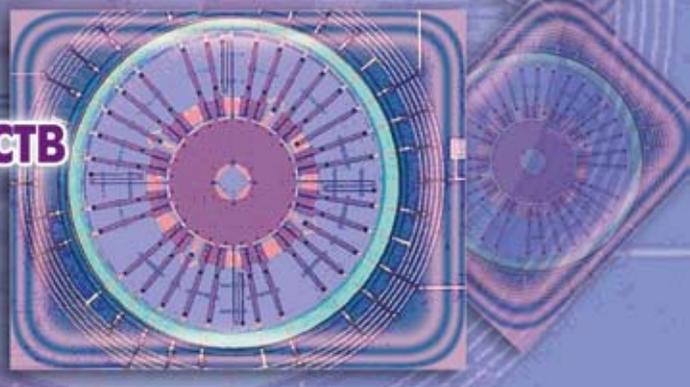


МЭМС – ЗДЕСЬ, ТАМ, ВЕЗДЕ БОЛЬШИЕ РЫНКИ МАЛЫХ УСТРОЙСТВ

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) – небольшие устройства, объединенные с полупроводниковыми приборами и сочетающие характеристики электронных схем и механических компонентов, – появились на рынке в 80-е годы прошлого столетия, хотя принцип их построения был предложен еще в 50-е годы. Но только сейчас они, наконец, нашли широкий спрос. Об этом свидетельствует тот факт, что в 2005 году общий объем средств, вложенных в развитие МЭМС и микросистем, превысил 1 млрд. долл. Сегодня интерес к МЭМС-технологии обусловлен не только их техническими возможностями, но и коммерческими перспективами. Многочисленные рынки сбыта МЭМС сулят значительные прибыли. Важный стимул для развития этой технологии – возможность объединения с бурно развивающейся нанотехнологией. Но, несмотря на рост продаж МЭМС, по темпам развития эта технология существенно уступает полупроводниковой, которая стремительно завоевывала рынки электронных систем на протяжении всей своей истории. Что же препятствует реализации потенциалов этой перспективной технологии и развитию рынка МЭМС-устройств? Какие усилия прилагаются для решения существующих проблем? Каково современное состояние и перспективы развития МЭМС?



М.Гольцова, В.Юдинцев

ПРОБЛЕМЫ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ

К основным причинам, сдерживающим промышленный выпуск МЭМС-устройств, относятся следующие:

- отсутствие всего необходимого для производства МЭМС технологического оборудования. Так, нет нужных установок глубокого травления кремниевых пластин, установок двухстороннего совмещения и соединения нескольких пластин. Разработка такого оборудования – процесс длительный и дорогостоящий. Как правило, этим занимаются малые фирмы с ограниченными финансовыми возможностями и небольшим коллективом квалифицированных специалистов;
- недостаточное понимание механических свойств МЭМС и зависимости материалов, используемых при их производстве, от технологического процесса;
- относительно низкая точность контроля толщины МЭМС-структур (как правило, она должна быть выше $\pm 10\%$, принятых в полупроводниковой промышленности);
- непонимание взаимодействия механической и электрической стабильности структур;
- отсутствие технологии вертикального монтажа пластин, критичной для многих МЭМС-приборов;
- отсутствие специализированных недорогих устройств тестирования промышленных МЭМС, особенно оборудования, имитирующего механические усилия, например давление.

В результате сроки освоения массового производства первых приборов (совокупный объем выпуска – 1 млн шт.) оказались длительными (табл.1). Правда, эти сроки аналогичны “инкубационным” периодам других технологий, таких как воспроизведение видеоизображения, сотовая связь и спутниковое телевидение. К тому же, сейчас срок между окончанием НИОКР и освоением промышленного производства первых образцов МЭМС составляет три-шесть лет, а для новых приборов, изготавливаемых по современной технологии, – два-три года.

Что предпринимается для поддержки коммерциализации МЭМС-технологии? Какие уроки удалось извлечь за столь длительный период ее развития?



Таблица 1. Освоение массового производства первых МЭМС-приборов

Изделие	Год освоения выпуска		Инкубационный период, лет
	первого образца	серийных приборов	
Датчик давления	1961	1984	23
Датчик ускорения пьезорезистивный емкостной	1970	1995	25
	1977	1995	18
Головки струйных принтеров	1977	1996	19
Дисплеи (DLP)	1979	2001	22

По данным отчета о состоянии промышленности, выпускающей МЭМС-устройства и системы, на 2006 год, опубликованном в журнале Small Times, для ее успешного развития производители должны усилить меры по продвижению этой технологии на рынок. Чтобы сформировать ресурсы, требуемые для выпуска МЭМС, необходимо понять, что нужно потребителю. Дело в том, что на начальном этапе развития компании-разработчики МЭМС-устройств и систем, в основном открывали высококвалифицированные специалисты в области полупроводниковой техники под девизом “сделай что-нибудь новое, и это завоюет рынок”. В результате сейчас практически все поставщики выпускают МЭМС по собственной технологии, считая, что единственно верное решение – идти “своим путем” (“My Way”). Производителям МЭМС следует проводить политику полупроводниковых фирм – оперативный, качественный и недорогой «ответ» на нужды потребителя. Для быстрой коммерциализации МЭМС-технологии компаниям-разработчикам целесообразно отказаться от собственного производства в пользу так называемых “чистых” заводов (foundries), подобных фирмам TSMC или Chartered Semiconductor, или в пользу контрактных производителей.

Но есть и положительные моменты. За прошедший длительный этап развития инфраструктура промышленности МЭМС-устройств существенно улучшилась. Появились производители специализированного промышленного оборудования – EV Group, Jenopik, STS и Suss MicroTec. В результате изготовители смогли отказаться от применения модифицированного технологического оборудования, предназначенного для производства полупроводниковых приборов. Кроме того, появились компании, специализирующиеся в области средств проектирования МЭМС (Conventor, IntelliSense и MEMSCAP). Большая часть поставляемых на рынок МЭМС изготовлены на пластинах диаметром 150 мм, хотя пока еще многие выпускают устройства на 100-мм пластинах. Вместе с тем ряд компаний (Dai Nippon Printing, Sony, STMicroelectronics) освоили крупномасштабное производство на 200-мм пластинах.

Пока в МЭМС-индустрии, несмотря на активную деятельность в последние пять лет Международной ассоциации производителей полупроводникового оборудования и материалов (Semiconductor Equipment and Materials International, SEMI), существует дефицит стандартов. Только в середине

2005 года был выпущен первый стандарт по МЭМС-технологии – “Руководство по конструированию, производству и сборке стандартных средств ввода-вывода для жидкостных микросистем”. К сожалению, сейчас это лишь один из трех стандартов, относящихся к МЭМС-технологии. Для справки: в полупроводниковой промышленности действуют более 700 стандартов. Чтобы ускорить коммерциализацию МЭМС-технологии, необходимо разработать большое число стандартов на методы обработки, сборки и тестирования МЭМС-устройств. И этому должны способствовать такие объединения промышленников, как действующие в полупроводниковой индустрии организации SEMI и некоммерческий консорциум SEMATECH. В этой связи перспективна деятельность организованного Европейской комиссией в 1992 году Общества поддержки лидерства в области многофункциональных микросистем (Network of Excellence in Multifunctional Microsystems, NEXUS*).

Важную роль в развитии МЭМС-технологии играют слияние и поглощение компаний. Правда, в результате мирового экономического спада 2001–2003 годов особенно пострадали компании, приобретенные крупными фирмами, специализирующимися в области оптических телекоммуникационных систем. Тем не менее, позиции “выживших” фирм сегодня укрепились и многие из них становятся рентабельными. Сейчас с появлением большого числа новых компаний производство МЭМС и микросистем постепенно наращивается. Положительные результаты дает и слияние фирм.

Каково же сегодня состояние рынка МЭМС-устройств и микросистем?

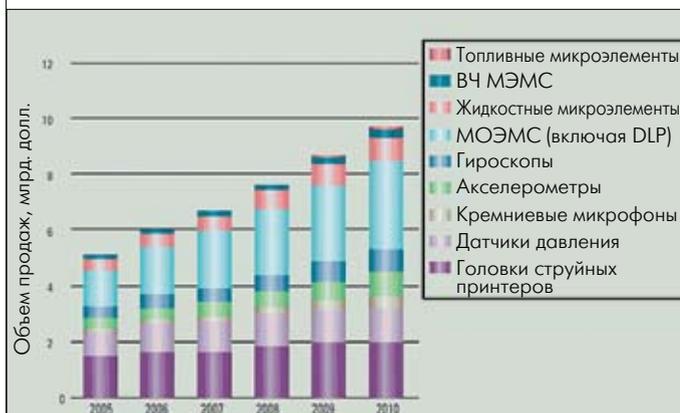


Рис. 1. Динамика рынка МЭМС-устройств в период 2005–2010 годы

СОСТОЯНИЕ МЭМС-ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Согласно оценкам фирмы Databeans, занимающейся маркетинговыми исследованиями, рынок МЭМС в 2006 году составит ~6,3 млрд. долл. В последующие пять лет он увеличится более чем в два раза и достигнет ~15 млрд. долл. при среднегодовых темпах прироста 20% (табл.2). Прогноз

* В задачи NEXUS входят: поддержка НИОКР и коммерциализации МЭМС и микросистем за счет организации форумов; прогноз тенденций рынка и наиболее перспективных их секторов; составление программ развития МЭМС-технологии (Roadmaps); координация деятельности в области стандартизации; распространение информации через публикации и Интернет.

аналитической и консультативной компании Yole Development более сдержан: продажи МЭМС за период 2006–2010 годы увеличатся с 5,1 млрд. до 9,7 млрд. долл. при среднегодовых темпах прироста 15% (рис.1). Это обусловлено ростом производства МЭМС и снижением его издержек.

По оценке Yole Development, сегодня на мировом рынке МЭМС присутствуют компании следующих типов (рис.2):

- производители электронных систем, располагающие производственными участками по выпуску МЭМС. Это наиболее обширный круг игроков на рынке. Сейчас в мире насчитывается 200 таких компаний (в том числе и лидеры в области электронной техники – Bosch, Delphi, Hewlett Packard). Этот тип фирм в свою очередь можно разделить на производителей МЭМС для собственных нужд (к ним относятся такие крупные компании, как Fujikura и Endevco) и для продажи на рынке;

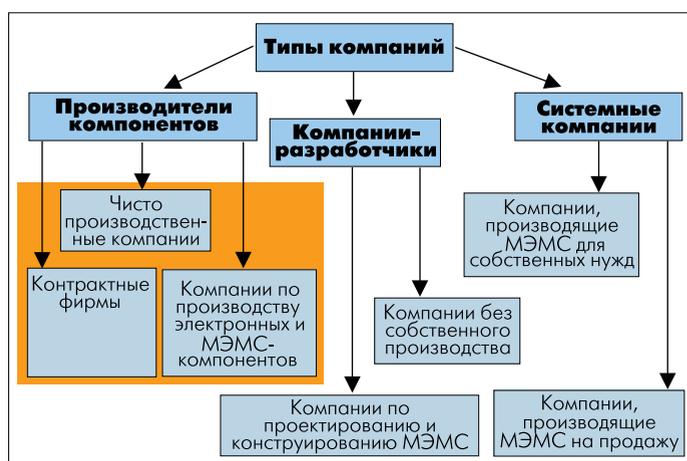


Рис.2. Типы МЭМС-компаний

- компании-разработчики, которые можно разделить на компании без собственного производства МЭМС (fabless) и компании, занимающиеся проектированием и конструированием МЭМС и микросистем (Lionix). В последнее время наблюдается рост активности новых компаний fabless-типа, о чем свидетельствует деятельность Akustica, Discera, Knowles, Lightconnect;
- производители электронных компонентов, которые в свою очередь делятся на поставщиков МЭМС на рынок (к ним относятся такие ведущие полупроводниковые фирмы, как Analog Devices, STMicroelectronics, Freescale, Infineon/Sensor, VTI Technologies); “чисто” производственные компании, занимающиеся только выпуском МЭМС (foundries) (DALSA Semiconductors, AMP, IMT, Neostones) и контрактные производители.

Согласно данным Yole Development, в 2005 году на долю компаний типа foundries и контрактных производителей приходилось ~3% рынка МЭМС. Однако к 2010 году объем их продаж увеличится по сравнению с 2005-м в три раза и превысит 500 млн. долл. (рис.3). Об этом свидетельствует и рост активности таких компаний. Продажи некоторых из них, по оценкам Yole, в 2006 году должны были превысить 20 млн. долл.

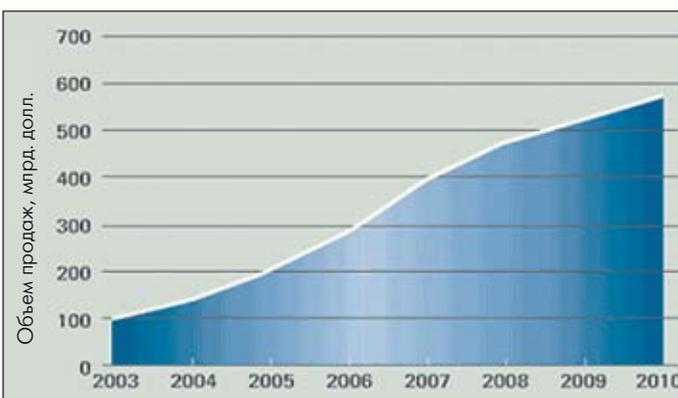


Рис.3. Мировой объем продаж контрактных и чисто производственных фирм

Эта категория фирм неоднородна (рис.4). В нее входят компании следующих типов:

- небольшие независимые компании-производители небольшой номенклатуры изделий (APM, IMT, MEMStech, Micralyne, Microfab Bremen, Silex, Touch Microsystems, Tronuc’s Microsystems);
- небольшие независимые компании с диверсифицированным производством МЭМС (в основном собственной разработки). Это такие компании, как Colibrus и MEMSCap;
- средние фирмы по выпуску специализированных микросхем типа ASIC, освоившие и производство МЭМС (China Resources Semiconductor, DALSA Semiconductor, Semefab и Xfab);
- крупные электронные компании с небольшими производственными участками по выпуску МЭМС (Honeywell, Matsushita, Electric Works, Olympus, Omron);
- крупные полупроводниковые компании, предлагающие услуги по производству МЭМС (Dai Nippon Printing, Sony и STMicroelectronics).

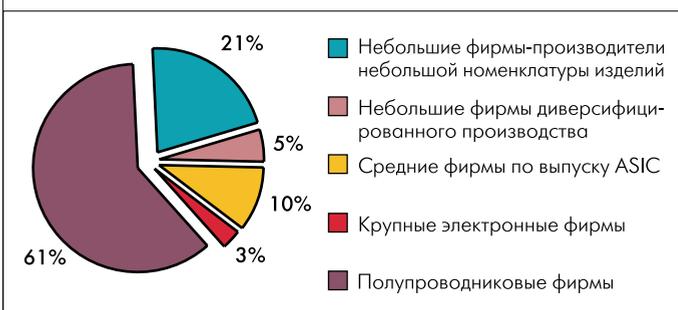


Рис.4. Доля рынка различных типов фирм-производителей

Области применения МЭМС разнообразны. И они постоянно расширяются. Сейчас наибольший объем продаж приходится на долю головок струйных принтеров (25% мирового рынка МЭМС). Вероятно, в ближайшем будущем с ними по объему продаж сравняются или превзойдут устройства цифровой обработки света (Digital Light Processing, DLP). Уже сейчас на долю DLP приходится 50% мирового рынка проекционных телевизоров. Устройства цифровой обработки света лидируют на рынке телевизоров высокой четкости с разме-



Таблица 2. Динамика мирового рынка МЭМС-устройств (данные компании Databeans)

Показатель	Динамика рынка								Среднегодовые темпы прироста, %
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Объем продаж									
стоимостное выражение, млрд. долл.	5,42	5, 19	6, 3	7,61	9,16	10,98	13,31	15,65	20
количественное выражение, млрд. шт.	5,14	5,23	6,2	7,93	9,76	10,96	14,0	16,74	22
Средняя цена, долл.	1,06	0,99	1,02	0,96	0,94	1,0	0,95	0,93	-2

ром экрана 1 м и более. Компания Texas Instruments начала поставки трехмерных DLP для проекционной цифровой киноаппаратуры. И в то же время компания продемонстрировала небольшую микросхему DLP, которая позволит проецировать на большой экран изображения малогабаритных карманных устройств, скажем дисплея мобильного телефона.

Продажи головок струйных принтеров, акселерометров для мешков безопасности и датчиков кровяного давления достигли насыщения, и темпы их прироста снижаются. Это «открывает дорогу» новым МЭМС-изделиям и новым областям их применения (радиочастотным переключателям для беспроводных систем связи, датчикам давления шин и гироскопам для различных автомобильных, аэрокосмических и промышленных систем). Одна из наиболее быстро развивающихся областей применения МЭМС-приборов – радиочастотные устройства. Разработкой и исследованиями в области ВЧ-МЭМС в мире заняты более 120 промышленных и научных организаций. По данным фирмы WTC, за период 2004–2009 годы рынок ВЧ-МЭМС вырастет с 126 млн. до 1,1 млрд. долл. (или ~6 млрд. шт. в количественном выражении). Сегодня приборы этого типа выпускают более 60 фирм, причем из них около 15 начали поставки промышленных изделий или образцов в 2005 году.

МЭМС наконец стали достаточно малогабаритными, дешевыми и прочными, чтобы завоевать мир бытовой электроники. Датчики перемещений, МЭМС-микросхемы микрофонов, гироскопов и акселерометров находят спрос у изготовителей сотовых телефонов, цифровых фотокамер, игровых приставок, портативных компьютеров. Уже в 2007 году доля МЭМС для бытовой аппаратуры составит 9% от мирового рынка МЭМС (доля устройств для средств связи – 10%, периферийных устройств компьютеров – 24%). В последующие годы, согласно прогнозам экспертов, доля МЭМС, предназначенных для бытовой аппаратуры, возрастет до 22%.

Только продажи МЭМС-микрофонов для сотовых телефонов, согласно прогнозам компании Yole, возрастут с 60 млн. единиц в 2005 году до более 350 млн. в 2008 году, общий объем их продаж составит 432 млн. штук. А по данным компании In-Stat, более 85% кремниевых MEMS-микрофонов, выпущенных в 2005 году, предназначались для сотовых телефонов. Остальные МЭМС-микрофоны нашли применение в цифровых камерах, MP3-плеерах и карманных компьютерах. Компания Yole оценивает продажи МЭМС-микрофонов в 2010 году в 800 млн. долл. против 100 млн. долл. в 2005-м (рис.5). Правда, этот прогноз

был подготовлен компанией в ходе анализа рынка за 2005 год. Тогда практически единственными микрофонами на базе МЭМС, представленными на рынке, были изделия компаний Knowless Electronics LLC (США) и Sonion MEMS A/S (Дания). Так называемые кремниевые микрофоны этих компаний были выполнены, соответственно, на двух и трех микросхемах. К 2007 году Knowless продала более 82 млн. МЭМС-микрофонов. При этом предполагается, что 8% из них были предназначены для старших моделей мобильных телефонов. Ожидается, что в 2007 году на долю мобильных телефонов придется уже 20% от объема продаж этих изделий.

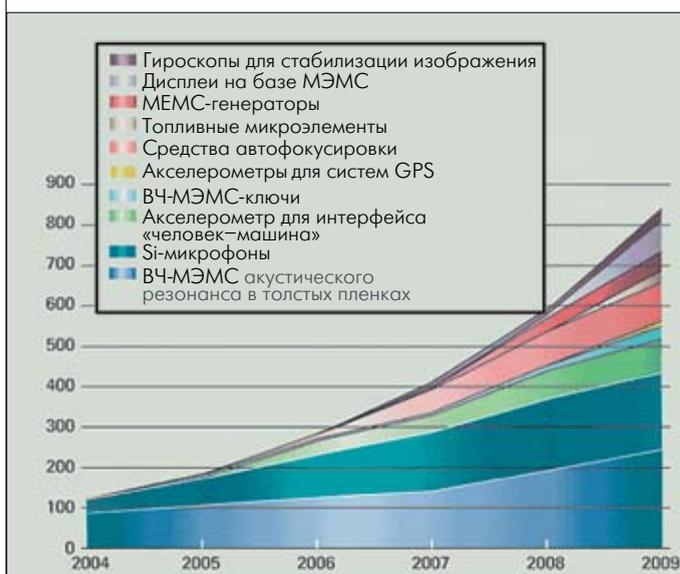


Рис.5. Динамика рынка МЭМС для мобильных телефонов

Ситуация на рынке МЭМС-микрофонов может существенно улучшиться благодаря выпуску компанией Akustica однокристальной микросхемы МЭМС-микрофона модели АКУ2000. Микросхема объединяет акустический преобразователь, аналоговый усилитель и сигма-дельта АЦП. С выхода АЦП снимается цифровой одноразрядный модулированный сигнал, нечувствительный к радиочастотам и электромагнитным помехам. Выполнена микросхема по стандартной КОМП-технологии. Для высвобождения встроенной диафрагмы микрофона требуется всего один дополнительный процесс, который проводится после того, как сформированы КМОП-устройства микросхемы. Возможность массового производства микросхем с высоким выходом годных была подтверждена практическими результатами. Ее воспроизвели девять заводов с помощью одиннадцати различных методов – от дешевого

0,6-мкм процесса с алюминиевыми межсоединениями до 0,18-мкм процесса с медной металлизацией.

Гармонические искажения кремниевого микрофона AKU2000 при уровне звукового давления 115 дБ не превышают 10%. Тактовая частота – 1–4 МГц, отношение сигнал-шум – 55 дБ. Напряжение питания составляет 2,8–3,6 В, потребляемый ток в режиме пониженного потребления энергии – 75 мкА. Микросхема поставляется в монтируемом на поверхность корпусе размером 4x4x1,8 мм.

По мнению аналитиков, микросхема МЭМС-микрофона компании Akustica благодаря низкой стоимости (начальная цена 4 долл. за микрофон при закупке партии в 1 тыс. шт.), высоким характеристикам и простоте монтажа в систему найдет применение в различных цифровых бытовых системах – от ПК и карманных компьютеров до головных телефонов стандарта Bluetooth и сотовых телефонов. Правда, несмотря на свой потенциал, МЭМС-микрофоны (в том числе и изделия Akustica) не сразу найдут применение в сотовых телефонах. Такие крупные производители, как Nokia, Motorola и Philips, не спешат переходить на новую технологию. Сейчас они платят 95 центов за обычный микрофон с электретной мембраной и используют центральный процессор со встроенным речевым кодеком. Производителям МЭМС-устройств придется доказать, что их приборы позволят улучшить блок обработки речи, а на это уйдет несколько лет. Поэтому большинство аналитиков

считает, что МЭМС-микрофоны найдут широкое применение в мобильных телефонах лишь к 2010 году. А пока благодаря развитию телефонии на базе IP (VoIP) наиболее перспективный рынок для высококачественных МЭМС-микрофонов – ноутбуки и ПК. В моделях 2007 года каждый крупный поставщик ноутбуков предусмотрел по крайней мере одну VoIP-платформу. Так, компания Fujitsu намерена установить микрофон AKU2000 в ноутбук модели LifeBook Q2010. Рост спроса на МЭМС-микрофоны для ПК стимулирует и выпуск компанией Microsoft ОС Windows Vista, предусматривающей возможность применения в каждом компьютере до четырех микрофонов.

Интерес представляет и МЭМС-микрофон компании Infineon Technologies, выдерживающий температуру до 260°C. К тому же, по утверждению разработчиков, микрофон по вибростойкости и ударопрочности превосходит традиционные устройства. Микрофон состоит из двух микросхем: МЭМС и специализированной микросхемы типа ASIC. Последняя преобразует изменения емкости гибкой кремниевой мембраны МЭМС, вызванные акустическими колебаниями, в электрические сигналы. Микросхемы смонтированы в плоский корпус размером 4,72x3,76x1,5 мм. Отношение сигнал-шум микрофона составляет 59 дБ, чувствительность – 10 мВ/Па. Потребляемый ток равен 70 мкА при напряжении питания 1,5–3,3 В. Благодаря своим характеристикам прибор компании Infineon перспективен для замены традиционных элек-



третних микрофонов. А высокая термостойкость позволяет без труда непосредственно паять его на стандартную печатную плату. Таким образом, появляется возможность полной сборки бытовой техники на автоматизированных линиях крупносерийного производства.

Но не микрофонами едиными славен рынок МЭМС для бытовой аппаратуры. Производители мобильных телефонов обещают стать крупнейшими потребителями разнообразных МЭМС-устройств. МЭМС гироскопы, ВЧ-ключи и генераторы будут активно вытеснять на этом рынке кварцевые генераторы*.

По мере совершенствования средств изменения масштаба изображения и разрешения цифровых фотокамер (до 3 и 5 Мпикселов) стабилизация изображения становится важнейшей задачей. Существующие средства стабилизации изображения достаточно громоздки, потребляют большую мощность и стоят дорого. Поэтому они не могут применяться в малогабаритных телефонах с фотокамерами. Удачное решение этой проблемы предложила образованная в 2003 году компания InvenSense. В середине 2006 года она выпустила устройство стабилизации изображения, выполненное на основе двухосевого МЭМС-гироскопа, которое позволяет существенно улучшить качество изображения, поскольку исключает эффект его размытия вследствие дрожания рук. Новый гироскоп модели IDG-300 объединяет МЭМС-схему гироскопа с электронной КМОП-микросхемой регистрации угла поворота. МЭМС-гироскоп размещен на кристалле размером 3,5x3,5x1 мм (размер ближайшего конкурента – гироскопа на основе пьезокерамики компании Murata – больше). Монтируется устройство стабилизации в плоский безвыводной корпус QFN-типа размером 6x6x1,45 мм. Гироскоп предназначен для фотокамер сотовых телефонов и фотоаппаратов. Гироскопы компании InvenSense поставляются изготовителям комплектного оборудования Японии, Тайваня и США.

По оценкам специалистов компании, 35% поставляемых сегодня на рынок фотоаппаратов оснащены средствами стабилизации изображения на базе МЭМС. К тому же, 40% современных сотовых телефонов имеют цифровые фотокамеры. В результате спрос на средства стабилизации изображения существенно возрос. Кроме того, МЭМС-гироскопы могут улучшить точность GPS-систем, обеспечить создание более “разумных” интерфейсов “человек-машина”, реагирующих на движения рук и жесты пользователя. Кристалл с МЭМС-гироскопом может монтироваться в корпус с трех-осевым акселерометром, формируя малогабаритное дешевое пятиосевое устройство регистрации перемещения. А по утверждению специалистов компании InvenSense, к 2008 году промышленность освоит выпуск шестиосевых инерционных измерительных устройств. По площади и стоимости они будут сопоставимы с двухосевыми моделями, но смогут обеспечить более совершенный интерфейс “человек-машина”.

* Белов Л., Житникова М. Микроэлектромеханические компоненты радиочастотного диапазона. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2006, №8, с.18.

Помимо рынка сотовых телефонов весьма перспективен для МЭМС-компонентов и рынок игровых платформ последнего поколения. Так, долгожданная платформа Wii фирмы Nintendo оснащена беспроводным устройством контроля перемещений, которое позволит преобразовать пассивную игру в интерактивную. Игроки смогут размахивать виртуальными теннисными ракетками, владеть невидимыми шпагами и брэнчать на воздушных гитарах. И все это благодаря акселерометрам компаний STMicroelectronics и Analog Devices, которые регистрируют движение и наклон руки игрока и реагируют на изменения их направления, скорости и ускорения. Компания Nintendo к концу 2006 года планировала продать только в США и Канаде 4 млн. игровых платформ Wii.

Разработчики и изготовители МЭМС опровергли предубеждение о непригодности МЭМС для изделий широкого применения. Потенциальный рынок МЭМС-устройств для бытовой аппаратуры ограничен только воображением. Изделия на базе МЭМС становятся предметами повседневной жизни. Их все больше применяют в средствах обеспечения жизнедеятельности человека – от систем безопасности и биоконтроля до аппаратуры автоматизации дома, промышленного контроля, мониторинга окружающей среды и, конечно, бытовой техники и развлекательных систем.