

Многообразие микросистемных инноваций: новые технологии и игроки

Светлана СЫСОЕВА
Dr.Gold@sysoeva.com

Микросистемы — самое емкое из известных определений, обобщающее МЭМС и CMOS — технологии, классифицируемые как МЭМС или смежные с МЭМС. Многие из этих технологий сейчас находятся в стадии зрелости, некоторые только входят в стадию коммерциализации. Независимо от этого, их теоретическое и практическое значение не уменьшается — оно состоит в том, чтобы показать все возможное многообразие и широкую применимость микросистемных технологий в различных сферах.

Введение

МЭМС-преобразователи — обширное и точное название, обобщающее датчики, актюаторы, ключи, аналоговые микросхемы, CMOS, микрофлюидику, дисплеи и многие другие устройства в микроминиатюрном исполнении для преобразования в микроструктуре одного вида энергии в другой. За понятием МЭМС скрывается огромное многообразие устройств, чувствительных к механическому, электромагнитному, химическому, биологическому или иному интерфейсу, понятие которого непрерывно расширяется. Входными параметрами для МЭМС являются, например, давление, ускорение, температура, акустика, свет, магнитные и электрические поля, гравитационное поле, газ, влажность, ДНК.

МЭМС-структура и корпус являются, в общем, сенсорным интерфейсом к физическому, химическому, биологическому входу, и таково же разнообразие выходных интерфейсов актюаторов, которые могут быть реализованы на основе той же МЭМС-структуры, если вход для нее является электромагнитным (в частном случае — электрическим). Поэтому разработки и предложения, относящиеся к технологии МЭМС, характеризуются таким же многообразием.

Технология МЭМС с самого своего рождения была инновационной. Такой она остается и по сей день, поскольку находится в постоянном движении. Некоторые направления МЭМС в настоящее время являются весьма «зрелыми», а именно головки струйных принтеров, датчики давления, акселерометры, микрзеркала. Наблюдается бурный рост рынка датчиков движения/инерции — исторически одного из первых. Микрофлюидика, гироскопы, микрофоны, комбидатчики инерции, ВЧ МЭМС, микро-

боллометры достигли состояния «зрелости» в последние несколько лет.

Область сравнительно новых применений охватывает МЭМС-микродисплеи, пикопроекторы, автофокусировку, электронные компасы, технологии сбора энергии (Energy Harvesting), осцилляторы, микротопливные ячейки, микропикеры, микронаконечники (Microtips) и др.

Аналитическая компания Yole Development оценивает динамику роста рынка возникающих применений МЭМС следующим образом: от \$550 млн в 2009 г., что составляло несколько процентов от общего рынка МЭМС (близкого к \$10 млрд), до \$2,2 млрд в 2015 г.

Практически ежеквартально и даже ежемесячно появляются новые разработки МЭМС. Некоторые из них вписываются в общие рыночные тенденции, догоняют лидирующие предложения, другие становятся совершенно уникальными, усиливающими фрагментацию рынка МЭМС и расширяющими спектр возникающих применений. Множество различных разработок МЭМС в настоящее время перешагивает временной зазор, неизменно присутствующий между стадиями научных исследований и разработок и коммерциализации, причем некоторые даже не достигают коммерческого успеха. Но их значение от этого не уменьшается, так как они иллюстрируют (теоретически и практически) широкую применимость технологии МЭМС для решения различных задач и все возможное многообразие применений и технологий.

В рамках данной публикации рассматриваются многие новые разработки МЭМС, классифицируемые как микроэлектромеханические системы (МЭМС). Некоторые из них, в сущности, даже не являются таковыми — это не микромеханические, а, например, микрохимические, микрооптические или, в значительной степени, твердотельные CMOS-

устройства в микроминиатюрном формате. Это также модули, включающие МЭМС, или технологии, смежные с МЭМС.

Микросистема — еще более общее определение, под которое подпадают все микроустройства, включающие микроструктуру с механическими, оптическими, электрическими и другими элементами и функциями, независимо от их классификационной принадлежности к МЭМС и уровня микросистемной интеллектуальности.

Микросистемная интеграция MEMS с ASIC, в которой первичное назначение ASIC состояло в обеспечении электрического интерфейса с МЭМС-структурой, в дальнейшем позволила реализовать интеллектуальные алгоритмы обработки коммуникационных сигналов, например, в мультикристалльных модулях IMU, ставших особенно популярными в 2011 г. Блоки инерциальных измерений с девятью степенями свободы интегрируют трехосевые акселерометры, гироскопы, магнитометры, а блоки с 10 степенями свободы включают также датчик давления для измерения высоты. В IMU только магнитометры являются не МЭМС, а смежной технологией.

Ключевым направлением микросистемной эволюции сегодня является повышение интеграции и осуществление технологии слияния данных. Снижение стоимости, в особенности цены корпусирования, которое составляет порядка 40%, — следующее актуальное направление для инноваций.

МЭМС активно внедряются в потребительские устройства, а также в промышленные, медицинские, военные и телекоммуникационные. Пикопроекторы, ВЧ МЭМС, телекоммуникационные переключатели, микроболлометры и микротопливные ячейки иллюстрируют широкий спектр применимости инновационной технологии МЭМС в настоящем и в обозримом будущем.

Пикопроекторы МЭМС

Ключевые применения технологий сканирующих лазерных пикопроекторов — смартфоны, презентации и общение, а также лазерные дисплеи на ветровом стекле (head-up display, HUD).

Лазерные пикопроекторы представляют также значительный интерес для игр с отображением сцены на стене, где лазерные лучи, сфокусированные на любом расстоянии, дают более четкое изображение, чем светодиодные проекторы. Но ввиду недостаточной яркости и значительного потребления мощности эта технология еще не получила широкого распространения. По данным Yole Développement, рынок пикопроекторов в 2010 г. составил лишь 750000 единиц, а это капля в море на фоне доминирования проекторов DLP и LCoS.

STMicroelectronics и bTendo сотрудничают в разработке бесфокусного пикопроектора для следующего поколения смартфонов. Смартфоны представляют собой устройства с малым экраном, поэтому для них была создана возможность оснащения пико-проекторами для проецирования видео и изображений на различные поверхности. По замыслу разработчиков, новый пикопроектор должен стать самым малым в мире.

Совместно создаваемое решение имеет менее $2,5 \text{ см}^3$ в объеме, его высота менее 6 мм. В планах разработчиков — достичь более высокого, чем у конкурентов, качества изображения. Устройство объединяет два микрозеркальных MEMS-устройства в оптической машине, кристалл обработки видео, малое энергопотребление, встроенную интерфейсную поддержку MIPI (Mobile Industry Processor Interface).

Новое поколение технологии зеленых лазеров непосредственного действия от MicroVision открывает новые возможности для создания меньших по размеру и более дешевых сканирующих лазерных пикопроекторов. Компания располагает инновационной ультраминиатюрной лазерной дисплейной технологией, в которой применение высокоомощных лазеров позволило повысить яркость пикопроекторов последнего поколения на 50%. Но зеленый цвет лазера до недавнего времени мог быть получен только посредством частотного удвоения выхода ИК-лазеров. В настоящий момент непосредственное излучение уже реализовано, что позволяет удалить оптическую систему для частотного преобразования и тем самым уменьшить размер дисплейного устройства на 30%. Яркость достигает 10–15 лм, качество изображения ввиду избирательной чувствительности глаза к зеленому, передаваемому с более высокой точностью, получается более высокое. Цена составляет несколько десятков долларов.

Но первым коммерческим применением технологии зеленых лазеров от MicroVision



Рис. 1. а) Иллюстрация лазерной сканирующей технологии MicroVision PicoHUD; б) применения микрозеркального MEMS-устройства в PicoP

становятся HUD-дисплеи. В июле 2011 г. компания анонсировала заключение контракта с лидирующим автомобильным производителем для разработки автомобильных HUD. Ожидается внедрение технологии MicroVision PicoHUD в тестовые автомобили (рис. 1а), что является шагом на пути к коммерциализации PicoHUD для массового производства, запланированного на 2014 г. Автомобильные HUD перспективны с точки зрения безопасности, и данный контракт послужит средством проверки применимости технологии PicoP engine за пределами карманных проекторов. Ядром PicoHUD является MicroVision PicoP (рис. 1б) — ультраминиатюрная лазерная дисплейная технология с высокой степенью гибкости дизайна и программируемости. MicroVision, автомобильный производитель и поставщик Tier 1 (имена по требованию партнера скрываются) сотрудничают в разработке прототипов HUD с дисплейной машиной PicoP следующего поколения, основанной на зеленых лазерах.

Технология PicoHUD предназначена для проецирования изображений на ветровое стекло, где лазерная сканирующая технология допускает более прозрачные, просвечивающие HUD, без освещения для черного или подсветки для матричных дисплеев, что дает высокий контраст и меньшую интерференцию с видимым светом на ветровом стекле.

Поляризованный и узкий лазерный луч позволяет получить изображение достаточной яркости, видимое в условиях яркого солнечного освещения. Изображение прорисовывается вначале в малой плоской области, затем увеличивается посредством

оптики и сворачивается. Световой луч рисует изображение подобно тому, как если бы оно было перед автомобилем.

PicoHUD-технология может позволить автомобильным разработчикам создавать дисплеи с высокой яркостью, контрастностью, цветовым насыщением, а способность к бесконечной фокусировке обеспечивает гибкость дизайна для различных дисплейных поверхностей.

MicroVision также сотрудничает с Pioneer Corporation, которая работает над коммерциализацией в 2012 г. автомобильного HUD, основанного на технологии PicoP, для автомобилей, уже выпущенных на рынок (встроенные автомобильные дисплеи запланированы только в моделях 2015 г.).

Мобильные МЭМС-дисплеи

Pixtronix — компания, занимающаяся исключительно разработкой МЭМС-технологии для мобильных дисплеев под названием PerfectLight. Маломощные дисплеи, представляющие собой МЭМС на стекле (MEMS-on-glass), применяют Samsung, Hitachi Displays, Chimei Innolux. Производство 10-дюймового дисплея Samsung wide XGA формата, например, запланировано на 2013 г. Hitachi планирует выпуск МЭМС-дисплеев уже в конце 2011 — в начале 2012 гг. (рис. 2а). Их назначение — мобильные телефоны, смартфоны, планшеты, цифровые камеры и другие устройства, оборудованные 10-дюймовым или меньшим дисплеем.

Pixtronix MEMS-дисплей состоит из MEMS-затвора, блока задней подсветки с RGB-светом



Рис. 2. Иллюстрация технологии МЭМС-дисплеев Pixtronix: а) МЭМС-дисплей, прототипированный Hitachi; б) MEMS-DMS-структура

диодами, TFT-элементов, отражающей пласты. Цветовые тона регулируются открытием и закрытием МЭМС-затвора с высокой скоростью и изменением суммы света от подсветки и естественного освещения.

Дисплейная технология цифровых микрозатворов digital micro-shutter (DMS) (рис. 26) обеспечивает выдающиеся оптические характеристики. В прототипах СМІ достигнуты следующие показатели: цветовая гамма 135% NTSC, 24-битная цветовая глубина, контраст 1000:1, углы обзора 170°, срабатывание затвора — 100 мкс. В технологии Pixtronix находят отражение общие тенденции беспроводного рынка. Большие и яркие дисплеи дают больше видеоконтента, но потребляют меньше мощности, что важно для мобильных устройств с ограниченным сроком службы батареи.

Дисплейная технология, как заявлено, снижает на 75% потребление мощности видео, а для электронного чтения достигается даже большее снижение. Настройки МЭМС-затворов могут быть отрегулированы для различных применений с целью экономии мощности.

Qualcomm MEMS Technologies — еще одна компания, разработавшая МЭМС-дисплеи на основе оригинальной технологии интерферометрической модуляции IMOD, характеризующиеся малым потреблением мощности и достаточной яркостью изображения при солнечном свете. Массовая коммерциализация Mirasol-устройств (например, устройств чтения электронных книг, планшетов) ожидается в текущем или следующем, 2012 году, хотя официальные заявления компании об этом отсутствуют.

MEMS-микрзеркала Capella для селективного переключения по длине волны

Capella производит модули селекторных переключателей по длине волны Wavelength selective switch (WSS), основанные на технологии МЭМС-микрзеркал и характеризующиеся высокой интеллектуальностью.

Назначение WSS Capella состоит в динамической маршрутизации, блокировке и подавлении длин волн DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexed Technologies — плотное мультиплексирование с делением по длине волны, технология спектрального уплотнения с частотным разносом каналов) в сетевом узле. WSS-компонент характеризуется числом каналов WDM и направлений ($1 \times N$).

Данный тип решений для управления длиной волны перспективен для использования в реконфигурируемых оптических мультиплексорах ввода-вывода Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer (ROADM) и оптических кросс-соединениях Optical Cross Connect (OXC). По данным Infonetics Research, рынок оборудования ROADM оптических сетей WDM (Wavelength Division

Multiplexing, мультиплексирование с делением по длине волны) вырос на 20% за 2010–2011 гг., при этом общий рынок оптических сетей увеличился на 7%.

Интеллектуальные подсистемы Capella интегрируют следующие функции: мультиплексирование, демуплексирование, реконфигурация по длине волны, динамическое выравнивание (эквалайзинг) каналов, мониторинг длины волны и мощности, канальная блокировка или верификация конфигурации. Capella WSS отличаются компактностью и атермическим дизайном, основанным на технологии МЭМС.

Важнейшая разработка компании — это контроль с замкнутым циклом closed-loop control с автоматической компенсацией окружающих изменений, благодаря чему эти системы гарантируют надежную работу в рабочих условиях в течение срока службы продуктов.

По данным Yole Development, уровень инвестиций в 2011 г. составил \$20 млн. В настоящее время Capella переходит в стадию масштабирования производства, новые инвестиции также предназначены для разработки модулей типа 1×20 WSS.

MEMS PIC от KAIAМ — пример оптимизации производственного процесса

KAIAМ разрабатывает и производит недорогие оптические под сборки, компоненты, трансиверы, основанные на технологии Photonic Integrated Circuit (PIC) для волоконно-оптической телекоммуникации.

По мере того как потребности в пропускной способности превосходят скорости передачи данных одиночных электронных каналов, существует необходимость в параллелизме коммуникации данных. Для передачи множественных полос данных в пределах коротких диапазонов используется параллельное ленточное волокно. Для длинных диапазонов используются технологии грубого мультиплексирования с делением по длине волны CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexed) и плотного мультиплексирования с делением по длине волны DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexed) в однорежимных волокнах. На длинах наибольшей протяженности и в связях, где эффективность в частотной полосе является важной, когерентные архитектуры, которые допускают множественные символы на бит, эффективно комбинируют множественные полосы на ту же самую длину волны света.

Эти более сложные параллельные линии связи требуют более сложного корпусирования для соответствия требованиям плотности. Корпусирование одиночного лазера в ТО может давать неудовлетворительные результаты. В настоящее время имеются многие решения для увеличения плотности, каждое со своими

плюсами и минусами. Монолитная интеграция компонентов на один субстрат InP исключает связи между компонентами, но материал является дорогим, а при интеграции различных типов устройств на ту же самую пластину характеристики снижаются. Цена разработки является высокой. Но в отличие от электроники, где интеграция приводит к более низкой емкости и более высокой скорости, нет выигрыша в характеристиках для интегрированной оптики — только преимущества в обработке волокон.

Гибридная интеграция отдельных компонентов для формирования эквивалента электронного мультикристалльного модуля является наиболее исследуемым подходом. Но плотные оптические режимы и экстремально точное позиционирование, необходимое для хорошего объединения, требуют использования дорогих и комплексных сборочных средств, которые работают медленно и с низкой выработкой.

KAIAМ продвигает метод на основе комбинации гибридного и монолитного подходов. Согласно стандартным при реализации данного способа приемам, лазерный массив на InP объединяет множественные источники, затем массив InP комбинируется с пассивной оптикой. В сравнении с полной гибридной интеграцией преимущество состоит только в выравнивании — один шаг вместо многих в направлении шести осей, а недостаток в том, что массив получается более сложным, чем одиночные элементы, что снижает выработку и характеристики. Платформа, основанная на MEMS, включает микролинзы, выполняющие роль печатной платы (рис. 3а). Оптические компоненты, такие как лазеры, модуляторы, фотонные световые схемы (Photonics Lightwave Circuits, PLC) и сходные однорежимные устройства, монтируются на MEMS-сборку с использованием электронных сборочных средств вначале грубо, с невысокой точностью. Части могут отстоять от оптимального положения на десятки микрон, без оптических соединений между собой. Затем микролинзы перемещаются для направления оптических лучей и оптического соединения компонентов. По достижении оптического выравнивания микролинзы электрически закрываются с применением интегрированных нагревателей, которые соединяют компоненты окончательно. Дизайн минимизирует влияние ошибок совмещения или смещений в течение пайки на оптическое выравнивание.

Процесс полностью автоматизирован и может производить любые плотно интегрированные PIC — мультиволновые трансиверы, сборки для когерентной коммуникации или потребительскую оптику.

Пример готового продукта показан на рис. 3б.

KAIAМ в настоящем коммерциализирует данную технологию для трансиверов 4×10 Гбит/с, соответствующих стандарту

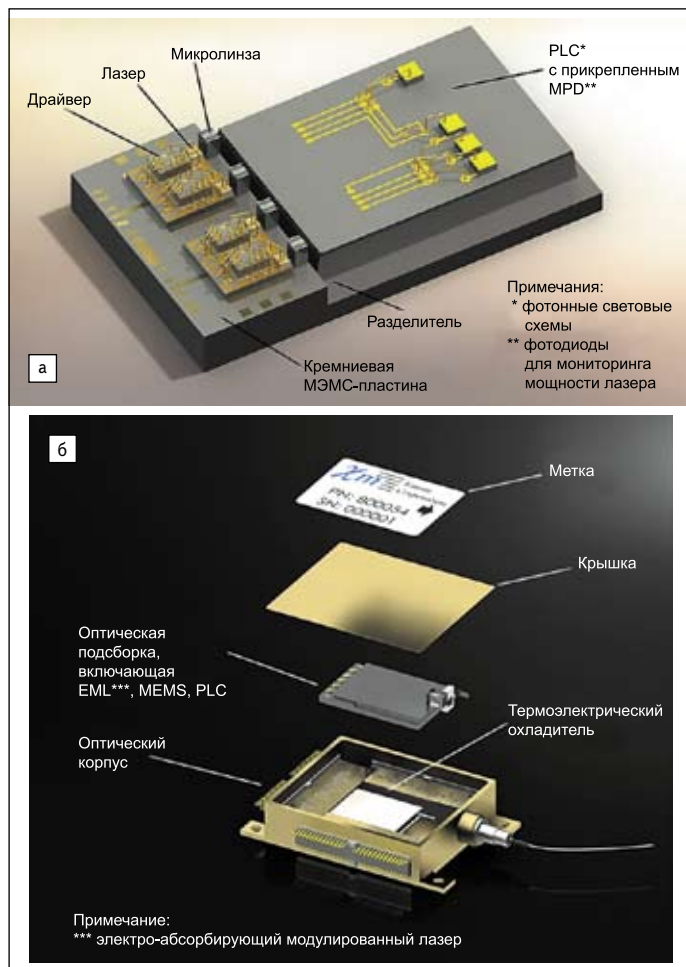


Рис. 3. Технология PIC KAIAM: а) гибридные PIC для QSFP-системы; б) 10-канальные TOSA с EM интегрированным TEC для работы с разнесением каналов на 100 ГГц

40GBASE-LR4 в QSFP, и также с электро-абсорбирующими модулированными лазерами (electro-absorption modulated lasers), на длинах волн DWDM, в законченном трансивере CFP.

MEMS-осцилляторы

Кремниевые MEMS-осцилляторы в настоящее время активно вытесняют объемный кварц (дискретные кварцевые устройства) из новых электронных устройств. Глобальный рынок устройств синхронизации, включая резонаторы, генераторы и синхронизирующие чипы, который оценивается в \$5 млрд, движется к тому, чтобы стать стопроцентно кремниевым. В данной области работают компании SiTime, Discera, Sand 9, SiLabs, Vectron, которые уже обеспечивают МЭМС-осцилляторами высокообъемные рынки потребительской электроники, телекоммуникационный и автомобильный. Аналоговая полупроводниковая компания SiTime, занимающаяся разработкой высокопроизводительных МЭМС-устройств синхронизации, например, к настоящему моменту продала уже 50 млн единиц своих осцилляторов, тактовых генераторов, резонаторов.

Усилия производителей позволили перекрыть ранние ограничения MEMS-осцилляторов, связанные с потреблением мощности, фазовыми шумами, джиттером, частотными скачками, недостаточной точностью выхода для 3G, 4G или GPS, и проблемами стабильности вследствие температурных свойств кремния и загрязнений МЭМС-балок осцилляторов.

Электронная промышленность приняла синхронизирующие МЭМС-решения, поскольку они обладают следующими преимуществами перед кварцевыми:

- более высокая надежность (MEMS можно эксплуатировать при более высоких рабочих температурах, они более устойчивы к ударам, вибрации, шумам в цепи питания);
- меньший размер;
- более высокая применимость, гибкость;
- сниженное энергопотребление;
- низкая цена.

По общим оценкам, глобальный рынок MEMS-осцилляторов составил \$21,4 млн в 2010 г., и ожидается, что он достигнет \$312 млн в 2014 г., где потребительские продукты составляют не менее половины рынка. Рынок кремниевых МЭМС-решений для синхронизации в период с 2011 по 2016 г. должен расти на 66,4% с CAGR за год.

Данный рост поддерживается компаниями, принимающими МЭМС вместо кварцевых продуктов, а также возможностями высокообъемного производства, достигнутыми производителями.

SiTime — лидер в данном сегменте с долей на рынке, составившей в 2010 г. 85%. В прошлый (2010) год SiTime продала больше единиц, чем за первые пять лет. Современная электроника характеризуется включением трех-пяти синхронизирующих устройств на систему, и данное число растет ввиду увеличивающейся системной сложности и конвергенции. SiTime предлагает большое портфолио конфигурируемых синхронизирующих продуктов с высокими характеристиками, сниженным размером, повышенной надежностью (по заявлениям компании, 10-кратной в сравнении с кварцевыми дискретными) и обширным набором возможностей для достижения гибкости решений.

Опыт SiTime в MEMS и аналоговой технологии насчитывает много устройств, ставших первыми промышленно выпускаемыми:

- Первый MEMS-осциллятор, разработанный для телекоммуникационных, сетевых и встроенных приложений, контролируемый напряжением, VCXO (Voltage Controlled MEMS Oscillator) с характеристиками джиттера порядка фемтосекунд, диапазоном тюнинга (pull range) и линейностью в 10 раз лучшими, чем у кварцевых устройств.
- Первая МЭМС-платформа осциллятора под названием Encore, допускающая уровень исполнения TCXO (Temperature Compensated Oscillator, X-Crystal) и OCXO (Oven-Controlled Oscillator).
- Первый программируемый тактовый генератор (SiT9105) с интегрированным резонатором, выходами LVCMOS и дифференциальными выходами в одном корпусе, позволяющий снижать область, занимаемую на плате, на 66%.
- Программируемые осцилляторы с самым низким потреблением мощности в промышленности.
- Самое тонкое в мире таймирующее устройство SiT8003XT, используемое в картах SIM и SmartCard (рис. 4а).

Важнейшим параметром является частотная стабильность МЭМС-устройств — зависимость частоты от температуры. SiTime несколько ранее выпустила программируемые МЭМС-осцилляторы SiT8003 и SiT8103 со стабильностью порядка 25 ppm в температурном диапазоне $-40...+85$ °C.

В июле 2011 г. SiTime представила первый в промышленности ультрастабильный MEMS Encore VCTCXO (Voltage Controlled, Temperature Compensated Oscillator) для телекоммуникационных, сетевых и беспроводных применений, например оборудования SONET и синхронного интерфейса Ethernet, сотовых базовых станций и повторителей, GPS и измерительного оборудования. Данное новое программируемое семейство VCTCXO (рис. 4б) включает четыре устройства: SiT5001, SiT5002, SiT5003 и SiT5004. Все они поддерживают частоты до 220 МГц, обеспечивают лидирующую в промышленности стабильность порядка $\pm 0,5$ ppm и интегрированный фазовый джиттер 500 фс RMS (в диапазоне 12 кГц – 20 МГц). Семейство SiT500x поставляется в стандартных фут-принтах, допускающих 100%-ное замещение кварцевых TCXO и VCTCXO без редизайна.

Стандартные полупроводниковые процессы и высокообъемное пластиковое корпусирование, а также опыт аналогового программирования компании SiTime обеспечивают вывод клиентского продукта на рынок в кратчайшие сроки. Доступно веб-ПО для разработки. Все это позволяет доводить продукт до клиента в течение трех-пяти недель.



Рис. 4. Кремниевые MEMS-осцилляторы SiTime: а) сравнение размеров корпусов кварцевых кристаллов и SiT8003XT; б) новое программируемое семейство ультрастабильных осцилляторов VCTCXO SiT500x

Одной из новостей лета 2011 г. является то, что РОСНАНО (ОАО «Роснано») стало владельцем 17,3% акций компании SiTime Corporation. Общий объем финансирования составит примерно \$22 млн, из которых РОСНАНО инвестирует до \$15 млн. Средства будут направлены на развитие исследовательской базы SiTime, расширение географии продаж и создание российского центра разработок. Объем российского рынка осцилляторов оценивается в настоящее время в \$80 млн.

Основные рынки сбыта продукции в рамках проекта — инфраструктурные решения для современных телекоммуникаций, вычислительная техника, навигационные системы, сети датчиков для контроля окружающей среды и другие системы, использующие в своей работе прецизионные генераторы частоты.

SiTime доминирует на рынке синхронизирующих МЭМС, но это не единственная компания, позиционированная в данной области и предлагающая лидирующие технологические решения. Компания Discera разрабатывает и производит синхронизирующие МЭМС, замещающие традиционные кварцевые кристаллы и осцилляторы. С использованием полупроводниковых процессов и технологии корпусирования продукты Discera обладают размером, ценой и надежностью, ассоциируемыми с ИС. При этом они обеспечивают короткое время выхода на рынок, широкий набор признаков и возможность работы в более широком температурном диапазоне, чем стандартные кварцевые продукты.

Используя ультраминиатюрную резонаторную технологию PureSilicon на основе чистого кремния, Discera разработала широкий диапазон осцилляторов, предназначенных удовлетворить требования к характеристикам, размеру, мощности и цене для потребительского, промышленного и коммуникационного рынков.

С 2011 г. Discera продает первые программируемые МЭМС-осцилляторы DSC21XX I²C и DSC22XX SPI. Они применимы в одно-

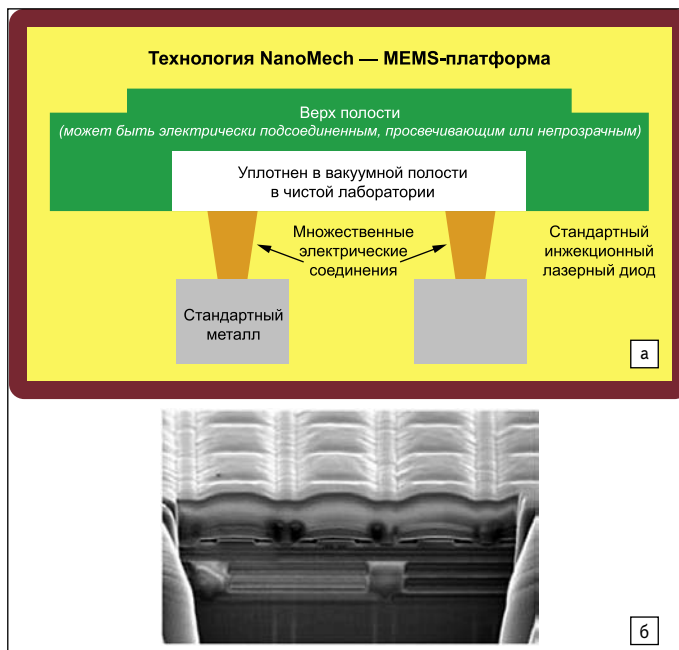


Рис. 5. Основы технологии Cavendish Kinetics: а) технологическая платформа MEMS NanoMech; б) массивы полостей

и двухвыводной конфигурациях (CMOS, LVPECL, LVDS, HCSL). Программируются выходные частоты и уровни. Устройства отличаются частотной точностью до 10 ppm, широкий диапазон рабочих температур $-55...+125$ °C, ультрамалый фазовый джиттер в 300 фс RMS на 156,25 МГц (200 кГц–20 МГц). Размеры 14-выводного корпуса 3,2×2,5 мм.

Sand 9 — технологический лидер в области МЭМС-резонаторов для синхронизации в коммуникационных системах, производимых с использованием кремниевого процесса MEMS, имеющих много преимуществ над кварцевыми резонаторами. Применения продуктов температурно-контролируемых МЭМС-осцилляторов TCMO включают GPS, LTE, 3G, WiFi, сети, промышленные системы. Первые в промышленности МЭМС-осцилляторы демонстрируют характеристики фазовых шумов и долговременную стабильность, сравнимую с температурно-контролируемыми кристаллическими осцилляторами (TCXOs), с высокой точностью. Sand 9 TCMO — первые осцилляторы, достигшие того же уровня, что и кварцевые кристаллы, но по более низкой цене.

Технология обеспечивает также диапазон тюнинга, в 10 раз более высокий, чем у кварца: вместо диапазона pull (tuning) range для начального смещения частоты, теплового дрейфа и эффектов старения порядка ± 5 –10 ppm TCXO дается до ± 50 ppm с Sand 9 TCMO. Это предоставляет большую гибкость тюнинга и более быстрое время выхода клиентского продукта на рынок.

Vectron еще в 2008 г. запустила в производство первый осциллятор, противостоящий ударам до 100 000 g. Выходные частоты до 150 МГц адресованы военным применениям.

Таким образом, характеристики, надежность и цена позволяют заключить, что МЭМС-осцилляторы имеют большие рыночные перспективы с точки зрения применения их в потребительских, военных, телекоммуникационных и автомобильных отраслях.

Встроенная инкапсуляция для снижения размера и цены корпусирования МЭМС

Cavendish Kinetics — МЭМС-компания, разработавшая уже третье поколение этой технологии. Платформа NanoMech снижает цену МЭМС-компонентов посредством уменьшения их размера и исключения дорогостоящего МЭМС-корпусирования.

ИС и МЭМС в настоящее время могут быть полностью интегрированными, но не в одном корпусе, а благодаря встраиванию МЭМС в ИС. Запатентованный процесс Cavendish Kinetics допускает, что МЭМС-компоненты полностью встраиваются в ИС в течение процесса производства. В основе NanoMech лежит образование уплотненных полостей между металлическими слоями в ходе стандартных процессов создания ИС без применения специальных материалов и оборудования (рис. 5). С использованием стандартного оборудования BEOL и материалов CMOS, BiCMOS, SiGe или SOI Cavendish встраивает МЭМС-компоненты в полости, которые находятся между двумя металлическими слоями кристалла.

К настоящему времени разработаны встраиваемые конденсаторы ВЧ МЭМС для тюнинга антенн и телефонов согласования импеданса в сотовых телефонах. Другие применения NanoMech — программируемая память, сохраняющаяся после выключения, I/V-переключатели, резонаторы, датчики температуры, инерциальные измерения, датчики изображения. Вариативность размеров, форм и признаков допускает разнообразие применений.

Как было сказано, в процессе производства МЭМС полностью уплотнены внутри полостей, поэтому загрязнения в полостях отсутствуют, и дополнительные средств корпусирования не требуется.

Благодаря своей миниатюрности миллионы индивидуальных полостей могут быть включены в ИС и содержать те же самые или различные устройства. Нестираемая память, сохраняющаяся после выключения, состоит, к примеру, из тысяч полостей с одним или многими кантилеверами. Другой пример — массив тысяч емкостных переключателей, контролируемых цифровым способом посредством переменного конденсатора, обеспечивающего разрешение порядка фФ и емкостной диапазон от нескольких фФ до пФ.

С полостью в верхнем слое и уплотнением со светопередающими материалами, полости подходят для определения света в спектре (ИК, измерители видимого света, рефлексивные световые переключатели).

По данным Yole Development, Cavendish Kinetics планирует войти в производственную стадию в 2012 г. Ожидается, что компания станет третьим (после WiSpry и EPCOS) МЭМС-игроком по выпуску продуктов для тюнеров антенн сотовых телефонов.

Qualtré — новый игрок на рынке МЭМС-гироскопов

MEMS-гироскопы — следующая волна на рынке датчиков движения. По данным Yole Development, данный рынок расширяется и в сегменте потребительских устройств в 2015 г. превысит \$1,5 млрд.

Qualtré — новый игрок на рынке датчиков движения для портативных бытовых

приборов. Технология МЭМС-гироскопов Qualtré — это оригинальная мультисековая технология на объемных акустических волнах (Bulk Acoustic Wave, BAW), интегрированная с электроникой и способная обеспечить высокие рабочие характеристики, надежность и низкую цену (рис. 6). Компания была основана в 2008 г., и ее первые шаги были направлены на обеспечение так называемой must-have, или обязательной функциональности мобильных и других потребительских устройств посредством МЭМС-гироскопов. Спектр целевых применений технологии включает цифровые камеры, 3D-управление аудио- и видеоприборами, портативные навигационные системы. Но технология является масштабируемой и для автомобильных, энергетических устройств и применений, в которых требуется высокая надежность.

Qualtré привносит значительный вклад в разработку технологий и процессов инерциальных датчиков. Согласно заявлениям компании, BAW-гироскопы Qualtré меньше многих МЭМС-устройств. Они также в значительной степени могут быть причислены к твердотельным устройствам, что позволяет повысить их надежность и толерантность в рабочих условиях. Для них не требуется вакуумное корпусирование, что снижает цену устройств, и они могут быть интегрированы со CMOS-схемой и другими датчиками. Компания заверяет, что те конкуренты, которые используют большие, не кремниевые датчики и методы вакуумного корпусирования, в ближайшем будущем окажутся неспособными встречать требования высоких характеристик и низкой цены.

С начальными инвестициями в \$5 млн в 2008 г. и последующими \$8 млн в 2010-м, компания в настоящее время завершает разработку дизайна кристаллов для скорейшей коммерциализации в потребительских продуктах известных брендов. В июле 2011 г. инвесторы вложили в капитал дополнительные \$10 млн — для расширения инфраструктуры сбыта продукта, а также для разработки продуктов следующего поколения на основе процесса HARPSS MEMS.

Комби-датчики инерции и LBS — ключевые сегменты потребительского рынка

Значительный рост в потребительском сегменте рынка переживают в настоящее время комби-датчики инерции и сервисы, основанные на местоположении (location-based services).

Yole отмечает, что в период с 2011 по 2016 гг. среднегодовой рост спроса на интегрированные сенсорные блоки (акселерометры+гироскопы+магнитометры) составляет 18,6%. Но снижение цены будет удерживать рост выручки до 11,4% CAGR, до \$2,74 млрд в 2015 г.

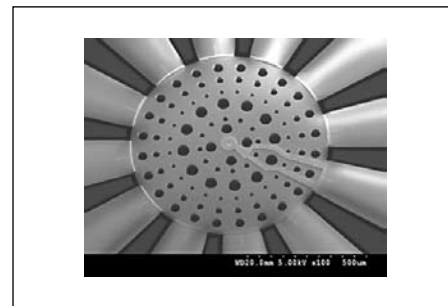


Рис. 6. Технология дисковых BAW-гироскопов Qualtré

Yole оценивает, что продажи комби-датчиков превысят \$1 млрд в 2016 г. главным образом за счет применения их в пользовательском интерфейсе и навигации, где интеграция предлагает снижение цены и футпринта.

Наиболее точные системы сейчас используются для слежения за людьми в опасных ситуациях или в беспилотных транспортных средствах, они используют IMU с девятью или десятью степенями свободы. Но для использования в сотовых телефонах такие блоки все еще велики, дороги, остается проблемой потребление мощности.

Поставщики мультисенсорных блоков вместе с ПО (Movea и Hillcrest Labs) приносят свой вклад в повышение уровней интеграции и интеллектуальности комби-датчиков.

Продажи автономных магнитометров для потребительского рынка показывают в текущем году 64%-ный рост. Но двойное ценовое давление будет удерживать рост выручки до 4,5% CAGR в течение 2016 г.

Альтернативные технологии стремятся снизить доминирование АКМ. Yamaha продвигает GMP, Aichi MI — технологию аморфных магнитоиндуктивных металлических проводов, STMicroelectronics — AMP, Freescale — магнитного туннельного перехода.

Другие компании также работают над МЭМС-магнитометрами или магнитометрами, которые легко интегрируются с МЭМС-датчиками, но продукты еще не готовы к производству. Важным направлением является повышение точности — от текущих $\pm 5^\circ$ до $\pm 1^\circ$ или 2° — для более точного наведения в системах дополненной реальности (augmented reality, AR).

Развитие LBS-сервисов повышает необходимость в датчиках инерции и давления для надежной идентификации местоположения в помещении и за его пределами, а также повышение системной интеллектуальности сервисов LBS.

Датчики давления востребованы для навигации пешеходов, дифференциации этажей и улучшения точности вычислений расстояния при наличии холмов и ступенек. Freescale, например, предложили потребителю датчик давления с точностью до 30 см.

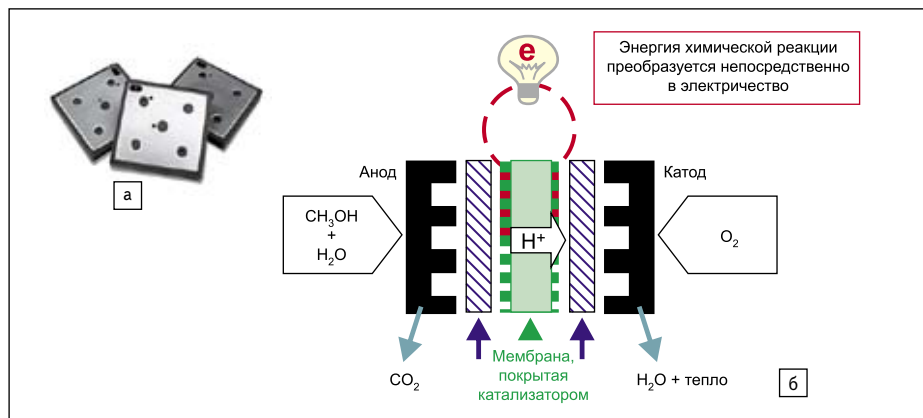


Рис. 7. Иллюстрация технологии МТИ микротопливных ячеек: а) кристаллы Mobion; б) основы технологии

Другой ключевой аспект — обработка данных от множественных датчиков на сенсорном уровне, позволяющая снижать нагрузку центрального процессора. Решение Freescale для интеграции на сенсорном уровне состоит в корпусировании микроконтроллера с акселерометром, управлении данными от акселерометра и магнитометра, что снижает объемы отправки данных к процессору в приложении в 20 раз и позволяет использовать только несколько мкВт мощности вместо 100 мкВт.

Непосредственный впрыск не только в автомобилях, но и в микротопливных ячейках

MTI MicroFuel Cells (MTI Micro) — разработчик портативных решений для обеспечения мощности под названием Mobion (рис. 7а). MTI Micro располагает технологией и рядом системных прототипов, демонстрирующих возможность использования силовых пакетов для зарядки ручной электроники без шнуров питания (cordless), а также снижение размера и улучшение в характеристиках. Пакеты MTI Micro Mobion разрабатываются для замещения Li-ion и других перезаряжаемых батарейных систем многих ручных потребительских электронных устройств и адаптированы также для использования в военных сегментах. MTI Micro получила правительственные инвестиции и работает в направлении достижения коммерциализации своих устройств.

Силовые пакеты Mobion основаны на технологии микротопливных ячеек с непосредственным впрыском метанола (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC).

Микротопливные ячейки представляют собой портативный силовой источник для маломощных электронных устройств, преобразующих химическую энергию в полезную электрическую. Микротопливная ячейка генерирует мощность во время электрохимической реакции топлива в присутствии катализатора. Микротопливные ячейки МТИ используют как топливо метанол, отличаю-

щийся доступностью и высокой энергетической плотностью, что обеспечивает длительный срок эксплуатации и увеличенную функциональность клиентских продуктов.

В микротопливной ячейке основным элементом является центральная мембрана, каждая сторона которой покрыта слоем катализатора: один для реакции с топливом, другой — для реакции с кислородом воздуха (рис. 7б). Микротопливная ячейка производит электрическую мощность, когда топливо подается к анодному слою катализатора, где взаимодействует с водой для образования протонов, электронов, диоксида углерода. Мембрана позволяет протонам передаваться к катодному слою катализатора. Это усиливает движение электронов и генерацию мощности. На катодном слое катализатора протоны и электроны рекомбинируются и взаимодействуют с кислородом, вырабатывая водяной пар.

Процесс в ячейках метанол-воздух представляет собой прямое преобразование энергии топлива на основе метанола в электрическую мощность, где на выходе образуется только два продукта — диоксид углерода и водяной пар.

Достигается увеличение времени работы без перезарядки (run time) от двух до десяти раз в сравнении с существующими батарейными технологиями. Что особенно важно для беспроводных и других электронных ручных устройств, они будут полностью беспроводными, способными работать без необходимости подключения к стенной розетке для перезарядки, освобождают пользователей от ношения проводного адаптера и ожидания.

Кристаллы МТИ Mobion основаны на архитектуре, отличающейся меньшей сложностью внутренней конструкции топливных ячеек, чем у конкурентов, сниженной ценой производства, повышенными характеристиками и ведущей к дальнейшей системной миниатюризации. Эти факторы важны для успешного позиционирования топливных ячеек в сегменте потребительской электроники. Технология МТИ Micro Mobion, в частности,

упрощает традиционный подход к системному дизайну, в котором вода подкачивается от катода к анодной стороне для протекания химической реакции и производства энергии с применением внешних средств. Технология МТИ Micro Mobion позволяет доставлять неразбавленный метанол прямо к анодной стороне, что исключает необходимость в подаче воды в систему и в микропроводах.

Система МТИ Micro Mobion снижает число частей и дает возможность не использовать сложные компоненты, упрощая систему и открывая таким образом производственные и рыночные возможности. Система также масштабируема для широкого диапазона опций — от аксессуаров до батарейного замещения — в коммерческом и военном сегментах рынка. Системные прототипы, которые были разработаны, имеют меньшие размеры и улучшенные характеристики.

Системы Mobion работают в температурном диапазоне 0...+40 °С при любом уровне влажности. Мощность, которую продемонстрировали устройства, — 84 мВт/см² при производстве 1,4 Вт·ч/см³. По заявлениям компании, это в два или три раза больше, чем у конкурентов.

Кристаллы Mobion разработаны для высокообъемного массового производства и находятся в стадии коммерциализации. Ведутся также разработки по интеграции большей функциональности в кристаллы при снижении цены части Mobion размером 9 см³ в устройстве, помещаемом в ладони.

МЭМС-спикеры

Sony и австралийская группа Audio Pixels Holdings разрабатывают недорогие цифровые МЭМС-спикеры с повышенными в сравнении с обычными технологиями спикеров характеристиками — в корпусе толщиной порядка 1 мм. Компании работают над доведением технологии до массового производства.

В технологиях Audio Pixels используются новые методы для генерации звуковых волн непосредственно от цифрового аудиопотока с использованием недорогих МЭМС-элементов.

Цифровая платформа реконструкции звука Digital Sound Reconstruction platform от Audio Pixels способствует эволюции рынка аудиоспикеров — к меньшим, точным, более чисто звучащим устройствам, более эффективным с точки зрения потребления мощности, а также эволюции видеодисплеев от больших и тяжелых аналоговых мониторов к цифровым плоскостельным.

После завершения фаз разработки и тестирования оба партнера надеются перейти в стадию массового производства. В дальнейшем Audio Pixels планирует продавать и/или лицензировать свои продукты производителям спикеров и потребительских электрон-

ных устройств, которые могут использоваться как автономные спикеры или каскадироваться на одном кристалле для достижения желаемых характеристик спецификации.

МЭМС-теги

STMicroelectronics и Bluechip сотрудничают в производстве следящих МЭМС-тэгов (рис. 8), предназначенных для применений в области здравоохранения, и прежде всего для биобанков.

Bluechip разрабатывает систему радиочастотной идентификации (RFID), в которой используются RFID MEMS-теги, способные работать при экстремальных температурах. Коммерческая доступность технологии благодаря сотрудничеству с STM ожидается к началу 2012 г.

Биобанки — динамично растущая технология. По данным Visiongain, данный рынок, который в 2009 г. составлял \$8 млрд, достигнет \$45 млрд к 2025 г.

Следящий тэг — механическое устройство, способное работать и читать ID-образцы при экстремально высоких и низких температурах, устойчивое к гамма-излучению. Уникальные тэги уплотняются в тестовые трубки. Это решение превосходит традиционные методы — метки, штрих-коды, RFID и обеспечивает высокий уровень достоверности данных.

Тэги способны измерять температуру и передавать эту информацию считывающему устройству, которым является Bluechip Matchbox reader. В оценочном комплекте тэги интегрированы в трубки и флаконы, вместе с ними использован беспроводной протокол для захвата данных МЭМС и ПО Bluechip Stream. Matchbox Retriever wand включает 25-мм антенну, которая может быть помещена в бак с жидким водородом для захвата ID без удаления флаконов из бака.

Система предназначена для фармацевтических и других компаний сферы здравоохранения, которые работают с сотнями и тысячами термочувствительных продуктов, хранящихся при температурах $-196...+200$ °C. Тэги Bluechip могут интегрироваться при производстве в пластиковые контейнеры, которые можно подвергать стерилизации. Bluechip разработали MEMS-тэг, достаточно малый для прикрепления к криогенным трубкам, названный MEMS-ID, способный выдерживать стерилизацию. Пассивный тэг размерами 4 мм по длине и ширине содержит массив металлических резонаторов, построенных на кремниевом субстрате с печатной антенной. Резонаторы вибрируют при получении ВЧ-сигнала от считывающего устройства, излучают сигнал на различных частотах, который преобразуется в уникальный бинарный ID. Диапазон считывания тэга — порядка 3–5 мм, хотя Bluechip работает над созданием нового поколения устройств с антеннами различных размеров, повышающих данный диа-



Рис. 8. МЭМС-теги Bluechip и STM

пазон. Другие ключевые рынки применения MEMS-тэгов — безопасность, оборона, промышленность, авиация, космонавтика.

МЭМС-двигатель для часов

МЭМС-двигатель для часов, разработанный EPFL, представляет собой электромагнитный трехфазный двигатель, позволяющий создавать более эффективные (в три раза) часы, чем существующие. Помимо длительного срока службы наручные часы могут объединять в себе функции телефона, компаса и т. д., для которых важно низкое энергопотребление. Электромагнитный МЭМС-привод, в котором применен фиксированный магнит и три фазы, построен на основе технологии МЭМС и включает ротор и статор. Тем не менее оснащение двигателя датчиками для связи с ротором остается сложной и дорогостоящей задачей, для решения которой ученые работают над применением методов обработки сигнала с использованием напряжения тока двигателя.

МЭМС-центрифуга

МЭМС-центрифуга на кристалле разработана исследователями UCLA и Калифорнийским институтом наносистем (California NanoSystems Institute). Центрифуга работает на основе принципов микрожидкостной динамики. Посредством вихревых методов в камере она разделяет, сортирует и улавливает клетки. Отдельные процессы на кристалле со скоростями расхода порядка мм в минуту могут быть включены параллельно с другими кристаллами, процессы в которых протекают быстрее. Данная работа открывает новые возможности для автоматизации, недорогих и точных применений диагностики клеток и образцов в промышленных масштабах. ■

Продолжение следует