

МЭМС РЫНОК СТОЙКИЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫЙ РОСТ

В.Майская

Время от времени появляются новые технологии, воспринимаемые как необходимые для совершенствования потребительского ландшафта и в конце концов изменяющие мир, производительность и энергетический баланс мировой промышленности. Сегодня к такой технологии можно отнести технологию микроэлектромеханических систем (МЭМС), продажи которых бурно растут. Разумные, дешевые и, конечно, малогабаритные МЭМС-датчики и исполнительные механизмы (актюаторы) "штурмуют" сектор потребительской электроники, проникая на рынки традиционных бытовых устройств – от разумных смартфонов, видеоигр до видеокамер, акустических систем и микрофонов. Ожидается, что в ближайшее время они найдут применение в самых невероятных приложениях и проложат путь к формированию обширной сети, получившей название "Интернет вещей" (Internet of Things, IoT) и состоящей из триллионов соединенных между собой приборов, позволяющих контролировать и управлять практически всеми человеческими действиями. В итоге при прогнозируемых совокупных темпах годового прироста рынка МЭМС 12–15% можно ожидать, что к 2046 году объем их продаж достигнет 1 трлн. долл. Но как этого добиться?

РЫНОК МЭМС

Транзисторная и МЭМС-технологии появились практически одновременно в конце 1940-х и начале 1950-х годов в результате работ компании Bell Labs. Но долгое время МЭМС-приборы предназначались для промышленных и автомобильных приложений. В результате если рынок полупроводниковых приборов к 2011 году достиг ~300 млрд. долл., то продажи МЭМС-компонентов составили всего 10,2 млрд. долл. На рост рынка МЭМС повлиял на интерес промышленности потребительской электроники, особенно изготовителей смартфонов и планшетных компьютеров к МЭМС-датчикам, вызвавший взрыв спроса и новые области их применения. Ряд экспертов считают, что стремительный рост продаж МЭМС для потребительской техники – результат решения

Стива Джобса превратить сотовый телефон в мощный компьютер. Как бы то ни было, к 2011 году на рынке сформировалась потребность в несколько миллиардов МЭМС инерциальных датчиков (акселерометров, гироскопов), магнитометров микрофонов, датчиков давления и РЧ МЭМС. В 2011 году каждый из более 300 млн. отгруженных смартфонов содержал четыре-девять МЭМС-датчиков. В результате только для мобильных систем их потребовалось более 2 млрд. И это лишь начало. Растут не только продажи смартфонов, которые к 2017 году, по прогнозам, достигнут 1 млрд. устройств. Увеличивается и число МЭМС-датчиков в смартфонах. Например, компания Nokia для подавления шумов и оснащения смартфона функцией проведения видеоконференций планирует установить в нем одних МЭМС-микрофонов

до четырех-восьми штук. МЭМС и другие датчики, такие как преобразователи изображения, становятся для электронных систем тем же, что пять органов чувств для человека.

Согласно данным отчета компании Yole Development за 2011 год "Статус МЭМС-промышленности", в последующие шесть лет будет наблюдаться стабильный рост рынка МЭМС* при совокупных темпах годового роста (СТГР) продаж в натуральном выражении 20 и 13% в стоимостном [1]. В результате мировой рынок МЭМС в 2017 году составит 21 млрд. долл. (рис.1) Прогнозируемые темпы прироста доходов несколько ниже "прыжка" в 17% в 2011 году. Причина - некоторое сокращение первоначально высокого спроса и снижение цен на инерциальные датчики для смартфонов, а также дальнейшее постепенное сокращение спроса на датчики для автомобильной промышленности. Высокие темпы роста ожидаются для модулей движения (на основе датчиков движения, акселерометров, гироскопов, магнитометров и комбинированных датчиков), доля которых составит ~25% рынка МЭМС. Не малый рост и у микродозаторов - 23% рынка.

В последующие три года по мере роста спроса ожидается увеличение продаж датчиков движения. Но из-за конкуренции, падения цен, стабилизации рынка и тенденции к интеграции инерциальных датчиков СТГР этого крупного сектора рынка составят всего 8%. Тем не менее, к 2017 году объем продаж датчиков движения достигнет 5,2 млрд. долл.

В 2010 году с выпуском Apple iPhone 4 успешно стартовали продажи МЭМС трехосевых гироскопов, которые теперь используются и в Android мобильных телефонах, и сегодня трехосевые гироскопы стали ходовым изделием для потребительской электроники. Доля продаж гироскопов для смартфонов, равная 9% в 2010 году, в 2011 возросла до 36%, а через два-три года в каждом смартфоне можно будет найти гироскоп. Многие изготовители мобильных телефонов, стремящиеся повысить конкурентоспособность своих изделий за счет

* По определению Yole, МЭМС – трехмерная структура в основном с физическими и механическими, а не электронными свойствами, изготавливаемая с помощью полупроводниковой технологии. Как правило, МЭМС имеют перемещаемые элементы или полости, но могут также содержать резонаторы на объемных акустических волнах, пьезо- и термические элементы. Кроме того, поскольку магнитометры, в принципе не относящиеся к МЭМС, все чаще можно встретить в комбинированных датчиках наряду с инерциальными приборами, компания включила их в рассматриваемый рынок МЭМС.

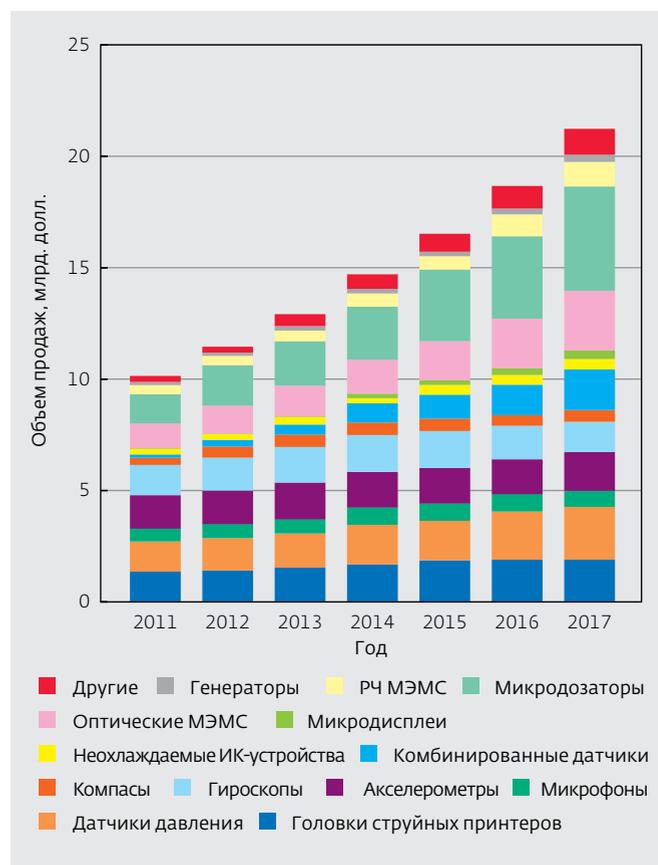


Рис.1. Прогноз динамики рынка МЭМС

стабилизации формируемого изображения и улучшения тем самым качества фотографий, начали устанавливать в мобильник два гироскопа.

Несмотря на высокий спрос на инерциальные датчики со стороны изготовителей потребительских систем, компания Yole предвидит сокращение их продаж. Этого мнения придерживается и другая авторитетная прогностическая компания IHS iSupply [2], по данным которой к 2014 году 100% смартфонов и 50% многофункциональных телефонов с расширенными возможностями будут иметь акселерометры, после чего темпы роста их продаж сократятся. В результате, по прогнозам iSupply, рост доходов рынка МЭМС для мобильных устройств за период с 2011 по 2016 год сократится с 29 до 9% [3]. В связи с этим возникает вопрос: сохранятся ли достаточно высокие темпы роста продаж инерциальных датчиков?

Правда, это сокращение продаж будет компенсировано ростом спроса на комбинированные датчики (акселерометр/гироскоп, акселерометр/магнитометр, возможно, еще и с третьим типом датчика), рынок которых сформировался в 2011 году в результате освоения массового

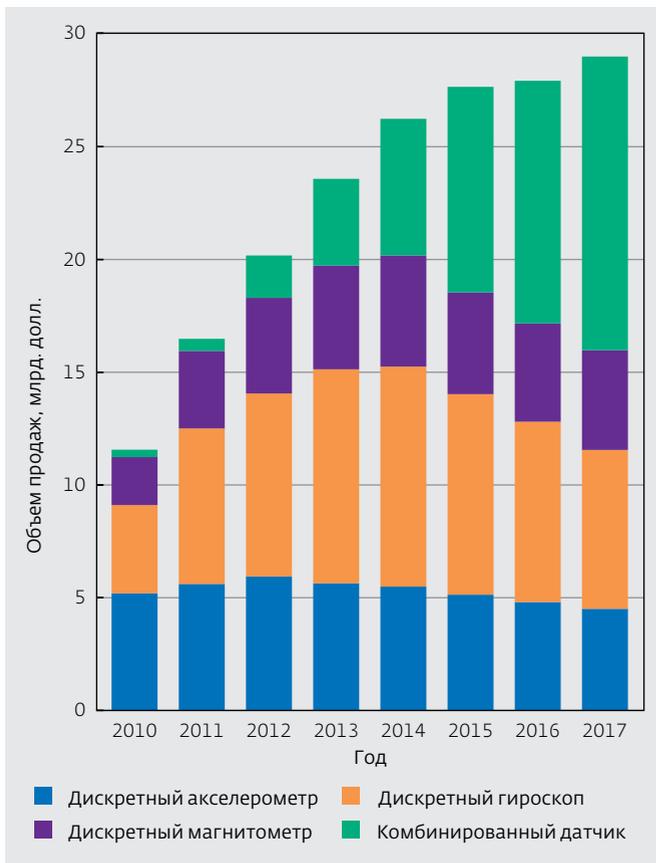


Рис.2. Динамика рынка инерциальных и комбинированных МЭМС-датчиков для потребительских изделий

производства датчика с шестью степенями свободы (6 Degrees-of-Freedom, 6DoF), содержащего трехосевые акселерометр, магнитометр и только одну ASIC-микросхему.

Популярность комбинированных датчиков стремительно растет, и через два-три года на рынке будут представлены датчики с шестью и девятью степенями свободы, выпускаемые успешно развивающимися компаниями. В связи с ростом продаж комбинированных датчиков компания Yole при подготовке прогноза развития рынка МЭМС на 2012–2017 годы впервые выделила отдельный сектор таких датчиков, объем продаж которых возрастет с менее 100 млн. до 1,7 млрд. долл. (рис.2). Правда, по мнению руководства компании STMicroelectronics, широкое применение комбинированных датчиков следует ожидать лишь через полтора года.

Рынок МЭМС по-прежнему сильно фрагментирован и число их крупномасштабных приложений невелико. Надежду на формирование больших секторов рынка МЭМС изготовители возлагают на новые приборы и близкие к завершению

разработки, особенно предназначенные для мобильных устройств (РЧ МЭМС настройки антенн и джойстики для планшетных ПК, генераторы, МЭМС-актюаторы для механизмов автофокусировки и т.п.). Способствовать росту рынка МЭМС будут и новые датчики влажности и температуры, микрофоны, обеспечивающие высококачественное воспроизведение звука, газовые датчики для приборов анализа дыхания, датчики уровня загрязнения окружающей среды и уровня УФ-излучения для смартфонов, а также новые актюаторы – приборы накопления энергии окружающей среды для замены аккумуляторов, МЭМС-системы доставки лекарств (например, ампулы инсулина) больным. Существующие датчики в ряде случаев благодаря новым типам комбинированных устройств (например, с датчиками давления) смогут завоевать новые сектора рынка.

Устойчивый рост спроса компания Yole прогнозирует для датчиков давления со стороны как изготовителей автомобильной электроники, так и сотовых телефонов, в которых они выполняют функции навигации внутри помещений и определения местонахождения объекта. Аналитики компании Juniper Research (Великобритания) считают, что для повышения точности услуг по определению местоположения мобильного телефона пользователя (location-based services) уже к 2016 году потребуется 4·10⁹ МЭМС-датчиков [4]. В результате в 2017 году продажи МЭМС этого типа составят 2,2 млрд. долл. при СГТР 8%. По прогнозам HIS iSupply, к 2015 году датчики давления по доходам от продаж превзойдут МЭМС-акселерометры (лидер на рынке МЭМС) и гироскопы [2]. Это объясняется в первую очередь достаточно высокой стоимостью этих МЭМС: от 1 долл. за простые одноразовые датчики для медицинских приложений до нескольких десятков долларов за прибор для промышленных и автомобильных систем и сотен долларов за специализированные приложения, такие как гидравлические системы летательных аппаратов и аппаратура измерения данных. Положительно влияет и спрос на датчики давления для автомобильной промышленности. Так, с конца 2007 года все американские автомобили выпускаются с блоками мониторинга состояния шин (TPMS) на основе таких датчиков. В 2012 аналогичная программа должна была вступить в силу в Европе. Дополнительно росту доходов от продаж МЭМС для автомобильной промышленности будут способствовать и новые приложения. Так, в странах БРИК (Бразилия, Россия, Индия, Китай) благодаря применению МЭМС в системах

безопасности автомобилей рынок МЭМС за шесть лет возрастет на 400 млн. долл. Правда, возникает вопрос, насколько сократится потребление датчиков для систем управления двигателем в гибридных и электронных машинах. К другим перспективным типам МЭМС для автомобильных систем относятся фильтры частиц для систем непосредственного впрыска топлива, в которых заинтересованы автомобилестроители Европы, МЭМС для выполнения электронного вызова при ДТП. Окажет положительное влияние и тенденция к применению нескольких турбокомпрессоров для создания более дружелюбных среде моторов.

Продажи оптических МЭМС к 2017 году составят 2,6 млрд. долл. при СТГР за рассматриваемый период 16%, что превысит этот показатель для всего рынка МЭМС. В этом секторе рынка в основном представлены МЭМС для проекционных систем воспроизведения изображения. Но сейчас наблюдается успешное формирование рынка МЭМС-пикопроекторов. Основные игроки в этом секторе демонстрируют опытные образцы встраиваемых изделий для сотовых телефонов. Для проекционных систем предпочтение отдано цифровым микрозеркальным устройствам (DLP). Правда, благодаря разработке лазеров непосредственного зеленого излучения появилась возможность улучшения лазерных проекционных систем, хотя из-за необходимости применения двух ASIC остались проблемы уменьшения габаритов и снижения стоимости систем. Интерес представляют и МЭМС оптических актюаторов для механизмов автофокусировки камер мобильных телефонов.

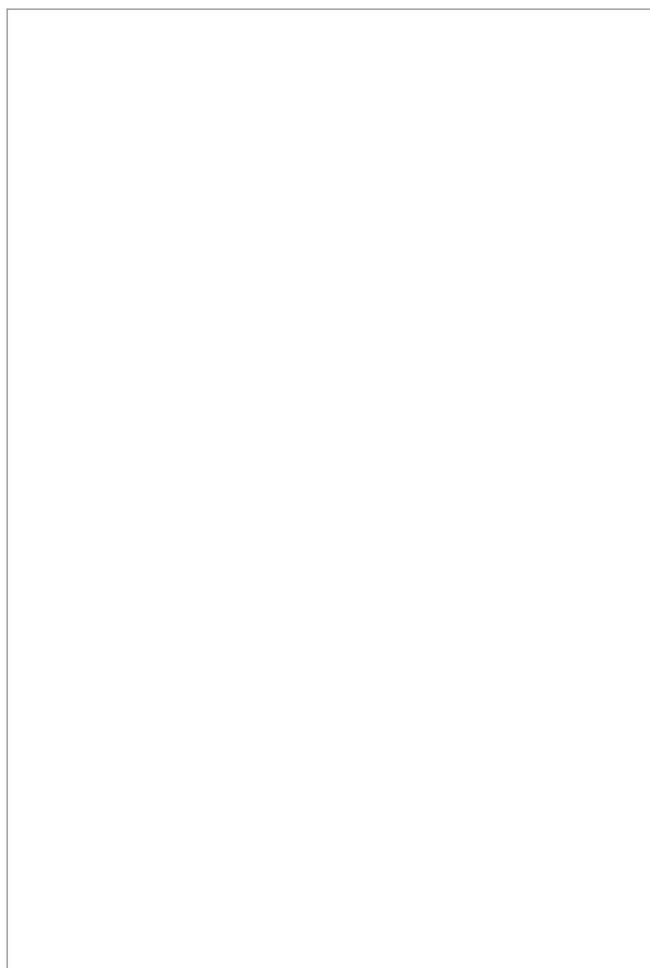
Рынок РЧ МЭМС (коммутаторов, конденсаторов переменной емкости, кремниевых МЭМС-генераторов, фильтров и умножителей на объемных акустических волнах), по оценкам Yole, к 2017 году достигнет 1 млрд. долл. при СТГР 16%. Постоянен спрос на МЭМС-генераторы компании SiTime, активно используемые в частности Xilinx для оптимизации характеристик FPGA. В 4G-мобильных устройствах LTE-стандарта целесообразно выполнять настройку антенны одновременно со скачкообразным изменением частоты. Наилучшие рабочие характеристики и низкие производственные затраты присущи МЭМС-антенным согласующим устройствам. Первый сотовый телефон с МЭМС этого типа представила компания WiSpry на выставке бытовой электроники (CES) этого года. Все это позволило обозревателям компании Yole прогнозировать достаточно большой спрос на МЭМС антенных

тюнеров и средств настройки 4G-телефонов. Правда, широко применяться они начнут лишь после того, как их стоимость будет ниже 0,30 долл., но и в этом случае на их долю придется лишь часть рынка этих систем.

Yole Development ожидает, что на рынке РЧ МЭМС появятся такие крупные компании, как NXP, SiLabs, VTI и Sand9. Но пока мнение большинства экспертов относительно перспектив развития радиочастотных МЭМС неоднозначно.

Таким образом, можно сделать вывод, что развитие рынка МЭМС в основном вызвано ростом спроса на датчики, особенно предназначенные для беспроводных устройств и Интернета. А это связано с появлением Интернета вещей. Если добавить МЭМС-датчики давления, влажности, температуры, расходомеры, а также успехи в области беспроводных сенсорных сетей и технологии аккумулирования энергии из окружающей среды, то приложения, поддерживаемые Интернетом вещей, окажутся бесчисленными.

Что же предпринимается для развития МЭМС-технологии?



ТЕХНОЛОГИЯ РОСТА

Основные тенденции в области разработки МЭМС, как и в целом в электронике, – сокращение их энергопотребления (ток инерциальных датчиков уже составляет несколько микроампер) и уменьшение габаритов. Так, если в 2008 году площадь трехосевого акселерометра составляла 4–5 мм², то в 2011 она уже была равна 2 мм² (рис.3) [5, 6]. Ожидается, что площадь трехосевых акселерометров следующего поколения может составить 1 мм². Эта же тенденция характерна и для гироскопов. В 2007 году размер типового двухосевого гироскопа был равен 6×8 мм, сегодня площадь трехосевого гироскопа компании InvenSense – 4 мм². Стоимость современных трехосевых гироскопов та же, что двухосевых версий в 2007 году. Уменьшаются и размеры используемых микросхем ASIC, которые изготавливаются с 0,18–0,35-мкм топологическими нормами. Уменьшаются размеры магнитометров и комбинированных датчиков. Соответственно упали и издержки их производства.

Руководство компании Robert Bosch отмечает, что размеры и толщину датчиков давления для потребительских систем удалось сократить быстрее, чем ожидалось, благодаря совершенствованию системы управления производственным процессом и освоению выпуска многомиллионных партий изделий в месяц, а не в год. STMicroelectronics смогла уменьшить размеры структур выпускаемых МЭМС и обеспечить их высокие характеристики благодаря единой платформе технологических процессов изготовления всех ее акселерометров и гироскопов.

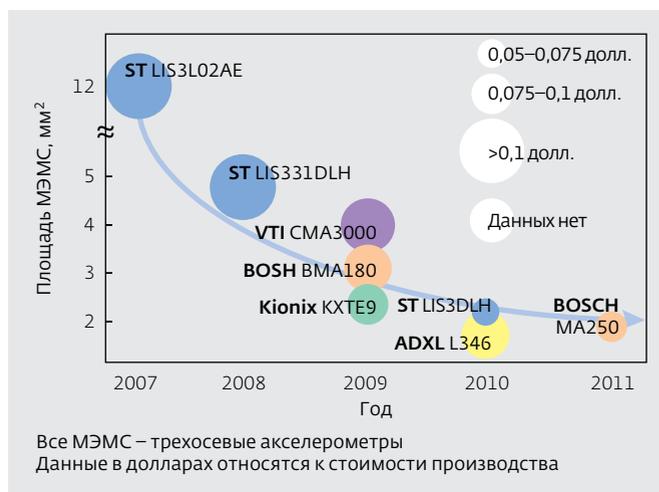


Рис.3. Изменение размеров МЭМС-акселерометров

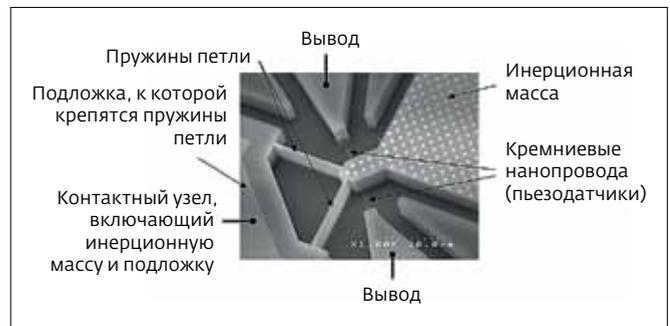


Рис.4. Структура М&NEMS-датчика

Интерес представляют работы Лаборатория прикладных исследований в области электроники Leti, курируемой французским атомным ведомством (Atomic Energy Commission, CEA), по уменьшению размеров МЭМС-датчиков без ухудшения их характеристик. Предложенная технология, получившая название М&NEMS, объединяет структуры микро- и наноэлектромеханических систем [7]. Один конец МЭМС-структуры толщиной 15 мкм, представляющей собой инерционную массу, подвешен с помощью петли, укрепленной на кремниевой подложке. К МЭМС-структуре прикреплен навесной кремниевый нанопровод, который выполняет функцию тензодатчика (рис.4). Поперечное сечение датчика – 250×250 нм. Вращение МЭМС инерционной массы, вызываемое ускорением, приводит к возникновению механического напряжения в нанопроводе и к заметному изменению его сопротивления. Благодаря малому поперечному сечению нанопровода и навесной инерционной массе концентрация механического напряжения велика, что позволяет получить высокую чувствительность изготовленных по М&NEMS-технологии акселерометров и гироскопов. А наличие в структуре двух элементов различной толщины позволяет одной схеме выполнять измерения как в плоскости, так и вне плоскости перемещения инертной массы. Таким образом, разработанная в Leti технология позволяет изготавливать трехосевые акселерометры площадью 1 мм², трехосевые гироскопы площадью менее 2,5 мм² и девятиосевые комбинированные датчики (трехосевые акселерометр, гироскоп и магнитометр) площадью менее 5 мм². Изготавливаются М&NEMS-датчики по стандартной КМОП-технологии за исключением процесса осаждения слоя магнитного материала магнитометра.

Сейчас CEA-Leti ведет работы по применению М&NEMS-технологии для создания микрофона

и сверхминиатюрного датчика давления с высокими характеристиками. Таким образом, основные датчики, требуемые для большинства приложений, могут быть изготовлены в одной микросхеме. И последнее, но не менее важное сообщение SEA-Leti касается передачи M&NEMS-технологии компании Tronics Microsystems, которая вскоре сможет представить на рынке произведенные с ее помощью изделия.

Сегодня все более важную роль играют методы корпусирования и сами корпуса МЭМС. Замена стеклокерамического припоя металлическим при герметизации прибора позволила значительно уменьшить площадь кристалла. Так, компания STMicroelectronics благодаря применению для уплотнения эвтектического сплава золота уменьшила площадь герметизированного трехосевого акселерометра модели LIS3DH с 4,7 до 2,1 мм². Дальнейшее уменьшение размеров МЭМС-датчиков обеспечат корпусирование на уровне кристалла и уменьшение размеров контактных площадок за счет применения сквозных отверстий через кремний (TSV) или стекло. Освоение такой технологии может привести к росту стоимости обработки пластин более чем на 100 долл., но уменьшение в итоге размера структуры позволит снизить стоимость конечного изделия.

Появление комбинированных датчиков, содержащих в одном корпусе несколько типов МЭМС, совместно пользующихся одной специализированной схемой ASIC, очевидно, приведет к усложнению операций корпусирования, сборки и испытания. В результате их стоимость может составить 35–65% от всей стоимости модуля МЭМС-датчика. Для высокоскоростной обработки возросшего объема данных комбинированных модулей, очевидно, потребуются модули, изготавливаемые по промежуточной 2.5D-технологии, и освоение TSV-технологии.

Корпуса для МЭМС-модулей, представляющих собой систему в корпусе (System-in-Package, SiP), сложнее стандартных корпусов микросхем. Во многих случаях они должны обеспечивать доступ МЭМС-датчиков к окружающей среде. Это накладывает специальные требования к их конструкции – наличие полости или отверстия в подложке, металлического вывода у датчиков давления и микрофонов, прозрачного окна у оптических МЭМС. Необходима полностью вакуумная герметизация структуры прибора. Производители МЭМС-датчиков не располагают средствами разработки заказных корпусов и поэтому выдвигают требование к созданию стандартных платформ корпусов. Конечно,

корпуса разнообразных МЭМС должны различаться. Но возможны несколько типов стандартных платформ. Например, корпусирование на уровне пластины (WLP) и TSV-межсоединения, SiP-микромодули с микровыводами или литые корпуса с углублением для схемных матриц. Ряд поставщиков подложек и субплатформ в области корпусирования микросхем разрабатывают библиотеки стандартных блоков или стандартных платформ, которые позволят облегчить разработку корпусов типовых семейств.

Стоимость испытаний и калибровки датчиков составляет 18% от общей стоимости производства. При этом увеличение сложности испытаний и калибровки комбинации датчиков модуля требует применения дорогого оборудования, в ряде случаев работающего параллельно для повышения производительности. Стремление к увеличению объема производства и снижению затрат на него заставляет производителей все чаще обращаться к поставщикам стандартного высокопроизводительного оборудования. Больше объем производства – больше стандартных платформ.

Серьезно изменились и принципы испытаний комбинированных датчиков. Помимо обычных электрических испытаний элементов на пластине и механических и функциональных испытаний корпусированных МЭМС необходимо тестировать и калибровать модули комбинированных датчиков. Если в корпус комбинированного датчика входит микроконтроллер, следует проверять соединение датчика с ним. Для обеспечения высокой эффективности тестирования многоосевых приборов и модулей с различными датчиками ведется совместная разработка измерительного оборудования изготовителями датчиков и поставщиками этого оборудования. В результате компании по сборке и испытаниям комбинированных датчиков могут предложить контрактным производителям МЭМС аутсорсинговые услуги по испытаниям.

Освоение крупномасштабного производства МЭМС и сокращение объема выпуска специализированных изделий открывает большие возможности для производителей полупроводниковых микросхем. GlobalFoundries – третий по размеру контрактный производитель микросхем – утверждает, что применение установок контроля, принятых при производстве КМОП-микросхем на каждом этапе изготовления МЭМС, позволило за два года освоить массовое производство изделий, отвечающих предъявляемым заказчиком техническим требованиям. Компания InvenSense, не имеющая собственного производства, наращивает серийный выпуск разработанных ею МЭМС-гироскопов на предприятиях контрактных производителей TSMC и GlobalFoundries. Благодаря производству МЭМС оборот TSMC увеличился на 15%, группы фабрик по производству микросхем X-FAB Silicon Foundries – на 33%.

На примере инерциальных и комбинированных датчиков рассмотрим достижения МЭМС-промышленности.

РАЗРАБОТКИ МЭМС

Инерциальные датчики

Работы по совершенствованию инерциальных датчиков направлены на получение 8- и 14-рядного разрешения акселерометров, снижения шума и потребляемой энергии гироскопов, увеличение динамического диапазона и разрешения магнитометров.

Самый успешный тип инерциального датчика основан на емкостном преобразователе, поскольку в этом случае сенсорный элемент прост, не требует применения экзотических материалов, энергетически эффективен и термостабилен.

В мае 2012 года компания Analog Devices представила первый в отрасли серийный аналоговый трехосевой МЭМС-акселерометр ADXL377, позволяющий измерять ускорение, возникающее при сильных ударах и вибрациях, в диапазоне $\pm 200g$ без насыщения выходного сигнала [8]. Ширина полосы датчика задается внешними конденсаторами в пределах 0,5–1200 Гц для оси Z и 0,5–1600 Гц для осей X и Y. Среднее значение потребляемого тока датчика – 300 мкА. Работает он от одного источника питания на напряжение 1,8–3,6 В. Выдерживает ударную нагрузку до 10 000g. Поставляется в миниатюрном корпусе LFCSP_LQ размером 3×3×1,45 мм.

Благодаря сочетанию широкого диапазона измерений и аналогового выходного сигнала, обеспечивающего непрерывный обзор воздействия, акселерометр перспективен для выявления травматических повреждений головного мозга. Широкое применение акселерометр ADXL377 может найти и для измерения уровня вибрационных и ударных воздействий в промышленном оборудовании, работающем при экстремальных нагрузках, и в системах защиты от механических повреждений.

Но в связи с развитием технологии комбинированных датчиков возникает вопрос, будут ли акселерометры традиционной архитектуры перспективны для комбинированных датчиков?

Гироскопы

Самый популярный сегодня тип гироскопа – трехосевой. До последнего времени трехосевые гироскопы поставляли две компании – STMicroelectronics и InvenSense. Выпущенный в конце 2011 года компанией STMicroelectronics для смартфонов и планшетных ПК трехосевой гироскоп модели L3G4IS представляет собой двухъядерное решение – содержит два гироскопа [9]. Один предназначен для стабилизации изображения, второй – для распознавания движения и жестикуляции. Из двух цифровых выходов гироскопа нужный для исполнения выбранной функции выход автоматически задается встроенным блоком ASIC (рис.5). Для гироскопа, взаимодействующего с пользователем, возможен выбор одной из трех шкал чувствительности (250/500/2000 град./с). Для гироскопа оптической стабилизации изображения чувствительность составляет ± 65 град./с.

В модели предусмотрены режимы пониженного потребления энергии и ожидания, а также встроенный блок FIFO-памяти. В датчик входят и такие дополнительные компоненты, как

конфигурируемые фильтры низких и высоких частот, датчик температуры. Данные датчика выводятся через интерфейсы I²C и SPI. Напряжение питания равно 2,4–3,5 В. Диапазон рабочих температур составляет -30...85°C. Изготовлен гироскоп на кремниевой подложке по разработанному компанией для производства инерциальных датчиков и актюаторов процессу микрообработки. Поставляется в корпусе LGA-типа размером 4×4×1 мм. Правда, поскольку для обработки сигнала датчиков требуется сложная специализированная ASIC-микросхема, это решение, вероятно, не самое дешевое.

InvenSense в июне 2012 года объявила о выпуске микросхемы трехосевого МЭМС-гироскопа модели MPU-3300 [10]. Микросхема содержит 16-разрядные АЦП, программируемые цифровые фильтры, встроенный температурный датчик, SPI- и I²C-интерфейсы. Гироскоп рассчитан на работу в диапазоне температур -40...105°C. В этом диапазоне коэффициент изменения чувствительности составляет ±2%, изменение нулевого

сигнала - ±0,14 град./с/°C. MPU-3300 отличается лучшими на сегодняшний день шумовыми характеристиками: 0,005 град./с/√Гц против 0,01–0,03 град./с/√Гц для представленных на рынке МЭМС. Потребляемая мощность не превышает 10 мВт. Поставляется гироскоп в корпусе QFN размером 4×4×0,9 мм.

Предназначен для бортовых систем данных о курсе и высоте, которые можно найти в аэрокосмических комплексах, робототехнике и прочих приложениях, где требуется чрезвычайно высокая стабильность работы. Перспективен гироскоп и для применения в навигаторах промышленных транспортных средств, летательных аппаратов и судов. Малая потребляемая мощность гироскопа привлекает создателей малогабаритных устройств контроля материально-производственных запасов. К другим возможным приложениям MPU-3300 относятся устройства стабилизации антенн, прецизионные роботы, геодезические инструменты, беспилотники, промышленное и сельскохозяйственное оборудование, строительная техника.

Магнитометры

Магнитометры, как правило, выполняются на основе эффекта Холла. Основной их поставщик – компания АКМ, на долю изделий которой приходится 78% объема продаж в этом секторе рынка. Но изучение магнитного импеданса, гигантского магнетосопротивления и анизотропного магнетосопротивления изменили подход к технологии МЭМС-магнитометров. И другие поставщики МЭМС-магнитометров (от STMicroelectronics и Robert Bosch до MEMSIC) считают, что их альтернативные технологии позволяют изготавливать более точные устройства с меньшим энергопотреблением, которые легче, чем магнитометры АКМ, интегрировать с изготавливаемыми ими МЭМС-приборы.

В качестве примера значительного расширения функциональных возможностей МЭМС-магнитометров основатель, президент и генеральный директор компании MEMSIC Янг Жао приводит разработанный 14-разрядный трехосевой анизотропный магнеторезистивный (Anisotropic MagnetoResistance, AMR) магнитометр модели ММС3316хМТ (рис.6) [11]. Его шкала измерений составляет ± 16 Гс при полномасштабной

точности $\pm 2\%$, гистерезисе 0,5% и воспроизводимости 0,5% по каждой оси. Напряжение питания – 1,8–3,3 В, потребляемый ток – 0,1 мА при скорости передачи данных 7 выб./с, диапазон рабочих температур от -40 до 85°C . Смонтирован в корпус LGA-типа размером $2 \times 2 \times 1$ мм.

Магнитометр представляет собой завершенное измерительное устройство, содержащее на кристалле сигнальный процессор и I²C-интерфейс, что позволяет подключать его непосредственно к микропроцессору и тем самым отказаться от АЦП и сэкономить ценную площадь печатной платы. Он реализует разработанный MEMSIC передовой алгоритм сенсорного интегрирования, который удаляет помехи, вызываемые тяжелыми и мягкими магнитными частицами. Поскольку магнитометр нечувствителен к внешним магнитным помехам, он перспективен для применения в разнообразных приложениях – смартфонах, планшетных ПК, игровых консолях, электронных компасах, GPS-навигаторах.

Компания Bosch в своих магнитометрах также отказалась от использования эффекта Холла. Магнитометры компании размером

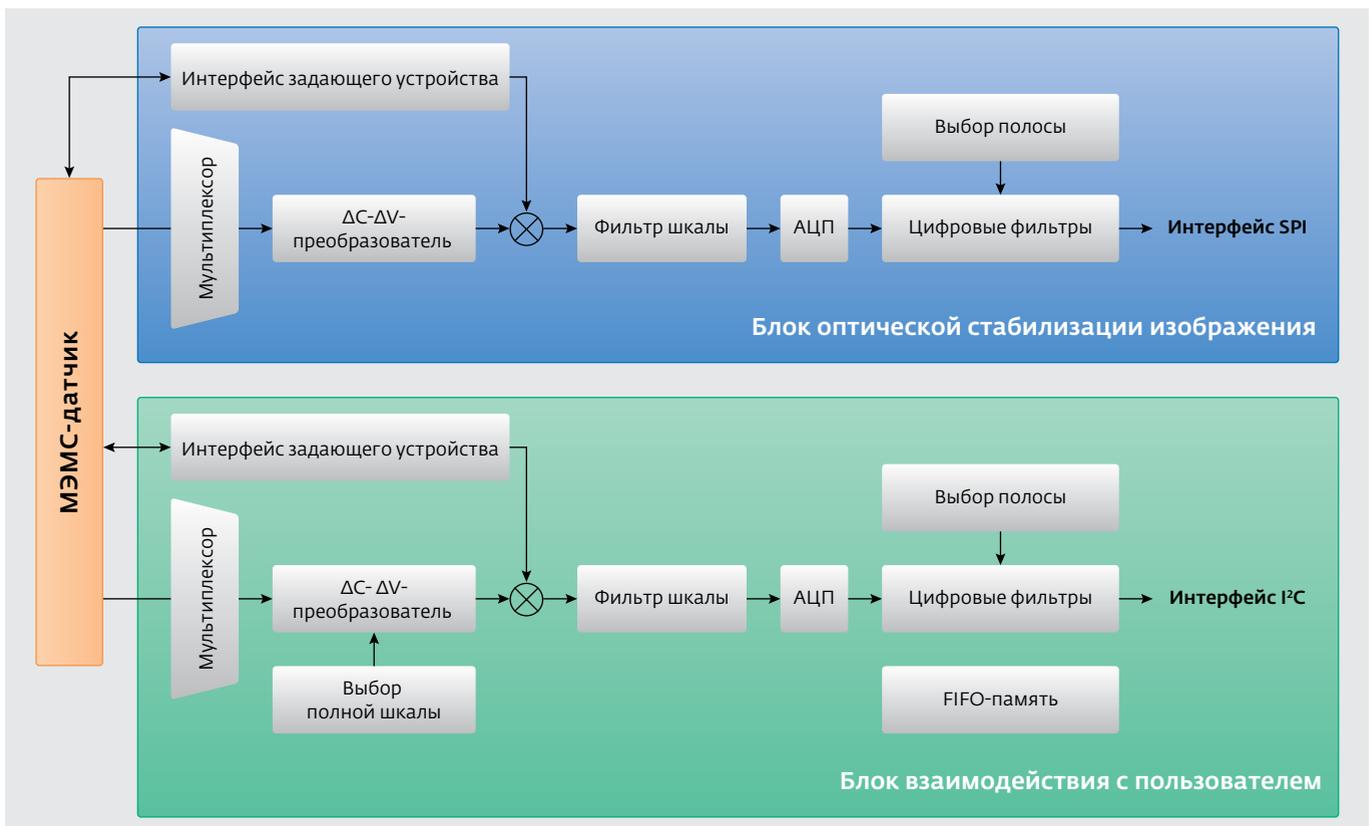


Рис.5. Блок-схема двухъядерного гироскопа компании STMicroelectronics

3×3 мм выполнены на основе двух слоев магнитного материала, электрические свойства которого меняются при изменении магнитного поля и соответственно меняется и выходной импульс напряжения. Интервал между двумя выходными сигналами зависит от силы магнитного поля в области измерения.

Об интересе к технологии магнитных МЭМС свидетельствует выделенный Шведским агентством инновационных систем (VINNOVA) компании Silex Microsystems (крупному контрактному производителю МЭМС) грант в 3 млн. шведских крон (~400 тыс. долл.) на разработку новых сегнетоэлектрических материалов для МЭМС следующего поколения смартфонов [12]. По мнению специалистов компании, магнитные МЭМС будут играть важную роль в будущих изделиях. В смартфонах уже можно найти электронные компасы и датчики, объединяющие функции гироскопа и регистрации магнитного поля и позволяющие создавать модули со многими степенями свободы. Сочетание новых магнитных материалов



Рис.6. Трехосевой магнитометр MMC3316xMT

с технологией формирования сквозных отверстий в кремнии поможет создать новый класс элементов индуктивности с высокими характеристиками и добротностью. Программа по разработке магнитных МЭМС, рассчитанная на полтора года, должна была начаться в мае этого года.

Очевидно, интеграцию магнитометров в комбинированные датчики облегчит технология выполнения МЭМС-датчика, функционирующего благодаря силам Лоренца. Этот принцип был использован испанской

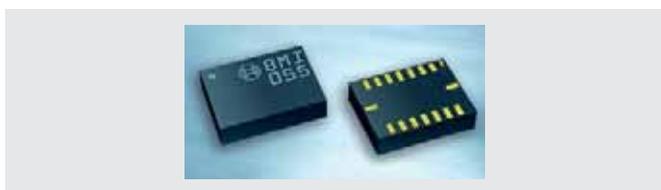


Рис.7. Инерциальный измерительный модуль с шестью степенями свободы компании Bosch Sensortec

компанией Baolab Microsystems, которая разработала микросхему трехкоординатного цифрового нанокомпаса VLBC3-D с МЭМС-датчиком на основе эффекта Лоренца [13]. Компас создан по НЕМС-технологии компании, позволяющей изготавливать МЭМС-датчик с помощью высокопроизводительного оборудования для производства КМОП-микросхем с необходимыми аналоговыми и цифровыми блоками на одном кристалле.

Основа МЭМС-датчика – подвижная алюминиевая пластина, подвешенная с помощью пружин, – формируется в металлических слоях межсоединений КМОП-микросхемы путем вытравливания промежуточного диэлектрического слоя. При прохождении тока в пластине в ней возникает сила Лоренца, пропорциональная окружающему компас магнитному полю. Вызванное в результате смещение пластины регистрируется по трем координатам путем измерения емкости между ней и окружающими ее неподвижными электродами. На основе этих данных с помощью микросхемы вычисляется направление магнитного поля и определяется положение объекта в пространстве.

Поскольку микросхема нанокомпас с встроенным МЭМС-датчиком полностью выполнена по КМОП-технологии, стоимость ее намного ниже стоимости датчиков на основе эффекта Холла. Другие преимущества нанокомпаса VLBC3-D – малая потребляемая мощность, поскольку используются металлические проводники, более высокая чувствительность благодаря механическому резонансу и отсутствие магнитного насыщения.

В текущем году компания планирует выпускать опытные образцы нанокомпаса VLBC3-D с разрешением 13 разрядов по каждой оси. Микросхема с последовательным I²C- или SPI-интерфейсом монтируется в 10-выводной корпус DFN-типа размером 1×1×0,9 мм или BGA-корпус размером 2×2×0,75 мм. Серийное производство нанокомпаса намечено на IV квартал 2012 года.

Комбинированные МЭМС-датчики

Прогноз появления на рынке МЭМС-датчиков с шестью и девятью и даже большими степенями свободы подтвержден появившимися в этом году приборами компаний Bosch Sensortec, InvenSense, STMicroelectronics, Analog Devices. Компания Bosch Sensortec в мае 2012 года на МЭМС бизнес-форуме сообщила о выпуске инерциального измерительного блока (IMU) модели BMT055 (рис.7). Модуль содержит в одном корпусе трехосевые 12-разрядный акселерометр и 16-разрядный гироскоп [14]. Измерительный блок с шестью степенями свободы предназначен для игровых консолей и игровых приложений смартфонов и планшетников. Программируемый диапазон измерений гироскопа составляет ±(125–2000) град./с, акселерометра – ±(2–16)g. Отклонение показаний при смещении нуля составляет всего 70 мкг. Плотность шума акселерометра равна 150 мкг/√Гц, гироскопа – 0,014 град./с/√Гц. При полной скорости вывода данных потребляемый ток акселерометра и гироскопа составляет 200 мкА и 5 мА, соответственно. В гироскопе предусмотрены режимы малого энергопотребления (вдвое меньше рабочего значения) и ожидания. Выход из режима малого энергопотребления занимает 10 мс, из режима ожидания при возбуждении акселерометра действиями пользователя – 30 мс.

В модуле IMU предусмотрены два механизма обслуживания прерываний и совместимость с платформой программного обеспечения с девятью степенями свободы BSX2.0 FusionLib. Модуль содержит FIFO-буфер, цифровые интерфейсы I²C и SPI. Поставляется в корпусе LGA-типа размером 3,0×4,5×0,95 мм. По утверждению компании, это самый малогабаритный на сегодняшний день инерциальный измерительный блок с шестью степенями свободы.

Компания InvenSense представила первый модуль движения (MotionTracking) с девятью степенями свободы MPU-9150 [15]. Модуль представляет собой систему в корпусе (System in Package, SiP). Он содержит комбинированный датчик MPU-6050, в который входят трехосевые гироскоп, акселерометр и запатентованный компанией процессор обработки сигналов, вызванного движением (Digital Motion Processor, DMP), а также схема трехосевого цифрового компаса AK8975. MPU-6050 выполнен по разработанной компанией технологии Nasiri-Fabrication, которая позволяет формировать МЭМС-элементы поверх стандартной КМОП-схемы (рис.8). Как отмечают разработчики, этот процесс позволяет

сократить число этапов изготовления МЭМС, проводить испытания на кристалле и монтировать прибор в корпус, сопоставимый по размерам с кристаллом. При изготовлении прибора по технологии Nasiri используются имеющиеся на рынке оборудование и процессы, сопоставимые с КМОП-технологией.

В модуле регистрации движения применены запатентованные блоки испытания и калибровки датчиков, позволяющие проводить полные функциональные 9DoF испытания. Поставляется модуль в корпусе типа LGA размером 4×4×1 мм.

О создании IMU-блока с девятью степенями свободы модели LSM333D в начале 2012 года сообщила и компания STMicroelectronics. Блок содержит трехосевые цифровые акселерометр, гироскоп и магнитометр. Кроме того, в блок IMU входят: встроенный датчик температуры, система управления питанием для экономии заряда батареи, FIFO-буфер, программируемые прерыватели по детектированию свободного падения/движения/магнитного поля, интерфейсы I²C и SPI. Диапазон измерений акселерометра составляет ±(2-16)g, гироскопа - ±(250-2000) град./с, магнитометра - ±(2-12) Гс. Напряжение питания - 2,4-3,6 В, диапазон рабочих температур - от -40 до 85°C. Поставляется в корпусе LGA размером 3,5×6×1 мм. Массовое производство измерительного блока планируется на III квартал 2012 года. При этом планируется уменьшить его размеры до 4×4×1 мм [15].

В июне этого года компания Analog Devices объявила о выпуске 10DoF инерциального измерительного модуля ADIS16480 с встроенными алгоритмами обработки данных различных сенсоров [16]. Он содержит трехосевые гироскоп

(динамический диапазон ±450 град./с), акселерометр (диапазон ±10g), магнитометр (диапазон ±2,5 Гс) и цифровой датчик давления (диапазон 300-1100 мбар), а также процессор ADSP-BF512 семейства Blackfin. Основное достоинство ADIS16480 - наличие процессора ADSP-BF512, в котором реализован алгоритм фильтра Калмана, осуществляющий коррекцию выходных данных гироскопа на основе информации акселерометров и магнитометров. В блоке также реализованы алгоритмы преобразования выходных данных инерциальных датчиков в навигационную информацию.

Ширина полосы модуля составляет 330 МГц, что в шесть раз больше, чем у конкурирующих изделий. Время запуска модуля равно ~500 мс, стойкость к перегрузкам - до 2000g. Напряжение равно 3,0-3,6 В, потребляемый ток в нормальном режиме работы - 254 мА, в режиме пониженного энергопотребления - 12,2 мА, в режиме сна - 45 мкА.

Благодаря сочетанию высокоэффективной технологии iMEMS и прецизионной схемы обработки сигналов сенсоров поддерживаются близко расположенные (0,05°) и фазогласованные оси, обеспечивается низкий температурный дрейф, а также нелинейность на уровне 0,01%. Проводимая в заводских условиях калибровка температурного дрейфа смещения нуля акселерометра и гироскопа гарантирует высокую стабильность инерциальных датчиков и магнитометра в диапазоне -40...70°C (температурный коэффициент гироскопа составляет ±35 ppm/°C, акселерометра - ±25 ppm/°C, магнитометра - ±275 ppm/°C). Размер модуля - 47×44×14 мм.

Основное применение модуль найдет в системах навигации военных и коммерческих

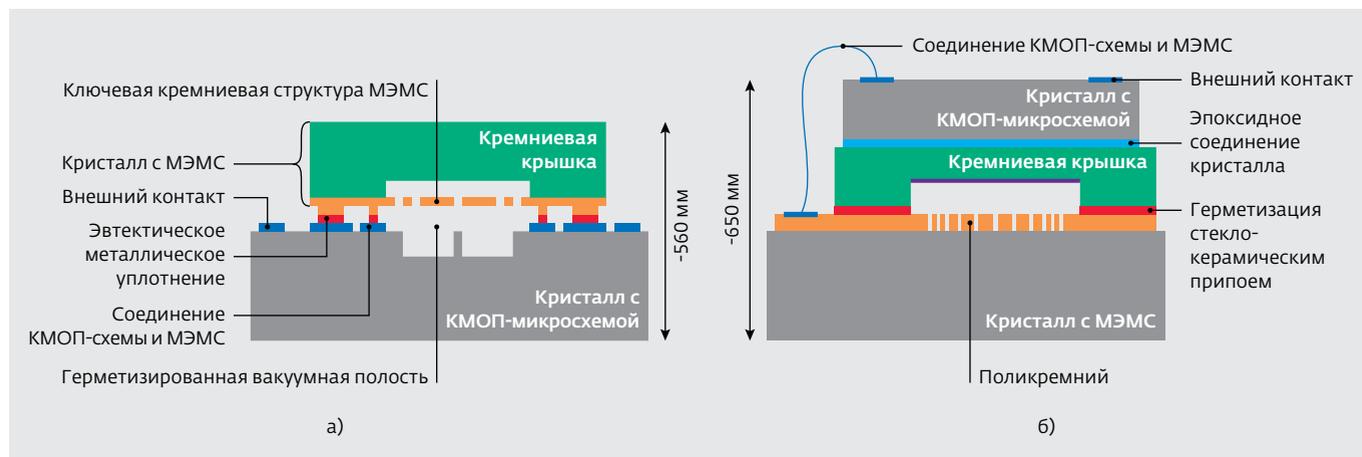


Рис. 8. Сравнение структур, изготовленных по технологиям Nasiri-Fabrication (а) и обычной (б)

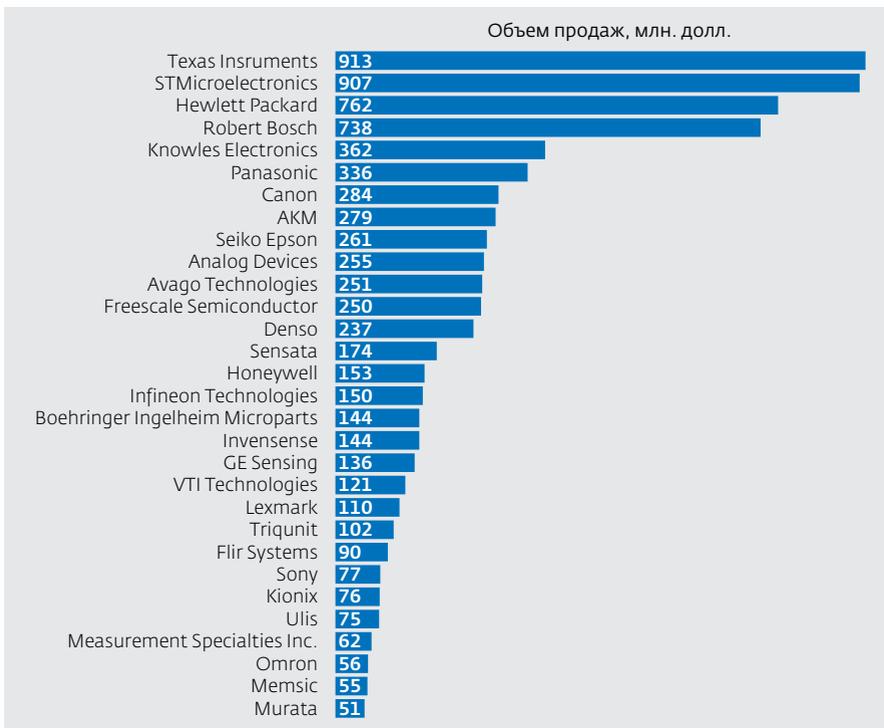


Рис.9. Рейтинг ведущих мировых компаний по разработке и производству МЭМС в 2011 году

самолетов, беспилотных летательных аппаратов, в промышленных роботах, системах позиционирования подвижных платформ и контрольно-измерительной аппаратуре.

ВЕДУЩИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛИ

В отчете "Статус МЭМС-промышленности" компания Yole проанализировала бизнес-модели крупнейших поставщиков МЭМС – компаний STMicroelectronics и Bosch [17]. Компания STMicroelectronics диверсифицировала разработки МЭМС и выпускает разнообразные их типы. Тем не менее, 90% ее продаж приходится на долю акселерометров и гироскопов, выпускаемых в результате деятельности по производству и маркетингу (IDM). Предвидя высокие темпы развития рынка МЭМС, компания начала ранние инвестирования в инфраструктуру производства приборов на пластинах диаметром 200 мм и заключала различные договоры по сотрудничеству, чтобы ускорить сроки выхода на рынок и расширить номенклатуру выпускаемых изделий. Она увеличила объемы производства своих заводов в Италии (МЭМС-изделия), во Франции (микросхемы ASIC) и на Мальте (сборка и испытания). На предприятии на Филиппинах объем производства был доведен до более 3 млн. датчиков в день. STM

принадлежит около 600 патентов-аналогов в области потребительской электроники, медицины, энвироники (науке об окружающей среде). В результате STM сумела извлечь высокие доходы из взрывного спроса на датчики движения для мобильных устройств и увеличить в 2011 году продажи МЭМС до 907 млн. долл. (рост на 42% по сравнению с предыдущим годом). Тем самым STM в списке ведущих компаний по крупномасштабному производству МЭМС сумела перейти с четвертого места на второе и практически сравняться с лидером – Texas Instruments (рис.9).

Сейчас компания намерена сосредоточить свои работы в области двухъядерных гироскопов, пригодных для стабилизации изображения камер мобильных телефонов и одновременной регистрации движения. Совместно с компанией CSR, занимающейся созданием микросхем для беспроводных систем и систем определения местоположения, STM намерена выйти на рынок средств навигации в пешеходных зонах с микросхемой, содержащей акселерометр и микроконтроллер. В планах компании развертывание работ по освоению магнеторезистивной технологии для электронных компасов, улучшению качества воспроизведения звука МЭМС-микрофонами. Она планирует занять ведущее положение в секторе аудиоустройств.

Доходы компании Bosch, составившие ~738 млн. долл. в 2011 году (рост ~16%), обеспечивает развитая инфраструктура производства МЭМС в основном для бытовых и автомобильных систем, что и позволило снизить цену на них и занять четвертое (после Hewlett Packard) место в списке ведущих производителей.

Сейчас годовой объем производства Bosch достигает 500 млн. кристаллов (1,3 млн. за рабочий день). Благодаря большому портфелю МЭМС-приборов и собственным программным средствам объединения различных датчиков компания и в этом году рассчитывает на хорошее состояние дел в секторе МЭМС для бытовых систем.

Самый высокий рост доходов от продаж МЭМС (80%) у компании MEMSIC благодаря высокому спросу азиатского рынка мобильных телефонов на выпускаемые ею достаточно дешевые акселерометры и магнитометры (особенно на приборы, выполненные по AMR-технологии). В результате при доходах в размере 68 млн. долл. компания впервые вошла в список 30 ведущих МЭМС-компаний. MEMSIC прекратила разработки гироскопов для потребительских изделий, когда не смогла добиться ценового превосходства перед крупными IDM-компаниями, имеющими собственные предприятия по производству гироскопов. И теперь компания считает, что основное назначение гироскопов – игровые консоли, а акселерометры и магнитометры могут успешно выполнять функции гироскопа, не на 100%, но достаточно для игровых систем.

Помимо ведущих 30 компаний на рынке представлены еще около десяти компаний с доходом 30–50 млн. долл. И в ближайшем будущем они могут оказаться в списке 30. Это – Silicon Sensing Systems, выпустившая гироскоп нового поколения для автомобильных систем, Silex Microsystems, Teledyne DALSA, Epcos, доходы которой увеличились в 2011 году на 50% благодаря успеху на рынке ее микрофонов и дублексеров на основе объемных акустических волн. Серьезный претендент на вхождение в список 30-ти – компания SiTime, доходы которой за счет продаж МЭМС-тактовых систем увеличились на 100%.

* * *

По-видимому, МЭМС – один из вестников перемен, которые преобразуют коммерциализацию электроники в ее персонализацию. Это значит, что МЭМС-компонентов станет еще больше и они будут выполнять роль "привратника", открывающего возможность общения реального мира с электронным. Насколько справедливо это утверждение и достигнут ли продажи МЭМС 1 трлн. долл., рассмотрим в следующем номере журнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mounier E., Robin L.** MEMS market will continue double digit growth, to double by 2017. – MEMS' Trends, April 2012, issue 10, www.memsindustrygroup.org/files/MEMSTrends_April2012_iMN.pdf
2. Press Release. Dixon R. Pressure Sensors will be Top MEMS device in 2014. – www.isuppli.com/MEMS-and-Sensors/News/Pages/Pressure-Sensors-to-Become-Top-MEMS-Device-by-2014.aspx
3. **Bouchaud J.** MEMS Industry Needs New Killer Apps to Sustain Double-Digit Growth. – www.isuppli.com/MEMS-and-Sensors/MarketWatch/Pages/MEMS-Industry-Needs-New-Killer-Apps-to-Sustain-Double-Digit-Growth.aspx
4. **Allan R.** Consumer-Focused MEMS Embarks On The Internet Of Things Consumer-Focused MEMS Embarks On The Internet Of Things. – electronicdesign.com/article/components/consumerfocused-mems-embarks-internet-74007
5. MEMS die size grows, test evolves, and other trends. – www.electroiq.com/articles/stm/2011/12/mems-die-size-test-evolves.html
6. **MOUNIER E. and BARON J.** Volume consumer markets are changing MEMS manufacturing. – www.electroiq.com/articles/sst/print/vol-55/issue-6/features/mems/volume-consumer-markets.html
7. **Dr. Philippe Robert.** Micro and Nanoelectromechanical Systems: A New Approach for Low Cost 6D Inertial Sensor. – www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2742
8. Press Release. ADXL377: 3-Axis High g Analog MEMS Accelerometer. – www.analog.com/ru/mems-sensors/mems-accelerometers/adxl377/products/product.html
9. World's First Dual-Core Gyroscope from STMicroelectronics Handles Smart User Interface and Image Stabilization in Phones and Tablets. – www.st.com/internet/com/press_release/p3260.jsp
10. News Release. – ir.invensense.com/phoenix.zhtml?c=237953&p=irol-newsArticle&id=1701912
11. MEMSIC Introduces Latest Innovation to Its 3-Axis Magnetic Sensor Product Line. – www.globenewswire.com/newsroom/news.html?d=255222
12. Silex Microsystems Receives VINNOVA Grant to Develop Magnetic MEMS Technology for Next-Generation Smartphone Applications. – online.wsj.com/article/PR-CO-20120425-907865.html
13. Press release. Baolab uses its NanoEMS™ technology to create ultra-low cost 3D Digital MEMS Compasses in CMOS. – http://baolab.com/pressreleases/baolab_3d_compass_july_2011.htm
14. Triaxial acceleration sensor and gyroscope in single package. – ir.invensense.com/phoenix.zhtml?c=237953&p=irol-newsArticle&id=1701912
15. **Johnson R.C.** IMU integrates accelerometer, gyro. – www.eetimes.com/electronics-news/4373807/Inertial-measurement-unit-integrates-accelerometer--gyro
16. LSM333D. iNEMO inertial module: 9 degrees of freedom sensing solution. – www.st.com/internet/analog/product/253513.jsp
17. **Peter Clarke.** ST closes in on TI atop MEMS top 30 ranking. – www.eetimes.com/electronics-news/4369800/ST-closes-in-on-TI-atop-MEMS-top-30-ranking