

АМБИЦИОЗНЫЕ ПЛАНЫ ПРОМЫШЛЕННОСТИ МЭМС ОТ МИЛЛИОННОГО ДОЛЛАРОВОГО РЫНКА К ТРИЛЛИОННОМУ?

В.Майская

Развитие изобретательных пользовательских интерфейсов привело к стремительному, подобному торнадо, росту рынка МЭМС для бытовой электроники [1]. К 2011 году было продано несколько миллиардов МЭМС-акселераторов, гироскопов, магнитных датчиков, микрофонов, датчиков давления. По мнению ряда аналитиков, рынок МЭМС не только "догонит" рынок полупроводниковых приборов, который в 2011 году составлял 300 млрд. долл., но через 10 лет сможет достичь 1 трлн. долл. Правда, без ускоренного развития к этому времени он будет равен всего 43 млрд. долл. Чтобы достигнуть современного уровня рынка полупроводниковых приборов, среднегодовые темпы прироста продаж МЭМС должны быть равны 39%, а чтобы рынки полупроводниковых приборов и МЭМС в будущем сравнялись, они должны составлять 43%. И, наконец, для формирования рынка в 1 трлн.долл. продажи МЭМС должны ежегодно расти на 56%. Возможно ли это? На этот вопрос пытались ответить участники международного симпозиума по МЭМС-технологии "Датчики: основа для ускоренного роста рынка МЭМС до 1 трлн. долл.", проводимого Советом по корпусированию и технике тестирования устройств микроэлектроники (MERTEC), и МЭМС-бизнес форума 2012 года. Каков их вывод?

Развитие любого бизнеса основано на принципе "мыслить широко, чтобы сорвать большой куш". Этот принцип нашел отражение в работе симпозиума по МЭМС-технологии. Идея разумного бизнеса, выдвинутая компанией Harbor Research, занимающейся оценкой прорывной интернет-технологии, предусматривает развитие концепции разумных систем для "вездесущего" Интернета, объединяющего взаимодействующих друг с другом людей, приборов, сенсоров и деловых операций. Практика разумного бизнеса должна соединить воедино физический и виртуальный миры, позволяя объединять операции информирования и принятия выгодных решений, а также развивать творческие способности, что, по мнению многих обозревателей, будет способствовать

высоким темпам развития экономики. Основные рынки разумных систем датчиков – сотовые телефоны, инфраструктура разумной энергосети, автомобильная электроника, ИТ- и промышленные системы, приборы наблюдения за состоянием здоровья.

Рассматривая историю развития техники, вице-президент компании Maxim Integrated Виджей Уллал отметил три основные технические революции:

- появление пароходов, электричества, двигателей внутреннего сгорания, радиостанций, развитие авиации и воздухоплавания, что привело к повышению производительности труда;
- разработка транзисторов, компьютеров и Интернета, благодаря чему рынок полупроводниковых приборов достиг высокого уровня;

- объединение компьютерной, связанной и индикаторной техник, что позволит создать Интернет вещей, освободить человечество от нетворческого труда и уравнивать продажи МЭМС и полупроводниковых приборов. Эта революция, стимулируемая развитием технологии микро- и нанодатчиков, только началась.

Для решения вопроса о возможности достижения объема продаж МЭМС-устройств в 1 трлн. долл. (рис.1) на симпозиуме рассматривались революционные новинки, которые могут появиться благодаря применению МЭМС, обсуждались МЭМС-технологии следующих поколений [1-3].

Роберт Хаак, вице-президент азиатско-тихоокеанского отделения Фонда обучения коммерциализации микро- и нанотехнологии (Micro and Nanotechnology Commercialization Education Foundation, MANCEF) указал задачи, определенные планом развития (Roadmap) МЭМС-технологии. В отличие от международного плана развития полупроводниковой технологии (ITRS), задающего необходимые для соблюдения закона Мура технологические процессы, в плане развития МЭМС-технологии внимание MANCEF сосредоточено на определении устройств, которые позволят достичь уровня продаж в 1 трлн. долл. Это - системы ВЧ-, химических и инерциальных измерений, датчики давления, акустические датчики, дисплеи. Указаны три технологии, которые следует согласованно развивать: собственно МЭМС-датчики, средства передачи их данных и системы обработки полученных данных. Хаак также отметил, что для обеспечения быстрого развития компании должны перейти от конкуренции к кооперации, возможно путем проведения совместных исследований до наступления конкурентной борьбы [4].

Во вступительном докладе "Сенсорные комплекты" (sensor swarms) профессор Университета Калифорнии в Беркли Кристофер Пистер остановился на возможностях и проблемах развития больших сенсорных сетей. Он отметил, что необоснованный прогноз может отразиться на доходах. Так, в 2007 году в связи с быстрым распространением сенсорных сетей ожидалось, что в 2011 году датчики по объему продаж превзойдут мобильные телефоны. Но вместо прогнозируемых 600 млн. датчиков было продано всего 20 млн.

Сенсорный комплекс формирует большое число беспроводных датчиков, обеспечивающих информационную поддержку центрального компьютерного и аналитического центров. Большая часть таких комплексов предназначена для построения

автоматизированных систем, при этом связь в основном осуществляется в соответствии с протоколом Zigbee. Элемент датчика реализуется по МЭМС-технологии [5].

Пистер также перечислил существующие сейчас проблемы, которые необходимо решить для достижения прогнозируемого уровня в 1 трлн. долл.:

- моделирование на атомном уровне с тем, чтобы сократить необходимость построения приборов для проверки их конструкции и процессов производства;
- корпусирование МЭМС. Сейчас для каждого семейства существуют свои особые методы сборки в корпус;
- трудоемкие, специфичные для каждой структуры методы тестирования;
- стандартизация процессов производства, что позволит, как и в полупроводниковой промышленности, перейти к модели контрактных производителей (foundries), с тем чтобы усилить конкуренцию конструктивных решений МЭМС, а не разрабатываемых технологических процессов.

Как отмечал Виджей Уллал, сегодня росту применения МЭМС-датчиков способствует формирование обширной сети Интернета вещей. Несмотря на мнение некоторых скептиков, что Интернет уже перегружен и может в любой момент "рухнуть", его пропускная способность велика и может поддержать межмашинный обмен данными. По оценкам IBM, к 2015 году Интернет будет содержать до 1 трлн. узлов связи. И, конечно, многие крупные электронные корпорации активно готовятся к освоению Интернета вещей.

Вице-президент компании Fairchild Semiconductor Януз Бризек отметил программы, которые будут способствовать росту спроса на МЭМС-датчики и развитию Интернета вещей. Это, в первую очередь, программа центральной нервной системы Земли (Central Nervous System

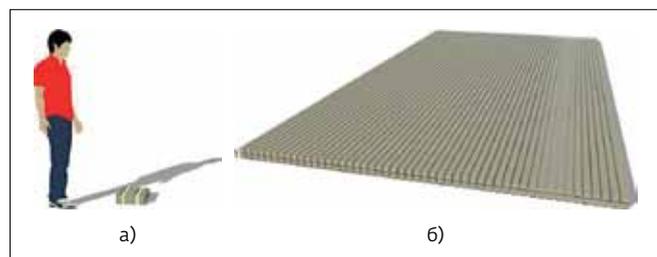


Рис.1. Для наглядности: пакет банкнотов на 1 млн. долл. (100 пачек по 10 тыс. долл.) (а) и пакет банкнотов на 1 трлн. долл. (б)

for the Earth, CeNSE) компании Hewlett Packard и расчеты компании Bosch по доведению числа МЭМС до 1000 устройств на человека.

ПРОГРАММЫ, СТИМУЛИРУЮЩИЕ РОСТ РЫНКА МЭМС [6]

Программа центральной нервной системы Земли

В 2010 году компания Hewlett-Packard в многочисленных докладах и статьях сообщила о предлагаемой программе создания центральной нервной системы Земли, содержащей до триллиона МЭМС-датчиков и актуаторов, которые будут "раскиданы" по планете для контроля самых разных природных процессов и явлений, а именно:

- мониторинга климата;
- поддержки нефтепоисковых исследований и нефтедобычи;
- поддержки разумных автомагистралей;
- предсказания цунами и землетрясений;
- поддержки разумных энергосетей и домов;
- контроля медицинского оборудования;
- контроля основных фондов и системы поставок.

По оценкам специалистов компании, каждый человек на планете будет оснащен 1 тыс. датчиков системы CeNSE. Для обработки сигналов этих датчиков необходимо будет увеличить полосу пропускания Интернета более чем на три порядка, что приведет к колоссальному спросу на компоненты компьютерных систем. В результате к 2013 году мировой рынок сенсорных систем возрастет до 70 млрд. долл., а рынок услуг зондирования с учетом добавленной стоимости – до 290 млрд. долл. Если стоимость одного сенсорного узла такой сети будет равна 1 долл., то рынок датчиков после полной реализации системы достигнет 1 трлн. долл.

Сенсорные блоки системы могут крепиться на мостах и зданиях для предупреждения о возможных избыточных напряжениях или о погодных условиях. Так, на мосту "Золотые ворота" (Golden Gate Bridge) в Сан-Франциско можно установить до 10 тыс. таких блоков. В 2010 году Hewlett-Packard заключила договор с компанией Royal Dutch Shell на использование миллиона акселерометров нового поколения в системах поиска месторождений "черного золота". Установлено 1000 беспроводных датчиков на больших мостах. На очереди стоят и другие проекты. Усиление сигнала поверхностно-усиленного рамановского рассеяния (SERS) на основе наноМЭМС-структуры локального поверхностного плазмона составляет 10^{11} , что обеспечит чувствительность системы обнаружения 0,02 частей на триллион (ppt). Работы лаборатории

социальной компьютеризации компании HP показали, что применение МЭМС-датчиков обеспечивает 97%-ную точность предсказания объема доходов от проката кинофильма в зависимости от его предварительной рекламы. Компанией разрабатывается система имитации зрительной коры головного мозга человека, содержащей 64512 активных центров и позволяющей познавать без обучения.

Основная цель сети CeNSE – преобразование потока данных в знание, позволяющее выполнять нужное действие. Возможно, это приведет к появлению небесной сети Skynet?

Сенсорные комплексы

В том же 2010 году региональный президент компания Robert Bosch LLC Хорст Мьюнзел на конференции по МЭМС-технологии, проходившей в Стэнфордском университете, описал сенсорные комплексы, которые к 2017 году будут содержать $7 \cdot 10^{12}$ нанодатчиков, подключенных к Интернету и обслуживающих 7 млрд. человек. Эти комплексы войдут в мобильную систему обслуживания Интернета людей (сеть социальных объединений) и Интернета вещей, формирование которой может привести к увеличению в 2013 году мирового рынка систем на основе МЭМС до 360 млрд. долл. В итоге в 2017 году на каждого человека придется 1000 сенсоров. И это утверждение обосновано. Уже сегодня можно встретить приложения с большим числом МЭМС-сенсоров:

- парковки в Сан-Франциско и Голливуде, оснащенные датчиками автомобилей, позволяющими динамически формировать указатели свободных стоянок. Система также может связываться с приложением смартфона "парковщик" (parker) для получения информации о свободных стоянках;
- продвинутые автомобили с ~100 датчиками;
- сеть датчиков метана, размещенных у каждого распределительного крана нефтеперегонного завода в Ричмонде;
- датчики температуры и вибрации, установленные на железнодорожных платформах;
- сенсорные сети разумных домов с 10-100 датчиками;
- смартфоны, в которых, по крайней мере, пять из используемых 12-18 сенсоров представляют собой МЭМС-приборы [7];
- медицинское диагностическое оборудование с сотней различных сенсоров, которое в конечном итоге перейдет в разряд персональных устройств.

Профессор Цистер в качестве примера распространения МЭМС-датчиков привел сеть прокатного стана завода металлургической компании Wheeling-Pittsburgh Steel, содержащую 1 млн. МЭМС-датчиков. Использование сенсорной сети позволило увеличить производительность прокатного стана на 5% – наибольшее повышение производительности за всю историю производства стали!

Не так трудно рассчитать, что система, содержащая $7 \cdot 10^{12}$ узлов, приведет к объему продаж датчиков, равному 7 трлн. долл.

ТОРНАДО МОБИЛЬНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ АППАРАТУРЫ

Активный рост применения МЭМС-датчиков в мобильных устройствах связи способствовал развитию и персональных мобильных медицинских приборов на их основе. В связи с ростом затрат на здравоохранение открываются хорошие перспективы для рынка МЭМС. В 2011 году Управление по продовольствию и лекарствам США разрешило продажу первых мобильных медицинских приборов: манжета для измерения кровяного давления, подсоединяемая к iPad или iPhone (французской start up компании Withings) (рис.2) и устройство визуализации результатов компьютерной томографии. Манжета автоматически накачивает, затем скачивает давление и воспроизводит на панели смартфона значения пульса и кровяного давления. Стоит манжета 129 долл. [8].

Ожидается, что в этом году стоимость персональных медицинских устройств снизится, а сроки принятия решения о возможности их применения сократятся, поскольку Управление планирует выпустить подробное руководство по определению относящихся к его компетенции мобильных приборов и систем контроля состояния здоровья. К 2015 году, согласно прогнозам, 30% пользователей смартфонами в мире будут иметь мобильные устройства контроля состояния здоровья. А к 2020 году к большинству смартфонов будут подключены такие разнообразные устройства, как датчики регистрации нарушений нормального состояния пользователя, биодатчики, химические датчики, спектрометры, приборы диагностики и доставки лекарств, УЗ-сканеры и др.

На основе прогноза наличия мобильных устройств у 7 млрд. человек в 2020 году и в среднем 14 различных медицинских МЭМС-систем у каждого пользователя общий рынок МЭМС для медицинских систем составит 100 млрд. приборов. Можно ожидать появления за рассматриваемый период "доктора на кристалле", который

за считанные минуты сможет установить заболевание и провести анализ крови с помощью встроенных в смартфон контейнера с микродозатором разового использования и спектрометра, а также регулирующих поступление инсулина глюкометров с беспроводными спектрометром и дозатором инсулина.

УСКОРЕНИЕ ТЕМПОВ РОСТА МЭМС-РЫНКА

Сегодня высоким темпам развития рынка МЭМС препятствуют длительные циклы НИОКР и отсутствие стандартных процессов производства. Так, Виджей Уллал (компания Maxim) считает, что в области МЭМС ежегодно следует проводить до 15 НИОКР (сейчас четыре-пять). Но это потребует недоступного для отдельной компании уровня финансирования. Следует помнить, что объем рынка в сильной степени зависит от цены представленных на нем продуктов. Увеличение через несколько лет объема продаж до 10^{12} МЭМС-датчиков станет возможным, если они будут стоить не 10 долл., как сегодня, и даже не 1 долл., а лишь несколько центов. На рынке уже есть 12-разрядные акселерометры стоимостью менее 0,35 долл. и микрофоны по цене 0,25 долл. Но даже при стоимости МЭМС-датчиков в несколько центов объем продаж 10^{12} датчиков останется в пределах 10 млрд. долл. Генеральный исполнительный директор компании Kionix Грегори Гальвин обосновал свои сомнения относительно достижения объема продаж МЭМС в 1 трлн. долл. тем, что на долю МЭМС-датчиков приходится всего 2% стоимости конечных изделий на их основе. И если рынок в 1 трлн. МЭМС-устройств состоится, объем продаж



Рис.2. Подключаемая к смартфону манжета для измерения кровяного давления

изделий на их основе составит 50 трлн. долл., что не реально, поскольку эта сумма равна 80% ВВП США в 2010 году (63 трлн. долл.). Таким образом, даже если рынок систем на основе МЭМС составит 1 трлн. долл. и будет продано 1 трлн. МЭМС-устройств, объем их продаж в стоимостном выражении не достигнет прогнозируемого уровня.

Тем не менее, для достижения поставленной цели промышленность МЭМС прилагает усилия по наращиванию темпов прироста рынка. Ускорение темпов развития МЭМС-технологии, помимо сокращения циклов проведения НИОКР, потребует и новых программных средств, позволяющих моделировать изготовление приборов на атомном уровне. К ним относятся:

- программы, позволяющие формировать канавки специфической формы за один проход процесса глубокого реактивного травления. Сейчас для этого требуется большое число итераций, занимающих несколько недель или месяцев. Создание таких программ моделирования потребует тесного сотрудничества поставщиков оборудования и программистов;
- программы моделирования на атомном уровне состояния поверхности изделия, обрабатываемой конкретным инструментом. Обычно технологический процесс влияет на состояние поверхности, что может привести к затягиванию разработки (например, операций сборки) на месяцы или даже годы;
- программы разработки процесса очистки после проведения технологической операции (например, после глубокого реактивного травления). Поиск нужного процесса очистки, зависящего не только от технологической операции, но и от трехмерной геометрии изделия, может длиться несколько месяцев.

Типичный процесс разработки МЭМС-изделия отвечает парадигме один тип изделия–один процесс–один тип корпуса–один тип ASIC-микросхемы–один тип тестовой системы. Цикл подготовки изделия к производству непредсказуем и может длиться несколько лет. Стандартизация технологического процесса позволяет существенно сократить разработку МЭМС-прибора. Сегодня существуют несколько стандартных успешно используемых процессов, например, сверхпланарная многоуровневая МЭМС-технология пятого поколения (SUMMiT V) Сандийской национальной лаборатории. Однако стандартизация проводилась без учета стремительного роста рынка МЭМС и поэтому не рассчитана на поддержку крупномасштабного производства.

Ряд компаний стандартизировали процессы изготовления своих МЭМС-приборов. Так, STMicroelectronics при производстве акселерометров, гироскопов, датчиков давления, микрофонов, микродозаторов использует стандартную технологию Thelma. Однако отвечающие требованиям заказчика стандартные технологические процессы пригодны для изготовления лишь узкого класса изделий, при этом определенные параметры конкретных изделий могут варьироваться (например, толщина мембраны или глубина травления) при сохранении последовательности операций. Стандартизировать технологические операции (в основном для производства инерциальных датчиков) начали и некоторые контрактные производители. Параллельно и изготовители устройств микроэлектроники начали применять определенные МЭМС-процессы для сборки выпускаемых изделий в сопоставимый по размерам с кристаллом корпус и для формирования 3D-структур. В результате на рынке появились усовершенствованные обрабатывающие установки поставщиков полупроводникового оборудования.

Представитель компании Amkor Technology, отметил необходимость в последующие 10–20 лет уделять особое внимание стандартизации корпусов. Правда, из-за большого числа вариантов нужных корпусов эта задача не простая.

Еще одна проблема, которую необходимо будет решить при наращивании производства МЭМС-приборов, – обеспечение требуемых производственных мощностей. Если предположить, что средняя площадь кристалла составит 2 мм² и в среднем МЭМС будут реализованы в виде набора из двух пластин, то для создания 1 трлн. приборов потребуется более 140 млн. пластин диаметром 200 мм.

Следующим этапом МЭМС-технологии станет объединение ее с дешевыми системами беспроводной связи.

ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ

По мере развития рынка МЭМС происходит все больший разрыв между доходами четырех крупнейших производителей (Texas Instruments, STMicroelectronics, Hewlett-Packard и Robert Bosch [1]). Сегодня лишь небольшое число компаний занимаются только разработкой МЭМС и не располагают производственными мощностями (fabless-компаниями). Но в будущем в МЭМС-промышленности для реализации экономических достоинств масштабирования придется

более широко использовать fabless-модель, что сейчас доступно только крупнейшим производителям, особенно в связи с планируемым в этом году переходом от 150-мм пластин к пластинам диаметром 200 мм. Для успешной конкуренции на рынке МЭМС объемом в 1 трлн. долл. компаниям придется совместно осваивать лучшие разработанные конструкции и технологические процессы (взаимодействующая конкуренция), а не пытаться в одиночку продвинуться на относительно небольшом рынке.

С точки зрения Жана-Кристофа Элоя, основателя и президента компании Yole Developpement, высказанной им на Европейском исполнительном конгрессе по применению МЭМС, возможны два типа производителей МЭМС. При значительных объемах производства заказы могут выполняться такими контрактными производителями, как Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC), United Microelectronics Corp (UMC) или GlobalFoundries. Традиционные изготовители МЭМС на этапах конструкторской разработки и/или при производстве небольших по объему серий изделий смогут действовать как партнеры. У этих двух групп производителей разные цепочки поставок, поэтому между ними отсутствует конкуренция. Компания второй группы может начать производство МЭМС, а затем продолжить его на предприятии контрактного производителя. Было отмечено, что начинающие компании не могут инвестировать в массовое производство, и им услуги контрактных производителей явно востребованы. Но смогут ли производители МЭМС соблюдать жесткую технологическую дисциплину во время выполнения строго заданного технологического процесса? Ответа на этот вопрос пока нет.

ПОБОЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ РОСТА РЫНКА МЭМС

Ускоренный рост рынка МЭМС приведет к появлению новых рабочих мест и формированию высокотехнологичных новых компаний. Большая часть этих новых рабочих мест появится в развивающихся странах. При этом может возникнуть соперничество за привлечение компаний, способствующих образованию таких рабочих мест. Если принять средний доход 100 компаний, входящих в фондовый индекс Nasdaq, равным в 2011 году ~500 тыс. долл., то в результате реализации рынка с доходом в 1 трлн. долл. в МЭМС-промышленности появятся 2 млн. рабочих мест и вдвое больше в отраслях, косвенно связанных с ней, т.е. всего 6 млн. новых рабочих

мест. Для сравнения в США за последние 10 лет было открыто 1,3 млн. новых рабочих мест, в основном в правительственном и медицинском секторах.

Кроме того, в результате развития МЭМС-технологии появились и новые коммерческие организации: компании по программным средствам обработки данных датчиков, центры обработки сенсорных данных и, наконец, Интернет вещей. Как и при любой промышленной революции можно ожидать появления первых МЭМС-компаний с миллиардным доходом.

* * *

Вопрос – быть или не быть МЭМС-рынку объемом в 1 трлн. долл. – пока однозначно не решен. Скорость реализации систем на основе МЭМС-устройств зависит от их цены, которая должна непрерывно падать. Для этого и для решения технических задач моделирования, корпусирования и испытания необходима кооперация производителей МЭМС, разработчиков программных средств и аппаратуры. Совет организаторов симпозиума: "Не надо безоговорочно доверять прогнозам развития новых рынков, способствующих появлению новых приложений. Они могут быть или слишком оптимистичными или пессимистичными".

ЛИТЕРАТУРА

1. **Майская В.** МЭМС-рынок. стойкий продолжительный рост. Электроника: НТБ. 2012, №5, с.42–55.
2. **Fury Michael A.** MEMS Symposium Report: Chasing 1 Trillion. – www.electroiq.com/articles/sst/2012/05/mems-symposium-report-chasing-1-trillion.html
3. **Feldman Ira.** Thinking Big: \$1 Trillion MEMS Market – Part 1. – hightechbizdev.com/2012/06/01/ira-feldman-high-technology-business-developmentthinking-big-1-trillion-mems-market-part-1
4. MEMS- Sensory Swarms.– mandetech.com/2012/06/13/mems-sensory-swarms
5. **Feldman Ira.** Thinking Big: \$1 Trillion MEMS Market – Part 2. – hightechbizdev.com/2012/06/04/ira-feldman-high-technology-business-developmentthinking-big-1-trillion-mems-market-part-2
6. **Janusz Bryzek.** Roadmap to a \$Trillion MEMS Market.
7. **Fury M.A.** MEMS Symposium Report: Chasing 1 Trillion. – www.electroiq.com/articles/sst/2012/05/mems-symposium-report-chasing-1-trillion.html
8. **Peter Wayner.** Monitoring your health with mobile devices. – www.deccanherald.com/content/230784/monitoring-your-health-mobile-devices.html