

МЭМС-УСТРОЙСТВА АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ СБУДУТСЯ ЛИ МЕЧТЫ?

М.Гольцова

Будущий мир видится как мир, опутанный датчиками. И развертывание сенсорных сетей уже активно реализуется. Встроенные датчики выполняют самые разнообразные функции – от контроля давления шин автомобилей и стабильности полета самолетов до определения качества воздуха в их салонах. Основная задача при обеспечении бесперебойной работы таких сетей – организация энергопитания. Сегодня датчики питаются от энергосети или от батарей. Сетевое электропитание ограничивает области их применения, а батарейное – независимость. И здесь открываются широкие возможности применения МЭМС-устройств сбора и преобразования энергии окружающей среды в электрическую энергию, или МЭМС-устройств аккумулирования энергии (Energy Harvesters, EH), для питания беспроводных датчиков и не только. Таким образом, МЭМС-технология аккумулирования энергии, позволяющая эффективно решать проблему питания маломощных встроенных устройств, особенно когда к размерам источника питания предъявляются жесткие требования, – злободневная тема современных НИОКР.

РЫНОК УСТРОЙСТВ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Сегодня технология аккумулирования энергии окружающей среды, обеспечивающая беспроводное питание многих дистанционных и портативных устройств и систем, батарейное питание или замена батарей которых затруднительны, вызывает большой интерес. Источник аккумулированной энергии (или автономный генератор) может либо непосредственно выполнять функции питания, либо применяться для продления срока службы батарей. Использование энергии окружающей среды (солнечной, тепловой, ветровой, кинетической или электромагнитной) обеспечивает неограниченную во времени эксплуатацию электронных устройств. Таким образом, преобразование энергии окружающей среды в электрическую – это

технология, гарантирующая питание электронного оборудования и позволяющая реализовывать безаккумуляторные системы.

Согласно опубликованному в конце 2012 года отчету компании Yole Développement "Инновационные приборы аккумулирования энергии" (Emerging Energy Harvesting Devices), основное применение этого нового нарождающегося класса приборов – питание сетей беспроводных датчиков, используемых в строительстве, интеллектуальных домах и промышленном оборудовании. Мировой объем производства EH-приборов для беспроводного оборудования, согласно прогнозам компании, с 2012 по 2017 год увеличится с 19 млн. до 227 млн. долл., т.е. объем производства возрастет в десять раз (годовые темпы роста 51%). А по данным маркетинговых



Рис.1. Прогноз структуры рынка модулей аккумуляции энергии

исследований компании Navigant Research, в 2020 году будет продано 18,7 млн. ЕН-устройств (в 2013 – менее 10 млн.).

Прежде всего, приборы аккумуляции энергии найдут применение в беспроводных переключателях (для включения-выключения освещения) и датчиках (температуры, влажности, контроля присутствия и пр.), устанавливаемых в зданиях коммерческого назначения. Другими крупными потребителями будут беспроводные датчики, предназначенные для контроля состояния промышленного оборудования и процессов. Здесь их главное достоинство, помимо увеличения скорости проводимых измерений, которая сейчас ограничена параметрами батарей, заключается в бесперебойной работе, особенно в тех случаях, когда доступ к оборудованию затруднен. Объем продаж устройств аккумуляции энергии для промышленных систем пока невелик, поскольку для них нет действующего соглашения и протокола маломощной радиосвязи, подобных тем, которые существуют для приборов, используемых в интеллектуальных домах. Но эта ситуация может вскоре измениться, что приведет к значительному снижению цен на ЕН-устройства и, соответственно, к увеличению объема их выпуска. Возрастет и спрос на приборы аккумуляции энергии для замены батарей в модулях беспроводных датчиков, используемых в системах контроля окружающей

среды, медицинских приборах, бытовой технике, автомобильных системах мониторинга состояния шин, транспортных средствах (рис.1).

Типы ЕН-устройств весьма разнообразны, как и степень зрелости их технологий. Наиболее динамично развивается рынок механических и термических устройств аккумуляции энергии, которые применяются в строительстве, промышленных и транспортных системах. Их доля в общем объеме продаж ЕН-прборов в 2017 году составит 36 и 25% соответственно. При этом цены на них за рассматриваемый период будут ежегодно снижаться на 12% [1].

В докладе на Второй научно-практической конференции, посвященной разработке, контролю, реализации программных средств распределенных МЭМС, прошедшей в 2012 году в Безансоне (Франция), старший аналитик компании Yole Développement в области МЭМС Эрик Мунье определил маркетинговый потенциал МЭМС-устройств аккумуляции энергии (см. таблицу) [2].

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЭМС-УСТРОЙСТВ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Сейчас особое внимание уделяется развертыванию беспроводных сенсорных сетей, которые рассматриваются как основной функциональный блок интеллектуальных городов. Размеры датчиков благодаря соблюдению закона Мура и освоению МЭМС-технологии значительно сократились. Уменьшилась и их стоимость. Но стоимость монтажа сенсорных сетей (включая стоимость прокладки проводов для подачи питания) по-прежнему велика и существенно превышает цену датчика. Так, стоимость электропроводки для переключателя света ценой в 1 долл. составляет 50 долл. Не менее важны проблемы сетевого питания. Срок службы используемых батарей при определенных условиях эксплуатации может составлять 25 лет, но для многих применений зачастую предпочтительнее автономный источник энергии для питания сенсорной сети или зарядки батареи. И здесь на первый план выступают МЭМС-устройств сбора и преобразования энергии.

Достоинства и недостатки МЭМС-генераторов энергии

К факторам, стимулирующим интерес к МЭМС-устройствам сбора и преобразования энергии, относятся:

- снижение издержек эксплуатации (не требуется периодическая замена источника питания);
- уменьшение габаритов и массы источника питания и, следовательно, системы;
- возможность применения в системах, работающих в неблагоприятных для батарей условиях (например, батареи, в отличие от автономных МЭМС-источников, не выдерживают температуры выше 50°C);
- защита окружающей среды от загрязнений благодаря предотвращению ежегодного выброса миллионов токсичных батарей.

Однако пока энергия, вырабатываемая МЭМС-аккумуляторами энергии, не превышает 5–20 мкВт/см³, поэтому они могут применяться лишь для питания маломощных встраиваемых устройств. Кроме того, МЭМС-приборы аккумулярования энергии дороже батарей и сетевого электропитания. Так, батареи для модулей мониторинга состояния шин стоят 0,40 долл., тогда как схема МЭМС-аккумулятора для такой системы – 2,0 долл. И в ближайшее время значительного снижения стоимости МЭМС-приборов аккумуляции энергии не предвидится. Правда, не стоит забывать, что они не требуют регулярной замены, как батареи. Для успешного продвижения на рынок габариты МЭМС-аккумуляторов энергии не должны превышать 1 см³, масса также должна быть небольшой. И еще: основная проблема при развертывании беспроводных сенсорных сетей заключается в интеграции гетерогенных сетей, содержащих датчики различных производителей. Для ее решения необходимы международные стандарты, которые бы обеспечивали разработку и реализацию не только оптимизированных по энергетическим характеристикам беспроводных сенсорных сетей для домашних систем и систем интеллектуальных зданий, но и сетей для разумных измерительных устройств, служб материально-технического обслуживания, энергосистем. Необходимо создать условия для совместной работы различных блоков системы, поскольку применение в них приборов аккумулярования энергии может потребовать существенного изменения схемы питания.

СТАНДАРТЫ, ПРИГОДНЫЕ ДЛЯ МЭМС-ПРИБОРОВ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Для сенсорных сетей с аккумулярованным питанием от МЭМС-источников приемлемы стандарты, обеспечивающие передачу данных на

расстояние до 10 м со скоростью 100 Кбит/с (субгигагерцового ISM-диапазона), 250 Кбит/с (ZigBee), 3 Мбит/с (Bluetooth).

В марте 2012 года Международная электротехническая комиссия (IEC) ратифицировала разработанный консорциумом EnOcean Alliance стандарт ISO/IEC 14543-3-10 (Информационные технологии. Архитектура домашних электронных систем, HES. Часть 3-10. Беспроводной протокол коротких пакетов, WSP, оптимизированный для экономии энергии. Архитектура и протоколы нижнего уровня). Стандарт предназначен для беспроводных сенсорных сетей компании EnOcean с низким энергопотреблением [3]. Это первый и пока единственный стандарт, который одновременно оптимизирован для источников аккумулярованной электроэнергии и для беспроводной технологии. Совместно с разработанной консорциумом спецификацией на профиль оборудования, применяемого для автоматизации зданий (EnOcean Equipment Profiles, EEPs), стандарт формирует полностью совместимую, открытую беспроводную технологию и сравним со стандартами Bluetooth и WiFi. В стандарте приведены решения для систем с автономной генерацией электроэнергии и работы датчиков от встроенных фотоэлементов, элементов Пельтье, источников аккумулярованной энергии на основе электромагнитных механических генераторов.

В марте 2013 года консорциум EnOcean Alliance объявил о выпуске версии 2.5 EEP, содержащей описание более 100 изделий, пригодных для построения беспроводных сетей с источниками питания аккумулярованной энергии. В версии 2.5 области применения с одинаковыми характеристиками впервые объединены в серии. Таким образом, сформировано руководство по разработке

новых изделий и оборудования сенсорных сетей. В дополнение к новой спецификации приводятся методы распознавания одно- и двунаправленных беспроводных приложений, а также установления профилей передачи шифрованных данных. Они важны для таких критичных устройств, как системы доступа и управления, или для организации защищенного доступа при передаче облачных данных [4].

ТИПЫ МЭМС-АККУМУЛЯТОРОВ ЭНЕРГИИ

МЭМС-аккумуляторы энергии, помимо преобразования солнечного излучения в полезную энергию, собирают кинетическую энергию, возникающую при вибрации/перемещении (пьезоэлектрические, электромагнитные и электростатические-емкостные элементы), а также энергию, обусловленную разностью температур источника тепла и среды (тонкопленочные термоэлектрические

Перспективные области применения МЭМС-устройств аккумулирования энергии

Область применения	Перспективы применения МЭМС-аккумуляторов энергии			Примечание
	Плохие	Средние	Хорошие	
Автомобильные системы	–	Системы снижения расхода бензина	Системы мониторинга состояния шин	Первыми будут использованы пьезомакроМЭМС. Возможно применение электростатических устройств
Промышленное оборудование	Системы интеллектуального учета	Датчики коррозии	Мониторинг состояния машин, датчики скорости оборотов	Предпочтение будет отдано аккумуляторам энергии больших размеров
Строительство и автоматизация домов	–	Беспроводные датчики в зданиях	Беспроводные переключатели в зданиях	В сильной степени зависит от устанавливаемой системы
Метеорологические системы	–	–	Аграрные сенсорные сети	Предпочтение отдается солнечным батареям
Военные и аэрокосмические системы	–	–	Комплексы мониторинга состояний и использования систем + мониторинг состояния авиационных запасных частей	Возможно, вместо комплексов мониторинга найдут применение в других глобальных военных системах
Медицинская аппаратура	Манометры-манжеты, капиллярный пульсоксиметр, кохлеарные имплантаты	Контроль ортопедических операций, разумные таблетки	Кардиостимуляторы, домашние системы контроля состояния здоровья	Пока применение ограничено. Возможно более широкое применение, но не в ближайшее время
Бытовая техника	Зарядные устройства сотовых телефонов, камер, компактных компьютеров	–	–	Устройства аккумулирования тепловой энергии для контроля температуры микросхем, как правило, не выполняются на основе МЭМС



Рис.2. Уровни энергии, генерируемой МЭМС-аккумуляторами

генераторы). Электрическую энергию можно извлекать и из радиочастотного излучения, хотя пока она значительно меньше, чем энергия, получаемая с помощью указанных выше трех методов (рис.2).

Ниже приводится перечень компаний, разрабатывающих и производящих МЭМС-генераторы:

- пьезоэлектрические – компании Morgan Electro Ceramics (Великобритания), MicroStrain Sensing Systems, TPL Micropower division, AdaptivEnergy (США);
- электростатические – HOLST Centre, (Бельгия) государственный университет National Chiao Tung University (NCTU) (Китай), ESIEE-ESYCOM (Франция), Королевский колледж Лондона, HSG IMIT;
- электромагнитные – EpOcean, Lumedyne Technologies (США), PMG Perpetuum (Великобритания), HSG IMIT (Германия), Asahi Glass (Япония);
- термоэлектрические – Holst Centre, Отделение микросистемной техники Фрайбургского университета, Thermo Life (США), Micropelt, Fraunhofer IIS (Германия), Nextreme (Япония).

Но для того чтобы МЭМС-аккумуляторы нашли широкое применение в промышленных системах, бытовой технике, автомобильной промышленности, медицинском оборудовании, автоматизации строительства, необходимо совершенствовать технологию, методы корпусирования, сборки, испытаний, аппаратные и программные средства. И семена уже посеяны, разработки МЭМС-аккумуляторов энергии активно ведутся и дают хорошие результаты.

МЭМС-УСТРОЙСТВА АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ Пьезоэлектрические МЭМС аккумуляторы энергии

Наногенераторы

Мерцающие символы на экране дисплея свидетельствуют о его неполадках. Однако мерцающие символы на экране ЖКД означали, что пятилетние усилия ученых Технологического института

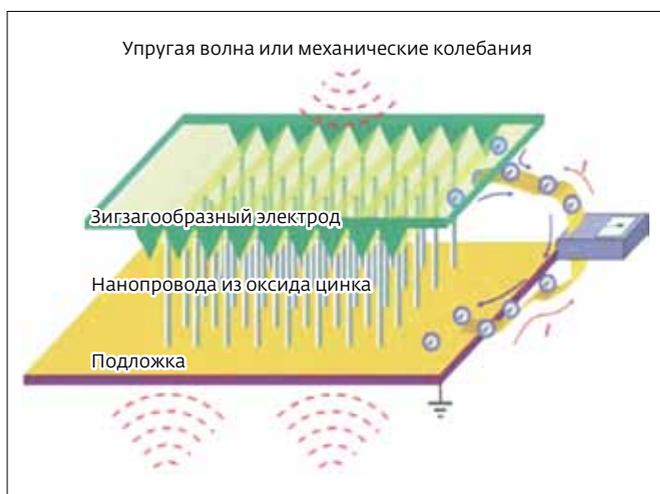


Рис.3. Структура наногенератора

Джорджии под руководством профессора школы материаловедения и технического проектирования Чжун Линь Вана по разработке наноразмерного генератора, аккумулирующего энергию механических или УЗ-колебаний, увенчались успехом. Генератор разрабатывался для питания электронных устройств, и его работа основана на свойствах пьезоэлектрических материалов, таких как оксид цинка.

Первый вариант наногенератора был выполнен на основе вертикально ориентированных нанопроводов из оксида цинка (материала со свойствами полупроводника и пьезоэлектрика) высотой около 1 мкм, которые были размещены с шагом 0,5 мкм на подложке из арсенида галлия, сапфира или гибкого полимера, покрытой слоем оксида цинка для электрического соединения нанопроводов. Поверх "леса" нанопроводов размещалась пластина с зигзагообразными кремниевыми электродами, более тысячи наноразмерных наконечников которых имели платиновое покрытие.

Пластина располагалась так, чтобы в зазорах между наконечниками могло находиться достаточное число нанопроводов (рис.3). При воздействии на генератор УЗ-волны или механических колебаний, нанопровода изгибаются и соприкасаются с наконечниками электродов. При этом наконечники с платиновым покрытием при касании нанопроводов образуют барьер Шоттки и тем самым позволяют собирать и хранить электрический заряд и обеспечивать протекание тока в одном направлении. При плотности нанопроводов 20 мкм² плотность энергии, которая обеспечивается током, образуемым сотнями движущихся

нанопроводов, составляет ~10 пВт/мм². При размере матрицы нанопроводов 10×10 мм генерируемая энергия будет достаточна для питания прибора на основе нанопроводов, нанотрубок или нанолент.

В процессе совершенствования созданного наногенератора и упрощения метода его изготовления исследователи выращивали матрицу нанопроводов конической формы, которые отделялись от твердой подложки и перемещались в спиртовой раствор. Раствор с нанопроводами стекал на тонкий металлический электрод, сформированный на гибкой полимерной пленке. После высыхания раствора поверх полученного слоя наносился следующий такой же слой с нанопроводами. Таким образом создавался композит, содержащий несколько слоев нанопроводов/полимерных пленок. При изгибе нанопроводов выходное напряжение матрицы, состоящей из пяти слоев генераторов размером 2×1,5 см, составляло 3 В (что сопоставимо с напряжением двух батарей AA), ток – 1 мкА. По утверждению разработчиков, новый наногенератор может питать коммерческие ЖКД, свето- и лазерные диоды, а также сетевые датчики и обеспечивать беспроводную передачу их данных.

Группа Технологического института Джорджии изучила также возможность замены оксида цинка цирконатом-титанатом свинца. Ученые химическим методом выращивали на проводящих и диэлектрических подложках матрицы вертикально ориентированных монокристаллических PZT-нанопроводов при температуре 230°C (температура обработки цирконата-титаната свинца составляет 630°C). Созданные наногенераторы на PZT совместно со схемой выпрямителя смогли питать коммерческий лазер. Так была показана возможность применения различных материалов для изготовления наногенератора. Правда, генератор на основе цирконата-титаната свинца по мощности несколько уступает генератору на оксиде цинка. Возможно, поэтому дальнейшие работы были сосредоточены на совершенствовании наногенераторов на оксиде цинка [5].

Работа группы исследователей технологического института Джорджии финансировалась Агентством перспективных оборонных исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA), Национальным научным фондом (NSF) и Учебным центром раковой нанотехнологии Технологического института Джорджии и Университета Эмори.

В 2012 году сотрудники технологического института Джорджии и Пекинского института наноэнергетики и наносистем во главе с Чжун Линь Ваном объявили о создании наногенератора на основе матриц вертикально ориентированных ZnO-нанопроводов с максимальным напряжением разомкнутой цепи 58 В, током короткого замыкания 134 мкА, что соответствует плотности мощности 0,78 Вт/см³. Вырабатываемый наногенератором площадью 9 см² сигнал подавался на седалищный нерв лягушки, что вызвало его раздражение, о чем свидетельствовали сокращения икроножного мускула [6, 7].

И наконец, в 2013 году группа исследователей под руководством Юн Циня из Университета Ланьчжоу Китайской академии наук и Чжун Линь Вана получили напряжение холостого хода генератора, равное 209 В и максимальный ток – 53 мкА, соответствующий плотности тока 23,5 мкА/см²! Наногенератор состоит из матрицы (площадью менее 0,95 см²) вертикально ориентированных нанопроводов длиной 420 нм, сверху и снизу которых расположены электроды. Периодическое воздействие на генератор объекта массой ~230 г или простое нажатие на него пальцем вызывает деформирование нанопроводов и генерацию электрического тока в нижнем электроде. В ходе экспериментов было показано, что генерируемая энергия зависит от силы воздействия: выходной сигнал был пропорционален корню квадратному из высоты, с которой падал объект. Масса используемого в экспериментах объекта была равна 193 г, высота падения – 5–13 мм.

Выходная мощность генератора была достаточной для питания коммерческого светодиода на напряжение 1,9 В. При этом новый прибор, в отличие от других наногенераторов, не требует применения элемента накопления энергии и позволяет системам с автономным питанием работать в разнообразных средах. Такие простые и универсальные наногенераторы могут вырабатывать электроэнергию под воздействием морских волн, звуковых колебаний, их даже можно встраивать в подошву обуви для подзарядки аккумулятора мобильного телефона при ходьбе. В будущем эти малогабаритные наногенераторы смогут использоваться для восстановления биологических нейронных сетей, в системах национальной безопасности и в Интернете вещей [8].

МЭМС-генератор готов к выходу на рынок

Компания MicroGen Systems в начале 2013 года объявила об освоении контрактным

производителем X-Fab промышленной технологии изготовления созданного ею пьезоэлектрического МЭМС-аккумулятора энергии на 200-мм пластинах кремния. МЭМС-генератор занимает площадь ~1 см². При типичных для промышленных условий колебаниях на частоте 120 Гц и динамической нагрузке 0,1 г его выходная мощность составляет ~100 мкВт, при частоте 600 Гц и нагрузке 0,5 г – ~900 мкВт. На основе МЭМС-аккумулятора энергии компания планировала летом 2013 года начать выпуск микромодулей источников питания серии BOLT. Модуль, помимо МЭМС-генератора, содержит AC/DC-преобразователь LTC3588 компании Linear Technology и конденсатор емкостью 300 мкФ. Выходная мощность модулей при напряжении по постоянному току 3,3 В составляет 25–500 мкВт в зависимости от конфигурации и частоты колебаний.

На Международной выставке и конференции сенсорных систем 2013 года MicroGen успешно продемонстрировала возможность питания беспроводной сенсорной сети (четыре датчика типа "интеллектуальная пыль") компании Linear Technology при вызываемых вибрационным стендом колебаниях на частоте 120 Гц и нагрузке 0,2 г.

По утверждению разработчиков, модули BOLT предназначены для питания беспроводных датчиков [9].

Спасибо музыке

Оригинальное решение имплантируемого медицинского датчика, питаемого акустическими колебаниями, присущими рэп-музыке, блюзам, джазу, рок-музыке, предложили исследователи Университета в Пардью. Лучшие результаты получены для рэпа, поскольку в нем много низкочастотных звуков, в частности басовых.

Основной элемент датчика – колеблющийся кантиливер из цирконата-титаната свинца длиной в 2 см. Музыка в диапазоне частот 200–500 Гц вызывает колебания кантиливера и генерацию электрического заряда, которой собирает конденсатор. Когда частота выходит за пределы диапазона чувствительности МЭМС, колебания кантиливера прекращаются. Электрический заряд конденсатора автоматически поступает на датчик, регистрирующий давление и передающий полученные данные приемнику, который может находиться на расстоянии в несколько дюймов от пациента (рис.4). Поскольку спектральный состав музыкального



Рис. 4. Имплантируемый датчик, который питается энергией, генерируемой пьезоэлектрическим МЭМС под воздействием музыки (рэпа, блюза, джаза, рока)

сигнала непостоянный, интервалы накопления заряда и передачи данных меняются. Вместо музыки можно использовать тональные сигналы. Правда, по мнению разработчиков, тональный сигнал утомляет, а музыка – эстетически более привлекательна.

Датчик предназначен для контроля давления в мочевом пузыре и кровеносном сосуде при аневризме [10].

Google Glass в МЭМС-исполнении

Беспроводной компьютерный интерфейс, размещаемый в стеклах очков – Google Glass, – уже знаком читателям. А теперь представим подобное устройство для контактных линз. Но как питать столь миниатюрное устройство? Батарея на ремне с проводами, тянущимися в глаза, не привлекает. Проблему решила новая start-up компания EPGL Medical Sciences (бывшая EP Global Communications), создавшая МЭМС-устройство аккумулирования энергии, которое помещается в контактную линзу и реагирует на мигание или движение глаз. Толщина МЭМС-аккумулятора равна всего нескольким микронам, и он незаметен пользователю контактных линз. Поскольку глаза человека всегда движутся (даже во сне), МЭМС-аккумулятор непрерывно собирает и осваивает вырабатываемую ими энергию, позволяя воспроизводить изображение на контактной линзе. Так, чтобы перед глазами появились данные о содержании глюкозы в крови, достаточно быстро мигнуть.

Предусмотрена возможность лицензирования МЭМС-генератора. В зависимости от того, насколько оперативно эта технология будет внедряться, автономное питание элементов контактных линз найдет применение завтра или через несколько лет [11].

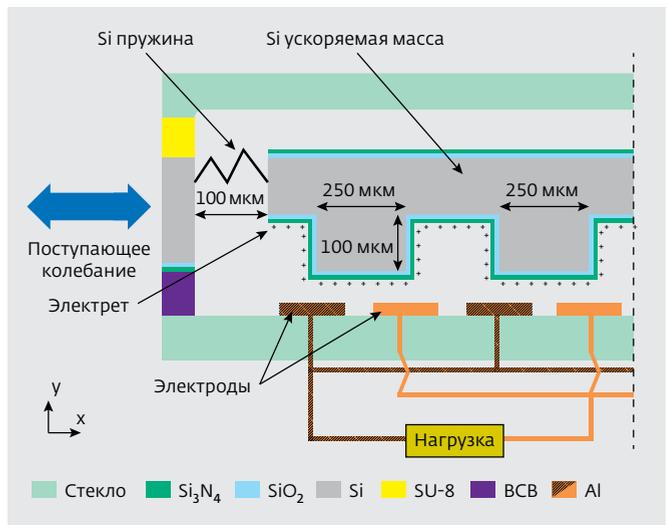


Рис. 5. Структура электростатического МЭМС-генератора энергии

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ МЭМС АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Группа специалистов бельгийского Центра микро- и нанoeлектроники IMEC и компании Panasonic на конференции по МЭМС для источников питания 2012 года (PowerMEMS 2012 Conference) представили новый электростатический МЭМС-преобразователь колебательной энергии, выполненный на основе гофрированного $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ -электрета (диэлектрика, длительное время сохраняющего поляризованное состояние после снятия внешнего воздействия, которое привело к его поляризации, или зарядке, и созданию в окружающем пространстве квазипостоянного электрического поля).

Электростатический МЭМС-аккумулятор энергии сформирован набором из трех соединенных друг с другом пластин. Центральная кремниевая пластина содержит механический резонатор, состоящий из сформированных травлением сейсмической массы и пружин. На нижней поверхности сейсмической массы расположен гофрированный электрет, полученный коронной обработкой многослойного $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ покрытия кремния. Нижняя стеклянная пластина содержит два металлических проводника, присоединяемых к схеме нагрузки. Верхняя стеклянная пластина обеспечивает герметичную оболочку и защищает прибор от неблагоприятного воздействия среды (рис. 5).

При воздействии колебаний сейсмическая масса перемещается относительно корпуса и резонирует. В результате на электродах обоих

проводников нижней пластины под воздействием электрического поля, образуемого постоянным зарядом электрета, появляются заряды противоположного знака. Заряд каждого электрода равен плотности электрического поля смещения вдоль его поверхности. При перемещении массы с третьем электрическое поле изменяется, изменяются и знаки заряда каждого электрода. В итоге в схеме нагрузки, к которой присоединены проводники, появляется ток [12].

Специалисты научно-исследовательского центра Holst Centre и ИМЕС предложили метод увеличения выходной мощности (или ширины полосы), генерируемой электростатическим или пьезоэлектрическим МЭМС-аккумулятором энергии. Метод достаточно прост и предусматривает крепление на корпусе аккумулятора стальной балки, что аналогично добавлению второй массы и пружины в масс-пружинную систему МЭМС-генератора. В результате дополнительная сейсмическая масса генератора уже равна сумме масс корпуса и балки. Это приводит к разделению полученного электрического сигнала на резонансной частоте аккумулятора на два сигнала. Путем подбора отношений масс и коэффициентов жесткости пружин собственно устройства сбора и преобразования

энергии и корпуса с балкой мощность МЭМС-генератора, смонтированного в корпус с балкой, можно увеличить в 51 раз (выходная мощность электростатического или пьезорезонансного МЭМС-аккумулятора энергии составляет 50–300 мкВт) и получить чувствительность 1,2 мВт/г². Поскольку максимальная амплитуда колебаний металлической балки равна 50 мкм, ее можно размещать и на печатной плате, на которой смонтированы микросхема и заряжаемая батарея. А это позволит объединить предложенную конструкцию с сенсорным узлом сети [13].

ПРОГНОЗЫ СБУДУТСЯ ИЛИ ОСТАНУТСЯ МЕЧТОЙ?

В мире, осознающем проблемы охраны окружающей среды, МЭМС-приборы аккумуляции энергии предоставляют возможность "чистого" и практически бессрочного электропитания небольших систем, позволяя отказаться от загрязняющих окружающую среду батарей. Согласно оптимистичным рыночным прогнозам, в последующие пять-десять лет доходы от продажи систем для вездесущих сенсорных сетей составят миллиарды долларов, поэтому можно ожидать больших объемов продаж и производства устройств аккумуляции энергии.

И действительно, МЭМС-приборы аккумулирования энергии на протяжении ряда лет – актуальная тема НИОКР. Но, как показала дискуссия, которая развернулась на европейском конгрессе руководителей компаний, занимающихся разработкой и производством МЭМС (MEMS Executive Congress Europe 2013), с оптимистичными прогнозами согласны не все [14]. Дискуссию открыл руководитель программ использования солнечной энергии Центра исследований в области энергетики Вим Синк, который отметил, что "МЭМС-технология может касаться проблем энергетики, но энергетика безразлична к проблемам МЭМС" Возможно, МЭМС найдут применение в интеллектуальных системах контроля состояния электрических сетей. Профессор микроприборостроения Королевского колледжа Лондона Эрик Итман поддержал Синка, указав, что требуемая в мире электроэнергия достигает 4 ТВт, тогда как отдельные приборы аккумулирования энергии в лучшем случае генерируют милливатты.

Возражая оппонентам, президент компании MicroGen Systems Роберт Андоска отметил, что применяя источники небольшой мощности, мы экономим много энергии. Если благодаря датчикам влажности, питаемым МЭМС-генератором, удастся сэкономить 10 мин работы каждой машины для сушки одежды, экономия затрат на электроэнергию в США за год составит 1,3 млрд. долл.

По мнению аналитика компании IDTechEx Гарри Зервоса, микрогенераторы и аккумуляторы энергии, ультрамаломощные электронные приборы и протоколы маломощной беспроводной передачи данных – три составляющие, которые совместно могут вызвать серьезные изменения в управлении строительством, промышленной автоматизации и в проведении таких мер, как предупредительное техническое обслуживание.

В итоге на вопрос, стали ли присутствующие относиться к аккумулированию энергии более или менее оптимистично, многие отметили, что смотрят в будущее с большим оптимизмом, чем пять лет назад. Ну что же, подождем еще пять лет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Energy harvesters challenge batteries into wireless sensors, announces Yole Développement. – Emerging Energy Harvesting Devices, a report from Yole Développement. – www.yole.fr/iso_upload/News/2012/PR_EmergingEnergyHarvestingDevices_YoleD%E9veloppement_Oct2012.pdf.
2. **Mounier E.** MEMS Markets & Applications. Focus on wireless sensor networks & ebergery harvesting. – dmems.univ-fcomte.fr/presentations/mounier.pdf.
3. **Елисеев Н.** EnOcean – океан энергии для "умного дома". – Электроника: НТБ, 2008, №7, с.40–43.
4. **San Ramon.** The EnOcean Alliance advances the wireless standard for green buildings. – www.enocean-alliance.org/en/enocean-alliance-advances-the-wireless-standard-for-green-buildings.
5. Energy harvesting: Nanogenerators grow strong enough to power small conventional electronic devices. – www.gtresearchnews.gatech.edu/energy-harvesting-nanogenerators/.
6. Nanogenerator provides continuous power by harvesting energy from the environment. – audiorazgovornik.ru/about-science-and-technology-in-american-english/1402---qq-nanogenerator-makes-electricity-from-waste-heat.
7. **Zhu G., Wang A.C., Liu Y., Zhou Y. and Wang Z.L.** Functional electrical stimulation by nanogenerator with 58 V output voltage. – Nano Lett., 2012, 12 (6), p.3086–3090.
8. **Zyga L.** Nanogenerator's output triples previous record. – phys.org/news/2013-01-nanogenerator-output-triples-previous.html.
9. **Friedlander B.** Energy harvester rolls to market production. – www.news.cornell.edu/stories/2013/05/energy-harvester-rolls-market-production.
10. **Venere E.** Rap music powers rhythmic action of medical sensor. – www.purdue.edu/newsroom/research/2012/120126ZiaieMusic.html.
11. **Montalbano E.** Company Designs MEMS-Based Energy Harvester for Contact Lenses. – www.designnews.com/author.asp?section_id=1386&doc_id=266466&dfpParams=ind_186,industry_medical,aid_266466&dfpLayout=blog.
12. High-performance electrostatic MEMS vibration energy harvester. – www.energyharvestingjournal.com/articles/high-performance-electrostatic-mems-vibration-energy-harvester-00005559.asp?sessionid=1.
13. Innovative power amplifier for a MEMS-based energy harvester. – www.holstcentre.com/en/NewsPress/NewsList/EnergyHarvestingAmplifier.aspx.
14. **Clarke P.** Panel casts doubt on MEMS for energy harvest. – www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1280605.

