

# МЭМС-ТЕХНОЛОГИИ

## ПРОСТОЕ И ДОСТУПНОЕ РЕШЕНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ

Принято считать, что история развития технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС) стартовала в 1954 году, когда в Германии и кремнии был открыт пьезорезистивный эффект, на основе которого впоследствии были созданы первые датчики давления и ускорения. Массовое производство первого датчика давления, выполненного по МЭМС-технологии, было освоено компанией National Semiconductor в 1974 году, а начало производства МЭМС-датчиков давления и акселерометров для подушек безопасности автомобилей в мировом масштабе относится к началу 1990-х годов. В истории развития МЭМС-технологий отсчетным можно считать еще более раннее событие, а именно изобретение в 1947 году транзистора, который является основой современной микроэлектроники. За эти годы в области МЭМС-технологий и устройств были достигнуты значительные успехи.

### МЭМС-ТЕХНОЛОГИИ

Сегодня ежегодные объемы продаж изделий микроэлектроники превышают 200 млрд. долл., компонентов на основе МЭМС – примерно 10 млрд. долл. По данным авторитетной организации Yole Development (Франция), специализирующейся в области анализа состояния и перспектив развития мирового рынка инновационных устройств, включая МЭМС, оборудование и материалы, требуемые для их производства, мировой рынок МЭМС-компонентов в 2009 году будет характеризоваться устойчивым "плоским" состоянием и составит 6,9 млрд. долл. Этот уровень практически не отличается от уровня 2008 года (6,8 млрд. долл.) и несколько ниже уровня 2007-го (7,1 млрд. долл.), что объясняется мировым экономическим кризисом, влияние которого будет заметным и в 2010 году.

По мнению президента компании Yole Жана-Кристофера Элоя, в последующие четыре года среднегодовые темпы прироста объема продаж МЭМС составят 12% (при этом в 2010 году они будут равны 15%). Объем продаж на миро-

С.Сысоева  
S.Sysoeva@mail.ru

вом рынке в 2011 году достигнет 10 млрд. долл. Уже сегодня поставляемые на рынок компоненты характеризуются высоким уровнем технологии. Производство МЭМС расширяется, возникают новые области применения, особенно в медицине и промышленности.

Быстрое развитие МЭМС-технологий во многом объясняется их ключевыми достоинствами – миниатюрностью, функциональностью, надежностью, малым энергопотреблением, простотой интегрирования, востребованностью практически всеми рынками электроники. МЭМС находят самое широкое применение как в средствах массового спроса, таких как электронные системы автомобилей и потребительская техника (сотовые телефоны, ноутбуки, нетбуки и др.), так и в сложных приборах специального назначения, производимых небольшими партиями: медицинском оборудовании, военной и аэрокосмической технике, промышленных АСУ, аппаратуре мониторинга метеоусловий. Важнейшее требование, предъявляемое к МЭМС массового применения, – выполнение соотношения "низкая цена/высокий объем производства", а к приборам специального назначения – высокие рабочие характеристики.

МЭМС-технологии могут стать уникальным, простым решением для многих, прежде сложных, системных задач мониторинга и управления не только благодаря их достоинствам, включая простоту интегрирования миниатюрного компонента в клиентскую систему. Сегодня развитие технологий производства и тестирования, а также доступность оборудования для локального изготовления МЭМС позволяет заказчику создавать собственные, уникальные комплексные решения в рамках своей технологической линии.

В общем случае под МЭМС понимаются различные механико-электрические (сенсорные) или электромеханические преобразователи (актюаторы) размером порядка микрон (не более 1 мм). Перемещение подвижных элементов МЭМС-структуры при этом также не превышает нескольких микрон. Концепция МЭМС построена на интеграции на кремниевой подложке с помощью технологий микропроизводства микромеханических структур датчиков (сен-

соров, измерительных компонентов), актюаторов (исполнительных управляющих элементов) и электронных устройств, выполняющих функции сбора, анализа, контроля, формирования управляющих сигналов. Эти технологии во многом сходны с теми, что используются для производства микросхем. Поэтому интегральные МЭМС-устройства обеспечивают высокий уровень функциональности, надежности, низкую цену. Это и предопределило их столь же широкое применение, что и изделий микроэлектроники. Хотя техника и приборы специального назначения допускают сравнительно высокую цену, то обстоятельство, что МЭМС-технологии позволяют достичь низкой цены, значительно расширяет возможности развертывания сенсорных сетей там, где прежде системным интеграторам это могло показаться избыточным.

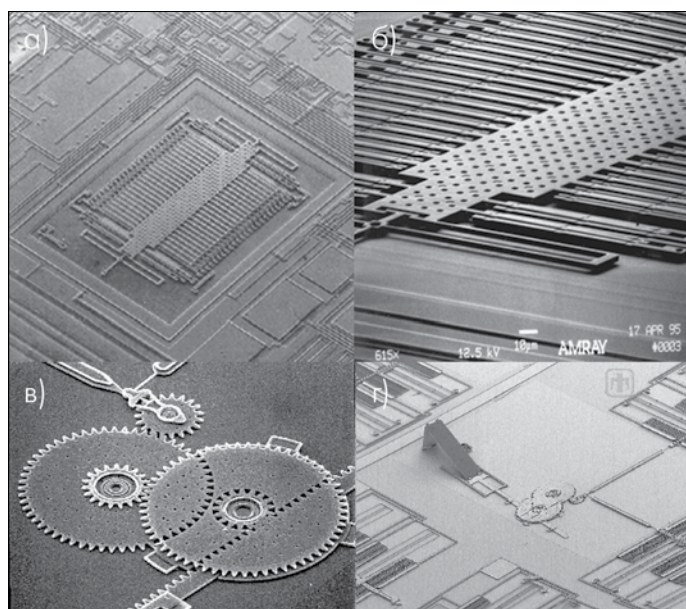
МЭМС-датчики давления и движения (акселерометры, гироскопы) моделируют процессы, параметры которых регистрирует микромеханическая структура. Движущаяся структура этих приборов не связана с объектом, поэтому они классифицируются как бесконтактные устройства. Если подвижная структура тщательно спроектирована и полностью защищена корпусом, то миниатюрный датчик высоконадежен и может функционировать в различных средах и фазовых состояниях, при различных перепадах температур, различных условиях вибрации, при воздействии ударных волн, влажности, загрязнений, электромагнитных помех, радиации. При этом обеспечивается надежная и точная работа в динамическом режиме, т.е. при быстром, скачкообразном, периодическом или аperiodическом изменении параметров.

Поскольку концепция МЭМС предусматривает объединение механического элемента и специализированной микросхемы преобразователя (Application Specific IC, ASIC) для обработки и формирования сигнала в законченную микросистему, в Европе МЭМС принято называть микросистемами (MST), в Японии – микромашинами.

Развитая технологическая база, оборудование, разработанное для всех этапов производства МЭМС, позволяют быстро создавать новые изделия, в которых микроустройства и микросхемы объединены в так называемых гетеросистемных корпусах.

Сегодня различают два типа микросистем на основе МЭМС (рис.1):

- гибридные, состоящие из МЭМС-устройства и отдельной микросхемы, которые размещены на общей кремниевой, стеклянной или кварцевой подложке;
- монокристалльные, представляющие собой стандартную КМОП-микросхему с МЭМС-элементами, выполненными на одном с ней кристалле. Монокристалльные структуры позволяют улучшить характеристики МЭМС, снизить издержки производства, корпусирования и тести-



**Рис.1. МЭМС-датчики и актюаторы: однокристалльный акселерометр компании Analog Devices с одноосевой измерительной структурой, окруженной электронными схемами обработки сигнала (а); увеличенное изображение подвижной части датчика (б); МЭМС Сандийской национальной лаборатории (в); МЭМС микрозеркала Сандийской национальной лаборатории (г)**

рования, поскольку этапы формирования МЭМС и микросхемы объединены. Множество схемных компонентов благодаря объединению с помощью промышленных технологий МЭМС и микросхемы могут быть размещены одним миниатюрным компонентом.

Сегодня МЭМС изготавливаются по технологии либо объемной, либо поверхностной обработки. **Объемная микрообработка** – это расширенная микроэлектронная технология, позволяющая изготавливать трехмерные МЭМС на кремниевой подложке с помощью анизотропного травления кремния с использованием в качестве масок пленок  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , хрома, золота. Недостаток этого метода – зависимость геометрии микроструктуры от кристаллической структуры подложки. Поэтому для формирования МЭМС-системы проводят либо глубокое анизотропное сухое травление (например, реактивное травление газовой плазмой), либо соединяют две подложки (кремниевую с кремниевой или кремниевую со стеклянной), на каждой из которых изготовлена МЭМС-структура и микросхема. Это позволяет создавать более сложные трехмерные МЭМС-элементы.

Сейчас объемная технология во многих случаях используется для изготовления МЭМС-устройств, входящих в двух- или даже трехкристалльные конструкции. Двухкристалльная конструкция содержит кристалл с МЭМС-датчиком, сигнал которого обрабатывает КМОП-схема, выполняющая функции защиты и обратной связи. Такое исполнение позволяет упростить производство МЭМС-устройства и быстрее реагировать на требования заказчика. Поэтому подоб-

ный путь в свое время избрали такие компании, как Bosch, Kionix, VTI Technologies. Кстати, и пионер в области однокристалльных датчиков, изготавливаемых по технологии поверхностной обработки уже 20 лет – компания Analog Devices – недавно выпустила трехосевой акселерометр ADXL345, выполненный на основе двух отдельных элементов – МЭМС и микросхемы ASIC-типа. Это связано с высокой стоимостью сложной системы обработки сигнала.

**Поверхностная микрообработка** позволила с меньшими усилиями создавать более сложные, многокомпонентные интегрированные МЭМС-структуры, формируемые в слоях жертвенного материала, и явилась значительным технологическим достижением. Подложка в основном служит механической основой, на которую осаждаются слои структурного и жертвенного материала. Жертвенный материал после создания требуемой структуры удаляется с помощью химического растворителя, освобождая подвижный элемент. Наиболее широко в качестве структурного материала используется поликремний, в качестве жертвенного материала – SiO<sub>2</sub>. Это обусловлено тем, что регулируя температуру высокотемпературного отжига поликремния, можно получать свободные от механических напряжений, или наоборот, механически напряженные слои. Механические напряжения двуокиси кремния сложно контролировать. Вот почему SiO<sub>2</sub> используется как жертвенный.

После создания МЭМС-структуры к ней с помощью стандартной полупроводниковой технологии могут быть добавлены электронные устройства. Это позволяет формировать МЭМС-структуру в центре кристалла, электронные компоненты микросхем – по его периферии и защитить МЭМС кристаллом-колпачком. Именно такой подход использован при производстве МЭМС и интегрированных МЭМС-датчиков (iMEMS) компании Analog Devices, многоосевых акселерометров, выдвижных (pop-up) микрозеркал, т.е. так называемых систем на кристалле (System-on-Chip, SoC).

Но такой подход достаточно сложен. Если первоначально изготавливать МЭМС-структуру, нарушается необходимая для формирования КМОП-элементов плоскостность подложки. А первоначально изготовленная КМОП-схема не может выдерживать высокотемпературные операции, требуемые для создания МЭМС-структуры. Эти проблемы были решены в частности специалистами Сандийской национальной лаборатории, предложившими изготавливать МЭМС-элементы в канавке, вытравленной на поверхности подложки, с последующим нанесением на нее слоя SiO<sub>2</sub> и химико-механической полировки. Затем на подложке со встроенными МЭМС-элементами с помощью обычной КМОП-технологии изготавливается микросхема и проводятся дополнительные этапы освобождения МЭМС-структуры.

Известен также модульный подход, разработанный исследователями Калифорнийского университета в Беркли, согласно которому алюминиевая металлизация КМОП-схемы заменена вольфрамовой, благодаря чему схема способна выдерживать высокотемпературные процессы изготовления МЭМС-структуры.

Альтернативой микрообработке с вытравливанием канавок, предложенной Сандийской лабораторией, является технология микролития, в процессе которого микроструктуры формируются с помощью литейных форм только там, где нужны, без последующего травления. Для получения подвижного элемента МЭМС-структуры достаточно лишь удалить форму.

Одна из популярных технологий формирования МЭМС-структур предусматривает последовательное проведение процессов литографии, гальванопокрытия и микролития. Эта технология, известная под названием LIGA (Lithographie, Galvanofornung und Abformung), позволяет создавать трехмерные структуры с высоким аспектным соотношением, используя разнообразные материалы – металлы, полимеры, керамику, стекло.

Технологии МЭМС непрерывно развиваются, совершенствуются методы производства и измерений. Так, компания Tronic's Microsystems изготавливает высококачественные МЭМС-датчики по технологии кремний-на-изоляторе (КНИ), позволяющей получать подвижные элементы заданной толщины и с высоким соотношением рабочие характеристики/стоимость.

Достаточно долго не удавалось улучшить характеристики многоосевых датчиков движения, требуемых в первую очередь для инерциальных измерительных устройств. Проблемы включали низкий порог чувствительности, необходимость выравнивать и собирать датчики в трехосевые системы, а также допуски и погрешности АЦП. МЭМС/КМОП-технология позволила изготавливать на одной подложке МЭМС-структуру ячеистого типа, то есть размещать на одном кристалле три МЭМС-датчика ускорения по каждой оси или МЭМС с шестью степенями свободы и микроэлектронную схему управления. И сегодня практически каждый известный производитель акселерометров предлагает интегрированные трехосевые устройства по цене одно- и двухосевых устройств.

Компания VTI Technologies реализовала новый принцип построения интегрированных МЭМС/КМОП-систем, получивших название кристалл-на-МЭМС (Chip-on-MЭМС, CoM). Согласно этой технологии, МЭМС и специализированная микросхема изготавливаются на отдельных подложках, что позволяет провести их полные испытания до объединения. На МЭМС-подложку наносятся металлические слои для формирования межсоединений, диэлектрические пленки и шариковые выводы из припоя, после чего



микросхема методом перевернутого кристалла (Flip-chip)\* монтируется поверх подложки с МЭМС-структурой. Затем зазор между подложкой и микросхемой заполняется пассивирующим слоем. По мнению разработчиков, важное достоинство предложенной технологии – уменьшение размера МЭМС-датчика на одну треть по сравнению с размером существующих устройств. Площадь МЭМС/КМОП-датчика, выполненного по CoM-технологии, составляла всего 4 мм<sup>2</sup>, толщина – 1 мм. Кроме того, CoM-технология компании VTI позволяет уменьшить индуктивность выводов, массу датчика, выполнять автоматическую пайку устройств при поверхностном монтаже.

Для изготовления современных миниатюрных электронных устройств перспективна и технология монтажа бескорпусных кристаллов на печатной плате (Chip-on-Board, CoB). Совмещение CoM- и CoB-технологий обеспечивает большую гибкость и лучшую приспособляемость производственного процесса к конструктивным изменениям, предоставляя больше возможностей контроля и исправления ошибок.

Таким образом, современные МЭМС изготавливаются с помощью тех же процессов, что и микросхемы. Тем не менее, некоторые процессы и их последовательность отличаются, и это различие увеличивается. Сегодня МЭМС объединяют с наноэлектромеханическими системами (nanoelectromechanical system, NEMS), что позволяет расширять их применение, прежде всего в биосистемах, радиочастотных устройствах и акселерометрах. В результате на смену традиционно используемым в полупроводниковой технологии операциям фотолитографии и травления приходит более дешевый метод – наноимпринтлитография. Эта перспективная технология предусматривает погружение наношаблона в мягкий слой тонкой полимерной пленки, нанесенной на фоторезист, который затем отверждается под действием тепла и давления (горячее тиснение) или УФ-излучения (холодное тиснение) с сохранением формы отпечатанного рисунка. Полученная пленка может быть использована как конечная структура, так и как наношаблон для формирования трехмерных структур. Наноимпринтлитография проще в исполнении, чем традиционная фотолитография, не требует сложной оптики, применения опасных химических веществ, мощных источников питания, позволяет работать с широким диапазоном фоторезистов и создавать трехмерные структуры. Благодаря стремительному развитию эта технология уже позволяет получать рисунки с минимальными размерами менее 10 нм. Она уже вышла за стены лабораторий (рис.2). Доступно оборудование для тиснения, выравнивания и совмещения слоев с разрешением порядка 20 нм,

\* Технологии Flip-chip – одно из самых актуальных направлений развития МЭМС. Получить более полную информацию о ней можно в книге Д.Рилея "Мир микро- и наноэлектроники", изданную на русском языке силами компании "Совтест АТЕ".



**Рис.2. Установка монтажа с опцией наноимпринтлитографии модели FC300 французской фирмы SET (Smart Equipment Technology)**

которое в основном ограничено лишь размерами шаблонов. В будущем ожидается широкое применение наноимпринтлитографии.

При производстве МЭМС-структур актуально сухое глубокое реактивное ионное травление (DRIE) на глубину в несколько сотен микрон. Все это, безусловно, значительно отличает производство МЭМС от традиционных техпроцессов микросхем, причем этот процесс меньше влияет на цену микросхемы, чем на цену МЭМС.

В отличие от микросхем, корпусирование которых не имеет первостепенного значения при проектировании системы, корпусирование МЭМС-структур играет важную

роль в процессе производства, влияя на цену изделия. Так, довольно часто из-за несовместимости материалов и технологических процессов изготовления датчиков, актюаторов и электронных схем приходится интегрировать все компоненты в гетерогенную систему на общей подложке (гибридная интеграция). Сейчас в нанотехнологии изучается возможность реализации процесса самосборки, который также отличен от традиционных методов микроэлектроники. Параллельно развиваются два типа нанoeлектронных приборов – интегрируемые с КМОП-микросхемами и не рассчитанные на совместимость с ними.

Сложилась ситуация, в результате которой стоимость корпусирования, сборки и тестирования МЭМС составляет более 50% (или даже 60–80%) стоимости системы. Конечно, в зависимости от назначения устройства этот вклад варьируется. Вполне объяснимы, например, повышенные требования к корпусированию МЭМС-устройств, размещаемых в химически активной среде (например, датчиков давления топливного бака, масла двигателя или кровяного давления человека). В этом случае кремниевая подложка должна быть хорошо защищена. Очевидно, по требованиям к корпусированию МЭМС, предназначенные

### ПРОЕКТЫ "СОВТЕСТ АТЕ" И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО КООПЕРАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

ООО "Совтест АТЕ" работает на рынке микроэлектроники с 1991 года как поставщик комплексных технических решений для предприятий-изготовителей изделий микроэлектроники и предлагает разнообразное оборудование для производства, тестирования и испытания микроэлектронных компонентов, а также расходные материалы и инструменты. В 2006 году выделилось новое направление деятельности компании – "Оборудование для микроэлектроники". И сейчас компания "Совтест АТЕ" активно разрабатывает проекты комплексных технических решений, ориентированных на производство изделий микроэлектроники, в том числе и МЭМС.

Компания сотрудничает со многими лидерами в области производства промышленного оборудования: Teradyne (США), Dage (Великобритания), S.E.T. (Франция), Hesse&Knipps (Германия), Hybond (США), Accrettech (Япония), MultiTest (Германия). Этот неполный список с каждым годом расширяется с целью максимального удовлетворения требований заказчиков, обеспечения возможности выбора вариантов оборудования и достижения оптимального соотношения цена–качество.

Сервисная служба предприятия выполняет гарантийное и постгарантийное обслуживание, техническую поддержку, шеф-монтаж, пусконаладку и настройку оборудования, обучение персонала заказчика.

Большой опыт работы со многими предприятиями-заказчиками России и стран СНГ, накопленный специалистами компании, успешное проектирование и производство первых собственных изделий микроэлектроники позволяют "Совтест АТЕ" заявлять о своей готовности удовлетворить существующую потребность крупных представителей аэрокосмической, военной, атомной отраслей промышленности, а также производителей медицинской аппаратуры в технологиях производства уникальных МЭМС-компонентов. В сферу интересов компании входят все инновации, связанные с полупроводниковой промышленностью и нанотехнологиями, в том числе МЭМС-технологии и фото-

вольтаика. "Совтест АТЕ" развивает такие технологии, как наноимпринтлитография, монтаж методом перевернутого кристалла (Flip Chip), непосредственный монтаж кристаллов на подложку (CoB), зондовый контроль пластин, корпусирование, герметизация изделий и другие. При этом компания стремится предлагать заказчику оптимальные комплексные технические решения. Помимо оборудования для производства предлагаются тестовые и испытательные системы. Так, компания поставляет оборудование обнаружения дефектов в трехмерных корпусах с помощью двумерной и трехмерной рентгенодефектоскопии, установки тестирования МЭМС-датчиков и других компонентов в условиях вибрации и т. п.

В июле 2009 года ООО "Совтест АТЕ" подписало эксклюзивное дистрибьюторское соглашение с американской компанией IMP (Intelligent Micro Patterning) на поставку оборудования для производства изделий микроэлектроники, а именно установок безмасочной оптической фотолитографии, позволяющих работать с различными типами подложек и фотошаблонов. Оборудование компании IMP позволяет создавать структуры с минимальным размером элемента 0,5 мкм. Отличительная особенность этого оборудования – возможность изменять длину волны и мощность излучения модуля экспонирования.

В настоящее время компания в силах предложить помощь крупным компаниям любой отрасли промышленности в создании опытных образцов и освоении производства, а также оказывать полный спектр услуг МЭМС дизайн-центрам. Предприятие располагает специализированной антистатической чистой комнатой, которая служит и для демонстрации оборудования заказчикам. Здесь можно убедиться в реальных предлагаемых "Совтест" возможностях производства прототипов, тестирования, испытаний.

В конце 2008 года в рамках проекта по пусконаладке оборудования с целью передачи его заказчику и укомплектования чистой комнаты были проведены пусконаладочные работы установки монтажа кристаллов PP-5 компании CEFORI (Франция). К ее достоинствам относятся:

для биосистем, в корне отличаются от МЭМС, используемых в сотовых телефонах.

Можно выделить следующие классы корпусов МЭМС-элементов:

- полностью герметичный (обычно вакуумный, керамический, стеклянный, металлический);
- негерметичный пластиковый;
- близкий к герметичному (Near-Hermetic Package, NHP);
- совместимый по размерам с подложкой (wafer-level packaging, WLP) с применением пассивного колпачка (без электрических соединений);

- возможность выполнять монтаж кристаллов практически всеми известными на сегодня методами (на клей, эвтектику, Flip Chip, термокомпрессии и др.), в том числе и в соответствии с технологией CoB;
- простота в эксплуатации и минимальное время, затрачиваемое на освоение рабочих процессов;
- захват кристаллов с упаковок типа Waffle pack и с пластин диаметром до 200 мм (при минимальном размере кристаллов 150×150 мкм и максимальном диаметре подложек до 250 мм).

Кроме установки PP-5 в чистой комнате имеется автоматическая установка разварки кристаллов клином VJ820 и установка тестирования соединений Condor 70-3. Таким образом, оборудование предприятия позволяет выполнять монтаж кристаллов на установке PP-5 с последующей разваркой проволочных выводов и тестирования полученных соединений. Значительный интерес представляет наличие тестового оборудования собственной разработки, пригодное для применения в различных отраслях промышленности.

С целью расширения производства ускоренными темпами строится еще один корпус предприятия.

Разработана программа сотрудничества с ведущими отечественными и зарубежными научно-исследовательскими организациями, предложившими в 2009 году интересные инновации, – МИЭТ, ИФП СО РАН, Научное сообщество им. Фраунгофера, MEMSFab, IHM, CSEM и другие. Благодаря научно-производственной кооперации с институтом "Fraunhofer IZM" (входит в состав Фраунгоферовского общества по содействию прикладным исследованиям, объединяющего более 80 исследовательских центров, включая 56 институтов им. Фраунгофера, расположенных в 40 городах Германии) компания "Совтест АТЕ" в состоянии предложить заказчику следующие готовые бизнес-решения в сфере микроэлектроники и нанотехнологий:

- разработка технологии производства уникального технического продукта в соответствии с требованиями за-

- полностью совместимый по размерам с подложкой (Full WLP) с применением колпачка с электрическими соединениями.

Благодаря малым размерам, повышенным характеристикам, быстрому продвижению на рынок с точки зрения снижения стоимости МЭМС наиболее перспективен WLP-корпус. Сочетание метода создания внутрикремниевых соединений (Through-Silicon Vias, TSV) и WLP-корпусов, а также переход от обработки пластин диаметром 150 мм к 200-мм пластинам позволяют корпусировать около 5 тыс. датчиков, формируемых на одной пластине.



**Установка монтажа кристаллов PP-5 компании CEFORI (Франция), размещенная в чистой комнате ООО "Совтест АТЕ"**

казчика на базе научно-исследовательского комплекса института "Fraunhofer IZM";

- проверка разработанной технологии в условиях российского производства;
- подбор и поставка линейки необходимого оборудования, его тестовые испытания и монтаж;
- теоретическое и практическое обучение специалистов заказчика основам реализации технологии и работы с оборудованием;
- научно-техническое и консультационное сопровождение заказчика в послепродажный период.

Технологии, предлагаемые тандемом "Совтест АТЕ" – институт "Fraunhofer IZM", большей частью отвечают приоритетным задачам, обозначенным Федеральной целевой программой "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008–2015 годы". Специалистами "Совтест АТЕ" выполнена значительная часть предварительных работ по изучению потенциальных рынков акселерометров, в числе и МЭМС-датчиков, основ их проектирования и разработки, проведена всесторонняя проработка вопросов применения передовых технологий производства, тестирования и испытаний. Развитие, результат, а также масштабы осуществления проекта в большой степени зависят от заинтересованности заказчика в дальнейшем сотрудничестве. Компания "Совтест АТЕ" готова оказывать всестороннее содействие в осуществлении проекта совместно с заказчиком и рассматривает любые предложения по кооперации в области производства МЭМС-компонентов и других изделий микроэлектроники.

Для прецизионных измерений важно компенсировать различие коэффициентов теплового расширения элементов, выполненных из разных материалов. Важен и метод крепления МЭМС. Многие МЭМС объединены с ASIC-микросхемами с помощью межсоединений, что также следует учитывать при изготовлении МЭМС/КМОП-устройств. Кроме того, нужно учитывать влияние МЭМС вследствие их природы на общее распределение температурного поля в рабочем пространстве, т.е. присутствие индукционного нагрева, который нельзя фиксировать численным моделированием.

Таким образом, на каждой стадии производства МЭМС практически необходимо ее тестирование. Становится ясным, что для создания функциональных и надежных МЭМС медицинского, военного и аэрокосмического назначения **требуется специальное оборудование для проведения основных технологических процессов производства, корпусирования и тестирования МЭМС.** Совокупность ресурсов, поддерживающих проектирование, разработку, производство и тестирование МЭМС, должна включать такие ключевые элементы, как оборудование для производства и контроля, программное обеспечение. Проектирование, инжиниринг и производство МЭМС выполняются в чистых комнатах (известно, что без надлежащего обращения элементы МЭМС могут быть разрушены электростатическим разрядом), в том числе и с автономной воздушной вентиляцией. При этом предусматривается модульная организация процессов, допускающая выполнение экспериментальных работ. Логистика также является более важным фактором для МЭМС, чем для микроэлектроники, поскольку при их изготовлении требуется соблюдение особых условий обработки больших, хрупких, чувствительных к загрязнениям пластин.

Несмотря на доступность средств разработки и производства МЭМС-компонентов, коммерциализация их ограничена вследствие отсутствия стратегии конструирования оборудования для производства и тестирования принятого поставщиком технического решения. Разработка МЭМС в основном сфокусирована на создании микроэлектромеханического компонента (акселерометра, датчика давления и т.п.), но не предусматривает анализа общего системного решения с встроенной специализированной микросхемой.

Все перечисленные выше проблемы обусловили необходимость кооперации разработчиков и производителей МЭМС и микросхем ASIC-типа. Крупные компании-производители микросхем все чаще стремятся приобретать малые инновационные МЭМС-компании с целью ускорения развития производства МЭМС и увеличения их объема продаж. Один из примеров – намерение компании Bosch приобрести фирму Akustika – новатора в области разработки КМОП/МЭМС-устройств для потребитель-

ских электронных систем. Освоение производства компонентов по собственным МЭМС- и полупроводниковой технологиям привело к существенному укреплению позиций на рынке таких компаний, как Analog Devices и Freescale Semiconductor. В освоении МЭМС-технологии сейчас заинтересована компания Maxim Technologies – крупный производитель аналоговых микросхем. Все это – свидетельства бурного развития МЭМС-индустрии.

Параллельно с предприятиями, специализирующимися в области обработки полупроводниковых пластин (foundries)\*, возникли компании, не имеющие собственного полупроводникового производства, так называемые fabless-компании, заказывающие производство разработанных изделий у крупных предприятий-foundries, иногда через брокеров, формирующих крупные заказы. Fabless-компании иногда называют дизайн-центрами. Доля их продукции на мировом рынке значительна. Выделяется также группа предприятий с ограниченными производственными возможностями (fab-lite). Инфраструктура производителей МЭМС-компонентов может включать средства производства, предоставляемые крупными компаниями, обладающими нужными технологиями производства. Компании-foundries способствуют быстрому продвижению МЭМС-устройств на рынок благодаря хорошо освоенной ими технологии производства специализированных схем и микроконтроллеров.

Позиции предприятий по производству МЭМС усиливаются: все большее число производителей систем принимают решение приостановить собственное производство и передать свои разработки для производства предприятиям-foundries, располагающим передовыми технологиями изготовления МЭМС. Эти предприятия к тому же разрабатывают различные инновационные платформы для выпуска МЭМС, предназначенных для новых областей применения (ВЧ МЭМС, микрофоны), в том числе и мультипроектное производство (Multi-Project Wafer, MPW).

По оценкам компании Yole, объем производства предприятий-foundries в 2008 году составил 480 млн. долл. при среднегодовом приросте 22%. Правда увеличение на рынке доли МЭМС, производимых foundries, в 2008 и 2009 годы, составило всего 6% против 30% в предшествующие годы. Тем не менее, эксперты компании Yole считают, что с 2010 года среднегодовые темпы прироста объема продаж МЭМС предприятиями-foundries будут равны 25%.

Производители микросхем уже располагают многими технологическими процессами производства МЭМС-компонентов. Если же производителю МЭМС доступна и технология корпусирования, и соответствующее оборудование, появляется возможность тестирования выпускаемых изделий

\* По данным компании Yole, сегодня к этой категории в мире относятся 50 предприятий.





на всех этапах производства и повышения их надежности, а также возможность накопления статистических данных анализа неисправностей и их устранения. Стоит ли говорить о наличии у крупных компаний больших маркетинговых наработок и широкой клиентской базы для сбыта МЭМС – одного из ключевых факторов, способствующих развитию и освоению как МЭМС-технологий, так и компаний-производителей микросхем, стремящихся занять лидирующие позиции на рынке МЭМС микросхем (MEMS IC).

Как показывают исследования компании Yole, мировой объем продаж оборудования для производства МЭМС с 2008 года находится на крайне низком уровне – 140 млн. долл. В 2010 году также не ожидается его роста. Это объясняется тем, что инвестиций прошлых лет хватило лишь на поддержание производства МЭМС, но не на его развитие. Заметное увеличение объема продаж оборудования ожидается лишь в 2011 году. Тогда же начнется и развитие промышленной инфраструктуры.

Сегодня активно развивается применение датчиков движения. И здесь речь идет об акселерометрах, занявших ключевые рыночные позиции во многих сферах применения. Эксперты компании Yole ожидают, что объем продаж акселерометров за период 2008–2012 годы увеличится с 893 млн. до более 1,7 млрд. долл. (среднегодовые темпы прироста 19%). Эти данные согласуются с оценками компании iSupply, согласно которым мировой рынок МЭМС-акселерометров за период 2007–2013 годы увеличится с 947,7 млн. до 1,7 млрд. долл. Акселерометры широко применяются в электронных системах автомобилей (например, в системах разворачивания подушек безопасности) и потребительской электронике, в средствах управления производственным оборудованием, в навигационных системах, медицинской аппаратуре. Активно развивается их применение в интерфейсах человек-машина.

Еще одна перспективная область применения датчиков движения – блоки инерциальных измерений (IMU), цена которых благодаря применению МЭМС составляет менее 100 долл.

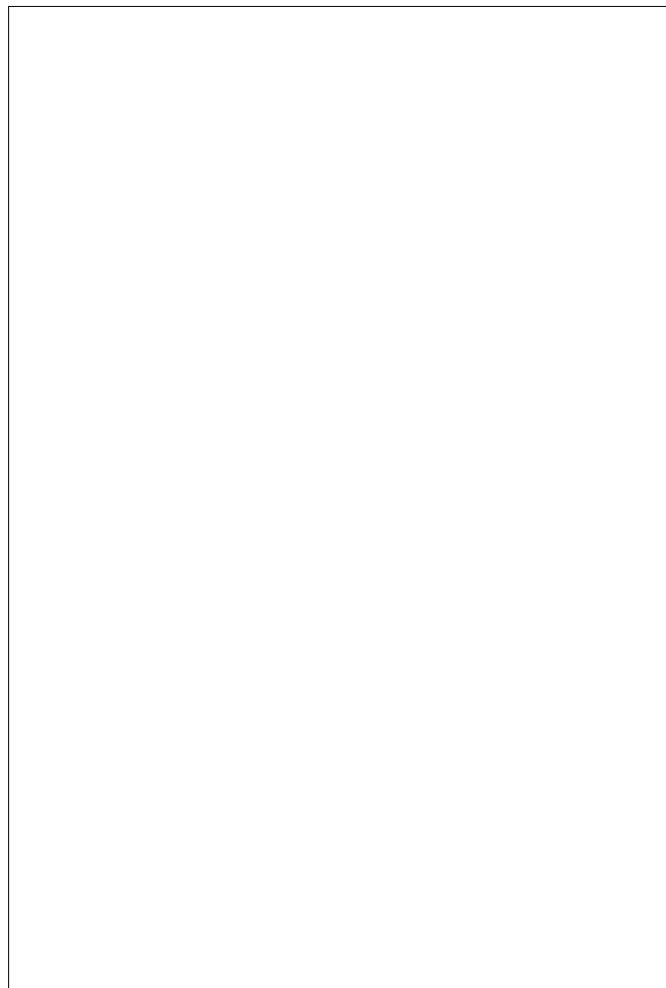
### **АКСЕЛЕРОМЕТРЫ. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ**

Акселерометры измеряют пять основных параметров: перемещение объекта, его положение, наклон, вибрацию и удар. Среди коммерчески успешных датчиков выделяются пьезоэлектрические, пьезорезистивные и емкостные акселерометры. Кроме того, разработаны тепловые акселерометры (МЭМСic), из лабораторий выходят туннельные, микрооптические и микрожидкостные датчики ускорения. Выбор акселерометра прежде всего зависит от области его применения, при этом приоритетными критериями выбора являются регистрируемый параметр (ускорение, движение или вибрация), диапазон его значений, статические или динамические условия работы.

В число основных применений акселерометров входят системы:

- детектирования движения, т.е. измерения ускорения, вычисления скорости и перемещения объекта методом интегрирования;
- измерения вибрации (высокочастотной или низкочастотной);
- регистрации ударов;
- определения наклона/гравитации (инклинометры);
- измерения указанных параметров при высоких и низких температурах, в условиях радиационного воздействия;
- многоканальные.

При измерении параметров движения, например в системах инерциальной навигации, немаловажной является скорость перемещения объекта. При прецизионных измерениях скорости методом интегрирования значений ускорения необходимо сводить к минимуму смещение нуля аналогового сигнала. Поскольку все пьезоэлектрические акселерометры реагируют только на изменение ускорения и нечувствительны к статическим значениям, они не применяются для регистрации движения медленно перемещающихся объектов, при котором возможно смещение нуля сигнала. Это так называемые динамически чувствительные датчики, или АС-акселерометры. Хорошей чувс-





твительностью к малым перемещениям, т.е. хорошей статической чувствительностью обладают пьезорезистивные и емкостные датчики, относящиеся к так называемым DC-устройствам.

Температурный дрейф нуля вызывает то же ненулевое смещение у статически чувствительного акселерометра, что и у динамически чувствительных АС-акселерометров. Отличается только природа их возникновения. Поэтому необходимо учитывать рабочую температуру и температурные условия функционирования системы. Поскольку результаты измерения – скорость или перемещение – в сильной степени зависят от качества первичного сигнала ускорения, важное значение имеют такие параметры датчика, как разрешение и отношение сигнал-шум.

При измерении вибрации на первое место выходит частотная характеристика – высокая или низкая частота вибрация. Диапазон частот непосредственно связан с детектируемым диапазоном ускорений. Резонансная частота акселерометра, предназначенного для измерения высокочастотной вибрации, должна была быть высокой. Это позволяет предотвратить у недемпфируемых акселерометров, составляющих большинство устройств этого назначения, резонанс, вызываемый высокочастотными гармониками, и недопустимое отключение датчика и микросхемы. Чувствительность широкополосного акселерометра к входному сигналу ускорения обычно низкая. Это – главное физическое ограничение преобразователей, включающих пружинную массу. Поэтому важной функцией широкополосных датчиков является способность выполнять калибровку. Важен также и метод крепления акселерометра, поскольку от него зависит способность передавать сигналы.

Регистрация низкочастотной вибрации, например при модальном анализе, требует хорошего согласования фаз каналов в рабочем диапазоне частот. Поэтому при выборе акселерометра для низкочастотных измерений приоритет отдается DC-датчикам: пьезорезистивным и емкостным устройствам или сервоакселерометрам (устройствам с принудительной обратной связью, обеспечивающей удержание инерционной массы в сбалансированном положении). Для выделения шумовых помех рекомендуется низкочастотная фильтрация, исключаящая ВЧ-гармоники, снижающие динамический диапазон системы. Важным фактором является частота среза порядка нескольких гигагерц, или близкое к статическому ускорение. Более высокие частоты могут измеряться АС-акселерометрами. Так как на низких частотах на существующем фоне, особенно на фоне большой амплитуды перемещений основания сложно выделить вибрационные сигналы, чувствительность акселерометра к механическому напряжению основания должна быть низкой. Для этого рекомендован адгезивный монтаж датчика. Тепловая переходная чувствительность, или чувствитель-

ность к медленно изменяющемуся температурному полю, также влияет на сигнал ускорения, поэтому целесообразно применять эффективную тепловую защиту датчиков.

Особую нишу занимают акселерометры, предназначенные для эксплуатации в жестких условиях, т.е. работающие в различных средах (масле, газе), при экстремальных температурах (-120, 180°C), высоких вибрациях, ударных нагрузках (20000g), повышенной радиации. При беспроводной передаче информации в многоканальных системах актуальны также проблемы идентификации и безопасности. Безусловно, МЭМС для таких применений имеют ограничения, но использование соответствующих материалов (Si, SOI, SiC) и технологий микропроизводства в сочетании с опытом выполнения измерений, сборки и корпусирования позволяет строить датчики, удовлетворяющие самым жестким требованиям этих применений.

Для измерения ударов, например при креш-тестах автомобилей, испытаниях ударопрочности корпусов, устойчивости объектов к ударным волнам при взрыве, требуются акселерометры со специальными характеристиками. Важнейшая из них – пиковое ударное ускорение (~10000g или выше). Часто ударное воздействие нелинейно и его сложно характеризовать. Поэтому при выборе акселерометра важно, чтобы его смещение нуля сигнала было минимальным. Это достигнуто в специально разработанных устройствах. Чем ближе к источнику воздействия находится акселерометр, тем выше ускорение свободного падения, поэтому малая не ограничиваемая (не демпфируемая) масса может вызвать воздействие большой силы. Это может привести, в частности, к неисправностям соединителей, плохим контактам, генерации трибоэлектрических шумов при использовании обычных коаксиальных кабелей. Поэтому для детектирования высоких ударных воздействий благодаря малой массе применяются паяные терминалы и ленточные жгуты. Но при их монтаже требуется осторожность.

Полезный выходной диапазон не должен быть ограничен. Применение ФНЧ на входе усилителя позволяет предотвратить перегрузки вследствие неожиданных воздействий на входе. Для измерения параметров движения при медленных ударах должна быть обеспечена статическая чувствительность.

Измерения в условиях радиации, или вблизи радиоактивных источников, например ядерных реакторов, требуют применения радиационно стойких акселерометров. Поскольку уровень радиации зависит от местонахождения акселерометра, существует градация уровня радиационной стойкости различных датчиков. Как правило, наивысшей радиационной стойкостью обладают пьезоэлектрические акселерометры, а наименьшей – конструкции со встроенными электронными устройствами. В таких применениях при вы-



боре акселерометра также учитываются следующие соображения. Для передачи сигнала в помещение с оборудованием мониторинга и управления процессом используются специальные радиационно стойкие кабели и преобразователи. Для кабельных сборок применяются специальные материалы, отличные от традиционного тефлона, не выдерживающего длительное радиационное воздействие. Так, компания Endevco предлагает специальные кабельные сборки для акселерометров, работающих в условиях радиации. Несколько моделей семейства 2273A компания рекомендует применять в атомной промышленности.

Помимо атомной промышленности, радиационно стойкие КМОП-микросхемы необходимы для аэрокосмических систем, для которых требуются схемы повышенной надежности, удовлетворяющие самым жестким требованиям, например требованиям военных стандартов MIL-M-38510, MIL-STD-883 класса B и SP, MIL-I-38535 (для специализированных ASIC микросхем, БИС, СБИС). Акселерометры, предназначенные для космической электронной техники, должны иметь следующие характеристики:

- диапазон рабочей температуры -55...125°C;
- повышенную вибростойкость;
- повышенную герметичность корпусов, защиту от воздействия внешней среды;
- высокую надежность, срок службы 10–15 лет (15 сбоев за  $10^9$  ч);
- низкий уровень отказов (10 ppm);
- высокую долговременную стабильность;
- контролируемые жаростойкость и газовыделение.

Стоит отметить и высокие требования к МЭМС и наноустройствам, используемым в автомобильных системах, промышленном оборудовании, медицинской аппаратуре, которые с каждым годом становятся более жесткими. Важна надежность и отказоустойчивость устройств, ответственных за жизнеобеспечение пациента, за автомобильную и промышленную безопасность. Для обеспечения максимального соответствия требованиям различных отраслей промышленности разрабатываются стандарты МЭМС. Над созданием таких стандартов работают специалисты Международной ассоциации производителей полупроводникового оборудования и материалов (SEMI), Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE), Объединенного совета по электронным устройствам Ассоциации электронной промышленности (JEDEC) и другие. Стандартизации подлежат методы корпусирования, тестовые методы, квалификационные планы, требования к кабелям, переходникам, соединителям для всех МЭМС-устройств. Особое внимание уделяется методам тестирования корпусированных устройств. В перспективе – квалификация устройств, используемых для производства МЭМС-систем, помимо общепринятых стандартов (ISO9001:2000, RoHS),

стандартизация производственных процессов, методов тестирования, испытаний.

Все это означает, что многие рынки (изделий атомной, аэрокосмической и военной отраслей промышленности, медицинской аппаратуры) смогут оптимально использовать достоинства МЭМС-технологии, в том числе и при эксплуатации компонентов в жестких условиях. Но от производителя компонентов это потребует более глубокой проработки вопросов выбора технологических операций и подбора оборудования для производства изделий требуемого качества.

## ЛИТЕРАТУРА

- Еloe J.C.** MEMS and Nano Divergence: Status of MEMS INDUSTRY.—yOLEdEVELOPMENT, sEPT.2009.
- Рилей Джордж А.** Мир микро- и наноэлектроники: Учебное пособие по современным технологиям в производстве микросистем. Ч. 1/Пер. с англ./Общ. ред. ООО "Совтест АТЕ": "Экспромт", 2009.
- Рилей Джордж А.** Мир микро- и наноэлектроники: Учебное пособие по современным технологиям в производстве микросистем Ч.2/Пер. с англ./Общ. ред. ООО "Совтест АТЕ": "Экспромт", 2009.
- Сысоева С.** Магнитоуправляемые МЭМС и мультисенсорные датчики движения 2009 года – функциональнее, точнее, миниатюрнее предшественников.– Компоненты и технологии, 2009, №8.
- Сысоева С.** Автомобильные акселерометры. Ч.3. Классификация и анализ базовых рабочих принципов.– Компоненты и технологии, 2006, №2, с.42–49.
- Сысоева С.** Автомобильные акселерометры. Ч.4. Развитие технологий и элементной базы емкостных акселерометров. – Компоненты и технологии, 2006, №3, с.10–17.
- Сысоева С.** Автомобильные акселерометры. Ч.5. Перспективная элементная база поверхностных кремниевых емкостных акселерометров. – Компоненты и технологии, 2006, №4, с.28–39.
- Сысоева С.** Автомобильные акселерометры. Ч.6. Некоторые уникальные технологии. Итоговый сравнительный анализ и оценка перспектив. – Компоненты и технологии, 2006, №5, с.58 –66.
- Sovtest ATE [www.sovtest.ru](http://www.sovtest.ru), [www.microsovtest.ru](http://www.microsovtest.ru)  
Yole Development [www.yole.fr](http://www.yole.fr)  
[www.memsindustrygroup.com](http://www.memsindustrygroup.com)  
[www.memsnet.com](http://www.memsnet.com)  
[www.sandia.gov](http://www.sandia.gov)