

Окончание. Начало в № 10' 2010

Введение в High-End сегменты применений MEMS-технологии

Светлана СЫСОЕВА
Dr.Gold@sysoeva.com

Актуальные новости и предложения компонентов от ведущих производителей МЭМС для High-End применений — постоянная тема для обсуждения и источник приложения сил российских разработчиков. Тех, кто успешно реализует бизнес-модель проектирования на уровне применения покупного компонента в составе электронного модуля собственной разработки (компонента следующего уровня иерархии или системы). Этот материал — для них. В статье представлен обзор современных применений МЭМС-технологий в сегментах рынков, обобщаемых названием High-End.

Снижение цены технологий уровня High-End до уровня, допускающего их распространение на массовых рынках и повсеместное снижение цены на всех рынках, — одно из самых значительных достижений эволюции технологий МЭМС, наблюдаемое сегодня.

Современная эволюция идет нарастающей волной, так как развитие технологий позволяет снизить цены. Разработанные когда-то как High-End, подешевевшие МЭМС-устройства находят себе множество новых применений и поддерживают затраты на новые High-End разработки — как для массовых, так и для уникальных рынков. Ряд применений, выходящих за рамки повышения уровня обеспечения потребностей отдельно взятого индивида и предназначенных для решения более широкомасштабных или узкоспециализированных, например, исследовательских задач в масштабах планеты или космоса, либо в пределах только одной лаборатории или предприятия/станции, непрерывно формирует спрос на High-End устройства еще более высокого уровня. Цикл непрерывно возобновляется. По мере коммерциализации технологий на смену одним устройствам или применениям High-End класса приходят другие — более высокоточные, высоконадежные, высокостабильные, при этом по более низкой цене.

Но когда количество устройств/применений возрастает, повышается и уровень самой системы, в которой применяются устройства, что приводит к качественно иному результату. Встает вопрос об оптимизации и сокращении, привлечении сетевых ресурсов, беспроводных или IP-каналов связи для установления санкционированного доступа к информационному серверу, разгрузке серверных процессоров с использованием высокоточных устройств посредством специально разработанных алгоритмов. Наиболее известным и успешным примером комму-

никации является Интернет, уже нашедший свое применение и для коммуникации промышленных сенсорных сетей. На горизонте — информационные сенсорные системы в масштабах планеты, предоставляющие возможность удаленного санкционированного доступа к сенсорной информации из различных точек Земли и формирующие более высокие требования к характеристикам и коммуникативным способностям датчиков.

МЭМС как системы в системе, с их высокой интегральностью и интегрируемостью, надежностью, точностью, малым энергопотреблением являются подходящими кандидатами для развертывания сенсорных сетей в любых масштабах.

Все это — текущий результат эволюции технологий МЭМС, циклически стартующий с уровня High-End.

МЭМС-датчики Солнца

Идеи по практическому использованию датчиков Солнца состоят, например, в определении местоположения Солнца в целях осуществления навигации или измерении интенсивности воздействующего света для включения автоматического кондиционера.

Положение Солнца и ориентация относительно него в пространстве актуальны для UAV, спутников, космических кораблей и даже обычных транспортных средств. Более точные и интеллектуальные системы управления формируют потребность в датчиках навигации и IMU, дополненных датчиком Солнца.

В последнее время приобретают особую актуальность идеи по использованию солнечной энергии для обогрева жилых домов, питания электрических двигателей и электронных приборов и систем (фото-вольтаика) — согласующиеся с идеями энергосбережения, экономии мощности, истощаемых природных ресурсов. Для измерения интенсивности солнечного излучения в ряде

применений (например, для включения/выключения осветительных, обогревательных, энергосберегающих/захватывающих приборов) может быть достаточно фотодиода или фототранзистора.

Но уровень МЭМС-технологий, продемонстрированный на примерах датчиков изображений в видимом и ИК-спектре, микроболометров, предоставляет еще большие реальные возможности для осуществления пиксельного контроля солнечного излучения. МЭМС-датчики — меньше, легче, более функциональны и надежны, чем полупроводниковые дискретные и другие не МЭМС-аналоги.

Так, солнечные датчики широко используются в подсистемах контроля ориентации космического корабля для измерения солнечного вектора в координатной системе. Микро- и нанокорабли или спутники недалекого будущего, оснащенные датчиками Солнца, будут использовать их для наведения курса относительно Солнца и определения положения. Впрочем, стандартные полупроводниковые датчики Солнца могут оказаться значительно больше самих микро- и нанокораблей. Все это указывает на неизбежность миниатюризации технологий датчиков Солнца до уровня МЭМС и далее — нанотехнологий. В последние годы были разработаны многие типы датчиков Солнца на кристалле, которые классифицируются как МЭМС.

Общим для многих из них является то, что датчик Солнца включает пиксельный датчик изображения со слоем маски, помещенным поверх слоя пикселей.

МЭМС-датчик Солнца на кристалле, разработанный для NASA в Калифорнийском технологическом институте, состоит из трех частей [22]:

- маски;
- разделителя (спейсера);
- фокальной плоскости, в которой размещена CMOS-камера.

Очевидно, в данном примере этот датчик может быть классифицирован как МЭМС ввиду многослойности структуры, в которой размещена CMOS-камера, и наличия механических элементов в паттерне маски.

Слой маски включает паттерн из 217 апертур. В зависимости от локации паттерна изображения в плоскости детектора датчик Солнца определяет угол падения солнечного луча. Фокальная плоскость МЭМС-датчика представляет собой камеру на кристалле — активный пиксельный сенсорный массив (Active Pixel Sensor, APS). Камера дополнена оптикой, выполненной в малой части кремниевой подложки/пластины.

Вся CMOS-функциональность (АЦП, средства вывода и т. д.) также интегрируется на кристалле.

Известны и другие разработки. Например, для реализации кристалла подходит структура «кремний на изоляторе» (SOI) или «кремний на стекле» (SOG). Боросиликатное стекло выполняет функции крышки, через которую лучи солнца проникают на фотодиоды. Разница в фототоке используется для извлечения информации об угле падения солнечного луча, сигнал для верификации также сравнивается с опорным.

В патенте 7,781,735 раскрывается сборка датчика Солнца для прикреплению к теплового датчику изображений, включающая двухконечный корпус, датчик Sun TEST sensor, прикрепляемый к одному концу тела трубки, ИК-окно, прикрепляемое к другому концу, ИК-фототранзистор, размещенный в трубке в пределах области обзора датчика Sun TEST Sensor — для автоматической активации ON/OFF механизма и защиты теплового датчика от опасного излучения [23].

Компания Solar MEMS Technologies S.L. разработала собственную технологию, основанную на МЭМС процессах производства и предназначенную для высокоточных систем солнечного слежения и позиционирования [24]. По заявлениям компании, технология позволяет создать высокоинтегрированные сенсорные структуры по низкой цене.

Датчик Солнца на кристалле (Sun Sensor on a Chip, SSoC) (рис. 9) измеряет угол падения солнечного луча по двум ортогональным осям. Практическое использование технологии направлено на решение следующих задач:

- определение ориентации;
- определение точного положения Солнца;
- позиционирование относительно Солнца в определенных точках траектории.

Разрабатывалось устройство как опорное дополнение к другим датчикам положения UAV в воздухе и IMU. Но SSoC-датчики допускают также географическую самолокацию, измеряют угловое перемещение, угловую скорость, угловое ускорение, выполняют другие комплементарные измерения.

Solar MEMS Technologies и Центр передовых аэрокосмических технологий (Center

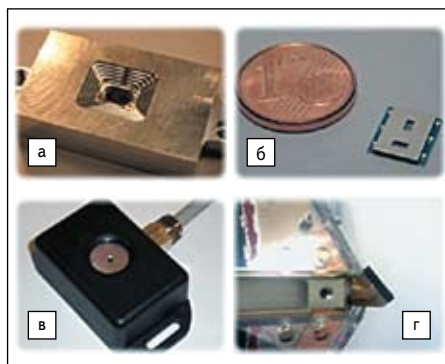


Рис. 9. Датчик Солнца Solar Sun Sensor on a Chip (SSoC): а, б) внешний вид; в) применение на UAV; г) применение со спутником Nanosat 1B

for Advanced Aerospace Technologies, CATEC) оценили работу датчиков Солнца на беспилотном транспортном средстве. Применение датчиков Солнца на UAV было одобрено для различных задач: контроля стабильности, географической самолокации, измерения высоты или линейной скорости.

Solar MEMS разрабатывает и другие новые применения/приложения устройства (на аппаратном и программном уровнях) в сотрудничестве с университетами и другими организациями. Иные применения датчика Солнца например, солнечное слежение в энергетике, гелиостаты.

Имеет место использование спутников для погодного наблюдения, научных измерений, телекоммуникации, высокоточных систем позиционирования. Эти платформы нужны в очень точных системах контроля положения в пространстве (Accurate Attitude Control Systems, AACS) — для того чтобы инструменты типа солнечных панелей, антенн и другого аппаратного обеспечения были правильно ориентированы для выполнения своих функций.

Датчики Солнца, которые могут измерять воздействующий угол солнечного излучения по двум осям, — наиболее распространенная технология датчиков позиционирования спутников. Для этого применения и других аэрокосмических, энергетических применений и UAV компания Solar MEMS разрабатывает точные (fine) и грубые (coarse) датчики Солнца.

Компания акцентирует внимание на том, что квалифицированная и выведенная на орбиту технология Sun Sensor on a Chip превосходит другие технологии датчиков Солнца по цене и уровню характеристик. Сенсорные блоки потребляют меньше энергии, имеют более широкую область обзора (60°) и высокое разрешение/точность (до 0,5°). Опыт в спутниковых применениях Solar MEMS включает различные проекты с INTA, MICINN и ESA (с момента старта разработки Nanosat 1B в 2006 году, который был запущен в 2009 году) [24].

МЭМС датчики излучения

Для изучения Солнечной системы NASA требуются новые сенсорные возможности, реализуемые в условиях космического галактического и солнечного излучения [25, 26] — первичного и вторичного. Часть радиации может поглощаться, а часть дает вторичное излучение. Еще некоторую часть радиации составляют искусственные источники на борту. Радиация представляет собой опасность для здоровья и жизни космонавтов, что является темой отдельных исследований, а также может разрушать кремниевую электронику, так как изменяет мобильность носителей заряда, вызывая токи утечки и в конечном итоге сбой.

В космических системах необходим контроль радиации в режиме реального времени, для чего NASA Glenn Research Center (GRC) [25] разрабатывает технологию детекторов космического излучения. Создание электронных online-дозиметров — все еще не решенная задача, хотя бы по той причине, что кремниевая электроника сама чувствительна к радиации настолько, что не дает эффективности измерений.

Поэтому NASA связывает будущее таких измерений с МЭМС и нанотехнологиями, способными работать в жестких условиях эксплуатации, и проводит исследования в этой области.

Для создания датчиков излучения предполагается использовать эффект сонолюминесценции, который состоит в генерации световой энергии от звуковых волн. Этот эффект впервые был открыт в 1930-х годах при работе с сонарами (гидролокаторами). Сонолюминесценция как явление для практического использования состоит в концентрации акустической энергии в разрушающихся (в жидком носителе) пузырьках, излучающих пикосекундные импульсы света в широкой полосе частот (рис. 10).

Для детектирования сцинтилляции¹ можно применять различные средства получения изображений — видеокamеры, фотодетек-

¹ Сцинтилляция — кратковременная световая вспышка. Сцинтилляторы — вещества, обладающие способностью излучать свет при поглощении ионизирующего излучения. В сцинтилляционном детекторе свет, излученный при сцинтилляции, собирается на фотоприемнике.



Рис. 10. Мультипузырьковая сонолюминесценция в воде при пятиминутном экспонировании (фото NASA GRC)

торы. Можно определить разницу в спектре излучения в тяжелой (D_2O) и легкой воде (H_2O), растворителях, например глицерине.

Разрабатываемые датчики излучения используют оптические компоненты и полупроводники с большой шириной запрещенной зоны, которая допускает большой диапазон энергии и разрешение. Важнейшее применение разрабатываемых технологий — в носимых детекторах излучения высокого качества, обладающих и высокой чувствительностью, и высокой надежностью. Электроника дозиметров выполняется на основе материала SiC, известного высокотемпературными свойствами и радиационной стойкостью.

Процесс сопровождается генерацией высоких давлений и температур.

Температура, сгенерированная в разрушающихся пузырьках, — выше температуры на поверхности Солнца, которая достигает 6000 К. Вычисления дают пиковые температуры в пузырьках, превышающие 12 млн К. Пиковые давления могут достигать 100 млн атм., инициируя слияние D-D (дейтерий-дейтерий).

В текущих разработках регистрация высоких температур, сопровождающих солюминесценцию, осуществляется платиновыми тонкопленочными детекторами. В разработке — тонкопленочный сцинтилляционный детектор, в котором тонкие пленки индицируют происходящие процессы. Например, родий используется для детектирования нейтронного излучения, медь представляет собой аттенюатор, палладий — катализатор для ряда процессов.

Но для применения в дозиметрах исследователям интересна не солюминесценция сама по себе, в данном проекте она предназначена именно для верификации вновь разрабатываемых сцинтилляционных детекторов. Впрочем, солюминесценция и сцинтилляторы актуальны также и для контроля следующего поколения МЭМС энергоберегателей и реакторов.

Высокие давления и температуры, сопровождающие явление солюминесценции, интересны и с точки зрения генерации мощности, а также использования для альтернативных источников энергии. NASA Glenn Research Center провел изучение солюминесценции для формулирования выводов о применении эффекта для создания меньших, более легких, тихих и более топливно-эффективных транспортных средств для авиации, изучения космоса и транспортировки.

Миниатюризация и интегрирование измерительных функций — ключевой аспект для осуществления как беспилотных, так и пилотируемых заданий. Ресурсы по мощности и пространству ограничены, в космических

применениях востребованы прочные и компактные корпуса.

Другие исследования, проведенные NASA Glenn Research Center еще в 1989 году, показали очевидность аномального тепла в течение загрузки/разгрузки дейтерия в объемный палладий. Получивший в свое время название “cold fusion” («холодное слияние»), затем данный эффект и другие ему подобные стали называться низкоэнергетическими ядерными реакциями (Low-energy Nuclear reactions, LENR).

Технологии МЭМС дают много возможностей для генерации мощности и осуществления передвижения, и данная область — одна из ключевых областей исследования. Одна из таких возможностей — микроракеты, основной компонент которых — микроракетные двигатели.

Микроракетные двигатели (MEMS thrusters)

МЭМС-микродвигатели соответствуют электрическому способу передвижения (Electric propulsion, EP), который в последние годы повсеместно приобретает приоритет над стандартными методами передвижения с использованием энергии от бортовых химических реакций². EP в первую очередь интересны для малых транспортных средств — от микроUAV до микрокосмических кораблей. Но существуют и другие применения микродвигателей — как в пределах транспортного средства, так и за его пределами. Например, электродвигатели могут использоваться для контроля полета, регулирования поверхностей, контроля положения спутников — причем не как главные, а как вторичные системы передвижения (именно они называются thrusters).

Задача дизайна микродвигателя состоит в том, чтобы в МЭМС-структуре сгенерировать электричество, которое затем выводится на электрод и используется для создания тяги. Многие сведения для реализации микротехнологий могут быть выстроены на основе знаний из сферы макротехнологий, используемых для передвижения. Электрические способы передвижения классифицируются в следующие главные категории, в зависимости от метода ускорения носителя, создающего тягу (propellant): электротепловые, электромагнитные, электростатические.

Электротепловой метод состоит в нагреве носителя (propellant). Электротепловой двигатель резистивного типа (resistojet) используется для нагрева рабочего тела электричеством, подаваемое через резистивный проводник. При нагреве газ расширяется. Расширяясь, газ выходит через сопло, что создает тягу. Как

рабочие тела/носители, могут использоваться не только газы, но и жидкости. Недостаток — малая эффективность, ограничения по температуре нагрева и мощности импульсов в создании тяги.

Следующее решение — arcjet, представляющий собой тот же resistojet, где газ передается через электрическую дугу (анод плюс катод). Газ может нагреваться до более высоких температур (3000 °C), что дает более высокие мощности, но с меньшей эффективностью. Как правило, дуговые электротепловые двигатели не столь легко масштабируемы для различных задач, как резистивные. Одна из проблем — разрушение (плавкость) электродов. Безэлектродные электротепловые двигатели работают на микроволнах.

Группа электростатических двигателей включает ионные и коллоидные двигатели, а также FEED.

Когда носитель входит в ионизационную камеру, электроны, излучаемые из центрального горячего катода, привлекаются к аноду, ионизируя атомы носителя. Сильное электрическое поле вызывает ускорение ионов, которые покидают двигатель, создавая тягу. Ионные двигатели часто в качестве носителя используют ксенон.

Поток выхлопа — это горячий катодный эмиттер, который впрыскивает электроны в выхлопной поток. Без этого выходящие ионы будут создавать заряд, который может интерферировать с другими источниками поля, создавая притяжение ионов, снижая тягу.

Коллоид представляет собой каплю, подобную чернилам принтеров, используемым для рассеивания на бумаге.

Микрокапли могут ускоряться в коллоидном микродвигателе подобно ионному. Двигатель лучше подгоняется под выполнение конкретного задания. Могут быть использованы различные носители.

Интересны микродвигатели Field Emission Electric Propulsion (FEED) Thrusters, представляющие собой малые двигатели, работающие во многом подобно коллоидным и имеющие заостренный излучатель. Разница с коллоидными состоит в том, что FEED эмиттер меньше (порядка мкм) и работает с ионами вместо капель. Ионизация происходит в процессе эмиссии, и ионизационная камера не требуется. Капиллярный метод выталкивания исключает необходимость в клапанах. FEED обычно используют как носитель расплавленного индия.

Электромагнитные ракетные двигатели представляют собой самую большую группу электродвигателей. При их создании используют различные методы, но функционируют они на основе одного и того же принципа — силы Лоренца. Если электрический ток протекает перпендикулярно магнитному полю, магнитное поле будет действовать в точке заряженной частицы (твердый проводник, газ) против поля (сила Лоренца). Другие электромагнитные двигатели — это импульсные ин-

² Химические ракетные двигатели космических кораблей функционируют при возгорании горячего и окислителя для создания тепла, которое вызывает расширение рабочего тела и создает тягу для вывода корабля на орбиту. Меньшие химические двигатели используются для изменения орбиты и удержания спутников на конкретной орбите.

Значительный недостаток химических двигателей — высокое потребление топлива, которое должно находиться на борту. Электрические двигатели потребляют намного меньше топлива. Один из путей состоит в комбинировании электрических и химических двигателей. В разработке также находятся ядерные двигатели.

дуктивные, магнитоплазмадинамические двигатели, двигатели Холла, плазменные и т. д.

Коллоидные и ионные микродвигатели типа Field Emission Electric Propulsion (FEEP) Thrusters, например, достаточно просто представить в МЭМС-исполнении. МЭМС-устройство может включать микрокамеру — испаритель жидкости и генератор капель, поступающих под давлением в систему микроканалов на кремниевом или стеклянном субстратах. Сопло производится на кремниевой пластине поверх тонкопленочного оловянно-индиевого нагревателя, размещенного на стекле.

Например, NWUAV (Northwest UAV) MEMS система впрыска топлива использует технологию Hewlett Packard Ink Jet для атомизации топлива.

Электротепловые методы очень перспективны для реализации на основе технологий МЭМС, так как тепло может быть получено из различных источников. МЭМС-технологии могут использоваться не только как двигатели, но и как генераторы, рекуперирующие энергию отработавшего тепла или энергию торможения, захваченную в результате других полезных процессов. Ряд подобных осуществлений МЭМС-устройств для космических и коммерческих применений раскрывается в патенте 6,978,611 [27].

Для МЭМС можно использовать различные материалы, в том числе высокотемпературный карбид кремния (SiC).

Все это позволяет рассматривать МЭМС как технологию будущего для реализации различных типов микродвигателей и генераторов.

Идеи по применению МЭМС-микродвигателей на основе физических или химических процессов для создания тяги³ возникли еще в XX веке. Так, известен проект DARPA по созданию системы контроля передвижения и положения микроспутников. Один из главных его результатов — успешное суборбитальное тестирование космического полета. Вся история проекта представлена в Интернете [28].

У программы цифрового микропередвижения MEMS Digital Micro-Propulsion Program, финансируемой DARPA и поддерживаемой TRW/Aerospace/Caltech, было две главные цели, одна из которых — продемонстрировать различные типы микродвигателей, а вторая — выполнить запуск микродвигателей в космос и верифицировать их характеристики.

Передвижение, поддержание положения/связи со станцией (station-keeping), контроль положения (ориентации, attitude) микрокосмических аппаратов (класса 1 кг) создает потребность в компактной и легкой системе для контроля генерации малых сумм импульсов. Был выбран МЭМС-метод, позволяющий исключить из рассмотрения топливные баки, топливные линии и клапаны. MEMS-двигатели размещены в массивы и выполнены как трехслойный сэндвич

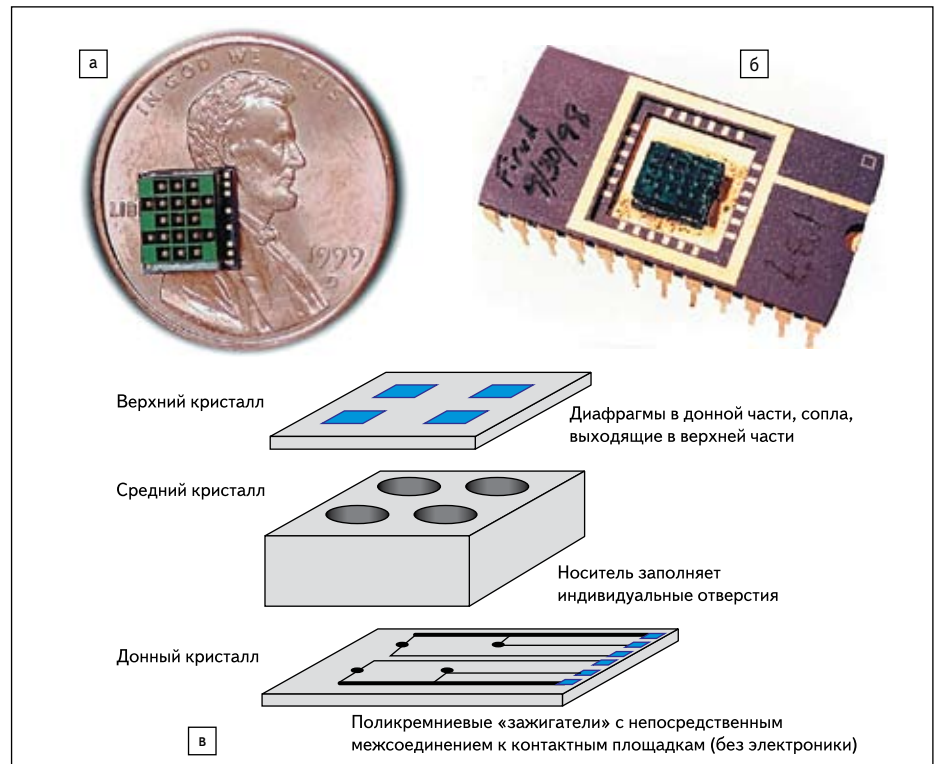


Рис. 11. Микродвигатели, разработанные в рамках программы DARPA: а, б) внешний вид; в) конфигурация

из кремния и стекла, в котором средний слой состоит из массива малых ячеек, или пленумов, и уплотнен диафрагмой на одной стороне (рис. 11).

Каждая ячейка представляет собой двигатель, подобный твердотельному ракетному двигателю. Ячейка загружается горючим ракетным топливом или инертными веществами в газообразной, твердой и жидкой форме. При использовании топлива происходит зажигание, которое способно формировать высокотемпературную жидкость с высоким давлением. Инертная субстанция нагревается для повышения давления, а после превышения давления распора диафрагмы она разрывается и формируется импульс — как жидкость, изгоняемая из пленума. При зажигании каждая ячейка поставляет один импульсный бит.

Величина импульса определяется в процессе производства размером пленума и топливом/носителем, которое загружается в ячейку.

Конфигурация представлена на рис. 11в. Верхний слой включает массив тонких диафрагм (SiN толщиной 0,5 мкм, квадрат со стороной 190/290/390 мкм). Средний слой — это массив сквозных отверстий (фоточувствительное стекло Schott FOTURAN, 1,5 мм толщиной) с диаметром 300, 500 или 700 мкм, которые нагружаются горючим. Донный слой включает массив поликремниевых микрорезисторов. Два донных слоя со-

единяются вместе, затем к ним присоединяется верхний слой. С различными размерами отверстий пленумов, диафрагм, резисторов было получено 90 различных конфигураций. Кристалл в сборке показан на рис. 11б.

Каждый микродвигатель способен сгенерировать 0,1 мН·с и примерно 100 Вт мощности, что зависит от горючего и других факторов. В перспективе это значение может быть увеличено в 10 раз.

Рассмотренный МЭМС-дизайн микродвигателей имеет преимущества над обычными двигателями: отсутствие движущихся частей, возможность использования различных видов топлива, масштабируемость, отсутствие необходимости в топливных баках, линиях, клапанах. Функция передвижения может быть интегрирована в спутник (микро-, нано- или пикомасштаба). Один или несколько микродвигателей могут заменить один или несколько двигателей вместе с топливными баками и системами топливоподдачи, включая клапаны. Массив можно запрограммировать для зажигания отдельных двигателей, нескольких двигателей одновременно или в контролируемой последовательности — для регулирования продвижения в дискретных инкрементах и поставки точных сумм импульсов.

Микросистемы продвижения (micro-propulsion) также называются ракетами на кристалле (rockets on a chip).

Приложение технологии MEMS к космическим системам дает новые возможности для

³ Еще один пример — микрозеркала, активируемые по большей части электростатическими или электромагнитными двигателями. МЭМС-двигатели также можно комбинировать с микропередатчиками (microtransmissions, microengines) — редукторами, мультипликаторами и применять для управления поверхностями, колесами, вентиляторами.

включения в орбитальное движение (orbital insertion⁴), обеспечения сохранения связи со станцией и функциональности контроля ориентации в пространстве по более низкой цене. Массив микродвигателей высокоизбыточен. На пластине может быть произведено порядка 106 микродвигателей.

Рассмотренный дизайн микродвигателей был успешно продемонстрирован на суборбитальной ракете Scorpius.

К программе Digital Micro-Propulsion Program проявила значительный интерес компания Northrop Grumman, которая производит и демонстрирует широкий ряд продуктов и услуг для разработки аппаратных средств для высококачественного полета.

Текущая линейка продуктов Northrop Grumman для осуществления продвижения (propulsion) включает системы улучшения полета (flight-proven systems), двигатели, работающие на двух видах ракетного топлива (bipropellant engines and thrusters) или на одном (monopropellant thrusters), а также гелевые системы продвижения (gel propulsion systems). Линейка стандартных компонентов отличается высокой надежностью — одновременно с возможностью получения высоких рабочих характеристик по низкой цене.

Компания Northrop Grumman предполагает использовать МЭМС-двигатели (thrusters) для выполнения вывода на расчетную орбиту (orbital insertion), обеспечения сохранения связи со станцией и функциональности контроля ориентации в пространстве на микро-, нано- и пикосателлитах — по мере их разработки [29].

MEMS-микродвигатели могут использовать различные технологии генерации мощности, а футуристическая картина, представленная некоторыми исследователями, представляет собой рой микроспутников и других беспилотных транспортных средств, которые выполняют различные исследовательские функции и контролируются в сетевой структуре на различных уровнях.

Стоит вновь вспомнить о том, что независимо от способа передвижения спутника или UAV (МЭМС или не МЭМС), выхода на орбиту, для контроля положения/ориентации в пространстве и навигации будут применяться МЭМС-датчики инерции.

Еще одна актуальная и сейчас, и в будущем технология МЭМС — это датчики давления, нашедшие широкое применение для контроля различных узлов и механизмов.

Но традиционные кремниевые устройства требуют дополнительных аппаратных средств для рассеивания тепла и экранирования, что повышает массу и снижает экономичность будущих приборов. Решение — применение новых материалов со специальными свойствами, одним из которых является материал SiC.

MEMS датчики давления и инерции специального назначения

MEMS датчики давления обычно выполняются на основе гибкой, деформируемой под действием давления диафрагмы. По краям диафрагмы размещены четыре пьезорезистора, соединенные в мост Уитстона, вырабатывающие электрический сигнал, который соответствует изменению давления. В классическом исполнении датчика абсолютного давления диафрагма кремниевая, для ее создания субстрат вытравливается, а сенсорный кристалл присоединяется к стеклянному основанию, что создает уплотненную вакуумную полость под диафрагмой. Кристалл на стекле помещается в корпус следующего уровня так, что только верхняя часть диафрагмы подвержена воздействию давления, вызывающему изменение сопротивления пьезорезисторов, включенных в мост. Интегральная электроника переводит это изменение в аналоговый сигнал напряжения.

Выделяют три следующие основные конфигурации:

- Датчики абсолютного давления.
- Датчики относительного давления (вместо вакуума в опорной камере — воздух).
- Дифференциальные датчики давления (давление подается с двух сторон диафрагмы).

Метод изготовления — обычно объемная микрообработка, допускающая как двухкристалльный, так и однокристалльный (монокристалльный) дизайн с электроникой, интегрированной на том же кристалле, что и диафрагма с пьезорезисторами. Уровень интеграции с электроникой для коммерческих устройств достигнут высокий — до применения микроконтроллера и датчика температуры для коррекции данных и пользовательского программирования. Но обычные кремниевые МЭМС не подходят для регистрации высоких давлений, не работают при высоких температурах (выше 350 °C) и чувствительны к радиации, что существенно ограничивает их применение в High-End технике.

NASA связала свои разработки и исследования в области датчиков и электроники для космических применений с материалом SiC, обладающим способностями высокотемпературной работы (до 600 °C и выше), с высокими мощностями (что востребовано в силовых устройствах) и стабильной работой в условиях радиации. Исследования сфокусированы на разработке основ для наращивания кристалла с необходимыми свойствами и производстве устройств, а измерительные методы для устройств — по сути те же, что и для кремниевых [30].

Продемонстрирована перспектива работы SiC датчиков давления в камерах сгорания реактивных и газотурбинных двигателей без

применения сложного корпусирования, что актуально для осуществления более полного контроля работы двигателя и минимизации эмиссии.

Технологии МЭМС на основе материала SiC могут быть использованы для инъекции топлива посредством вращающихся форсунок (патент 6,770,208 [31]), создания других типов датчиков (ускорения, силы) и актюаторов — по мере изучения механических и других свойств данного материала [30].

SiC-датчики и силовая электроника, а также системы впрыска перспективны и для следующего поколения электромобилей и гибридов (на данном этапе занимающего среди автомобилей нишу High-End).

Интегрированный датчик давления может также использоваться для более полного контроля процессов сгорания или испарения в МЭМС-структуре микродвигателя или процессов в лабораториях на кристалле.

Ввиду своих способностей SiC-электроника может допускать снижение аппаратных средств космических кораблей для экранирования и рассеивания тепла, а также ее можно применять для контроля ядерных реакций, неизбежных в связи с перспективами полетов за пределы Солнечной системы. SiC-схемы можно рекомендовать для более близкого размещения к реактору, что будет снижать сложность и вес аппаратных средств контроля.

Что касается применения датчиков в непосредственной близости к ядерным реакторам, уместно вспомнить, что для них рекомендуются пьезоэлектрические устройства. Например, ряд High-End устройств (для радиационного окружения, тестирования полета, работы при высоких и криогенных температурах, в условиях высоких ударов, вибраций) выпускает фирма Endevco (www.endevco.com). Endevco 12 M1B Picochip — это пьезоэлектрический акселерометр в корпусе для поверхностного монтажа [32, 33]. Стоит заметить, что и пьезоэлектрические устройства допускают МЭМС-исполнение — как для датчиков инерции, так и для микродвигателей или актюаторов. Например, в лаборатории JPL NASA был разработан пьезоэлектрический МЭМС-клапан, предназначенный для решения уникальных проблем космических применений. Поиск новых решений, в том числе разработка материалов с необходимыми специальными свойствами для электроники и датчиков, способен расширить возможности космических кораблей и самолетов, атомных электростанций и автомобилей. Можно сократить число устройств и проводов, используемых для коммуникации, и снизить нагрузку на схемы обработки сигнала в связи с нестабильностью, погрешностями измерений и повышенной зашумленностью. При этом МЭМС и электроника со специальными свойствами способны повысить функциональность, уровень исполнения, надежность, интеллектуальность системы, в состав которой они войдут.

⁴ Вывод на орбиту или, иными словами, выход, ввод, включение в орбиту, внесение, запуск на расчетную орбиту (orbital insertion) включает маневры с ускорением или замедлением, необходимые для захвата спутника гравитационным полем планеты или другого космического тела. Вход на целевую орбиту может быть многоэтапным (вывод на промежуточную орбиту и т. д.)

Известно, что МЭМС не только можно встраивать в различные неживые системы, но их могут переносить люди и другие живые существа, а также их можно имплантировать в тела. На данный момент коммерческие медицинские технологии МЭМС развиваются очень быстро, многие из них значительно подешевели. Повсеместно стали или становятся доступными цифровые тонометры, акселерометры в составе тренажеров или in-vitro (в стекле, в пробирке) диагностика посредством лабораторий на кристалле. Но все еще достаточно сложно решаются, в зависимости от условий, задачи мониторинга состояния здоровья человека в режиме on-line посредством имплантируемых устройств. Так, в космических исследованиях возникают ситуации выхода человека в открытый космос, когда необходим полный контроль физиологических параметров, включая давление крови, частоту сердечных сокращений, контроль кислорода. Одна из разработок NASA — телеметрическая система для датчиков биоМЭМС-типа, например индуктивно-питаемых, с беспроводным интерфейсом передачи данных. Данные обновляются с некоторой периодичностью и передаются на сервер, где и обрабатываются. Датчик включает печатную антенну, а носимый аксессуар с печатной антенной используется для питания датчика, формируя индуктивную трансформаторную связь. Подобным образом функционируют Endotronix RF Bio-MEMS медицинские датчики, имплантируемые в тело человека [34].

В последнее время ведущие фирмы-производители МЭМС вкладывают много сил в новые имплантируемые/носимые медицинские системы. Об одной из них — датчике давления для мониторинга состояния глазного давления компании STMicroelectronics (www.st.com) — было рассказано в публикации [35].

Способности МЭМС к системной интеграции и даже имплантации в живые тела можно реализовать благодаря возможности датчиков интегрироваться с ВЧ схемами и актуаторами. ВЧ-МЭМС обладают следующими преимуществами: это малые вносимые потери, малое потребление мощности, устойчивость к шумам и надежность.

Рассказ о High-End применениях МЭМС невозможно будет завершить в этой публикации, так как непрерывно появляются не только новые разработки, но, как уже говорилось, и разработки нового уровня функциональности и коммуникации. В завершение статьи — о важнейшей из таких разработок.

Новые акселерометры Hewlett Packard и планетарная информационная экосистема

Компания Hewlett Packard (HP Labs, <http://www.hpl.hp.com>) разработала новые датчики, отличающиеся намного более высокой чувствительностью, чем современные

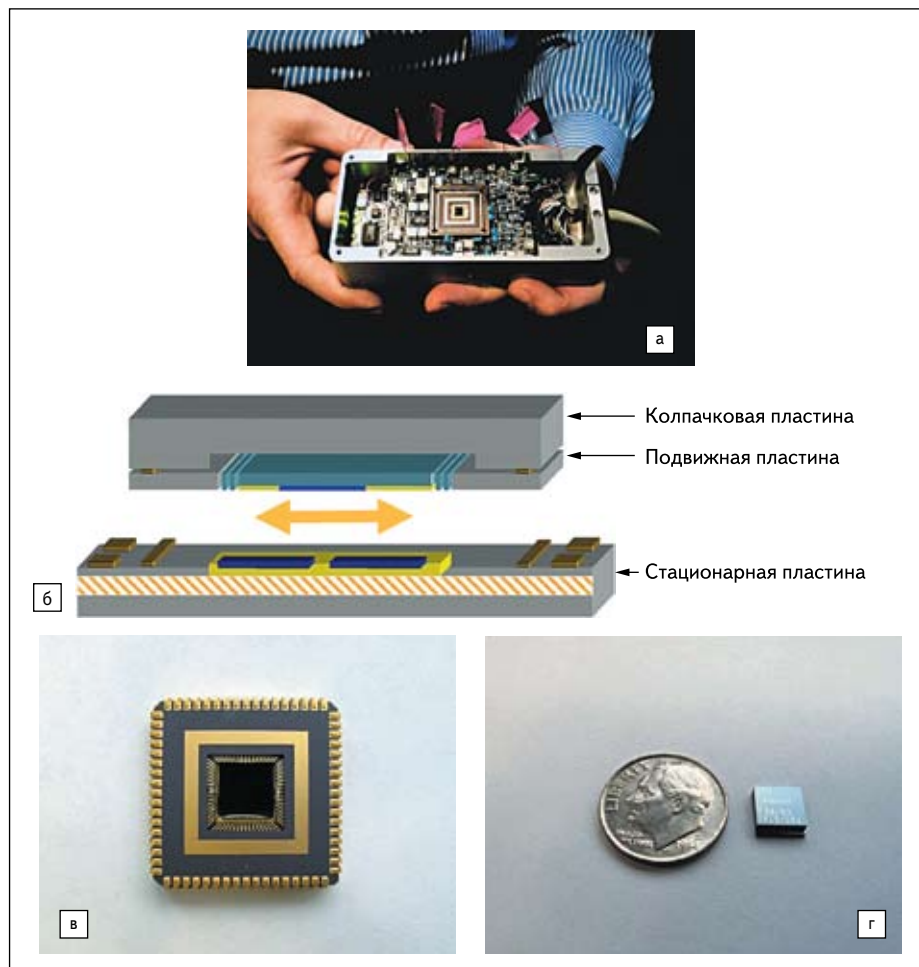


Рис. 12. Акселерометр Hewlett Packard, разработанный в рамках программы CeNSE: а) внешний вид устройства с МЭМС-акселерометром; б) МЭМС-конфигурация; в, г) внешний вид МЭМС-акселерометра

устройства (рис. 12). HP называет свою разработку, в которой новый акселерометр является ключевым компонентом, информационной экосистемой (information ecosystem) [36, 37]. Она сходна с платформой IBM Smarter Planet [38]. Первое коммерческое применение технологии HP будет представлять собой сейсмическую сенсорную сеть для помощи в обнаружении нефти и газа.

В разработке беспроводной сенсорной системы для сбора высокоразрешающих сейсмических данных на местности HP сотрудничает с Shell.

Инерциальная сенсорная технология, разработанная HP, допускает новый класс ультрачувствительных МЭМС-акселерометров, по заявлениям компании — в тысячу раз более высокочувствительных, чем высокообъемные коммерческие МЭМС. Новая сенсорная технология представляет собой результат исследований технологии МЭМС.

Высокая чувствительность достигается в устройстве на основе квадратного, со сторонами 5 мм, трехслойного кремниевого кристалла (рис. 12б). Часть центральной подложки подвешена между двумя внешними подложками посредством гибких кремниевых балок. Когда чип перемещается, подве-

шенный центр запаздывает вследствие его инерции. Измерение относительного перемещения используется для определения скорости, направления, расстояния.

Высокочувствительный акселерометр может определять изменение в положении от центрального кристалла в 10 фемтометров (10^{-15} м, менее одной миллиардной ширины человеческого волоса). В результате возможно измерение ускорения в микрогравитационном диапазоне. Это в 1000 раз более чувствительный датчик, чем акселерометры, используемые в телефонах Wii, iPhone или в автомобильных системах подушек безопасности.

Эта технология допустила возможность создания HP концепции новой информационной экосистемы, или Центральной нервной системы Земли (Central Nervous System for the Earth, CeNSE).

Ее суть состоит в том, что лучшие (например, более высокочувствительные) и более повсеместно распространенные датчики будут приводить к принятию более правильных решений, меньшему энергопотреблению, более эффективному применению ресурсов, а в частном случае разведки полезных ископаемых — к более полному использованию буровых скважин.

Цель программы HP Labs CeNSE — построение планетарной сенсорной сети с использованием миллиардов малых, недорогих, выносливых и высокочувствительных детекторов.

Исследователи лаборатории Information and Quantum Systems Lab (IQSL Lab) планируют добавить датчики света, температуры, барометрического давления, расхода воздуха и влажности. Сотрудники группы исследуют наноматериалы для усиления стандартных химической и биологической технологий детектирования (спектроскопия Рамана) в 100 млн раз. С повышением чувствительности размер датчика может уменьшаться. Это приведет к тому, что размеры подобных детекторов могут быть уменьшены настолько, что это позволит встраивать их в сотовый телефон.

Интеграция устройств в законченную сенсорную систему, объединяющую различные сенсорные сети, типы, возможности запасаения, средства вычисления и анализа, которые наблюдают окружение, объекты, состояние, безопасность, допускает новый уровень коммуникации объектов и людей.

Важнейшим ключевым отличием программы HP CeNSE является законченная интеграция в пределах компании.

В перспективах HP — капитализировать свою позицию самого большого производителя и потребителя МЭМС: в связи с тем, что миллионы МЭМС встроены в печатающие головки струйных принтеров HP.

Опыт HP в разработке применим к CeNSE-узлам. Сенсорный узел допускает высокую степень интеграции. В настоящее время стало возможным поместить сенсорный чип, батарею, солнечную ячейку в один недорогой интегральный корпус или на один, так же закорпусированный, комплексный кристалл. Но сенсорные узлы — это только часть CeNSE. Одна из задач HP — разработка сетевой интеллектуальности, программных средств сбора, хранения и обработки массивов данных.

Развертывание сети датчиков — это способ устранения фоновых шумов, повышения избыточности, так как современные чувствительные детекторы — притом что они дороги — способны к фальшивым сбоям. CeNSE использует разработанные и производимые HP датчики, но также собирает данные на собственные серверы, которые

анализируются посредством разработанного в HP программного обеспечения консультантами этой же фирмы.

Применение CeNSE согласно замыслу создателей состоит в обеспечении большей безопасности и удобств для жизни на Земле. По мере роста сети предполагается выполнять мониторинг и моделирование климатических изменений. А на индивидуальном уровне новые доступные сенсорные возможности могут изменять повседневный стиль жизни. ■

Литература

22. www.nasa.gov
23. Sun detection sensor. US Patent 7,781,735. Gamroth, et al. August 24, 2010.
24. www.solar-mems.com
25. www.grc.nasa.gov
26. <http://www.grc.nasa.gov/WWW/sensors/PhySen/research.htm>
27. MEMS closed chamber heat engine and electric generator. US Patent 6,978,611. Landis. The United States of America as represented by the Administrator of the National Aeronautics and Space Administration. December 27, 2005.
28. <http://www.design.caltech.edu/micropropulsion>
29. http://www.as.northropgrumman.com/products/mems_microprop/
30. <http://www.grc.nasa.gov/WWW/SiC/>
31. Method for forming MEMS-based spinning nozzle. US Patent 6,770,208. Okojie. The United States of America as represented by the Administrator of the National Aeronautics and Space Administration. August 3, 2004.
32. Сысоева С. МЭМС-технологии. Простое и доступное решение сложных системных задач // Электроника: НТБ. 2009. № 7.
33. www.endevco.com
34. <http://technology.grc.nasa.gov/SS-Endotronix.shtm>
35. Сысоева С. Новые мосты в дорожной карте эволюции МЭМС, 3D-ИС и нанотехнологий // Компоненты и технологии. 2010. № 7.
36. http://www.hpl.hp.com/news/2009/oct-dec/cense.html?jumpid=reg_R1002_USEN
37. http://www.hp.com/hpinfo/newsroom/press_kits/2010/sensingsolutions/index.html
38. <http://www.ibm.com/smarterplanet/us/en/>