

Окончание. Начало в № 9 '2011

Светлана СЫСОЕВА
Dr.Gold@sysoeva.com

Многообразии микросистемных инноваций: новые технологии и игроки

Новые игроки на рынке микроболометров

В отличие от многих других сегментов рынка, микроболометры — это сегмент, в котором значительные технологические инновации уже коммерциализованы или находятся на завершающей стадии коммерциализации. Сегодня это стремительно расширяющаяся ниша, в которой идет захватывающая рыночная игра, куда непрерывно вливаются новые игроки.

Yole Development сообщает, что коммерческие применения в системах наблюдения, автомобильного видения и термографии в 2016 году достигнут объемов продаж свыше 1 млн единиц, или \$3,4 млрд. Разработанные в начале для военного сегмента рынка при участии оборонных компаний США, ИК неохлаждаемые камеры сегодня широко используются во многих коммерческих применениях.

Микроболометр является ключевым компонентом современных ИК-камер, основное назначение которых — преобразование ИК-излучения в видимое изображение. Длинноволновое излучение (long wave infrared, LWIR) с длиной волны порядка 8–12 мкм используется наиболее часто. Неохлаждаемый микроболометр с массивом пикселей в фокальной плоскости (Uncooled Focal Plane Array, UFPA) служит детектором теплового излучения, который позволяет осуществлять функциональность ИК-камеры при объединении его с электроникой, а в ряде случаев — с ИК-оптикой. (Без ИК-оптики ядро камеры, объединяющее детектор с электроникой, выступает только как видеопроцессор video engine.)

Современный детектор может иметь различные форматы — от 1024×768 до 47×47 пикселей и пиксельный шаг 17–40 мкм. Более высокая плотность пикселей позволяет уменьшить размер детектора и снизить размер и вес тепловых камер.

Компания ULIS, производитель ИК-датчиков изображения для термографии, безопасности, автомобильных и военных применений, в 2011 году ввела датчик Pico640 с шагом между пикселями 17 мкм. Это высокоразрешающий ИК-датчик формата VGA (более 300 000 пикселей), который поставляется в малом фут-принте (24,13×24,13×5,57 мм).

Pico640 — неохлаждаемый датчик изображения, в котором оптимизируется соотношение между характеристиками (тепловой чувствительностью) и скоростью срабатывания. Высокая скорость срабатывания продемонстрировалась при тепловой постоянной времени в 8,8 мс и тепловом разрешении >45 мК. Диапазон детектирования — до 2 км, что зависит от цели. Датчик подходит для захвата быстро движущихся объектов, например, в военной технике, термографии, автоэлектронике.

Микроболометры военного назначения ВАЕ также эволюционируют в продуктах следующего поколения: от 28-микронного к 17-микронному шагу.

Военный рынок сбыта микроболометров сформирован высоким спросом в США: примерно 85% мирового рынка. Главные военные применения — оружейное «зрение» и повышение возможностей, или дополнение транспортного «зрения» — порядка 5–7 камер на транспортное средство.

BAE Systems и DRS Technologies — два основных игрока в «военном» сегменте. Здесь позиционированы и другие компании — Raytheon, L3 Communication, ZEISS, Thales, FLIR, Orgal, Northrop Grumman.

Коммерческие применения включают CCTV, наблюдение, автомобильные системы, пожаротушение и др.

Коммерческий бизнес микроболометров быстро расширяется сразу в трех главных сегментах этого рынка: термографическом, автомобильном и в сфере приборов для наблюдения.

FLIR и Fluke сейчас поставляют самые дешевые камеры для коммерческих применений. Цены камер от FLIR, близкие к \$1000, расширяют использование ИК-камер в области термографии, инженерных систем и инспекции зданий.

Автомобильные применения в 2010 году увеличились в объеме на 40% — благодаря выпуску новых моделей автомобилей с системами теплового ночного зрения. Эксперты Yole ожидают, что продажи автомобильных камер превысят 500 000 единиц в 2016 году.

Наблюдение становится ключевым рынком для игроков в сегменте больших CCTV-камер. К таким компаниям относятся Pelco, Axis, Bosch Security и Samsung Techwin. Стремительно дешевеют также камеры для

наблюдения и безопасности других производителей, цены на эти камеры снижаются с той же скоростью, что и цены термографических камер, к которым они неуклонно приближаются. В 2013 году ожидается значительное снижение цены автомобильных камер, где в этом плане также лидирует компания FLIR.

Техническая эволюция микроболометров происходит на 4 различных уровнях: это ИК-оптика, корпусирование, интеграция с ROIC, а также на уровне пикселя. Результатом эволюции становится повышение степени интеграции и снижение цены.

Лидером в корпусировании на уровне пикселя (Pixel Level Packaging, PLP) является фирма ULIS, но многие другие игроки разрабатывают технологии корпусирования на уровне пластины — Sensoror, SCD (Semiconductor Devices), NEC, Raytheon, FLIR, Freescale, BAE. WLP — значительное направление в технологии корпусирования, с которым связывается снижение цены. В 2011 году FLIR, например, использовала WLP в ядре новой камеры Quark.

Лидирующие производители, которые производят микроболометры из аморфного кремния (a-Si), — фирмы ULIS и L3Com. Ванадий-оксидные микроболометры выпускают FLIR, Raytheon. Sensoror, Melexis, Bosch и другие производят микроболометры на основе других материалов и технологий, которые у каждой компании свои.

Помимо микроболометров разрабатываются и другие технологии неохлаждаемых ИК-камер — термопилы, пироэлектрические детекторы, NIR-детекторы на квантовых пленках (InVisage), наноболометры (Tyndall). Но на фоне доминирования микроболометров они не представляют значительного коммерческого интереса.

FLIR как пионер и лидер в области неохлаждаемых ИК-камер для коммерческого рынка расширила свое присутствие на рынке в 2010–2011 году, в том числе — посредством приобретения других компаний (Raymarine и ICx).

В сумме это дает следующие структурные изменения в данном сегменте:

- Вертикальная интеграция — приобретение производителей детекторов производителями камер (Lumasense, Teledyne).
- Приобретение поставщиков камер производителями камер (L3Com + Insight, FLIR + ICx и Raymarine, Allied + VDS).

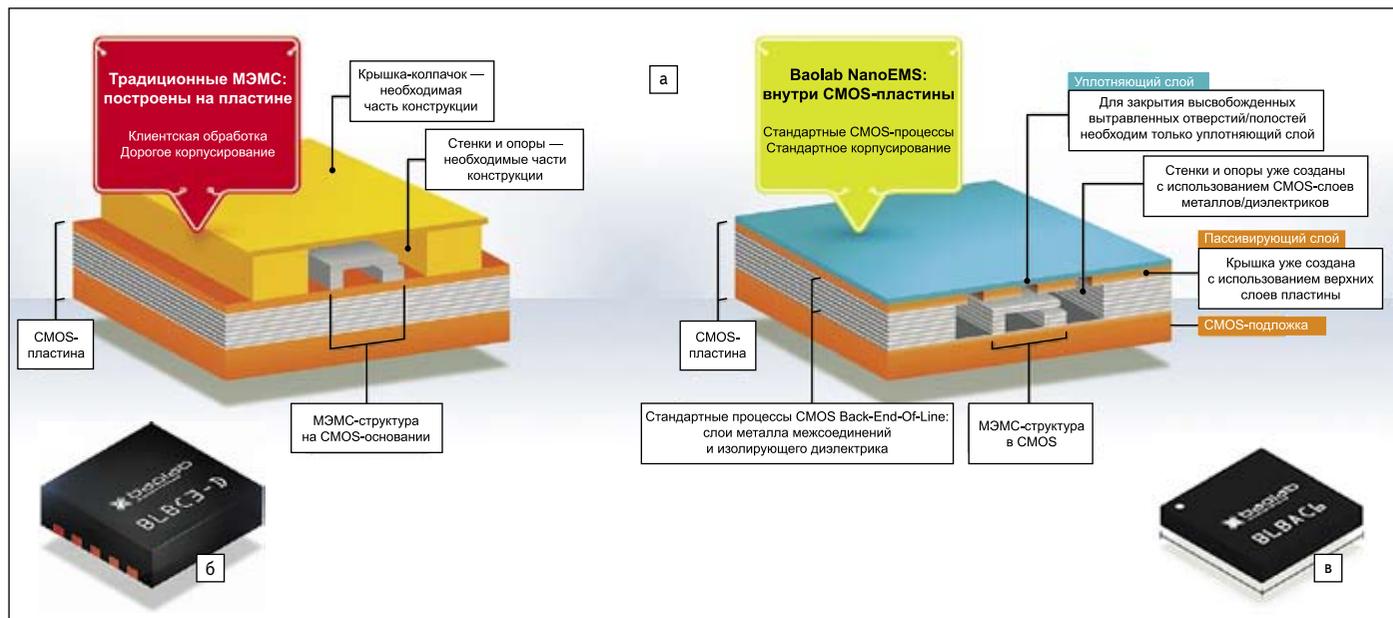


Рис. 9. 3D-компасы Baolab NanoEMS — иллюстрация технологии и ее преимуществ в виде меньших размеров корпусов: а) сравнение традиционной МЭМС-структуры, интегрированной со CMOS, и Baolab NanoEMS, интегрированной в CMOS; б) корпус DFN размерами 3×3×0,9 мм; в) корпус BGA размерами 2×2×0,75 мм

- Техническое сотрудничество: NEC и Tamron, ULIS и N2 imaging.

ИК-камеры становятся массовым рынком, где различные игроки расширяют их приложения (FLIR, Orgal) или входят в этот бизнес (DRS, SCD, Sofradir, Ulis и Electrophysics, Lumasense ITC, NEC Avio).

Но самой крупной нишей с наиболее высокой скоростью коммерциализации технологических инноваций остается потребительский сегмент.

Датчики силы Лоренца — новые конкуренты эффекта Холла

В настоящее время еще одна технология МЭМС под названием NanoEMS, которую разработала компания Baolab для создания недорогих 3D цифровых МЭМС-компасов, интегрированных в CMOS, достигла стадии коммерциализации.

Предшествующие разработки были основаны на нестандартных технологиях обнаружения магнитного поля Земли. К ним относятся, например, магниторезистивные материалы или структуры на основе эффекта Холла, скомбинированные для повышения магнитной чувствительности с концентраторами магнитного поля.

Baolab Microsystems — первая компания, разработавшая CMOS МЭМС датчик силы Лоренца и новый цифровой 3D-компас NanoCompass (рис. 9). Этот прибор имеет ряд преимуществ, а именно более высокую чувствительность при снижении потребления мощности и размера корпусов, причем по значительно более низкой цене. Дополнительный уникальный признак — автокалибровка для поддержания согласованной точности.

BLBC3-D NanoCompass представляет собой первый продукт на основе технологии Baolab NanoEMS, допускающей возможность построения наноразмерных МЭМС с использованием стандартных линий CMOS, монолитно интегрированных с аналоговой и цифровой электроникой (рис. 9а). МЭМС-элементы формируются в течение процесса производства CMOS в пределах существующих слоев межсоединений пластины. За счет того, что различные устройства интегрированы на одном кристалле для создания мультисенсорного устройства, технология NanoEMS позволяет снизить цену производства, корпусирования и тестирования.

Инновационный дизайн Baolab для компасов включает датчики силы Лоренца для обнаружения магнитного поля Земли. Структура МЭМС — подвижная алюминиевая плата, подвешенная на пружинах, она сконструирована на основе металлических слоев межсоединения CMOS посредством вытравливания скрытого (между пластиной и структурой микросхемы) в металл диэлектрика (Inter Metal Dielectric, IMD) с использованием пара фтористорого водорода vHF (varour HF). Когда ток передается через плату, результирующее смещение воспроизводит силу Лоренца пропорционально окружающему магнитному полю Земли, которая измеряется методом емкостного детектирования. Изменение емкости между подвижной платой и фиксированными электродами вокруг нее позволяет детектировать магнитное поле в направлениях X, Y, Z посредством одного кристалла NanoEMS chip.

Известно, что CMOS датчики Холла с планарными элементами чувствительны к магнитному полю, перпендикулярному кристал-

лу в Z-направлении, но для достижения требуемой чувствительности в X- и Y-направлениях требуют постобработки для депонирования магнитных материалов на пластину — интегрированных магнитных концентраторов (ИМК). Поэтому датчики Холла для детектирования слабых магнитных полей — не чистые CMOS-решения. Дополнительная обработка в пределах технологического процесса требуется также для реализации АМР и ГМР компасов. Другие преимущества по сравнению с эффектом Холла состоят в низком энергопотреблении (как носители тока используются металлические проводники), повышенной чувствительности (благодаря явлению механического резонанса) и отсутствию магнитного насыщения (нет ИМК).

Таким образом, метод силы Лоренца открывает новые возможности для мобильных устройств следующего поколения.

Компания Baolab сообщила, что инженерные образцы BLBC3-D NanoCompass будут доступны в 2012 году вместе с оценочным комплектом. Они обеспечат разрешение курса в 5°, сенсорное разрешение порядка 0,3 мкТл и 13 бит на ось в диапазоне ±1,2 мТл. Коммерческий продукт с интерфейсом I²C или SPI будет поставляться в двух корпусах на выбор: 10-выводный корпус DFN с шагом 0,5 мм, совместимый с существующими устройствами, размерами только 3×3×9 мм (рис. 9б), или еще меньший BGA-корпус размерами 2×2×0,75 мм (рис. 9в).

На основе этой технологии Baolab планирует разработку акселерометров и 6-осевых мультисенсорных блоков, объединяющих акселерометры и магнитометры.

Кроме того, компания предполагает, что RF-массивы NanoEMS CMOS RF-ключей обеспе-

чивают недорогой путь построения настраиваемых усилителей мощности и малошумящих усилителей. Настраиваемые компоненты NanoEMS на основе CMOS RF массивов ключей могут снизить количество компонентов и цену мобильных 3G/4G-трансиверов.

Компания CellGuide выбрала 3D-компасы NanoEMS Baolab в качестве дополнения к своим GPS-кристаллам CLIOX-C GPS для повышения качества локации, позиционирования, сервисов, основанных на местоположении, и дополненной реальности.

CellGuide CLIOX-C становится первым в мире устройством, интегрирующим GPS и компас и объединяющим признаки наведения и идентификации в мобильных устройствах, планшетах и камерах. Функция компаса повышает качество работы системы GPS, обеспечивая признаки выхода из туннеля, инерциальной навигации для помощи в ситуациях, где сигнал GPS прервался или недостаточен. Решение CLIOX-C GPS построено на технологии CellGuide SNAP, основанной на подключении центрального процессора и дающей конкурентоспособные характеристики при снижении потребляемой мощности и цены.

Совмещение функций CLIOX-C компаса и GPS создает комплементарность, то есть соответствие, допускающее решение для сервисов, основанных на местоположении (LBS), предлагаемое по низкой цене. Функции GPS и компаса работают одновременно, но они могут быть доступны независимо — посредством центрального процессора, что допускает эффективное управление мощностью для растущих мобильных применений.

Размеры фут-принта корпуса CLIOX-C — 5×5 мм.

Технология Baolab 3-осевого электронного компаса CMOS MEMS NanoCompass в CLIOX-C — первое воплощение технологии NanoEMS, позволяющей создавать наноразмерные MEMS в стандартной металлической структуре CMOS-пластины на основе стандартных высокообъемных CMOS-линий, что значительно снижает цену компаса.

Датчики движения — сфера непрерывных инноваций в области МЭМС технологий

Компасы от Baolab — первая МЭМС, а не только микросистемная технология датчиков магнитного поля, которую можно применять для детектирования инерции и движения. Для этих задач широко используются блоки инерциальных измерений (IMU) с 6, 9 или даже 10 степенями свободы, объединяющие МЭМС-акселерометры и гироскопы и даже МЭМС-датчики давления.

Movea — лидирующая компания, поставляющая IMU со слиянием данных от датчиков. Эти блоки применяются при создании систем измерений для спорта, фитнеса, медицины, а также в игровых и мобильных устройствах.

Решение от Movea использует до 5 блоков MotionPod, каждый из которых позволяет осуществлять захват движения с 6 степенями свободы (6 DoF) для полного захвата 3D-движения тела. Блоки MotionPod, закрепленные на теле, формируют своего рода локальную сеть — сеть тела (Body Area Network, BAN), допускающую детальный захват движения в реальном времени с высокой динамической точностью до 1°. IMU передают информацию посредством беспроводного передатчика, работающего на частоте до 2,4 ГГц, к ресиверу центрального контроллера (MotionController), подключенного к компьютеру через порт USB.

Число мобильных датчиков, входящих в категорию мобильных, или «носимых», неуклонно повышается, а вместе с ним — и спрос на IMU с более высокими рабочими характеристиками. Одновременно они становятся более мощными, а их размеры уменьшаются.

NavChip InterSense (рис. 10) — первый IMU на кристалле, причем тактического уровня исполнения: со стабильностью смещения гироскопа 10°/ч и угловым случайным уходом (шумом) 0,18°/√ч. Размеры корпуса NavChip составляют 24×13,5×9,1 мм, вес — 6 г.

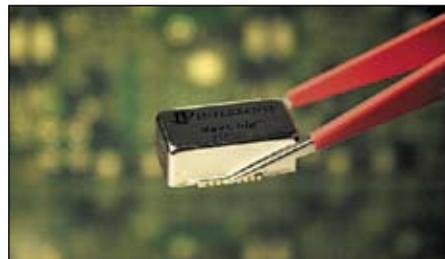


Рис. 10. Navchip InterSense — первый коммерческий IMU на кристалле тактического уровня исполнения

InterSense разработала уже следующее поколение технологии IMU NavChip, а в августе 2011 года анонсировала коммерческую доступность NavChip для различных рынков.

Назначение устройства — беспилотные летательные аппараты UAV и роботы с автономной навигацией и стабилизацией. Устройство также допускает миниатюризацию систем камер и стабилизации антенн в фиксированных и мобильных применениях.

NavChip был успешно протестирован и рекомендуется для следующих 4 ключевых областей: персональная навигация, GPS/INS, стабилизация и визуализация (Head-Mounted Display, HMD).

NavChip предлагает улучшение как шумовых характеристик (до 12 раз), так и дрейфа (до 2 раз) в сравнении с предшествующими коммерческими IMU в этом классе. Малый размер и низкое потребление мощности (65 мА на 3,25 В или 211 мВт) — другие важнейшие преимущества датчика, монтируемого непосредственно на печатную плату.

Производство стартует в сентябре 2011 года. NavChip будет доступен для мон-

тажа на плату OEM или в полном комплекте разработчика OEM Developers Kit.

Но хотя достижения компаний (Qualtre, Baolab, Intersense) примечательны как технологические инновации, доминирование на этом рынке компании STMicroelectronics, обеспечивающей самое быстрое реагирование на рыночные тенденции в потребительском сегменте и самые привлекательные для производителей мобильных устройств комбинации характеристик, размеров корпусов и цены, остается непоколебимым.

Число датчиков движения, проданных STM, уже насчитывает 1,54 млрд. Только в период с июня по сентябрь 2011 года было продано свыше 300 000 устройств.

В 2011 году STM объявила о внедрении программной машины iNEMO, выполняющей слияние сенсорных данных, а ближе к осени добилась еще большего снижения размеров интегрированных корпусов.

Фирма STMicroelectronics недавно анонсировала выпуск уже второго инерциального модуля iNEMO — LSM330DLC, интегрирующего по три оси детектирования линейного и углового движения в корпусе размерами 4×5×1 мм. Новое мультиосевое устройство от STMicro допускает 6 степеней свободы в 20 кубических миллиметрах.

LSM330DLC — самое малое устройство 6 DoF в семействе инерциальных модулей STM iNEMO. Это система в корпусе с независимыми каналами датчиков (по три для каждого — акселерометра и гироскопа) и интерфейсом SPI/I²C.

Несколько ранее, в июне текущего года, был выпущен 5-осевой (три оси детектирования акселерометра и две оси детектирования гироскопа) модуль iNEMO — LSM320DL. Его размеры — 7,5×4,4×1,1 мм. В производстве находится еще один представитель семейства iNEMO, тех же размеров, — 6DoF LSM330DL.

Новейшие модули STM создают новые возможности для высокоточного обнаружения жестов и движения в мобильных телефонах, системах персональной навигации и других смарт-устройствах.

Новый модуль iNEMO LSM330DLC полностью программно-совместим с последним поколением STM 3-осевых цифровых акселерометров (LIS3DH) и гироскопов (L3GD20), что позволяет клиентам легко производить апгрейд дизайна. Интеграция на уровне корпуса дает преимущества: снижение размера и высокую надежность. Модульное решение LSM330DLC обеспечивает точное выравнивание двух опорных сенсорных осей. Механический дизайн сенсорной структуры гарантирует тепловую и механическую стабильность.

Пользователь выбирает полный диапазон ускорения — от 2 до 16g, угловую скорость детектирования — от 250 до 2500°/с вдоль трех осей вращения (pitch, roll и yaw). Ввиду ограничения мощности для батарейного питания модуль включает режимы power-down

и sleep, плюс встроенный FIFO блок памяти для управления. Модуль может работать с любым напряжением питания в диапазоне от 2,4 до 3,6 В.

Список применений включает активируемые движением пользовательские интерфейсы в сотовых телефонах, планшетах и других смарт-устройствах, инерциальную навигацию, согласование с картой в устройствах персональной навигации, интеллектуальное сбережение мощности и обнаружение свobodного падения в портативной электронике.

Инерциальный мультисенсорный модуль LSM330DLC доступен в виде инженерных образцов, его цена — порядка \$3,2 при заказе от 1000 шт.

MEMS — «глаза» новых сотовых телефонов, или Камеры-модули с непрерывной автофокусировкой, допускающие автоматический монтаж

По данным японской консалтинговой фирмы TSR, в 2010 году в мире было продано более миллиарда модулей камер, достигших конечного пользователя. Аналитики ожидают, что в 2012 году продажи этих модулей превысят 2 млрд единиц, причем 1,5 млрд из них будут предназначены для оборудования камер сотовых телефонов.

Компания poLight объявила о своем выводе SVTC Technologies в качестве партнера по коммерциализации следующего поколения оптических MEMS-актюаторов камер. SVTC Technologies — лидирующий поставщик услуг для разработки и производства возникающих технологий на кремнии. Цель партнерства — выведение poLight на уровень высокообъемного производства.

Главные тенденции в рыночном сегменте камер портативных устройств — смещение в сторону компактных, недорогих модулей камер типа reflowable, обеспечивающих высокое качество изображения в ультракомпактном дизайне. В соответствии с этими тенденциями камера разрабатывается таким образом, чтобы противостоять множественным оплавлениям (имеется в виду групповая автоматическая пайка методом оплавления reflow soldering при высоких температурах) в процессе доработки и двустороннему оплавлению. По мере распространения сотовых телефонов был разработан метод производства камер на уровне пластины (wafer-level camera, WLC), ассоциируемый с гибридными линзами. WLC — одна из технологий, возникшая в ответ на потребность в камерах-модулях типа reflowable.

WLC имеет три главных технических преимущества:

- высокая надежность и характеристики;
- миниатюризация — до 50% от обычных камер;
- снижение цены по мере достижения объемов.

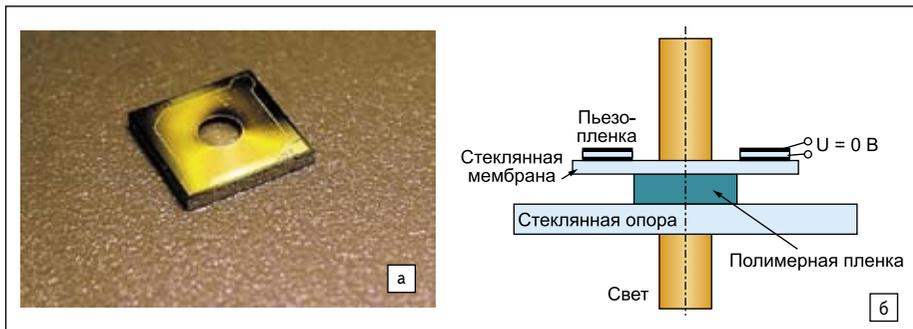


Рис. 11. Настраиваемые пьезоэлектрические МЭМС-линзы TLens poLight для автофокусирующих модулей камер типа reflowable: а) внешний вид; б) принцип работы

Для обеспечения этих признаков тысячи линз выстраиваются одновременно, непосредственно на пластине, что снижает размер и цену дополнительных материалов.

Линзы выравниваются и соединяются на уровне пластин с использованием технологии стекирования, а затем разрезаются на индивидуальные оптические элементы, которые закреплены на закорпусированном датчике изображения. Преимущества WLC на этом не заканчиваются: процесс сборки платы мобильного телефона совмещается с технологией поверхностного монтажа (surface mounted technology, SMT) — в отличие от обычных методов сборки. Большинство современных модулей камер встраивается в сотовые телефоны с использованием CMOS-датчиков с пластмассовыми линзами в держателе. Этот метод создает невозможность оплавления модулей камер при обычном процессе оплавления ИС (групповая автоматическая пайка методом оплавления) на материнской плате. Вследствие этих технологических ограничений вместо SMT для модулей камер должна выполняться отдельная сборка.

Камеры reflowable-типа, напротив, позволяют упростить их интеграцию и производство и параллельно повысить качество изображения.

Заметим, что применительно к портативным устройствам существует два толкования термина reflowable, что в переводе с английского означает также «переформатируемый». Этот термин широко используется для описания электронных книг с переформатируемым текстом. Цель переформатирования — повышение качества визуального восприятия информации.

Компания poLight — мировой лидер в разработке автофокусирующих линз для камер типа reflowable, востребованных на рынке сотовых телефонов и ноутбуков. Настраиваемые линзы poLight TLens (Tunable Lens) (рис. 11а) предлагаются изготовителем модулей камер следующего поколения актюаторов на основе инновационной патентованной оптической полимерной технологии, обещающей улучшение характеристик при снижении цены.

Инженеры poLight встроили пьезоэлемент, играющий роль актюатора, в тонкую сте-

кланную мембрану (рис. 11б). Под ней расположен полимерный участок на стеклянной опоре. На нулевом напряжении пьезоэлектрик находится в режиме standby, и никакие силы к тонкому стеклу не прикладываются. Световой луч, идущий через два элемента — стекло и полимер — не отклоняется. При приложении напряжения (до 30 В) пьезоэлектрический актюатор немедленно генерирует силу, изгибающую тонкую стеклянную мембрану. Это генерирует вариации оптической силы, допускающей фокусировку.

Продукты poLight TLens могут легко интегрироваться в модули камер различного ценового класса — от low- до high-end, в виде баррелей (бочонков) и кубов.

Основанная на методах полупроводникового производства, технология poLight подходит для производства малых модулей камер на уровне пластины, что позволяет значительно снизить цену TLens и, как результат, цену самих модулей.

Технология обладает преимуществами в сравнении с традиционными VCM (Voice Coil Motor) решениями. VCM широко используются в современных модулях камер. Но VCM-решения не позволяют снизить цену — на уровне пластины и способность к оплавлению. VCM также недостаточно эффективны в плане потребления мощности, гарантии качества изображений и непрерывной автофокусировки для видео.

TLens poLight обеспечивает примыкающую макроавтофокусировку (<10 см) и быструю видеоавтофокусировку (в 10 раз быстрее, чем традиционные VCM), что позволяет выделить эти преимущества как ключевые признаки новых мобильных телефонов.

Свойства, присущие TLens, гарантируют оптимальное качество изображений, независимость от разрешения и совместимость с HD-видео благодаря высоким оптическим характеристикам, включая низкие ошибки волнового фронта (волны с одинаковой фазой) и прозрачность свыше 95°. Размеры TLens — 4,2×4,2×0,5 мм: это самые маленькие из представленных на рынке автофокусирующих линз. Согласно недавним данным, фут-принт составляет менее чем 3×3 мм. Технология обеспечивает быстрое время

срабатывания: <1 мс. Потребление мощности — порядка 1 мВт. Высокая скорость работы и вполнину сниженное системное потребление мощности модуля камеры дают возможность создавать непрерывную фокусировку для захвата видео и картинок высококонтрастными (8–12 МПа) модулями камер типа баррелей в оптическом формате 1/3. Применение настраиваемых линз poLight TLens способствует уменьшению толщины камер и телефонов при высоком качестве изображений.

TLens также поддерживает производство оплавлением с противостоянием температурам до 260 °С. Эта технология подходит для существующих МЭМС-фаундри и массового высокообъемного производства.

Вследствие высоких объемов и динамики роста продаж мир потребительской электроники непрерывно формирует спрос на коммерческие МЭМС-инновации, и следующий пример — одна из них.

МЭМС — глаза в глаза

Выдающимся коммерческим применением технологии МЭМС являются окулярные контактные линзы, разработанные швейцарской компанией Sensimed (рис. 12). Многофункциональное МЭМС-устройство в глазу человека способно выполнять многие сенсорные, дисплейные и актюаторные функции. Интеллектуальные контактные линзы используют необычные характеристики глаза для диагностирования болезней по сетчатке глаза, а также подачи/поставки лекарств (drug delivery).

Прямое назначение контактных линз — фокусировка, но встроенные в линзы сенсоры и электроника могут предоставлять информацию о болезнях. Например, подобные устройства способны измерять уровень алкоголя и холестерина в крови и выдавать соответствующие предупреждения. То есть линзы могут служить одновременно и как сенсорное устройство, и как дисплейное. Если добавить к контактным линзам световые элементы, то становится возможным помещение в поле зрения носителя цифровых изображений, формирование своего рода дисплея HUD/HMD или оверлея дополненной реальности, не требующих стекол, экранов и носимых аксессуаров.

Первая контактная линза Triggerfish (рис. 12а) компании Sensimed с лета 2011 года уже представлена на рынке, хотя пока не одобрена для продаж в США. Triggerfish представляет собой питаемую беспроводным способом контактную линзу (выступающую в данном случае как электромагнитный собиратель энергии), назначение которой состоит в помощи больным глаукомой. Линза непрерывно измеряет кривизну глаза в течение 24 часов с использованием тензорезистивного измерителя типа strain gauge, выполненного по технологии МЭМС и встроенного в линзу



Рис. 12. Контактные диагностические МЭМС-линзы Triggerfish от Sensimed (на рынке — с лета 2011 года): а) внешний вид; б) принцип работы

(рис. 12б). Выходной сигнал посылается беспроводным способом к адгезивной антенне, подсоединенной к портативному рекордеру тонким гибким кабелем. Корректное лечение посредством лекарств обеспечивается при выявлении пиков внутриглазного давления — вместо стандартного тонометра Гольдмана.

МЭМС-имплантаты — роботы, восстанавливающие зрение

Порядка 30% ретинальных ганглиозных (нервных) клеток все еще функционирует даже после нескольких лет слепоты. Функция этих клеток состоит в передаче визуальной информации от сетчатки к мозгу. Визуальное чувство может создать электрическая стимуляция клеток посредством МЭМС-электродов, имплантируемых в месте между белком глаза и ретинальными нервными клетками для замещения дегенерировавших палочек и колбочек (субретинальные имплантаты), на сетчатке (эпиретинальные МЭМС) или на внешней поверхности белка, откуда они могут проникать частично или полностью (транссклеротивные МЭМС).

Следующий пример применения технологии МЭМС — в сфере ретинальной офтальмологии — биомикророботы для интраокулярной хирургии и поставки лекарств.

В Институте робототехники и интеллектуальных систем (IRIS), который входит в состав швейцарского федерального Института технологий в Цюрихе (ETHZ), разрабатывается субмиллиметровый МЭМС-робот для навигации в пределах стекловидного тела (гелеобразной субстанции глаза), поставки лекарств или выполнения хирургических процедур.

Роботы строятся с использованием микро- и нанотехнологии (MEMS, NEMS), а микророботы — в комбинации с макро-размерной медицинской робототехникой. Параллельно разрабатывается технология получения медицинских изображений и магнитное пилотируемое в естественных условиях. Цель — создание робота, который будет расположен на кончике тонкой иглы, — для впрыска лекарства прямо в глаз только с местной анестезией и без необходимости наложения швов.

Нерешенная проблема состоит в достижении точного контроля полей и токов.

Имеются две альтернативы для генерации магнитных полей — обмотки и магниты. После решения проблемы магнитного управления роботы будут применяться для целевой поставки лекарств и хирургии при лечении болезней, например макулярной дегенерации в связи с возрастом или ретинальной сосудистой окклюзией. При этих заболеваниях необходимо поставлять лекарства на специфические участки сетчатки.

Сейчас 4 различных типа роботов собираются из комбинации планарных частей, которые производятся с использованием электроосаждения никеля и соединения клеем, активируемым ультрафиолетом. Значительная выгода гибридного дизайна — в том, что для создания планарной геометрии отдельные части сборки могут выпускаться в результате стандартных процессов производства МЭМС. Робот, дозирующий лекарства, может оставаться в глазу несколько месяцев, и покрытие робота осуществляет его функцию, без участия внутренних компонентов.

MEMS-роботами можно управлять с помощью магнитов внутри стекловидного тела для выполнения хирургических операций на сетчатке.

Крылатый эллипсоид (“winged-ellipsoid”) имеет длинную ось симметрии. Внешнее магнитное поле выравнивает и выталкивает робота вдоль этой оси посредством магнитной силы и крутящего момента из-за эффекта анизотропии формы — во многом подобно игле, всегда намагниченной вдоль ее длинной оси. Крылатая форма также снижает дрейф микроробота в направлении поперечной оси, перпендикулярной длинной.

Проект находится в ранней стадии разработки: пока проводятся хирургические эксперименты на глазах мертвых животных, затем, до применения на людях, пройдет тестирование на глазах живых животных.

Энергетическая проблема питания МЭМС и различные способы ее решения

Микророботы, основанные на технологиях МЭМС, могут работать в местах, не подходящих для работы людей, например, обеспечивать сбор данных, производить поиск

выживших людей в разрушенных зданиях. Но для полностью автономной работы робота необходим источник энергии, что далеко не всегда обеспечивается посредством механизмов и электрических схем.

Например, в качестве силовых источников микророботов часто используются внешние магнитные поля. Микроботы, например те, что предназначены для лечения глаз, движутся в пределах некоего «корта», который имеет встроенные электроды, магниты или обмотки, позволяющие изменять электромагнитное поле и таким образом перемещать робота. За пределами действия поля робот не способен перемещаться.

Решение проблем автономизации роботов, выполняющих специальные миссии, и генерации мощности — в использовании батарейных технологий, микроактивных двигателей, микротопливных или солнечных ячеек, а также других собирателей энергии (энергохарвестеров).

Агентство продвинутых оборонных исследовательских проектов (DARPA) в свое время решило привлечь для извлечения мощности насекомых. В этих проектах используются МЭМС-имплантанты, а результатом является создание кибернетических насекомых для разведки и обнаружения. Имплантированные электроды переключают мускулы насекомого, что позволяет оператору управлять полетом насекомого, несущего микрофон и радиопередатчик. МЭМС-имплантанты интегрируются в организм насекомого еще на стадии развития куколки, и в процессе метаморфозы отрицательные последствия имплантации сглаживаются.

Для питания МЭМС-датчиков и радиопередатчика используются пьезоэлектрические собиратели энергии, захватывающие механическую энергию от полета бабочки.

Но многие исследователи все же стремятся найти пути для перемещения МЭМС-микророботов без участия насекомых, всего лишь только имитируя их передвижение. Например, исследователи Университета Вашингтона предложили технологию перемещения неуправляемых микророботов подобно сороконожке.

Микроробот имеет ширину примерно ногтя пальца и значительно тоньше монеты. Нижняя часть робота составлена из четырехсторонних структур с пульсирующими ресничками-опорами, позволяющими перемещать робота в любом направлении. В основе этой технологии лежит изобретенный в Стэнфордском университете актюатор. Эти же МЭМС-структуры были адаптированы для перемещения микроробота.

Демонстрационный робот-сороконожка весит менее полграмма, при этом он включает 512 ножек в 128 наборах по 4. Ноги питаются от электричества — посредством нагрева резистора на 20 мс, что вызывает расширение двух соединенных полимеров, но с разной скоростью, что далее вызывает движение

стопа. Циркулирование электрического тока через 128 наборов позволяет роботу перемещаться подобно насекомому со скоростью три фута в час. Питаемая электричеством система-сороконожка может перемещать платформу в любом направлении с нагрузкой, превышающей собственный вес в 7 раз. Набор из 4 шагов допускает повторяющиеся равные шаги для перемещения в любом направлении. Финансирование было обеспечено агентством DARPA и компанией General Motors Co.

Альтернатива батареям — энергособиратели, микротопливные ячейки... и батарейные источники уровня микросистем и МЭМС

При распространении технологий МЭМС и беспроводных сенсорных сетей нужно решить проблему питания микросистем. Проблема экономии, рационального использования, получения мощности сейчас весьма актуальна, поэтому многие исследователи предлагают различные методы ее решения:

- 1) Применение батарей.
- 2) Развитие технологий энергосбережения.
- 3) Использование интегрированных источников энергии — генераторов.
- 4) Развитие технологий адаптивного сбора энергии (Energy Harvesting).

Уровень батарейных технологий за последние годы повысился настолько, что стало возможным без замены батареи непрерывно подавать питание в течение нескольких лет для беспроводного узла, размещенного в труднодоступном месте. Но надежность работы батареи ограничивается условиями эксплуатации. Применение технологий адаптивного сбора энергии позволяет устранить риск сбоя устройства. В настоящее время технологии сбора энергии (Energy Harvesting) также достаточно развиты и могут применяться не только как дополнение к батареям, но и как самостоятельный источник энергии. Собиратели энергии миниатюризованы до уровня микро- и наносистем, разработаны прототипы МЭМС- и наноустройств.

Уже известно первое коммерческое применение МЭМС собирателей энергии вибрации. Это пьезоэлектрический вибрационный энергохарвестер (Piezoelectric Vibrational Energy Harvester, PZEH) компании MicroGen под названием BOLT 060 — устройство на кремниевом кристалле размерами 1 см² или менее с выходом мощности до 200 мкВт. В 2011 году PZEH включен в оценочный комплект THINERGY IPS-EVAL-EH-01 Energy Harvesting Evaluation Kit от IPS (Infinite Power Solutions, Inc.).

Миниатюризация энергохарвестеров до уровней МЭМС или нано открывает большие перспективы для их системной интеграции с сенсорными узлами. Один из примеров питания МЭМС-датчика от радиоволн

был описан выше (от компании Sensimed). Микротопливные ячейки, поставляющие энергию для питания устройств без ее запаса, — еще один конкурент батарейной технологии.

Но и батареи могут быть реализованы на основе микросистемных или МЭМС-технологий, традиционно отличающихся высокой надежностью.

Наиболее значительные достижения последних лет в батарейной технологии состоят в разработке литий-ионных батарей для потребительской электроники и плагинных гибридов (Chevy Volt), а также для электромобилей (Nissan Leaf). Литий-ионные батареи дают удельную энергию до 200 Вт·ч/кг и объемную удельную плотность мощности порядка 570 Вт·ч/л.

Основное отличие микроразмерных батарей от устройств в обычном формате состоит в применении тонкого твердого электролита (материала под названием LiPON), а также в технологии производства. Материал электрода и электролит наносятся в виде тонких пленок на субстрат из кремния, кварца или других материалов. Для достижения более высокой емкости батарейные ячейки наносятся на противоположные стороны субстрата. Каждая ячейка может иметь защитное покрытие.

Ведущее технологическое решение в области микроразмерных батарей было разработано в лаборатории ORNL (Oak Ridge National Laboratory). Лицензию на эту технологию получили следующие компании:

- Oak Ridge Micro-Energy;
- Teledyne Electronic Technologies;
- Infinite Power Solutions;
- Excellertron;
- Front Edge Technology;
- Cymbet Corp.

Например, продукты Infinite Power Solutions — THINERGY Micro-Energy Cell (MEC) — обеспечивают высокую эффективность в запасе энергии и позволяют собирателям окружающей энергии использовать миниатюрные, автономные решения.

Компания Infinite Power Solutions выпустила уже упомянутый оценочный комплект THINERGY IPS-EVAL-EH-01, ставший первым коммерческим применением МЭМС-энергособирателей.

NanoEnergy — миниатюрный силовой источник, разработанный Front Edge Technologies для систем с особо ограниченным пространством (смарт-карты, портативные датчики, тэги RFID). Например, NanoEnergy может питать синий светодиод (рис. 13).

Толщина NanoEnergy — всего 0,05 мм, включая корпус. Это твердотельная батарея на основе электролита LiPON и технологии ORNL без жидкостей и опасных материалов. Срок службы — свыше 1000 циклов со 100%-ным разрядом, а практически полный заряд (70%) достигается за 2 минуты. Саморазряд — низкий, менее 5% в год.



Рис. 13. Тончайшая перезаряжаемая батарея NanoEnergy от Front Edge Technologies, питающая синий светодиод, на основе электролита LiPON (технология ORNL): а) общий вид; б) вид с SEM-изображением

Кроме того, батарея гибкая, ее можно изгибать и придавать ей различные формы.

Многообещающие технологии микроразмерных батарей — батареи металл-воздух, в частности, литий-воздух с удельной энергией 11,5 Вт·ч/кг. Перезарядка батареи производится с использованием тонкопленочного твердого или полимерного электролита в ячейке. Но число циклов недостаточно, кроме того, литий-воздушные батареи имеют слишком большой объем, что неприемлемо для потребительской электроники.

Проводятся также исследования в Сандийской национальной лаборатории по созданию 3D-массивов электродов микробатарей и батарей на основе нанопроводов или наностолбиков. При этом можно будет обеспечить большую поверхностную область электроактивного материала в малом объеме.

Компания mPhase Technologies, Inc. летом 2011 года официально объявила о том, что создала законченный рабочий прототип нового автомобильного и морского продукта, относящегося к батарейной технологии и характеризующегося 20%-ным снижением цены и увеличенной функциональностью.

Эта компания известна благодаря своей технологии под названием Smart Surface, системно объединяющей достижения в области нанотехнологий, МЭМС и микрофлюидики. Потенциальные применения технологии —

в системах поставки лекарств, лабораторий на чипе, системах самоочистки, фильтрации, жидкостных и химических сенсорных системах. Первый продукт на основе Smart Surface получил название Smart NanoBattery (рис. 14). В дополнение к Smart Surface, mPhase недавно ввела продукт под названием mPower Emergency Illuminator, разработанный Porsche Design Studio (www.mpowertech.com).

Технология практически использует явление электросмачивания — электронной манипуляции с жидкостью, которая находится в контакте с твердой или пористой поверхностью. Жидкость на гидрофобной поверхности может образовывать капли, но посредством электросмачивания можно перемещать их или распространять. Для органических жидкостей это действительно также, при условии, что поверхность суперлилофобная.

Тот же самый эффект используется для создания интеллектуальных структур на супергидрофобных и суперлилофобных металлических, керамических, полимерных поверхностях для защиты от загрязнений, запотевания, обледенения и может быть полезным для дисплеев и линз. Это же явление в Smart NanoBattery используется для управления жидким электролитом посредством оригинальной кремниевой структуры — пористой мембраны, объединенной с батарейной структурой.

Батареи резервного типа AlwaysReady вначале были основаны на материале Zn/MnO₂ и сходны с щелочными батареями, используемыми, например, для дистанционного ТВ-управления. Для достижения высокой энергетической плотности для ноутбуков и цифровых камер применяется более дорогой материал — Li/MnO₂. Архитектура батарей AlwaysReady включает резервное, первичное и вторичное обслуживание. В резервном или начальном состоянии выход нулевой. Переключаемая (триггерная) мембрана выступает в качестве барьера, отделяющего электролит от положительного и отрицательного электродов. В активированном состоянии триггер допускает течение в камеру электролита к электроду, химическую реакцию и появление выходного напряжения (1,5 В для Zn/MnO₂ и 3 В для Li/MnO₂).

AlwaysReadySmart NanoBattery допускает интеллектуальное управление питанием. Ключевой дифференцирующий признак батареи — команда Power On Command, с ее помощью пользователь может локально или удаленно активировать батарею, выводить ее из неактивного или резервного состояния. До активации химические вещества удерживаются отдельно, и питание не подается, а активация вызывает смешение веществ, электрохимическую реакцию и подачу питания к электронному устройству.

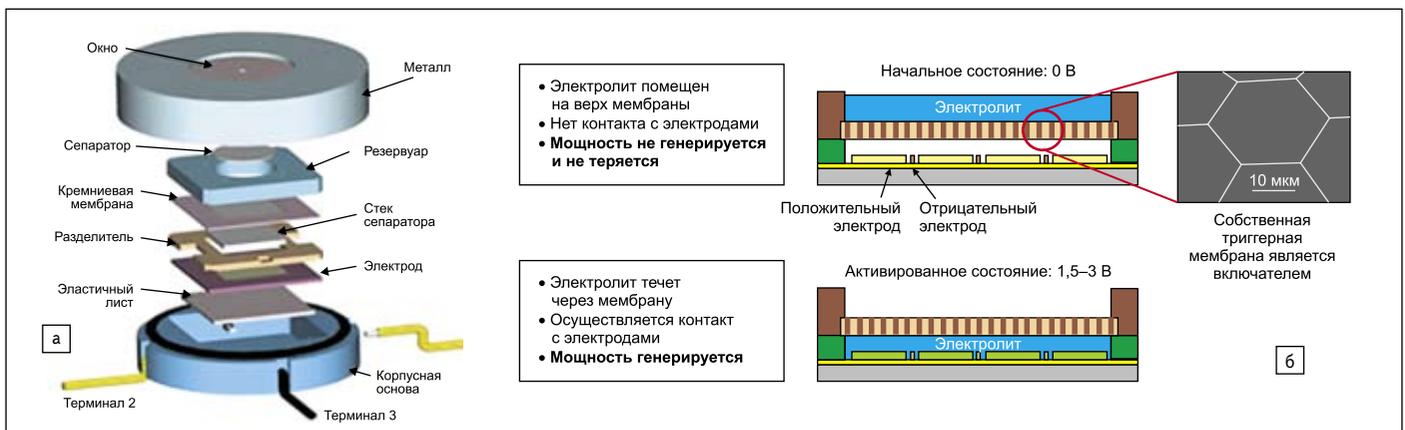


Рис. 14. МЭМС-технология батарей Smart NanoBattery mPhase: а) устройство; б) принцип работы батарей AlwaysRead

Список компаний и их сайтов:

- Yole Development: www.yole.fr, www.i-micronews.com
- STMicroelectronics: www.st.com
- bTendo: www.btendo.com
- Microvision, Inc.: www.microvision.com
- Pioneer Corporation: www.pioneer.jp
- Pixtronix, Inc.: www.pixtronix.com
- Hitachi Displays, Ltd: www.hitachi-displays.com
- Chimei Innolux Corp.: www.chimei-innolux.com
- Qualcomm MEMS Technologies: www.qualcomm.com/qmt, www.mirasoldysplays.com
- Capella Photonics, Inc.: www.capellainc.com
- KAIAM Corporation: www.kaiamcorp.inc.com
- SiTime Corporation: www.sitime.com
- Discera, Inc.: www.discera.com
- Sand 9, Inc.: www.sand9.com
- Silicon Laboratories, Inc.: (Silicon Labs Inc., SiLabs) www.silabs.com
- Vectron International, Inc.: www.vectron.com
- Cavendish Kinetics: www.cavendish-kinetics.com
- Qualtré, Inc.: www.qualtre.com
- Movea: www.movea.com
- Hillcrest Laboratories (Hillcrest Labs): www.hillcrestlabs.com
- AKM (Asahi Kasei Corporation): www.asahi-kasei.co.jp
- Yamaha Corporation: www.yamaha.com
- Aichi Micro Intelligent Corporation (Aichi MI): www.aichi-mi.com
- Freescale Semiconductor, Inc.: www.freescale.com
- MTI MicroFuel Cells, Inc. (MTI Micro): www.mtimicrofuelcells.com
- Audio Pixels Limited: www.audiopixels.com.au
- EPFL (École polytechnique fédérale de Lausanne) www.epfl.ch
- UCLA UCLA (University of California, Los Angeles): www.ucla.edu
- ULIS: www.ulis-ir.com
- BAE Systems: www.baesystems.com
- DRS Technologies: www.drs.com
- Raytheon Company: www.raytheon.com
- L3 Communication Holdings, Inc.: www.l3com.com
- ZEISS: www.zeiss.de
- Thales: www.thalesgroup.com
- Flir Systems, Inc.: www.flir.com
- Opgal Optronics Industries: www.opgal.com
- Northrop Grumman: www.northropgrumman.com
- Fluke Corporation: www.fluke.com
- Pelco by Schneider Electric: www.pelco.com
- Axis Communications: www.axis.com
- Bosch Security Systems: www.boschsecurity.com
- Samsung Techwin Co., Ltd: www.samsungtechwin.com
- Sensoror Technologies AS: www.sensoror.com
- SCD (SemiConductor Devices): www.scd.co.il
- NEC Corporation: www.nec.com
- Sofradir: www.sofradir.com
- Melexis Microelectronic Systems: www.melexis.com
- Invisage, Inc.: www.invisage.com
- Tyndall National Institute: www.tyndall.ie
- N2 Imaging Systems, LLC: www.n2imaging.com
- Lumasense Technologies, Inc.: www.lumasenseinc.com
- Teledyne Technologies Incorporated: www.teledyne.com
- L3 Com Insight: www.insighttechnology.com
- Allied Vision Technologies, Inc.: www.alliedvisiontec.com
- VDS Vosskübler: www.vdsvossk.de
- TAMRON Co., Ltd: www.tamron.com
- Raymarine Holdings, Ltd: www.raymarine.com
- ICx Technologies: www.icxt.com
- Electrophysics Corp (A Sofradir Groups Company): www.electrophysics.com
- Lumasense ITC (InfraredVision Technology Corporation, ITC): www.l-3com.com/itc
- NEC Avio Infrared Technologies Co., Ltd: www.nec-avio.co.jp
- Baolab Microsystems, S. L.: www.baolab.com
- CellGuide: www.cell-guide.com
- InterSense, Inc.: www.intersense.com
- poLight: www.polight.com
- SVTC Technologies: www.svtc.com
- Sensimed AG: www.sensimed.com
- ETHZ: www.ethz.ch
- Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA): www.darpa.mil
- University of Washington: www.washington.edu
- Infinite Power Solutions, Inc.: www.infinitepowersolutions.com
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory): www.ornl.gov
- Excellertron: www.excellatron.com
- Front Edge Technology, Inc.: www.frontedgetechnology.com
- Cymbet Corp.: www.cymbet.com
- mPhase Technologies, Inc.: www.mPhaseTech.com

Команда допускает контроль не только одной ячейки, но и их множества. Концепция массива представляет собой метод сегментации батареи в группы индивидуальных ячеек, которые могут быть независимо активированы в разное время.

AlwaysReady Smart NanoBattery может обеспечивать срок службы до 10 лет, но с последовательным переключением три ячейки могут обеспечивать 30-летний срок службы, а 6 ячеек — 60-летний. Вначале включается первая

ячейка, затем вторая и третья — посредством селективной электронной активации.

Независимость ячеек в массиве допускает для них различную энергетическую плотность или даже различный электрохимический состав (электроды и электролиты). Для непрерывной работы в изменяющемся окружении (различные температуры) могут использоваться разные материалы электродов и химикатов. Это потенциально позволяет удовлетворять требования различных

подсистем, адаптировать поставку мощности при различных температурах, а также использовать часть ячеек для резерва. Этот признак повышает эффективность питания удаленных или имплантируемых датчиков.

Заключение

Технология MEMS стремительно распространяется в различных сферах — от мобильных устройств до беспроводных сенсорных сетей планетарного или космического масштаба, повышая возможности выполнения сенсорных и актюаторных функций в труднодоступных местах или в микроминиатюрном масштабе, вплоть до автономного питания и беспроводной передачи данных.

МЭМС не назвать микробизнесом: это растущий рынок, его объем — порядка \$10 млрд.

МЭМС-технологии повсеместно допускают рост возможностей. В представленном обзоре — только некоторые ключевые инновации в области технологий МЭМС и микросистем, систематизация которых обязательно будет продолжена в последующих публикациях, посвященных этой тематике. ■