

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ОПТИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ

УДК 621.3.049.77

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ
МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

Э. Г. Косцов

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kostsov@iae.nsk.su*

В современной микроэлектронике наиболее интенсивно развивающимся сектором являются микроэлектромеханические системы (MEMS — Micro-Electro-Mechanical Systems). Однако к настоящему времени большинство разработчиков электронной техники и пользователей устройств высоких технологий обладает недостаточной общей информацией о новом направлении микроэлектроники. В предлагаемой работе рассматривается современное состояние этого направления, широкие спектры его практических применений и перспективы дальнейшего развития, включая переход в нанометровый диапазон с созданием элементов нанозлектроники. Рассматриваются также особенности функционирования ряда конкретных MEMS-устройств, их характеристики, области и масштабы практических приложений.

Ключевые слова: микроэлектромеханика, MEMS, электромеханическое преобразование энергии, микроэлектроника, микрооптика, оптоэлектромеханика, адаптивная оптика, генератор частоты, акселерометр, гироскоп, микроактюатор, нанозлектромеханика, ВЧ-коммутатор, ВЧ-фильтр, сенсоры давления.

Введение. Основная задача микроэлектромеханики — создание не имеющих аналогов микромеханических конструкций широкого назначения. Это направление базируется на достижениях современных микроэлектронных технологий, наследуя основные достоинства электронных микросхем: высокую надежность и воспроизводимость характеристик, низкую стоимость, крупные масштабы практического применения. Суть микроэлектромеханики заключается в том, что с помощью технологий современной микроэлектроники, например с помощью технологии глубокого травления кремния (либо структур КНИ — кремний на изоляторе, SOI), удалось создать интегральные схемы (ИС) одновременно с микромеханическими конструкциями с уникальными параметрами (определяемыми их микро- или наноразмерами, когда перемещаемая масса составляет 10^{-4} – 10^{-18} г), управляемыми электронными схемами.

Базовым элементом микроэлектромеханических систем (MEMS — Micro-Electro-Mechanical Systems) является электромеханический преобразователь энергии. Такие преобразователи могут базироваться на различных физических принципах: электромагнитных, электротепловых, пьезоэлектрических, электростатических. Предпочтение отдается последним как наиболее технологичным. Емкостные электромеханические преобразователи энергии имеют неоспоримые преимущества перед индуктивными в простоте конструкции и технологичности: в них нет необходимости использования магнитопроводов, обмоток и т. п.

Прецизионное, ранее недоступное механике изготовление подвижных элементов механических конструкций и одновременное объединение их в одном технологическом цикле с управляющими и обрабатываемыми элементами электроники, созданными на базе процессов МНОП-технологии (металл—нитрид кремния—оксид кремния—полупроводник), является важнейшей особенностью MEMS.

В истории развития MEMS-технологии можно выделить несколько этапов. На первом (с середины 50-х до начала 60-х годов прошлого столетия) проводились исследования, направленные на создание основ будущей технологии, в которых участвовали как научные подразделения таких крупных компаний, как "Bell Laboratories", так и некоторые академические учреждения. Главное внимание уделялось актуальным в то время технологиям двойного назначения, и прежде всего созданию различных точных датчиков, когда требовалась только высокая надежность, при этом высокая стоимость не являлась определяющей.

Второй этап развития MEMS-технологии определялся мощными военно-промышленными компаниями, такими как "Fairchild", "Westinghouse", "Honeywell" и т. п., которые спешили коммерциализировать первые экспериментальные наработки. Этот этап длился практически 10 лет.

И только когда стали ясны перспективы нового направления, к началу 70-х годов академической науке на него стало выделяться целевое финансирование в первую очередь от промышленности для решения задач сокращения стоимости и расширения областей применения MEMS-устройств. Этот этап (третий) длился более 10 лет.

Далее наступила микромеханическая эпоха [1–4], которая продолжается и в настоящее время.

Применительно к крупным практическим задачам начало современного этапа развития MEMS можно отнести к 2000 году, когда президентом США было объявлено о развертывании новой поддерживаемой государством научной программы национальной нанотехнологической инициативы (NNI — National Nanotechnology Initiative) с полумиллиардным бюджетом. Программа успешно развивается и за последние годы достигла гарантированных ежегодных миллиардных вложений в исследовательские и конструкторские работы. Крупная государственная поддержка этого направления имеет место и в ряде других стран, например в Японии, в которой заявлено о национальном проекте по развитию MEMS-индустрии до 2016 года.

К настоящему времени диапазон практических применений MEMS исключительно широк, число изделий составляет сотни миллионов. При этом чаще можно говорить не только о значительном улучшении параметров используемых устройств, но и о создании на основе MEMS принципиально новых устройств.

MEMS-направление за последние годы стало наиболее крупной и быстро развивающейся отраслью электронной промышленности. Об этом свидетельствуют многочисленные крупные международные конференции: IEEE International Conference on Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems, IEEE Annual International Conference on Microelectromechanical Systems (the MEMS conference), Eurosensors conference, IEEE Workshop on Solid-State Sensors, Actuators, and Systems и конференции, посвященные более узким вопросам применения MEMS (оптических MEMS, микродвигателей, Bio-MEMS), проблемам коммерциализации MEMS и т. п.

Появилось много новых научных журналов, предназначенных для разработчиков MEMS: IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems, Sensors and Actuators, Journal of Micromechanics and Microengineering, Lab on a Chip, Наномикросистемная техника (Россия), Nanotechnology, Nature Nanotechnology, Smart Materials and Structures. Кроме того, ряд журналов: Science, Nature, Applied Physics Letters, Journal of Applied Physics, New Journal of Physics, Proceedings of the National Academy of Science, Nano Letters, Analytical Chemistry, Langmuir и др. — часто публикуют статьи по физике, методам изготовления и применения MEMS. За последний год появились электронные журналы, посвященные только вопросам MEMS, например Memsjournal.com, MEMS Investor Journal и др.

Разработкой MEMS в разных странах занимаются сотни исследовательских центров (только в Китае их более 100). Постоянно проходят крупные международные научно-

технические конференции. В частности, в январе 2007 года в г. Хайнань (Китай) была проведена международная конференция и выставка «Интеграция и коммерциализация микро- и наносистем», в которой участвовало более 500 разработчиков и действовали следующие секции: микронаноэлектрические механические системы, микро- и наномеханика, микро- и наносистемы, микро- и наноприборы, микро- и наножидкости и др. Конференция «Нанотехнология и MEMS/MCT/микромашини: Глобальные перспективы технологии, применения и коммерциализация» прошла в июне 2007 года в г. Чикаго (США).

Областями применения MEMS являются:

— микрооптоэлектромеханика (дисплеи, адаптивная оптика, оптические микрокоммутаторы, быстродействующие сканеры для исследования роговой оболочки глаза, дифракционные решетки с электрически перестраиваемым шагом, управляемые двух- и трехмерные матрицы микрозеркал и другие);

— ВЧ-устройства (ВЧ-коммутаторы, перестраиваемые фильтры и антенны, фазированные антенные решетки и другие);

— измерители перемещений (гироскопы, акселерометры двух- и трехосные с высокой чувствительностью и высоким разрешением, дающие принципиально новые возможности большому классу электронных приборов);

— сенсоры вибраций, датчики давления, скоростей и механических напряжений, микрофоны (их число в мобильных телефонах исчисляется миллионами штук). Еще в 2004 году корпорация "Intel" начала поставлять для сотовых телефонов радиочастотные front—end-модули, изготовленные по MEMS-технологии. В них интегрировано около 40 пассивных элементов, что позволяет сэкономить до 2/3 пространства в корпусе телефона;

— большой спектр устройств для работы с микрообъемами жидкой среды и для применений в биологии, биочипах, биодатчиках, при химическом тестировании, создании нового класса химических сенсоров и т. п.;

— микродвигатели и нанопозиционеры, микрогенераторы энергии.

Одной из перспективных областей внедрения MEMS многие эксперты в настоящее время считают рынок телекоммуникаций. В 2000 году от Национальной лаборатории Sandia, принадлежащей министерству энергетики США, отделилась частная компания MEMX (<http://www.memx.com>), успешно занимающаяся вопросами коммерческого применения MEMS-технологий, связанных с оптическими коммутаторами для оптоволоконных телекоммуникационных систем.

Современное состояние MEMS позволяет утверждать, что создана промышленная технология принципиально новых микроэлектронных устройств с широким спектром практического применения. При этом можно отметить, что MEMS-технология не возникла из ничего, — она эволюционировала параллельно технологии полупроводниковых микросхем, а связь между электрическими и механическими силами применительно к различным устройствам изучалась уже достаточно долго.

Как видно, диапазон применения MEMS исключительно широкий, а перспективы использования новых поколений MEMS-приборов, способных качественно преобразовать практически все сферы техники, еще более значительные. Становится очевидным, что ни одна область современной электронной техники, в том числе изделия бытовой электроники, не останется в стороне от новой промышленной революции.

По данным компании по изучению рыночной конъюнктуры "YOLE Développement" (www.yole.fr) рынок MEMS за последние 4 года вырос более чем в 40 раз и уже в 2005 году объем продаж достиг 5,1 млрд. долларов, в 2010 году превзойдет 13 млрд. долларов, демонстрируя темпы ежегодного роста на 15–18 % (MEMS Investor Journal, <http://www.memsjournal.com>, Semiconductor International Weekly, Special Report: MEMS, 19.01.2007). Несмотря на то что за последние 5 лет рост MEMS намного опередил рост

основной промышленности полупроводников и был наиболее ярким событием в мире коммерческой электроники, по данным "YOLE Développement" взрыв масштабов новых разработок и использования MEMS еще впереди. Эту тенденцию подтвердило и совещание основных производителей MEMS совместно с группой Globalpress (30.03–2.04.2009 года, г. Сан-Франциско), посвященное обсуждению перспектив дальнейшего развития данного направления микроэлектроники. Учитывая высокие темпы роста продаж, большинство основных изготовителей MEMS (более 20 компаний) вкладывает, несмотря на замедление потребительских расходов в 2009 году, крупный капитал в новые технологические линии с переходом с 6- на 8-дюймовые подложки (преимущественно КНИ с двумя–тремя слоями поликремния толщиной до 3–4 мкм).

Принципы функционирования MEMS. Можно выделить несколько типов микроэлектромеханических устройств:

1) устройства, в которых перемещение фиксированной массы находится в зависимости от напряжения, поступающего от микросхемы, например стабилизаторы частоты;

2) устройства, в которых микросхемы регистрируют перемещение фиксированной массы, или инерционные устройства (например, акселерометры);

3) устройства, в которых величина перемещаемой массы определяется внешними факторами, например в датчиках газового состава;

4) устройства, в которых при электромеханическом преобразовании энергии возникают механические силы, используемые для совершения в пределах корпуса микросхемы механической работы (микродвигатели, микроактюаторы, гироскопы, MEMS-фильтры, коммутаторы и т. п.).

Наиболее простые базовые элементы MEMS — микроконсоли (cantilevers), микробалки. Они являются механическими микрорезонаторами, работа которых может описываться с высокой точностью простыми классическими уравнениями как системы с одной степенью свободы. Эти элементы имеют микрометровые размеры (в ближайшей перспективе — нанометровые) и различные возможные конфигурации. В большинстве случаев такие устройства создаются из монокристалла кремния либо из КНИ с использованием технологии глубокого травления (плазменного). Более сложные конструкции резонансных устройств могут быть изготовлены как мембраны, круглые или прямоугольные, с несколькими точками их закрепления к неподвижному основанию.

Малые размеры таких микроконструкций определяют возможность их колебаний на высоких резонансных частотах, до 1 ГГц и более, кроме того, такие размеры определяют и возможность достижения высокой добротности микровибраторов, до 10^5 – 10^6 и более, что существенно выше добротности всех известных электромагнитных контуров. Микрорезонаторы просты в изготовлении, легки в использовании и в интерпретации результатов измерений. Среди различных методов определения параметров колебаний микроконсоли можно выделить следующие: оптические, пьезоэлектрические или пьезорезистивные, емкостные (последние наиболее простые) [1–9].

Можно отметить, что кремний, наряду с его уникальными электрофизическими параметрами (высокая подвижность носителей заряда, большая ширина запрещенной зоны, наличие на его поверхности полного окисла с высокой электрической прочностью и низкой диэлектрической проницаемостью и др.), обладает и высокими механическими параметрами: модулем Юнга, свыше $3 \cdot 10^{11}$ Н/м, прочностью на изгиб и разрыв. Таким образом, именно кремний является в настоящее время базовым материалом MEMS. Вместе с тем при изготовлении микроконсолей используются такие материалы, как SiC, Si₃N₄, AlN и другие.

Характерный диапазон размеров микроконсолей, микробалок, создаваемых с использованием технологии травления кремния, следующий: толщина $d = 1$ – 15 мкм, длина $L =$

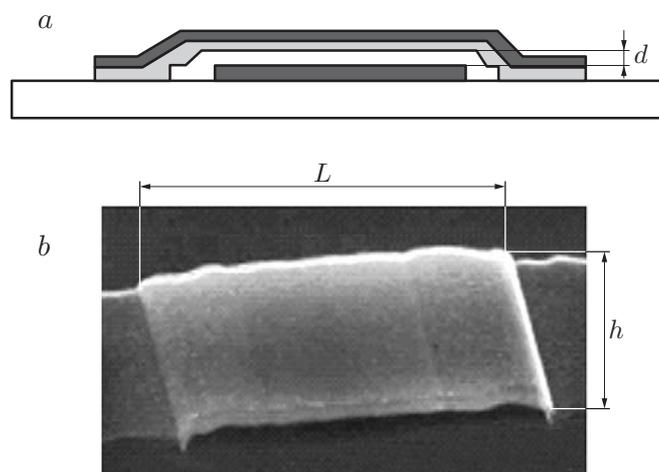


Рис. 1. Микробалка Si : H + Al: вид сбоку (а), вид сверху (b) (длина микробалки $L = 23$ мкм, ширина $h = 10$ мкм, внутренний зазор $d = 0,55$ мкм, резонансная частота 8–10 МГц)

= 5–300 мкм, ширина $h = 10$ –100 мкм. Резонансная частота колебаний таких микроконсольей ω лежит в диапазоне 1–1000 МГц и выше, она определяется их конкретными размерами. Одно из электронно-микроскопических изображений микробалки, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM), представлено на рис. 1 [10].

MEMS-генератор, стабилизатор частоты. Для иллюстрации особенностей функционирования MEMS рассмотрим MEMS-резонаторы стабилизации частоты, основанные на резонансных колебаниях микробалок, микромембран, микродисков и т. п. [10–32].

Как известно, практически все электронные системы нуждаются в генерации синхронных импульсов. С середины 1940-х годов и по настоящее время функции стабилизации частоты выполняют кварцевые кристаллы. В 2006 году их произведено 10^{10} штук для размещения в большинстве цифровых устройств: фотокамерах, промышленном оборудовании, различных интерфейсах с широким диапазоном частот, сотовых телефонах и т. п.

Однако кристаллы кварца имеют ряд недостатков, включая нетехнологичность операции крепления кварца, несовместимость ее с технологией ИС и, следовательно, высокую чувствительность к вибрациям, а также относительно большие размеры кварца, затрудняющие его совместимость с технологией все более уменьшающихся по размерам ИС.

Кроме того, для ряда задач необходимо расширить диапазон рабочих температур и частот, уменьшить температурную чувствительность и увеличить надежность таких приборов, так как она уже стала меньше надежности ИС. Все многолетние попытки заменить кварц были безуспешными исключительно из-за его параметров (высокой температурной стабильности и низкого шума наряду с высокими механическими и пьезоэлектрическими характеристиками, а также высокой добротности $(5-25) \cdot 10^4$). В настоящее время выпуском кварцевых генераторов частоты занимаются крупные производители, создающие кристаллы, микросхемы и уже готовые устройства в корпусе. Промышленность по производству стабилизаторов частоты состоит из двух отраслей: производство кристаллов кварца (ежегодные продажи 3,5 млрд. долларов) и производство специальных ИС и двух-трех отдельных конденсаторов (ежегодные продажи 1,5 млрд. долларов).

MEMS-генераторы более эффективны, чем кварцевые кристаллы: микросхема в одном и том же корпусе включает в себя как микрорезонатор, так и ИС управления, при этом ее стоимость ниже стоимости кристалла. Кроме того, на базе этого устройства можно генерировать кратные гармонические частоты, создавать частотное искажение и другие

функции выбора временных интервалов. Принцип работы MEMS-генераторов состоит в возбуждении колебаний микроконсоли или микробалки с частотой, близкой к резонансной частоте механических колебаний. Поскольку добротность таких устройств очень высокая, то амплитуда возбуждающего напряжения невелика — менее 1–2 В.

MEMS-генераторы состоят из трех основных компонент: 1) микрорезонатора, вибрирующего при внешнем возбуждении (обычно под воздействием электрического поля); 2) электронной схемы управления работой генератора, включая частотную и температурную компенсации, при этом в качестве регистрируемого параметра чаще всего используется величина емкости межэлектродного зазора между поверхностями микровибратора и одного из электродов; 3) корпуса, в который упаковано все устройство, при этом имеет место вакуумная откачка полости, в которой размещен микрорезонатор.

Разработка и промышленный выпуск MEMS-осцилляторов на основе МНОП-технологии, в том числе с использованием КНИ-структур, наиболее активно проводятся американскими компаниями "SiTime", "Discera Inc.", "Silicon Clocks and Mobius Microsystems", которые достигли высоких результатов за последние 2–3 года. Эти электромеханические резонаторы уже пользуются очень большим спросом у производителей микросхем. Типичные образцы MEMS-осцилляторов компании "SiTime" серии SiT1xxx и SiT8002 имеют размеры $2,0 \times 2,5 \times 0,85$ мм, серии SiT0100 (последняя разработка) — $0,8 \times 0,6 \times 0,15$ мм; микровибратор колеблется в межэлектродном зазоре 0,4 мкм с амплитудой 10–30 нм при управляющих напряжениях 1,8–3,0 В. Устройства работают на программируемых частотах 1–100 МГц и более, добротность генератора до 10^5 , его стоимость меньше 10 центов.

Одной из важнейших задач, успешно решенных при разработке MEMS-осцилляторов, является создание технологии их герметизации и помещения в вакуум, что позволяет добиться очень высокой добротности и повышения частоты колебаний микрорезонаторов. Такая технология MEMS First впервые была разработана и запатентована компанией "Bosch", а "SiTime" применила ее при создании осцилляторов. Герметизация производится при температуре 1100 °С, что позволяет устранить все пары воды, другие загрязнения и связанный с этим дрейф во времени частоты генератора. Стоимость операции помещения MEMS в корпус из керамики или из пластмассы составляет 5–7 центов. За счет использования специального геттера время сохранения вакуума в полости прибора (10^{-6} торр), по крайней мере, 25 лет.

Малая масса подвижного элемента устройств (менее 10^{-10} г) обеспечивает высокую вибростойкость MEMS-генераторов. Они успешно прошли ряд комплексных испытаний на надежность для различных условий применения. Показана более высокая их надежность по совокупности параметров в сравнении с кварцевыми генераторами частоты. Например, в Стэнфордском университете (Калифорния) установлено, что относительный уход частоты микрорезонатора за период, превышающий 1 год, в том числе и при циклировании в диапазоне температур от –50 до +80 °С, находится в пределах точности измерения меньше чем 10^{-6} . Такая стабильность определяется высокой чистотой камеры резонатора и стабильностью механических параметров материала микрорезонатора — кремния, отожженного при высокой температуре. В этом плане кремний — идеальный материал при небольших механических нагрузках, он практически не подвержен механической усталости. Например, согласно статистике при использовании в ADI 300 млн. MEMS-устройств не было ни одного случая их отказа из-за механического «износа», они имеют 100 %-ную надежность.

Динамику реального практического использования MEMS-генераторов и прогноз их дальнейшей коммерциализации отражает рис. 2. Прогноз составлен компанией WTC (Wicht Technologie Consulting) (www.wtc-consult.de), которая специализируется на ком-



Рис. 2. Прогноз развития рынка MEMS-осцилляторов

мерциализации высокотехнологичных продуктов в областях микроэлектроники, нанотехнологий и фотоники.

В НАСА было установлено, что при испытаниях в центрифуге MEMS-генераторы выдерживают перегрузку $50g$ (g — ускорение свободного падения) в диапазоне частот 5–20 кГц и $30000g$ при ударах с сохранением 100 %-ной работоспособности, установлена также их работоспособность при вариации температуры в диапазоне от $+100$ до -100 °С. Такие характеристики MEMS, наряду с малой массой и размерами, делают их идеальными приборами для аэрокосмических применений.

По надежности и по совокупности других параметров эти приборы, как показали сравнительные испытания 2006 году, более чем в 10 раз лучше резонаторов на основе кварца. По прогнозам экспертов объем рынка таких изделий в ближайшие 3–4 года достигнет нескольких миллиардов долларов. Можно полагать, что в ближайшие несколько лет бóльшая часть цифровой электроники как для бытовой, так и для специализированной техники будет оснащена этими приборами. В частности, к 2010 году более 30 % мобильных телефонов и компьютеров будут применять указанные разработки.

Одним из масштабных применений MEMS-резонаторов является использование их в качестве считывающих элементов для регистрации низкоконцентрированных продуктов малых объемов. Их преимуществом в таких задачах являются высокая чувствительность, низкая стоимость, безопасный технологический процесс в реальном времени. Матрица микроконсольей может применяться для диагноза большого количества веществ, например, при различных заболеваниях (biomarkers).

Исключительно малая масса подвижных элементов MEMS-осцилляторов, высокая резонансная частота колебаний при высокой добротности открыли возможность определения незначительных изменений указанной массы, например, за счет адсорбции или десорбции отдельных молекул на поверхности вибратора или образования химических связей с биологическими продуктами. Изменение массы приводит к сдвигу положения частоты резонанса. Современные электронные схемы обеспечивают достаточно точное определение сдвига частоты резонанса, с точностью лучше 10 Гц при частоте колебаний 0,1–100 МГц, что позволяет обнаружить изменение массы вибратора на 10^{-15} – 10^{-18} г, эквивалентное осаждению на его поверхность отдельных молекул органического вещества. Отметим, что микровибратор может работать не только в вакууме, но и в демпфирующей среде: на воздухе или в жидкой среде, в частности в воде. В этом случае добротность осциллятора существенно снижается и для поддержания заданных колебаний требуется подвод дополнительной энергии, использование параметрического резонанса. В реальных эксперимен-

тах пока получена чувствительность 28 Гц/нг при ожидаемой массовой разрешающей способности в вакууме $2\text{--}5 \cdot 10^{-15}$ г.

MEMS-акселерометры. Акселерометры — устройства, определяющие ускорение (характер движения), широко распространены во многих технических приложениях. В последние годы при их производстве стали использоваться MEMS-технологии [33–37]. MEMS-акселерометры успешно коммерциализировались и уже в 2003 году были вторыми по объему продаж после MEMS-датчиков давления, прежде всего, в автомобильной промышленности.

В настоящее время известно несколько типов промышленно выпускаемых MEMS-акселерометров, основанных на различных принципах измерения движения сейсмомассы относительно фиксированной рамы устройства: пьезоэлектрические, пьезорезистивные, емкостные, резонансные, оптические, электромагнитные. Независимо от разнообразия указанных принципов каждый акселерометр (рис. 3, *a—c*) содержит подвижный элемент с заданной массой m и пружину с упругостью k ; учитывается вязкость воздуха c , т. е. сопротивление движению массы. При ускорении указанная масса смещается относительно несущей конструкции. (Это движение описывается дифференциальными уравнениями второго порядка.)

Основным принципом для считывания информации (смещения массы) является емкостный принцип. Его применяют такие производители акселерометров, как "Bosch", "Freescale", "Kionix", "Oki Electric", "STMicroelectronics", "Analog Devices". Пьезорезистивный эффект используется компаниями "Hitachi Metals", "Matsushita", "Fujitsu", "Hokuriku".

Емкостные MEMS-акселерометры имеют ряд преимуществ перед другими принципами считывания из-за их более высокой чувствительности, низкого шума и дрейфа, температурной и поперечной чувствительностей, большей технологичности.

В емкостных акселерометрах смещение массы регистрируется через изменение емкости двух параллельных пластин — электродов. Одна из них подвижная, с заданной массой, другая стационарная. В общем случае используется дифференциальная емкостная схема считывания: емкость отсчитывается относительно обеих сторон подвижной пластины, при ее смещении увеличивается емкость одного конденсатора и одновременно уменьшается емкость другого, что дает возможность обеспечить линейность выходного сигнала и компенсировать дрейфы, создавая условия для обнаружения очень малых смещений (до долей 1 нм). Ускорение смещает указанную массу и выводит из равновесия дифференциальный конденсатор, вызывая импульс напряжения на выходе, амплитуда которого пропорциональна ускорению.

Использование фазово-чувствительных методов демодуляции позволяет определить и направление ускорения. В большинстве MEMS-акселерометров межэлектродный зазор заполнен газом (воздух), но так как вязкость воздуха слабо зависит от температуры, то

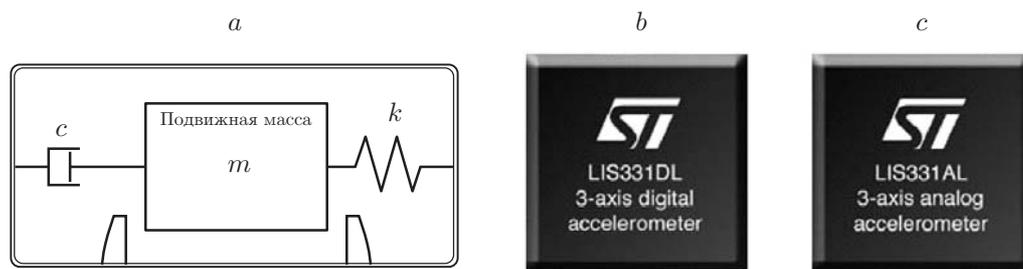


Рис. 3. MEMS-акселерометры: схема акселерометра (*a*), внешний вид одной из моделей трехосного цифрового (*b*) и аналогового (*c*) акселерометров

такие акселерометры имеют более устойчивую частотную характеристику по сравнению с устройствами, в которых этот зазор заполнен вязкой жидкостью. Для сохранения работоспособности устройства при сильных ударах используются механические ограничители.

Несмотря на многообразие видов MEMS-акселерометров их типичная конструкция состоит из трех слоев (подложек) кремния. Два внешних неподвижные, а средний слой, определяющий величину инерционной массы, подвешен к несущей конструкции на упругих торсионных консолях (длиной 100–1000 мкм, шириной 100–600 мкм и толщиной 5–10 мкм). Зазор между подвижными и неподвижными электродами составляет 2–5 мкм при величине емкости 0,1–0,2 пФ. Для уменьшения размеров подвижный элемент (при сохранении его массы) иногда выполняется из материала с более высокой плотностью, чем у кремния, например из никеля или его сплавов ($\rho_{\text{Si}} = 2,3 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{Ni}} = 8,9 \text{ г/см}^3$), осаждаемых на поверхность подвижной пластины электрохимическим методом.

Вес линейных MEMS-акселерометров таких производителей, как "Endevco and Texas Christian University", "Analog Devices", "Silicon Design", "Motorola", лежит в диапазоне 0,2–7,0 г. Верхний диапазон частот реакции на ускорение свыше 20000 Гц. Такие высокочастотные кратковременные и высокоамплитудные колебания характерны для военных и космических транспортных систем, для критических узлов систем, основанных на ударных нагрузках, например при разделении ступеней ракетного ускорителя. MEMS-акселерометры дают возможность регистрации и низкочастотных колебаний в диапазоне менее 0,1 Гц, которые характерны для крупных транспортных самолетов, а также космических станций и других подобных конструкций. Можно отметить, что распространенные в настоящее время пьезоэлектрические акселерометры не способны регистрировать низкочастотные колебания.

Приборы указанных компаний имеют достаточно близкие характеристики: диапазон работоспособности 8–10 *g*, ударостойкость 1000–5000 *g*, чувствительность 50–500 мВ/*g*, рабочее напряжение порядка 5 В, поперечная чувствительность 2–3 %, температурный диапазон работоспособности от –40 до +120 °С. Чувствительность в этом диапазоне температур изменяется в пределах 5 %. Акселерометр Endevco 7290-А имеет практически плоскую частотную характеристику в частотном диапазоне 1–200 Гц и уровень шумов < 15 мкг/Гц. Обычно MEMS-акселерометры герметизированы, они могут иметь как аналоговый, так и цифровой выход.

Низкий вес акселерометров, высокая идентичность параметров и низкая стоимость дают возможность объединить их в большие системы по 10–100 приборов с общим центром управления и считывания информации, достоверно описывающим перемещение в пространстве любого сколь угодно сложного по форме объекта и его критически важных узлов.

Разработкой таких сложных систем занимаются компании "Bosch", "Infineon", "Analog Devices", "Denso" и "Delphi".

В последние годы созданы двух- и трехосные MEMS-акселерометры, которые дают принципиально новые функциональные возможности большому классу устройств в первую очередь в робототехнике, автомобилестроении, в военной и авиакосмической промышленности и т. п. По крайней мере, десять компаний занимаются разработкой и созданием трехосных MEMS-акселерометров, которые первоначально создавались для автомобильной промышленности. Три оси чувствительности необходимы, чтобы полностью описать трехмерное движение.

Как простейший пример еще одного использования акселерометров можно рассматривать мобильные телефоны, которые при определенном движении смогут выполнять те или иные функции, включая связь с заданным абонентом, сетью Интернет и т. д. Такому применению трехосных MEMS-акселерометров способствует его высокая разрешающая способность и низкое потребление энергии.

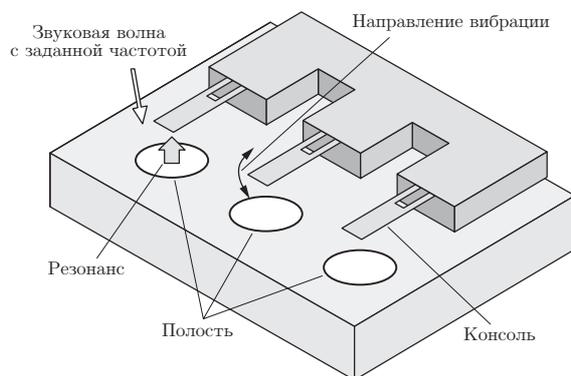


Рис. 4. Принцип работы матрицы MEMS-микрофонов

Приведем характерные параметры трехмерных акселерометров на примере прибора EK3LV02DQ с цифровым выходом на USB-шину: ширина полосы для каждой из осей X , Y и Z 10–640 Гц при ускорениях 2–6 g , разрешение лучше чем 1 mg , потребляемый ток 1 мА, работоспособность сохраняется при ударе (перегрузке) до 10000 g и длительности 1 мс, характерной, например, при пиростреле болтов в космических аппаратах во время старта. Самый малый акселерометр — устройство с тремя осями 12 мм³ (3,4 × 3,7 × 0,92 мм) — на сегодняшний день сделан "Hitachi Metals".

MEMS-микрофоны. Основным микрофоном в мобильных устройствах сегодня является электретный микрофон (ЕСМ — Electret Condenser Microphone). Его стоимость не более 0,5 доллара. Он обладает хорошей частотной характеристикой и достаточно качественно «обрабатывает» звуковые волны. Число производимых ЕСМ в год составляет 1,3 млрд. долларов. Размер этих микрофонов 4,0 × 1,5 мм без акустической полости и, вероятно, уже не сможет уменьшаться далее без снижения основных характеристик. Доминирующей компанией по изготовлению ЕСМ-микрофонов на базе электретов является "Panasonic".

Одним из наиболее применяемых в настоящее время и является цифровой MEMS-микрофон [38–43]. Принцип работы таких микрофонов основан на колебаниях кремниевой консоли или мембраны, вызванных воздушными потоками, которые возникают при воздействии голоса. Регистрация этих колебаний возможна путем измерения сопротивления тонких (толщиной 0,2–0,3 мкм) пьезорезистивных пленок либо э.д.с. в пьезоэлектрических (сегнетоэлектрических) пленках, нанесенных на поверхность микроконсоли, или измерения изменений величины емкости между поверхностью мембраны и неподвижным основанием. Последняя конструкция наиболее технологична. Колебание подвижного элемента происходит в полости (резонаторе). Консоль считывает эти колебания в закрытом воздушном столбе (рис. 4 [39]). Его размеры определяют рабочий диапазон частот микрофона с учетом скорости звука в воздушной среде (340 м/с). Использование полости значительно увеличивает чувствительность микрофона и позволяет получить практически плоскую полочку частотной чувствительности в диапазоне от 20 Гц до 20–40 кГц (до ультразвуковой области частот). Кроме того, микрофон высокочувствителен к углу падения звуковой волны, так как полость имеет апертуру в одном направлении. Характерные параметры таких микрофонов: размер 0,8 × 1,6 × 2,4 мм, чувствительность 15–50 мВ/Па при высоком соотношении сигнал/шум как при использовании аналоговых интегральных схем, так и цифровых.

Преимущества MEMS-микрофонов перед ЕСМ не только в том, что они в десятки раз меньше самого компактного электретного микрофона (рис. 5 [41]), но в большей технологичности, низкой стоимости изготовления, высокой надежности, совместимости их



Рис. 5. Общий вид нескольких MEMS-микрофонов

производства с КМОП-технологией ИС, вибростойкости, незначительной температурной чувствительности (они работоспособны до 250 °С).

Кроме того, при использовании матрицы микрофонов и программного обеспечения микросхемы, расположенной на том же чипе, появляется возможность подавления шумов и выделения направления звукового источника, обеспечения нечувствительности к ВЧ-излучениям и другим электромагнитным помехам.

Ожидается, что в 2009 году каждый третий микрофон в мире будет основан на MEMS и объем рынка достигнет 500 млн. долларов, а в 2010 году — 680 млн. долларов (рис. 6, прогноз WTC). Основные области применения MEMS-микрофонов: мобильные телефоны, портативные компьютеры с применением VoIP (Voice over Internet Protocol), цифровые видеокамеры PDAs (Personal Digital Assistant), диктофоны и другие устройства распознавания речи. Предполагается проникновение MEMS-микрофонов в автомобильный рынок, в рынок слуховых аппаратов, когда необходимо за счет нескольких микрофонов осуществлять подавление внешних шумов. MEMS-микрофоны используют программное обеспечение формирования направления волны с подавлением помехи и удаления эха, что позволяет пользователю говорить с устройством в любом положении. В компаниях "Microsoft" и "Intel" созданы программы для распознавания речи от узконаправленных звуковых источников с учетом нечувствительности цифровых микрофонов к интерференции сигналов.

Большую часть рынка MEMS-микрофонов обеспечивает компания "Knowles Acoustics". Эта компания имеет соглашения с "Sony Semiconductor", MEMSCAP, "Kyushu Corporation" и "Austria Microsystems" (которая выпускает ASIC). Полупроводниковые фабрики по производству микрофонов сотрудничают с фирмами MEMSCAP, "MicroFAB

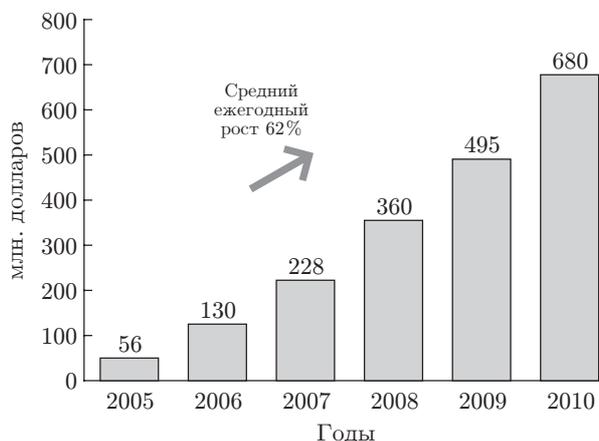


Рис. 6. Перспективы развития рынка продаж MEMS-микрофонов

Bremen", а также с "Silex Microsystems", "Micralyne", АРМ, "Memstech" и "Apogee". Компания "Sonion" в конце 2005 года стала выпускать цифровой MEMS-микрофон с привлечением "MicroFAB Bremen".

MEMS-микроактюаторы, микродвигатели. Базовым элементом большинства MEMS является микродвигатель (микроактюатор), изготавливаемый по технологии микроэлектроники в одном технологическом процессе со схемами управления и считывания информации. Такая технология обеспечивает крупные масштабы применения соответствующих устройств, их низкую стоимость и высокое качество в плане воспроизводимости технических параметров и возможности их вариации в широких пределах. Микроактюаторы осуществляют перемещение заданной массы непосредственно в конструкции MEMS, например в таких устройствах, как ВЧ-коммутаторы, фильтры, перестраиваемые антенны, гироскопы, микропомпы, устройства адаптивной оптики, микро- и нанопозиционеры, устройства лазерных ретинальных дисплеев, микророботы и микроманипуляторы, переключатели световодных линий и т. д. [44–62].

Среди физических принципов построения микродвигателей можно выделить электростатические, пьезоэлектрические, электротепловые, электромагнитные.

Основными требованиями при выборе физического эффекта, лежащего в основе работы MEMS-микродвигателя, являются его технологичность и удельная энергоемкость (соотношение мощность/масса). Исходя из этого при построении MEMS-микродвигателей используются преимущественно первые два из указанных физических принципов (в обоих случаях применяются емкостные микродвигатели). При этом электростатические микродвигатели более технологичны и энергоемки, допускают большую амплитуду перемещения массы, поэтому они используются в большем числе разнообразных устройств на базе MEMS. Отличие этих микродвигателей от классических электростатических двигателей — малый зазор (1–2 мкм) между статором и ротором (в классических электростатических машинах он равен 1–2 мм). Малый зазор в межэлектродном пространстве определяет относительно высокую плотность «накачиваемой» в образец электрической энергии и, следовательно, эффективность работы двигателя. Известно несколько конструкций электростатических микродвигателей. Наибольшее распространение получила конструкция, схематично представленная на рис. 7 [49], в которой подвижный электрод под действием электростатической силы (прикладываемого между электродами напряжения V) втягивается в межэлектродный зазор, совершая механическую работу. Величина этой силы равна $(V^2 \partial C / \partial x) / 2$, где C — емкость межэлектродного зазора. Обычно микромеханическая структура создается из кремния путем его плазменного травления.

При воздушном зазоре $d_e = 2$ мкм величина удельной емкости $C_{уд}$ равна $4 \cdot 10^{-6}$ Ф/м², а удельная энергоемкость A_R при $V = 30$ В близка к 0,01 Дж/м². Емкость структуры на единицу длины втягиваемого в зазор электрода составляет $\epsilon \epsilon_0 L x / d_e$. К примеру, если глубина травления кремния (величина L) равна 20 мкм, то сила тяги при указанном зазоре равна $7,9 \cdot 10^{-8}$ Н. Для увеличения этой силы возможно более глубокое травление в кремнии на глубину $L = 100$ мкм и создание многоэлементных систем из 10–40 втягиваемых в соответствующее число зазоров электродов. На рис. 8 [70] представлено снятое SEM изображение задающего изменение емкости ВЧ-коммутатора микроактюатора, применяемого на практике.

В настоящее время все большее число MEMS переходит на технологию КНИ (толщина кремния в пределах 3–5 мкм).

Реальные силы, развиваемые такими микродвигателями, находятся в пределах 1–10 мкН. Эта величина дает представление о возможностях микродвигателей и классе задач, которые они могут выполнять. Данные микродвигатели не являются реверсивными, обратное перемещение подвижных элементов осуществляется за счет упругих сил микропружин, возвращающих при снижении напряжения подвижную пластину в исходное по-

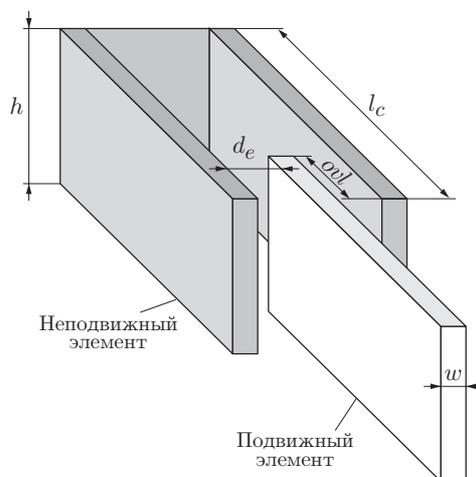


Рис. 7. Принцип электромеханического преобразования энергии при втягивании подвижного элемента (w — толщина, h — высота, l_c — длина межэлектродного зазора, d_e — межэлектродный зазор, ovl — амплитуда колебания подвижного элемента)

ложение. Эта конструкция позволяет осуществлять колебательные движения, достигать резонансных частот с высокой добротностью.

В работах [55–62] описан новый принцип электромеханического преобразования энергии, дающий возможность значительного увеличения энергоемкости микроактюаторов до значений 0,3–3,0 Дж/м² и более. Он основан на переносе процесса преобразования энергии в нанометровый зазор размером 50–2000 Å.

Такое преобразование достигается за счет использования сегнетоэлектрических (диэлектрических) пленок с высоким значением ε/d (свыше 10^9 м⁻¹). Здесь ε — величина диэлектрической проницаемости, d — толщина этой пленки. В этом случае в структуре электрод—сегнетоэлектрик—нанометровый зазор—подвижный электрод (металлический

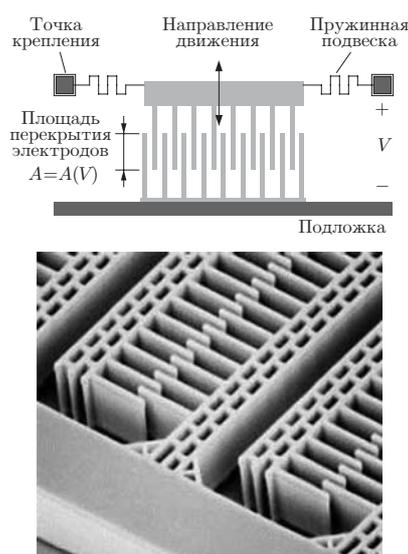


Рис. 8. Типичная конструкция электростатического микроактюатора, полученного путем глубокого травления кремния (межэлектродный зазор 2 мкм, его высота 30 мкм, напряжение 5 В, емкость 3 пФ на частоте 5 ГГц, глубина модуляции емкости 300 %, глубина втягивания и упругие элементы не видны)

лепесток) практически все поданное напряжение падает на зазоре, создавая плотность энергии электрического поля до 10^{10} Дж/м³ и давление до $(3-10) \cdot 10^3$ атмосфер, обеспечивая величину удельной емкости структуры до 10^{-3} Ф/м².

Анализ распределения сил в момент прижатия двух поверхностей показывает, что основная стадия электромеханического преобразования энергии осуществляется в нанометровых воздушных зазорах. Механизм преобразования энергии в такой структуре иллюстрирует рис. 9. Упругая металлическая пленка 4, закрепленная в точке А на поверхности подвижной пластины (слайдера), при подаче импульса напряжения между ней и электродом 5 под действием сил электростатики прижимается к поверхности сегнетоэлектрика 3, оставляя нанометровый зазор толщиной 10–50 нм, и натягивается с силой F_p . При этом возникают две силы: тангенциальная F_1 и нормальная к поверхности F_2 . Первая из них и определяет движение слайдера по направляющим 2 за счет последующего электростатического наката все большей части поверхности лепестка на поверхность сегнетоэлектрика, его изгиба и механического натяжения. Длина наката $L(t)$ во время действия импульса напряжения t возрастает, соответственно увеличивается и шаг смещения слайдера $h(t)$, при этом все бóльшая часть площади лепестка прижимается к поверхности сегнетоэлектрика.

На основе принципа электромеханического преобразования энергии создан ряд экспериментальных образцов высокоэнергоемких микродвигателей. Каждый микродвигатель состоял из двух подложек с регулируемым зазором между ними (10–100 мкм). На поверхность неподвижной подложки (статора) последовательно методом ВЧ-напыления наносились электрод ИТО ($\text{In}_2\text{O}_3\text{SnO}_2$) и сегнетоэлектрические пленки $\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ с величиной $\varepsilon = 3000-4000$ и толщиной 1–2 мкм. Микродвигатели имели следующие характеристики: удельная энергоемкость 0,3–1,0 Дж/м², длительность такта 10–500 мкс, частота тактов 1–20 кГц, шаг перемещения ротора за один такт 0,01–10 мкм, напряжение 10–50 В, максимальная длина перемещения подвижного (реверсивного) элемента до 40 мкм, развиваемая мощность 10–1000 мкВт.

Преимущества указанных микродвигателей перед классическими пьезоэлектрическими двигателями, в которых используется обратный пьезоэлектрический эффект:

- большой единичный шаг (от 1 мкм на 1 мм длины керамики до 10–20 мкм на 1 мм длины лепестка),
- большая длина перемещения подвижного элемента, равная геометрическим размерам пленки сегнетоэлектрика,
- микроэлектронная конструкция и технология изготовления,
- большая удельная энергоемкость (до 100 Вт/кг) и сила тяги 10^3-10^4 Н/кг,

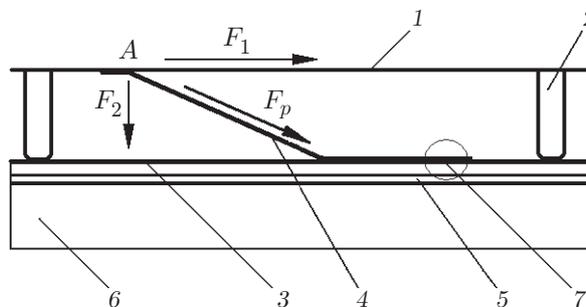


Рис. 9. Принцип электромеханического преобразования энергии при электростатическом прижатии тонкой металлической пленки к поверхности сегнетоэлектрика (А — точка крепления металлической пленки, F_1 — сила тяги, 1 — слайдер, 2 — направляющие, 3 — поверхность сегнетоэлектрической пленки, 4 — F_p -натяжение металлической пленки, 5 — электрод, 6 — подложка, 7 — нанозазор)

- меньшее рабочее напряжение начала движения,
- значительно меньший гистерезис.

По сравнению с микродвигателями на воздушных зазорах преимущества следующие:

- значительно (до 100 раз) увеличивается удельная энергоемкость и соответственно мощность,
- значительно увеличивается напряженность поля в рабочем зазоре,
- увеличивается тактовая частота,
- значительно увеличивается диапазон перемещения слайдера.

Область возможного применения описанного преобразователя энергии охватывает практически весь диапазон устройств MEMS.

Высокочастотные MEMS-переключатели и MEMS-фильтры. Новые технологии беспроводной передачи информации, такие как современные цифровые телевизионные стандарты, местные сети (Wi-Fi), широкополосный доступ по радиоканалам (WiMAX), глобальная система определения местоположения (GPS), многократный вход—многократная продукция (MIMO) требуют увеличения пропускной способности, а также расширения диапазона рабочих частот, создания динамически перестраиваемых малогабаритных и многополосных антенн, снижения размеров и стоимости аппаратуры, значительная часть которой становится мобильной.

В конструкциях мобильных телефонов должны быть учтены не только их небольшие размеры, но и такие неизбежные факторы, как близкое присутствие аналогичных аппаратов (способных создавать интерференцию сигналов), локальных вычислительных сетей (Bluetooth). Исключение влияния этих факторов при сохранении высокой чувствительности приемного тракта может быть обеспечено очень большой добротностью сетей приема сигнала, использованием высококачественных фильтров и перестраиваемых антенн, размещенных на одном чипе.

Одним из примеров такой антенны, самой небольшой из всех известных, является последний выпуск Chip Antenna на 2,4 ГГц для беспроводных технологий Bluetooth, GPS, ZigBee, UWB и LAN, применяемых в мобильных телефонах размером $3,2 \times 1,6 \times 0,5$ м.

В настоящее время в связи с указанными задачами наблюдается переход в гигагерцовый диапазон частот (1–100 ГГц и более), в котором полупроводниковые коммутаторы становятся неэффективными из-за больших потерь и нелинейности сигналов. Линейность является критической для всех элементов, непосредственно соединенных с антенной, поскольку нет никаких фильтров, способных компенсировать искажения переданного сигнала и предотвратить интермодуляцию сигналов на входе и выходе.

Создание ВЧ-фильтров в частотном диапазоне 0,3–3,0 ГГц является одним из главных вопросов при построении ВЧ-схем на одной микросхеме. Такие фильтры необходимы, например, для сотовых телефонов и других устройств при выделении определенного диапазона частот. До последнего времени для этого использовались преимущественно устройства на поверхностных акустических волнах, а также резонаторы на основе пьезоэлектрической керамики, которые уже не соответствуют размерам современных микросхем.

Появление MEMS-фильтров для близкого гигагерцового диапазона, сформированных на одном и том же кристалле с микросхемой, резко уменьшает размер устройства, стоимость и потребление энергии, что исключительно важно для мобильных СВЧ-устройств, таких как GSM, CDMA Bluetooth. Принцип их работы аналогичен работе вышеописанных стабилизаторов частоты [63–80]. Возможны два варианта увеличения резонансной частоты механического резонатора для близкого гигагерцового диапазона. Первый вариант — уменьшение массы микровибратора при высоком отношении длина/ширина (10/1). Например, зажатая кремниевая наноконсоль длиной 1,3 мкм, шириной 0,15 мкм и толщиной 0,2 мкм имеет массу 0,1 пг и фундаментальную резонансную частоту 1 ГГц. Второй

вариант — увеличение жесткости K консоли, что допускает увеличение размера микро-вибратора, в частности микродиска, до 1–10 мкм и соответствующее увеличение его массы (при толщине 2 мкм он имеет массу 0,365 нг и может также резонировать с частотой 1 ГГц при $k = 1,4 \times 10^7$ Н/м).

Можно отметить, что несмотря на высокие значения K для активизации резонансных колебаний микродиска необходима очень небольшая амплитуда переменного напряжения V , например для добротности 10^4 и межэлектродном зазоре 50 нм это напряжение (при постоянном смещении 10 В) равно 530 мкВ, при этом амплитуда колебаний микродиска меньше 1 нм.

Применение упругих элементов с высоким значением K делает производство микро-резонаторов намного более технологичным, оставляя их размеры в микронном диапазоне, когда возможно еще использовать оптическую литографию и снижать чувствительность резонансной частоты к массе микровибратора, которая может быть главной проблемой при широком практическом использовании нанобалок.

Высокочастотные MEMS-коммутаторы по сравнению с полупроводниковыми переключателями имеют исключительно низкие потери при высокой изоляции всех компонент, высокую линейность, низкую потребляемую мощность. За последние годы на исследования, развитие MEMS-переключателей, а также на их коммерциализацию были выделены значительные средства. Можно утверждать, что MEMS-коммутаторы для указанных задач имеют почти идеальные характеристики и относительно простые схемные решения. Одна из конструкций омического высокочастотного MEMS-коммутатора представлена на рис. 10 [71]. Конструкция емкостного ВЧ-коммутатора аналогична, имеет место только прижатие подвижного электрода к поверхности диэлектрической пленки.

Характеристики высокочастотных MEMS-переключателей значительно превосходят характеристики переключателей на $p-i-n$ -диодах или полевых транзисторах и имеют следующие преимущества:

- более низкую потребляемую энергию (не более 10^{-8} – 10^{-10} Дж/цикл);
- более низкие потери на высоких (гигагерцовых) частотах;
- низкий уровень собственных потерь (не более 0,1 дБ при частоте до 40 ГГц);
- очень низкие интермодуляционные составляющие, так как MEMS-переключатели являются линейными устройствами; такие характеристики примерно на 30 дБ лучше, чем характеристики переключателей на $p-i-n$ -диодах или полевых транзисторах;
- значительно более низкую стоимость.

Надежность MEMS-переключателей (основное условие их длительной эксплуатации) была предметом интенсивных многолетних исследований, которые показали, что большинство современных MEMS-переключателей имеет надежность до 10^{11} циклов и более

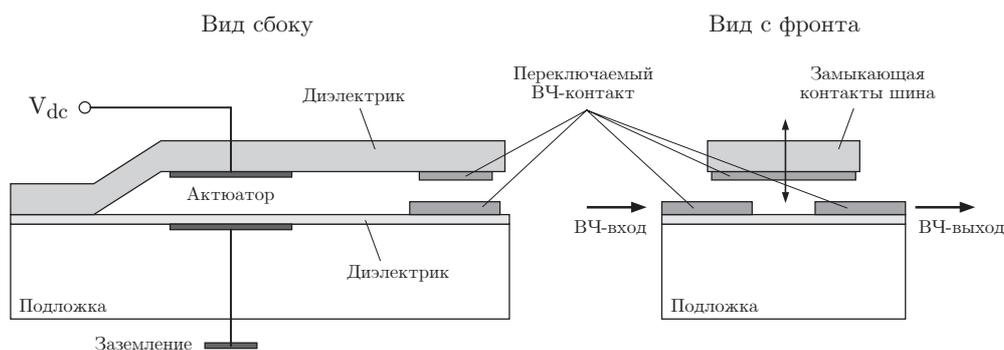


Рис. 10. Типичная схема омического активизируемого электростатическими силами MEMS-коммутатора

переключений без замеченных механических повреждений. Эти коммутаторы, создаваемые по МНОП-технологии, находятся в герметичном корпусе, что гарантирует многолетнюю надежность прибора. Герметизация MEMS с помощью полимеров осуществляется по низкотемпературной технологии.

Во всех MEMS-коммутаторах, предназначенных для работы на частотах в диапазоне от ВЧ до СВЧ применяется электромеханическое преобразование энергии для коммутации короткозамкнутых или разомкнутых цепей в ВЧ-тракте. Наиболее разработаны электростатические MEMS-переключатели. Они технологичны, экономичны и работают с высокой надежностью в диапазоне частот 0,1–100 ГГц.

Высокочастотные MEMS-коммутаторы изготавливаются на основе мембран или микробалок, подвешенных на микропружинах с заданной жесткостью, которая зависит от геометрических размеров мембраны или микробалки и от модуля Юнга используемого материала (например, Si, Al, Si₃N₄ и т. д.). Для большинства конструкций высокочастотных MEMS-коммутаторов эта жесткость составляет 5–50 Н/м. Поскольку перемещаемая масса в этих приборах очень мала (в пределах 10⁻¹⁰–10⁻¹⁵ кг), то они практически нечувствительны к перегрузкам. При жесткости пружины 10 Н/м и ускорении 10 *g* смещение массы коммутатора составляет несколько нанометров и не сможет вызвать срабатывание омического переключателя, в котором подвижному электроду надо преодолеть зазор порядка 1 мкм.

Известно несколько конструкций MEMS-коммутаторов, выполняющих как функции омических коммутаторов (двухэлектродный контакт металл—металл, трехэлектродное реле, способное управлять каналом нагрузки), так и емкостных коммутаторов также с двумя или тремя электродами. MEMS-резонатор с тремя электродами имеет механический резонанс в ВЧ-диапазоне и используется как очень «острый» фильтр.

Среди областей применения MEMS-коммутаторов можно выделить и следующие:

- РЛС для ПРО (диапазон частот 5–95 ГГц), фазовращатели для спутниковых РЛС большого радиуса действия и систем управления ракетными комплексами;
- спутниковые системы связи (диапазон частот 10–35 ГГц);
- переключающие схемы с 8 × 8 и более конфигурациями для применения в антеннах;
- системы беспроводной связи (диапазон 0,8–6,0 ГГц);
- переключаемые блоки фильтров для мобильных устройств и для базовых станций, разрядники защиты приемника и переключатели разнесения антенны SP2T;
- автомобильные радиолокаторы (24,6 и 77,0 ГГц);
- измерительная аппаратура (диапазон 0,01–50 ГГц) для исследования высокоэффективных переключателей, программируемых аттенюаторов, схем SPNT и фазовращателей на промышленных установках.

Перспективы роста рынка ВЧ-коммутаторов на ближайшие годы с распределением по областям применения (по данным WTC) отражает рис. 11. Можно отметить, что высокочастотные MEMS все больше будут применяться в аэрокосмических системах.

MEMS-гироскопы. Одним из важнейших достижений MEMS-технологии является создание плоского микроэлектромеханического гироскопа [81–111]. Обычные классические гироскопы, основанные на сохранении момента количества движения вращающегося массивного ротора, используются в различных узкоспециализированных устройствах, в частности, в военно-космических приложениях. Они имеют очень высокую стоимость (поскольку требуют высочайшего качества изготовления), большие размеры и вес, относительно небольшой срок сохранения эффективной работоспособности.

В то же время имеется высокая потребность в создании новых высококачественных навигационных систем для различных высокотехнологичных устройств в автомобильной

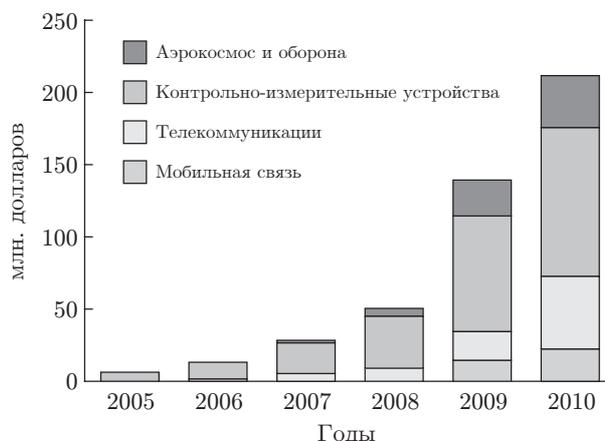


Рис. 11. Прогноз развития рынка продаж высокочастотных MEMS по данным WTC

промышленности, бытовой электронике и т. д. В конце 2005 года Федеральное космическое агентство объявило в рамках Федеральной космической программы России на 2006–2015 годы по оптико-конструкторским работам «Гироскоп» открытый конкурс на создание бортовых гироскопических приборов и систем нового поколения для космических аппаратов (КА), систем ориентации КА. В техническом задании указывалось, что динамические настраиваемые гироскопы при массе не более 0,3 кг, энергопотреблении не более 6 Вт и ресурсе работы не менее 100 тысяч часов должны обеспечивать диапазон измерения угловой скорости в пределах $\pm 20 \text{ с}^{-1}$, иметь случайную составляющую, не превышающую 0,01 угловой минуты в минуту. Такие гироскопы нужны для применения в бесплатформенных инерциальных блоках средств выведения. Наборы требований для звездных датчиков, устройств ориентации по Земле для низкоорбитальных КА и управляющих двигателей-маховиков для микрокосмической аппаратуры аналогичны.

За последние годы проведены многочисленные исследования, направленные на создание гироскопов, принцип работы которых при обнаружении силы Кориолиса основан не на сохранении момента количества движения вращающейся массы, а на сохранении ее количества движения при вибрации.

При разработке MEMS-гироскопов рассматривались различные способы возбуждения микроколебаний сейсмомассы: колебания камертона, балки, тонкой оболочки или цилиндра. Для регистрации колебаний массы с учетом действия силы Кориолиса в гироскопе использовались электростатический, электромагнитный и пьезоэлектрический методы. Емкостные методы считывания оказались наиболее эффективными и технологичными при обнаружении очень малых смещений, регистрируемых через соответствующее изменение величины емкости.

Принцип действия MEMS-гироскопов основан на определении углового ускорения исходя из измерений линейных ускорений в двух взаимно перпендикулярных направлениях, создаваемых силой Кориолиса. Конструкция гироскопа близка к конструкции двухосных акселерометров — колеблющихся масс относительно основания пластин. В данном случае в отличие от акселерометров, которые также базируются на емкостных методах измерения, требуется внешняя механическая сила (как и в классических гироскопах) — микродвигатель (микроактюатор). Однако эта сила не раскручивает ротор гироскопа с заданной массой, а вызывает резонансные микроколебания сейсмомассы с фиксированной амплитудой и частотой.

Резонансный режим требует минимальных энергозатрат при максимальной амплитуде колебаний массы. При вращении колеблющейся массы вокруг оси, перпендикулярной

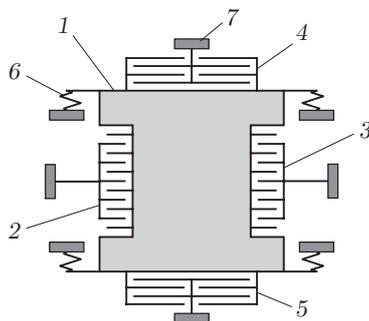


Рис. 12. Схема плоского MEMS-виброгироскопа: 1 — сейсмомасса, 2, 3 — вибромикроактюаторы, 4, 5 — система считывания изменений емкости на частоте колебаний сейсмомассы, 6 — упругие элементы (микропружины), 7 — точки крепления на подложке

плоскости колебаний, под действием силы Кориолиса происходит периодическое (колебательное с частотой, близкой к резонансной) смещение массы в направлении, перпендикулярном направлению колебания массы. Эти колебания регистрируются через изменение емкости воздушных зазоров в конденсаторах считывания, что дает информацию о параметрах вращения. Так работает MEMS-CVG (колебательный Coriolis-гироскоп).

Схематично такой гироскоп представлен на рис. 12.

Один из фрагментов реальной конструкции виброгироскопа показан на рис. 13 [88].

Относительно меньший (по сравнению с сигналом, вызывающим колебание сейсмомассы) сигнал от воздействия силы Кориолиса требует очень высокой чувствительности системы его регистрации, устранения различных источников погрешности в электромеханической системе чувствительного элемента.

Высокая добротность таких конструкций, характерная и для других резонансных MEMS-приборов (до 10^4 – 10^5), определяет высокие чувствительность и разрешение MEMS-гироскопов. Кроме того, эта чувствительность достигается благодаря возможностям современной МНОП-технологии, использованию дифференциальных конденсаторов, снижающих влияние шумов и флуктуаций температуры. Возможна уверенная регистрация сигналов, соответствующих изменениям емкости 10^{-18} Ф и менее, что позволяет иметь чувствительность к смещению электродов друг относительно друга лучше чем 1 фФ/нм. Для дальнейшего улучшения этого параметра необходимо снижение шумов. Одним из путей решения этой проблемы является параметрическая схема возбуждения колебаний.

Система электронного управления гироскопом основана на использовании цифровых сигналов, она поддерживает резонансный режим колебаний массы с заданной амплитудой.

MEMS-гироскопы отличаются от традиционных значительно меньшими размерами, весом, низкими стоимостью, температурным дрейфом сигнала и потребляемой мощностью.

Приведем диапазоны параметров резонансных MEMS-гироскопов: тактовые частоты 3–30 кГц, добротность выше $(1-5) \cdot 10^4$, температурный дрейф резонансной частоты $2 \cdot 10^{-5}$ град, угловая чувствительность 15–20 мВ/град/с, амплитуда колебаний сейсмомассы 2–5 мкм, ее величина 20–50 мкг, амплитуда смещения электродов считывания 1,5–2,0 нм, тепловой шум 0,5–1,1 град/ч/ $\sqrt{\text{Гц}}$, дрейф смещения 1,0–5,4 град/ч, общий вес устройства 30 г.

MEMS-гироскопы — значительно более сложные устройства по сравнению с акселерометрами, но их развитие дает дополнительный толчок дальнейшему совершенствованию последних, стоимость которых снижается значительно быстрее, чем стоимость гироскопов,

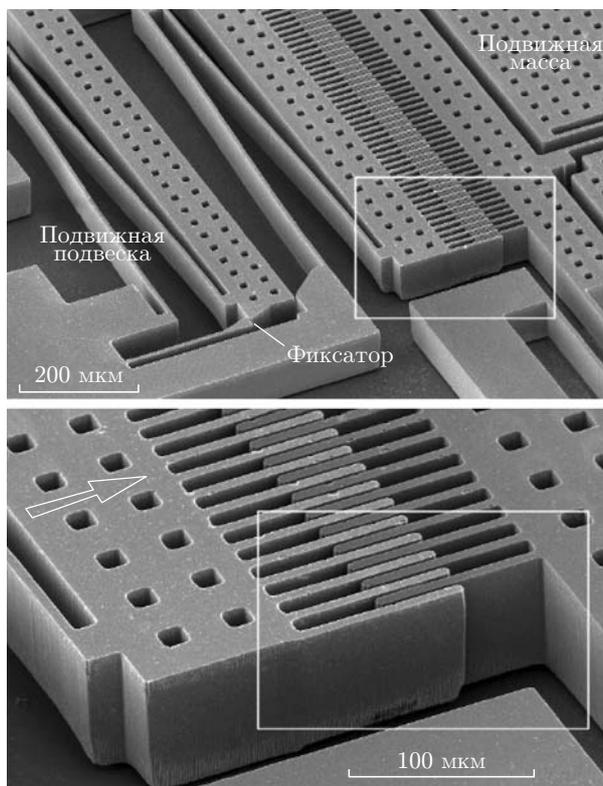


Рис. 13. Фрагмент виброгироскопа (снято на сканирующем электронном микроскопе, зазор между подвижными электродами 1 мкм, их ширина 10 мкм, стрелкой указано направление колебаний подвижной массы)

составляя ~ 1 доллара за ось. Можно отметить, что объем продаж трехосных акселерометров уже превысил несколько миллионов единиц. Стоимость же гироскопов пока ~ 10 долларов за ось. При снижении ее в 10 раз гироскопы как более функциональные приборы смогут вытеснить с рынка акселерометры.

MEMS-гироскопы придают новые функциональные возможности некоторым классам мобильных устройств, включая телефоны, видеокамеры, например, при стабилизации изображения, устранении его «дрожания» и т. д.

При высокой разрешающей способности современных фото- и видеокамер даже небольшой толчок рукой оказывает существенное влияние на качество изображения, и при этом эффект усиливается оптическим трансфокатором с большим коэффициентом масштабирования. Двухосный гироскоп способен обеспечить электронную стабилизацию изображения и устранить эффект ручного толчка.

Нужно отметить, что если в разработке MEMS-акселерометров в определенной степени уже достигнут высокий уровень и дальнейшее их развитие происходит медленно, то MEMS-гироскопы продолжают усовершенствоваться достаточно интенсивно.

Вопросу дальнейшего развития MEMS-гироскопов (современным методам их изготовления, включая использование КНИ-технологий, управлению и улучшению характеристик) посвящен ряд работ [81–111]. Двухосные MEMS-гироскопы уже достигли характеристик, достаточных для практических применений, где не требуется очень высокая точность. Предполагается, что в ближайшее время эти гироскопы смогут применяться для решения навигационных и пространственных задач в таких отраслях промышленности, где необходима более высокая точность, стабильность во времени при дрейфе смещения не хуже 0,1–1,0 град/ч.

В этом плане одной из основных проблем дальнейшего улучшения параметров MEMS-гироскопов является недостаточно высокая удельная энергоёмкость микроактюаторов, используемых при создании режима колебаний сейсмомассы, затрудняющая достижение более высоких частот колебаний при большей массе.

Трёхосные MEMS-микробироскопы с высокой разрешающей способностью еще только разрабатываются, и пока рано говорить об их массовом производстве.

Микрооптоэлектромеханические устройства. Микрооптоэлектромеханические устройства (МОEMS) являются четвертыми по объёму коммерческой продукции (после MEMS-стабилизаторов частоты, датчиков давления и акселерометров) [112–143].

Функционирование МОEMS-устройств базируется на комбинации двух микротехнологий: MEMS и микрооптики. Типичная конструкция МОEMS (она, как правило, гибридная, размещенная в корпусе) состоит из матрицы микрозеркал с высоким оптическим качеством поверхности, каждое из которых имеет одну или две оси вращения. Управление их положением (позиционированием, наклоном) осуществляется с помощью микроактюаторов и микропроцессора, размещенных в одном корпусе. Микрозеркала выполняют функции параллельных коммутаторов входных оптических каналов по плоскости, соединяя в любую комбинацию определенные пары элементов (входные и выходные) в аналоговом или цифровом режимах. Такая конструкция требует исключительно высокой точности поддержания позиции каждого микрозеркала и возможности сохранения его позиции в течение длительного времени.

МОEMS дают возможность построения полностью оптических телекоммуникационных сетей, управляя оптическим сигналом, без необходимости преобразования «оптический сигнал — электрический сигнал — оптический сигнал».

Появление МОEMS впервые позволило в оптических устройствах перестраивать в режиме реального времени параметры оптических элементов в зависимости от результатов измерений.

Одним из наиболее перспективных направлений использования МОEMS является применение их в системах оптической связи для замены электронных каналов в устройствах передачи информации, и прежде всего в системах телекоммуникации. Преимущества таких устройств: устойчивость к воздействию электромагнитных помех, широкий спектр длин волн, малые потери, небольшой размер, надежность, низкая стоимость, многоканальность (в ближайшей перспективе 1000×1000 каналов и более), возможность создания двух- или трехмерных конструкций (оптики свободного пространства) при минимальной чувствительности к вибрации и влажности, простые схемы управления на основе микропроцессоров.

Среди различных физических принципов, лежащих в основе работы указанных микроактюаторов для МОEMS, в большинстве конструкций используются электростатические, наиболее технологичные, воспроизводимые и практически безгистерезисные.

Существуют два подхода к изготовлению оптических переключателей на основе MEMS: плоскостные (двумерные) и объемные (трехмерные), различающиеся способами управления, а также способностями отражать лучи света.

В плоскостных коммутаторах каждое из микрозеркал имеет только две возможные позиции («включено» или «выключено»), они размещаются на пересечении световых лучей между входными и выходными портами. Такой тип положений зеркал намного упрощает схему управления и находит применение в коммуникационных сетях с малым числом портов, в частности в оптоволоконных сетях.

Современные электронные средства передачи информации обеспечивают до 2,5 Гбит/с на порт при возможности создания до 512 портов. Развитие указанной оптической технологии дает реальные основания для повышения скорости передачи информации. Одним из

препятствий на этом пути пока является невысокое их быстродействие: время переключения MEMS-коммутатора несколько миллисекунд при угле поворота микрозеркала не более $5-10^\circ$. По прогнозу экспертов коммерциализация MOEMS для промышленности связи (телекоммуникаций) произойдет в ближайшие 3–5 лет. Такие разработки идут достаточно интенсивно в США, Японии, Южной Корее и других странах.

Микрооптические устройства наряду с использованием их в системах многоканальной связи [19–26], в том числе межспутниковой [27–30], находят следующее применение:

- в адаптивной оптике, поверхностной адаптивной оптике, деформируемых микрозеркалах;
- в скоростных сканерах, в том числе двухкоординатных;
- в оптической скамье на чипе;
- в оптических ключах;
- в цифровых микрозеркальных устройствах (DMD'S — Digital Micromirror Device);
- в оптоволоконных оптических компонентах и выключателях (FDDIS);
- в проекционных дисплеях и цифровых видеопроекторах (DLP — Digital Light Processing).

DLP-технология. В основе оптического чипа DLP-проектора лежит технология цифровой обработки света, созданная на новом принципе формирования изображения DMD. В этом случае на поверхности DMD-кристалла размещена микросхема оперативной памяти, каждая ячейка которой определяет положение одного из множества (до 10^5-10^6) микрозеркал размером порядка 16×16 мкм. Микрозеркала имеют два состояния, отличающиеся направлением поворота зеркальной плоскости вокруг одной оси. В каждом состоянии угол между плоскостью зеркала и поверхностью микросхемы составляет 10° . Главное преимущество DMD перед формирователями иного типа заключается в высокой световой эффективности, обусловленной двумя факторами: более продуктивным использованием рабочей поверхности формирователя (коэффициент заполнения фокальной плоскости до 90 %) и небольшим поглощением света отражающими микрозеркалами.

SEM-фрагмент цифрового микрозеркального устройства представлен на рис. 14.

DLP-технология позволяет создавать как мощные проекционные аппараты с большим световым потоком (16000 лм), так и сверхминиатюрные проекторы (микропортативные) для мобильного пользования с возможностью подачи изображения непосредственно на сетчатку глаза. Именно в этих классах продуктов DLP-технология сегодня доминирует, обеспечивая высокую контрастность (1 : 800), отсутствие эффекта мозаики, точность цветопередачи. Самые миниатюрные устройства и самые яркие проекторы базируются в

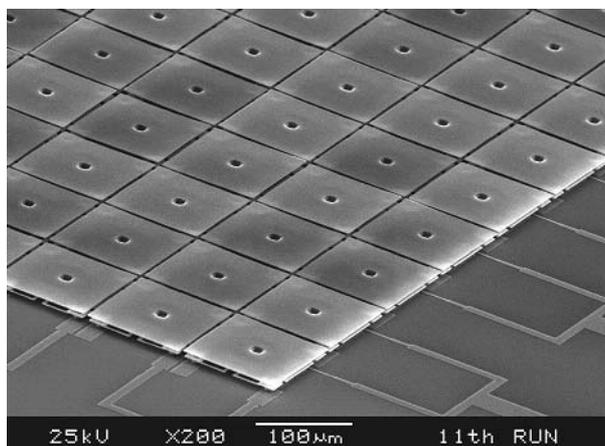


Рис. 14. Типичный SEM-фрагмент цифрового DLP-устройства

настоящее время на DLP-технологии. Современные DLP-проекторы строятся по схеме с одним, двумя и тремя DMD-кристаллами, которые формируют полноцветное изображение.

Отметим, что пока использование DLP-устройств уступает жидкокристаллическим экранам, но с каждым годом их количество увеличивается. Они применяются при проведении презентаций, а также демонстрации видео. Более 70 % рынка профессионального проекционного оборудования уже принадлежит трехкристальным DLP-проекторам, которые занимают приблизительно 50 % рынка всех телевизоров с фронтальной проекцией.

Адаптивная оптика. Еще одним из важнейших применений MOEMS являются устройства адаптивной оптики, которая позволяет корректировать оптические искажения световых волн при их распространении через турбулентную среду. Принцип работы таких систем состоит в измерении формы фронта волны и компенсации любых искажений, модифицировании фронта волны в режиме реального времени. Еще недавно большинство разработок технологии адаптивной оптики применялось в астрономии в наземных телескопах, характеристики которых ограничены оптическими эффектами турбулентности в атмосфере Земли.

MEMS-адаптивное зеркало является идеальным для адаптивной оптики. Матрица таких микрозеркал, каждое из которых индивидуально управляется электростатическими микроактюаторами без гистерезиса, является основой адаптивной системы. Частота работы микроактюаторов до 3 кГц, диапазон смещения конструкции микрозеркал 1,5–6,0 мкм.

Одной из ведущих компаний по разработке MEMS-адаптивных оптических систем является "Boston Micromachines", которая создала деформируемые зеркала с помощью 4096 электростатических микроактюаторов [119, 120]. Такие устройства с апертурой 25 мм и высокой степенью заполнения микрозеркалами фокальной плоскости (до 90 %) обладают высокой разрешающей способностью при коррекции фронта световой волны от изображения с низким уровнем контраста, например планет вне Солнечной системы (рис. 15).

Адаптивные оптические системы могут быть использованы в конфокальных микроскопах, лазерных системах и инструментах для диагностики глаза, когда требуется корректировать искажения фронта волны, вызванные подвижной тканью глаза. Офтальмология — одна из областей с большим потенциалом использования MOEMS адаптивной оптики. Несколько компаний уже производит системы адаптивной оптики для промышленных и медицинских применений, например для измерений оптических отклонений в

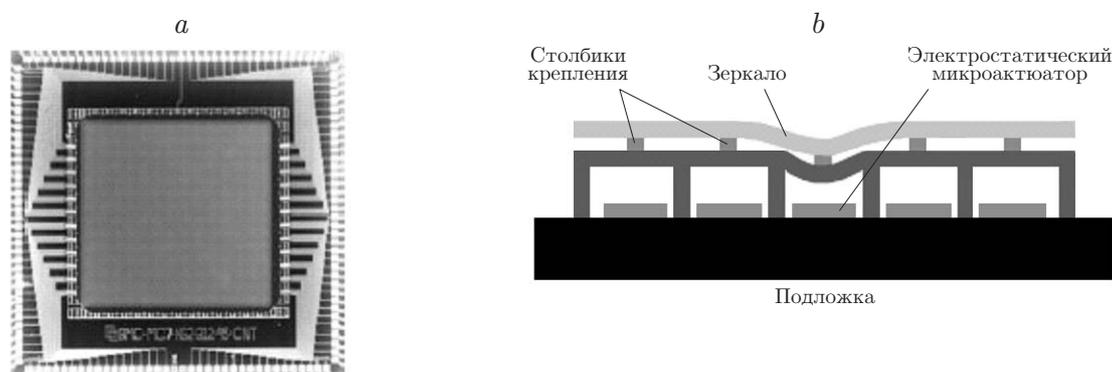


Рис. 15. Пример адаптивных оптических зеркал: *a* — матрица микрозеркал размерностью 12×12 (каждое микрозеркало независимо управляется четырьмя микроактюаторами, вертикально смещающими плоскость зеркал до 4 мкм, линейный размер пикселя 400 мкм); *b* — принцип работы деформируемых микрозеркал

глазе, ранней диагностики глаукомы, диабетического ретинопатита, для генерации специальных световых потоков, в частности для формирования профиля лазерного луча, который используется при лазерной обработке материалов и т. п.

Программируемые дифракционные решетки. В последние несколько лет разрабатываются принципиально новые оптические микроэлектромеханические системы, основанные на управляемых полем дифракционных решетках (GLV — Grating Light Valve™ Diffractive MOEMS Device) [124–126]. Такие системы имеют уникальные параметры, значительно превосходящие MOEMS, использующие движение (вращение вокруг оси) микрозеркал.

Базовым элементом GLV является тонкая микробалка с высокой отражательной способностью. Микробалка изгибается под действием сил электростатики, при этом зазор между микробалкой и электродом не превышает четверти длины волны модулируемого света. Один из вариантов изготовления микробалок — пленки нитрида кремния (Si_3N_4) толщиной 0,3 мкм, покрытые тонкой пленкой алюминия толщиной 0,1 мкм, которая выполняет функции как оптического отражателя, так и проводника (рис. 16) [125]. Высокая упругость пленки Si_3N_4 определяет быстрое восстановление исходного состояния микробалки при ее очень малых массе и амплитудах прогиба.

Характерные размеры микробалок: длина 30–500 мкм, ширина 2–4 мкм, толщина менее 0,3–1,0 мкм. Число микробалок в устройстве от 1000 до 3000, расстояние между ними — минимально допустимое технологическими возможностями (например, 0,35–1,0 мкм), коэффициент заполнения пикселей определяет яркость изображения.

Принцип работы такого устройства заключается в следующем. Когда к устройству не прикладывается напряжение, то свет отражается от гладкой поверхности совокупности микробалок, как от обычного плоского зеркала. Совокупность микробалок образует элемент изображения (пиксель). При адресации пикселей напряжением 10–20 В микробалки соответствующим образом прогибаются, создавая условия для дифракции поступающего на поверхность микробалок света. Управление устройством можно осуществлять как в аналоговом, так и в цифровом режиме.

Преимущества таких микрооптических устройств по сравнению с микрозеркальными устройствами определяются исключительно малой массой (10^{-10} – 10^{-14} г), перемещаемой под действием сигнала при малых амплитудах (0,1–0,2 мкм). Такие параметры определяют время переключения элементов устройства из одного состояния в другое в пределах

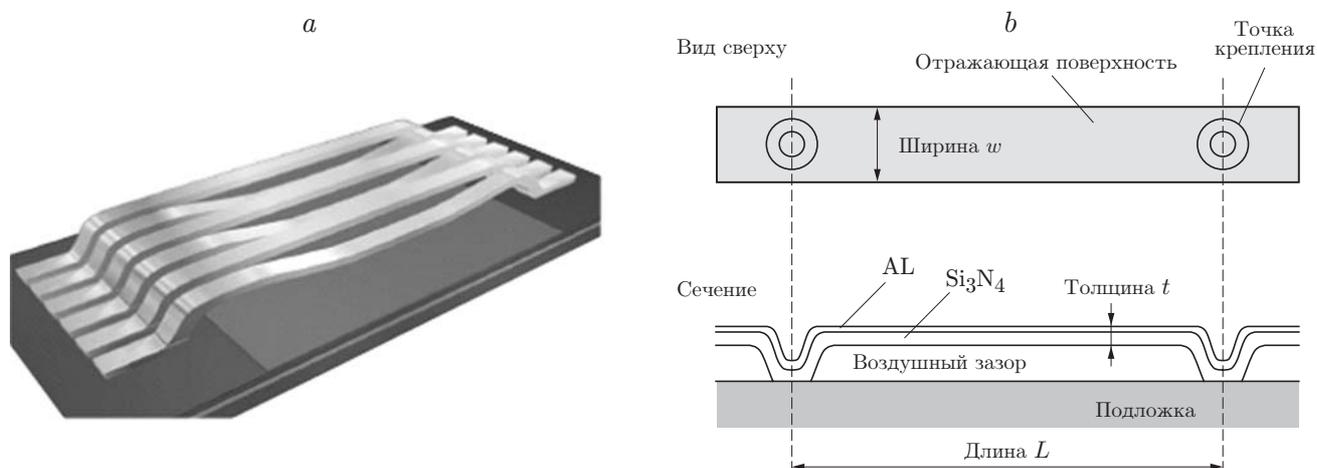


Рис. 16. Конструкция элементов, управляемых полем дифракционных решеток: пиксель GLV (а), схема элемента GLV (b)

10–50 нс, т. е. на 2–3 порядка быстрее любых известных пространственных модуляторов света.

Для уменьшения интенсивности отраженного от поверхности устройства света и выделения дифрагмированного используется специальная оптическая система. При этом достигается очень высокий уровень контраста (свыше 1000 : 1) за счет того, что в каждом элементе до 80–85 % света направляется в 1-й порядок дифракционной диаграммы направленности (рис. 17, *a*) [127]. С увеличением числа элементарных элементов, когда имеет место многократное суммирование потоков от них, величина контраста растет, а дифракционная эффективность достигает значений до 80–90 % (рис. 17, *b*).

Области применения систем GLV достаточно широки. Одним из примеров может служить проекционная система в формате 1920 × 1080-HDTV с частотой смены кадра 100 Гц. Такие значения параметров обеспечиваются высокой скоростью переключения элементов GLV: оптическая строка с высокой скоростью разворачивается с помощью линейки GLV, каждая строка видеоданных занимает 4,2 мкс (при 1 мкс на обратный ход).

Данные устройства высокотехнологичны, поэтому они должны отличаться низкой стоимостью и высокой воспроизводимостью параметров. GLV требуют использования значительно меньшего числа оптических компонент, легко меняют разрешающую способность и форматы изображения. Имеется возможность оптимальной подстройки качества изображения после изготовления устройства, при этом линейка GLV и электронный блок управления могут размещаться на одном кристалле. Предварительные исследования показали, что указанные элементы отличаются высокой надежностью, допускают до 10^{14} циклов изгиба без заметных отклонений в параметрах.

Как и другие пространственные модуляторы, технология GLV требует, чтобы падающий свет был эффективно собран и направлен на фотоприемник с малой площадью. Этот свет должен излучаться внутри заданного угла относительно нормали к плоскости устройства — заданного «конуса» полезного света. Приборы GLV имеют такой угол, сопоставимый с углами других технологий, но имеют намного больший угол приема луча.

В конструкциях GLV в качестве источника света эффективно использование твердотельных лазеров, точнее их множества, расположенных в линию с возможностью объединения для формирования мощного пучка света.

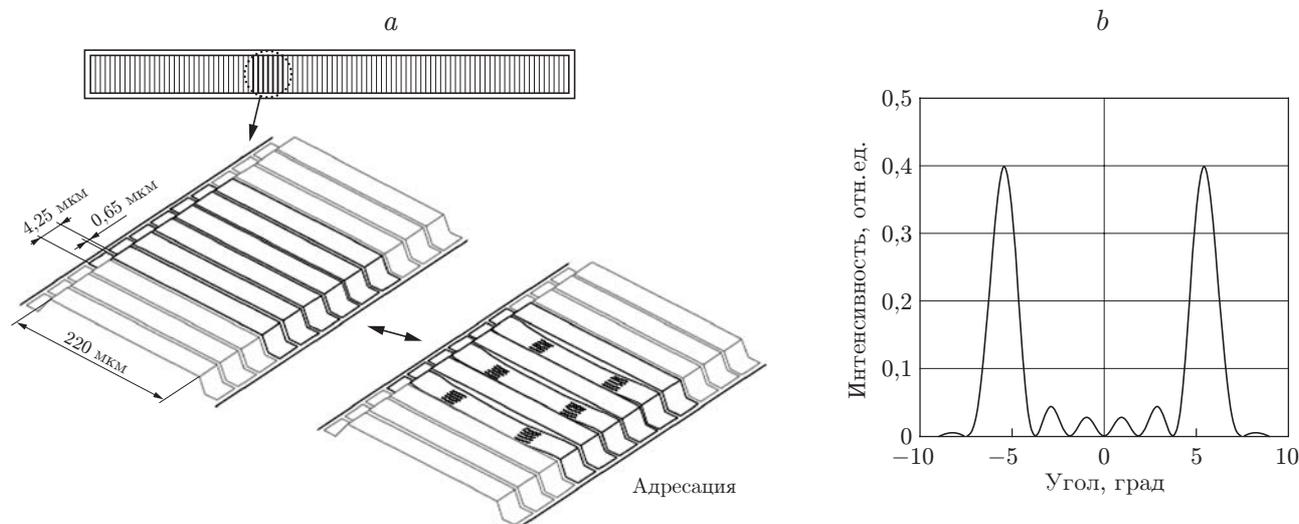


Рис. 17. Программируемые дифракционные решетки: соотношение параметров решетки в проекционной системе GLV (*a*), интенсивность отраженного света от трех пар GLV в зависимости от угла падения при длине волны 808 нм (*b*)

Компания "Sony" получила лицензию на микросхему GLV (с контрастом 3000 : 1) для всех систем формирования изображений в диапазоне от домашнего телевидения до больших проекционных установок для цифрового кино. На одной 8-дюймовой подложке может быть изготовлено 70 чипов GLV.

В настоящее время интенсивно проводятся научные исследования по расширению практического использования MOEMS для создания новых оптико-электромеханических устройств. В частности, экспертами прогнозируются большие возможности применения MEMS в волоконной оптике при построении оптоволоконных систем различного назначения. Например, в [142] экспериментально установлена возможность настраивания режимов сцепления волноводов перемещением вблизи их поверхности кремниевых микродисков. Первоначальный зазор 1 мкм, диаметр микродисков 20 мкм. Указанный зазор периодически изменяется с помощью электрического поля (с амплитудой напряжения до 40 В) до значения 0,2 мкм, создавая режим сцепления (рис. 18, *a, b*). Волноводный коэффициент пропускания подавляется до 30 дБ в критическом сцеплении, при этом добротность колебания микродиска остается высокой (до 10^5). Микродиск настраивает групповую задержку от 27 до 65 пс при изменении дисперсии групповой скорости от 185 до 1200 пс/нм. Такое устройство может быть базовым элементом в кремниевых фотонных интегральных схемах.

В настоящее время известно о выпуске первой партии матрицы оптических коммутаторов (CrossFiber) размерностью $M \times N$ световолокон (до 128 в линейке) стоимостью 50 долларов на оптический вход при возможности выполнения любой конфигурации переключения. Трехмерная коммутация осуществляется гребенчатыми электростатическими микроактюаторами, точнее, специализированной интегральной схемой MEMS и оптической технологией управления лучом с обратной связью.

Анализ перспектив развития оптических MEMS показывает, что оно будет идти в направлении объединения микроэлектромеханики и технологии нанофотоники — искусственных структур размерами много меньше, чем длина волны света.

MOEMS, основанные на управлении наклоном микрзеркал с выполнением перемещений в диапазоне до 10 мкм и ограничением частот до 10–50 кГц, должны уступить приборам, базирующимся на явлениях интерференции и дифракции. В этом случае диапазон механических перемещений лежит в субмикронной области при частотах модуляции

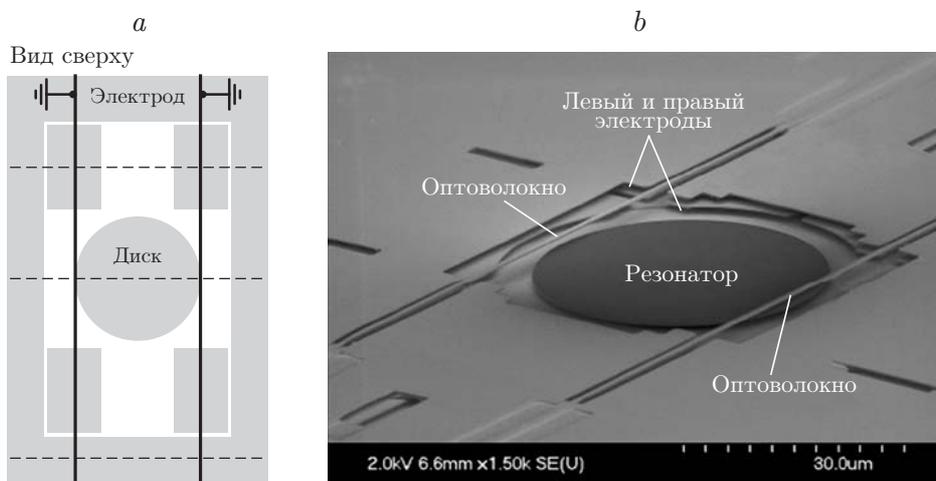


Рис. 18. Пример использования MEMS в волоконной оптике: схема размещения кремниевого микродиска относительно оптоволоконна (*a*), SEM-изображение микродиска и оптоволоконна (*b*)

свыше 10–20 МГц. Сочетание нанофотоники с MEMS позволит создавать оптические приборы, действующие в гигагерцовом диапазоне.

Наиболее интенсивно развитием новых оптических технологий занимаются корпорации и университеты: НАСА, УС Беркли, Локхид Мартин, Фраунгоферов институт и MIT, Бостонский университет, Стэнфордский университет, Университет Олбани, Университет Делавэра, Университет Дрексел, Университет Йены, Университет Мичигана, Университет штата Монтана, Университет полярной Каролины, УС Санта-Барбара, Университет Токио и Университет Висконсина.

MEMS-дисплеи. Еще одна из областей микрооптических применений MEMS-технологий — создание оптических настраиваемых фильтров Фабри — Перо, в которых расстояние между двумя поверхностями (одна из них — полупрозрачная мембрана) определяется электростатическим микроактуатором.

Компании "Prime View International" (PVI), "Qualcomm MEMS Technologies" (QMT, <http://www.qualcomm.com/>), "Iridigm" разрабатывают MEMS-дисплей. Ключевым элементом технологии, получившей название iMoD Matrix, является интерференционный модулятор (iMoD — Interference Modulator). Он представляет собой образец MEMS и состоит из полупрозрачной пленки на прозрачной подложке, способной частично отражать и пропускать свет, и гибкой металлической мембраны. Последняя может находиться в двух состояниях: в первом случае между ней и пленкой есть воздушный зазор, во втором — нет. Переход из одного состояния в другое осуществляется за счет электростатического взаимодействия в результате приложения внешнего напряжения различной полярности, причем после его снятия мембрана сохраняет новую конфигурацию.

Когда пленка и мембрана разделены воздушным зазором, световые волны, отразившись от пленки, интерферируют с волнами, прошедшими сквозь нее и затем отразившимися от мембраны, в результате чего выделяется излучение определенного цвета. Если же зазор отсутствует, то интерференция не происходит. Варьируя величину зазора, можно получить три основных цвета: при наибольшей толщине воздушной прослойки — красный, при средней — зеленый и при наименьшей — синий. Размеры одного интерференционного модулятора составляют всего десятки микрон. Один пиксель в дисплее на основе iMoD Matrix состоит из трех субпикселей: красного, зеленого и синего, каждый из которых образован несколькими рядами модуляторов. При этом управляющие схемы располагаются по краям дисплея.

В числе достоинств предлагаемого решения, помимо хорошего качества изображения, специалисты отмечают очень малый уровень энергопотребления, что в случае коммерческой реализации технологии может сделать ее оптимальной для разнообразных мобильных устройств. Хотя вопрос об объемах производства еще обсуждается, PVI уже разослала выпущенные прототипы будущих устройств компаниям-партнерам, работающим в сфере мобильных телефонов, смартфонов и портативных компьютеров.

Принцип работы таких дисплеев не предполагает использование ламп подсветки и цветочных фильтров. Кроме того, эти экраны будут тоньше ЖК-панелей и со временем не должны утрачивать яркость и цветовую насыщенность.

Микрожидкостные MEMS. Одним из перспективных направлений развития MEMS является использование их в устройствах для инъецирования микроструй жидкости и газа, при создании микронасосов, при разработке самодвижущихся надводных и подводных микроаппаратов и т. п. [144–167].

В последние годы в различных областях техники наблюдается все возрастающий интерес к микроструйным технологиям (microfluidic device, microfluidic chip, lab-on-a-chip), которые способны управлять небольшими объемами жидкостей при проведении химического и биологического анализов, количественного анализа при иммунологических обследова-

дованиях, при проведении тестов на наличие антигенов или антител в организме человека и т. д. Прецизионная подача микрообъема жидкости в заданное место имеет ряд качественных, не имеющих аналогов характеристик: малое время процесса (анализа), низкая стоимость, возможность исключения источников загрязнения. Миниатюризация объема, в котором происходит химическая реакция, уменьшает число необходимых проб, дает возможность выполнять анализы быстро без ручных операций, значительно упрощая и удешевляя медицинскую диагностику.

Микронасосы, встроенные в интегральные схемы, уже применяются для охлаждения участков их локального перегрева, при этом требуется достаточно высокая интенсивность потока жидкости. Например, для охлаждения микросхем, выделяющих энергию до 100 Вт, необходимо обеспечить поток жидкости с расходом свыше 10–100 мл/мин, что может быть достигнуто только при давлении жидкости в каналах до 100 кПа. Возможно использование MEMS-насосов в топливных элементах сотовых телефонов и в портативных компьютерах.

MEMS-микронасосы применяются в космической области для придания импульса движения микроспутникам. Микроимпульс сжатого газа с расходом ~ 1 мл/мин достаточен для существенного изменения движения на орбите микроспутника с массой ~ 1 –5 кг.

Наиболее распространенной областью практического применения микронасосов являются струйные принтеры. При работе таких устройств выстреливаются микрокапли объемом ~ 3 –10 пл с тактовой частотой 1–100 кГц.

Основной принцип передачи энергии от внешнего источника инжектируемой капле или струе жидкости — использование упругих диафрагм, при изгибе которых за счет внешнего воздействия повышается давление в камере с жидкостью и струя инжектируется во внешнюю среду. Этот принцип является наиболее эффективным, так как потеря энергии происходит только в тракте передачи усилия на прогиб диафрагмы, который обеспечивается механическим толкателем.

Принцип работы основан на емкостных способах электромеханического преобразования энергии на пьезоэлектрических и электростатических микроактюаторах (рис. 19).

Важнейшей характеристикой указанных устройств является удельная энергоемкость — отношение потребляемой мощности к массе движителя или механическая энергия, получаемая с единицы рабочей поверхности устройства.

Однако при создании более эффективных микронасосов возникает ряд проблем, связанных, прежде всего, с удельной энергоемкостью их микроактюаторов.

Следует отметить, что тонкие пьезоэлектрические пленки не обладают достаточной энергоемкостью для эффективной работы микронасосов. Поэтому используются тонкие пластины пьезокерамики толщиной ~ 200 мкм (суммарная толщина микроактюатора вместе с пассивной пластиной достигает 500 мкм). Из-за высокой жесткости таких пластин

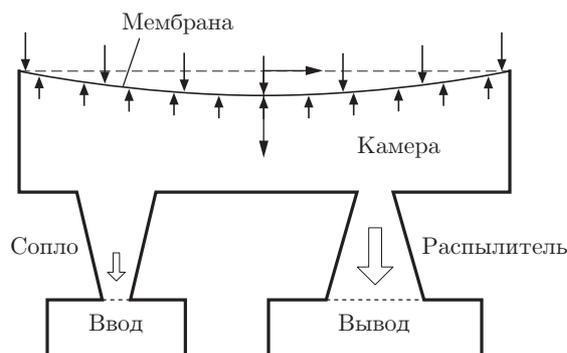


Рис. 19. Принцип работы диафрагменного микронасоса

при их диаметре $\sim 4\text{--}5$ мм пьезоэффект обеспечивает прогиб мембраны только на $0,15\text{--}0,25$ мкм при напряжении $70\text{--}100$ В и давление под мембраной до 1 МПа, что позволяет инжектировать капли диаметром до 10 мкм с начальной скоростью $0,1\text{--}0,2$ м/с или перекачивать жидкость с производительностью $10\text{--}500$ мкл/мин.

По сравнению с пьезоэлектрическими струйными головками диафрагменный MEMS-инжектор (MEMSJet), основанный на электростатическом принципе, имеет ряд существенных преимуществ: большую технологичность их изготовления, возможность массового производства и небольшие размеры устройства.

Био-MEMS. Устройства на основе MEMS уже находят широкое применение в медицинских технологиях: телеметрическом контроле за здоровьем человека, телеметрических эндоскопах, «интеллектуальных» хирургических инструментах, микроаппаратах, вживляемых на длительный срок в тело человека, например, для непрерывного управления сердечным ритмом, мониторинге параметров крови или глюкозы [168–178]. Объем рынка таких устройств уже превысил 1 млрд долларов. Созданы автоматические микромеханизмы для перемещения оптических микроузлов в пищеварительном тракте. Их преимущество перед обычными гибкими эндоскопами заключается в значительно более щадящем режиме, определяемом использованием более низких механических сил.

Био-MEMS являются одними из самых перспективных устройств для медицинской диагностики. Они основываются на междисциплинарной интеграции медицины, биологии, биохимии, физики и технологии микроэлектроники, размещены на одном чипе (Lab-on-a-chip) и функционируют по определенной программе с использованием цифровых процессоров. Био-MEMS состоят из набора датчиков, электрических коммутаторов, механических элементов, микронасосов и микроклапанов для эффективного управления пульсирующим движением жидкостей в микрообъемах, их перемешиванием. Такие микрожидкостные системы могут осуществлять комплексный молекулярный диагноз и иммунологическое обследование микрообъемов жидкостей в реальном времени, осуществлять сортировку и подсчет биологических частиц. Среди задач, уже решаемых с помощью био-MEMS, можно отметить следующие: анализ белков и нуклеиновых кислот, контроль в реальном времени за давлением жидкости (например, в глазах, ушах, спинном мозге), контроль за внутричерепным давлением, слежение за сердечно-сосудистой системой и за концентрацией глюкозы, диагноз вирусов и бактерий, в том числе с помощью вживляемых радиоуправляемых биодатчиков.

В работе [174] описывается использование резонирующей микроконсоли для обнаружения закрепления на ее поверхности *immunospecific* вирусов, захваченных от жидкости. Такое устройство имеет массовую чувствительность $\sim 10^{-19}$ г/Гц и тем самым дается возможность обнаружить монослой антитела AcV1 массой до 3×10^{-15} г.

Корпорация "Aldagen" разрабатывает микрожидкостные устройства (ALDEFLUOR) для опознания, изолирования и клинической сортировки стволовых клеток и клеток-предшественников человеческого костного мозга с целью клинического использования при восстановлении живой ткани, в частности для устранения причин хронической (ишемизированной) остановки сердца, периферийной сосудистой болезни, лейкоми, генетических дефицитов фермента и других болезней. При этом сортировка терапевтических доз стволовых клеток занимает $1\text{--}3$ ч.

Уже в настоящее время продукт ALDEFLUOR используется более чем в ста исследовательских лабораториях для обработки клеток и имеет положительные отзывы об этой технологии, допускающей высокую скорость сортировки клеток при отличной стерилизации путей протекания жидкости. Число проданных ALDEFLUOR увеличивается быстро. Вышло большое число научных публикаций, написанных пользователями этой технологии.

Для контроля крови больных диабетом необходим ее минимальный объем (0,3 мкл). Для обнаружения микробов в анализе жидкостей человека требуется больший объем, например до 10 мкл крови для обнаружения малярии. Другими параметрами жидкости, которые могут регистрировать lab-on-a-chip, являются pH-фактор, вязкость, концентрация ДНК, а также химический синтез.

Для таких исследований достаточно иметь минимальный объем жидкости (~20–50 пл). Микронасосы в Био-MEMS обеспечивают среднюю скорость потока жидкости (различных растворов) ~0,3 мл/мин при минимальном разрешении дозировки 2 мг/час.

MEMS-сенсоры. Эффективность выполнения задач различными техническими устройствами, реагирующими на воздействие внешней среды, зависит, как известно, от качества датчиков и сенсоров. С усложнением технических устройств, расширением их функциональных возможностей, увеличением потока снимаемой с них информации эта зависимость возрастает. Одним из важнейших результатов MEMS-технологий является создание на их основе нового класса разнообразных датчиков: высокочувствительных, быстродействующих, при высокой степени интеграции, с малыми размерами и низкой стоимостью. Датчики совмещены с современными микросхемами и допускают использование цифровых форм передачи информации с возможностью ее компьютерной обработки, облегчающей создание сетей датчиков и оперативный сбор большого объема цифровой информации.

Линеаризация выходных характеристик, программируемость настроек во всем диапазоне измерений, стабильность характеристик во времени, минимизация влияния внешних факторов, самодиагностика, технологичность конструкции, снижение энергопотребления также отличают MEMS-сенсоры [179–194].

Известно несколько десятков различных сенсоров, построенных на базе MEMS. Наибольшее практическое применение к настоящему времени получили MEMS-датчики давления. Эти системы автоматически контролируют давление шин автомобиля. Они становятся стандартным оборудованием во всех новых транспортных средствах. В частности, все модели автомобилей США, выпускаемые с 2008 года, должны быть оборудованы электронной системой контроля давления шин на базе элементов MEMS. Более высокая безопасность движения обеспечивается тогда, когда на приборной панели видно состояние давления в каждой из шин автомобиля и есть возможность корректировки этого давления. Прогноз развития различных датчиков применительно к автомобильной промышленности иллюстрирует рис. 20.

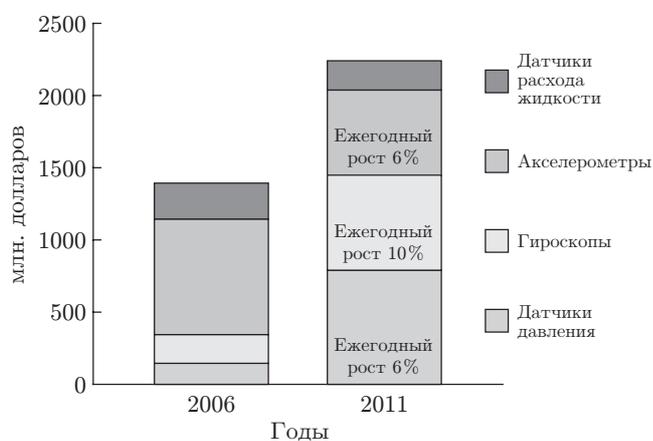


Рис. 20. Прогноз коммерциализации MEMS-сенсоров в автомобильной промышленности до 2011 г. по данным WTC

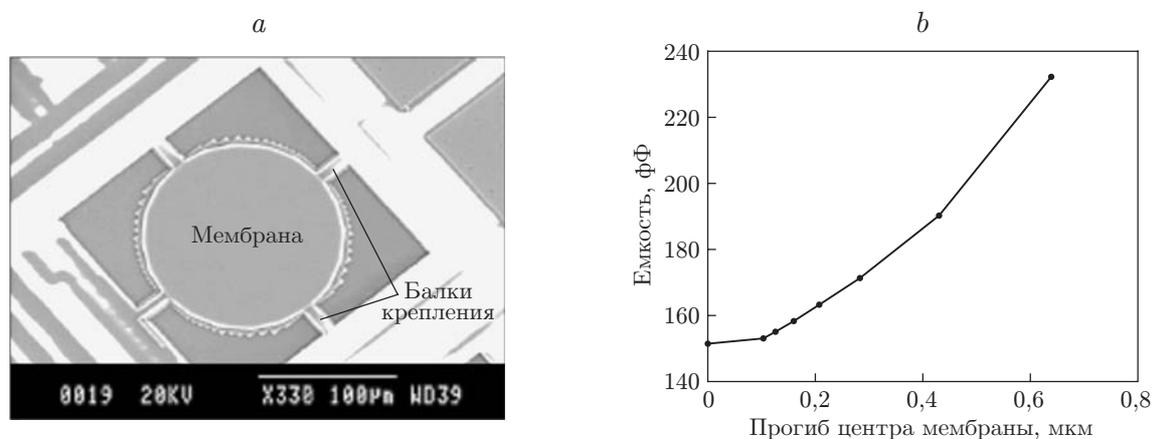


Рис. 21. Датчик давления с емкостным принципом считывания информации: *a* — SEM-изображение мембраны датчика давления (ее диаметр 75 мкм, длина упругих «подвесок» 25 мкм, их толщина 10 мкм); *b* — изменение емкости датчика как функции прогиба диафрагмы (давления)

Как правило, MEMS-датчик давления состоит из мембраны размером $\sim 100\text{--}200$ мкм, подвешенной на упругих элементах с высоким коэффициентом жесткости (до 1800 Н/м). Принцип считывания информации емкостный. Такой датчик рассматривается в [189] и показан на рис. 21. Без давления емкость межэлектродного зазора равна 153 фФ при резонансной частоте 48,96 МГц. При смещении мембраны на 0,56 мкм и соответствующем изменении емкости на 63 фФ сдвиг частоты резонанса составляет 13,5 МГц при чувствительности к изменению емкости 0,21 МГц/фФ и чувствительности к силе (давлению) 26,1 кГц/мкН.

Типичное напряжение питания MEMS-датчика составляет 1,7–3,6 В, цифровой выход 16–19 бит, частота опроса 10–20 Гц, размер $7,0 \times 7,0 \times 1,8$ мм. Датчик обладает устойчивостью к ударам, к изменению давления окружающей среды от 0–30 бар, к изменению температуры до 200 °С, потребляет мало энергии. Изменение диапазона измеряемого перепада давления достигается выбором диаметра мембраны, межэлектродного зазора, упругости элементов подвески. Самый небольшой MEMS-датчик давления компании "Bosch Sensortec" имеет размер $3,0 \times 3,0 \times 0,9$ мм и в режиме ожидания потребляет ток, меньший тока саморазряда батарей питания. Этот датчик был представлен на ярмарке «Электроника», прошедшей в Мюнхене в 2008 году (раздел «MEMS в мире автомобилей и бытовой электроники»).

Автомобильный сектор является одним из основных рынков применения MEMS-датчиков. В настоящее время в транспортных средствах используется до 100 различных датчиков, более 30 из них составляют MEMS. В состав этих датчиков входят акселерометры, гироскопы и кренометры, датчики потока и давления. В последнее время появились ИК-датчики, микросканеры и т. п. Интегральные радиосхемы преобразуют сигналы сенсоров и передают их через аналоговые или цифровые устройства блокам управления для дальнейшей обработки.

Общее количество MEMS-датчиков постоянно увеличивается: в 2006 году насчитывалось около 430 млн. штук, к 2011 году по прогнозам специалистов будет выпущено около 780 млн. изделий. Таким образом, ежегодный рост составляет 13 %.

Основные компоненты рынка — гироскопы для систем антивибрационной защиты лазерных головок в автомобильных CD-системах; датчики давления в подушках безопасности с их активизацией при ударе, включая боковые подушки; датчики давления в шинах;

триггерное предохранение одновременного нажатия клавиш и т. д.

Автоэксперты ожидают, что в течение 5 лет установка воздушных подушек в транспортных средствах возрастет с 40 до 60 млн. штук (80 % автомобилей во всем мире), а число акселерометров — до 350 млн. штук, при этом в одном автомобиле может быть установлено до 8 акселерометров с соответствующими электронными блоками управления. Имеет место кластеризация датчиков (новое слово в технологии сбора информации), дающая дополнительные функциональные возможности.

В настоящее время известно 13 крупных компаний, производящих до тридцати различных видов MEMS-датчиков. Десять из них выпускает продукцию более чем на 100 млн. долларов. Безусловный лидер по выпуску MEMS-сенсоров — компания "Robert Bosch", ежегодный объем производства сенсоров для автомобильной промышленности отделением электроники этой компании превышает 200 млн. штук. Кроме того, она занимает четвертое место по производству MEMS, уступая таким компаниям, как "Hewlett Packard" и "Texas Instruments".

MEMS-генераторы энергии. С развитием технологии микроэлектроники и обеспечением воспроизводимости тонких воздушных зазоров (толщиной до 1–2 мкм) стало реальным построение устройств, способных при механических воздействиях выполнять обратное по сравнению с микродвигателями преобразование энергии и служить генераторами электрической энергии [195–214]. Такие микроэлектронные генераторы могут занять ту энергетическую нишу, которая до настоящего времени была недоступна — область микро- и милливаттных мощностей. Интерес к ней постоянно растет в связи со все меньшим энергопотреблением современных микросхем.

Актуальность задачи создания подобных генераторов определяется как увеличивающейся необходимостью нахождения возобновляемых источников энергии, так и постоянно возрастающим вниманием к построению больших сетей беспроводных датчиков различного назначения.

Сравнение возможных источников энергии показывает, что только солнечная энергия и энергия механических колебаний являются наиболее подходящими вариантами для решения вопроса непрерывного производства энергии из окружающей среды, особенно применительно к задачам создания сетей датчиков. Оба варианта соответствуют требованию по плотности мощности, необходимой для обеспечения работоспособности беспроводных сетей близкорасположенных датчиков, $\sim 10\text{--}200\text{ мкВт/см}^3$. Такие сети имеют широкое применение: контроль температуры, освещенности, местоположения людей в зданиях; определение химически вредных веществ, включая их перемещение в транспортных средствах; контроль за формированием трещин усталости, например, в самолетах, высотных зданиях; контроль определенных параметров излучения на местности и т. д. Многие научные эксперты считают, что микромощные, встроенные в различные конструкции электронные устройства станут в ближайшие годы неотъемлемой частью окружающей среды, круглосуточно выполняя разнообразные информационные функции в автоматических режимах.

Направление генерации энергии, в котором беспроводной узел сети производил бы собственную энергию из окружающей среды, до настоящего времени практически не исследовалось. Этот метод в последние годы стали называть методом «энергетической очистки» (energy harvesting), так как элемент убирает энергетический «мусор» и собирает неиспользованную энергию окружающей среды. Энергетическая очистка является самой перспективной из всех возможных вариантов, потому что продолжительность работы узла ограничена только отказом его собственных компонент.

Постановку задачи создания генераторов энергии на основе микроэлектронных технологий можно отнести еще к 2000–2002 годам [199, 203, 212]. В настоящее время такие разработки ведутся более чем в 15 различных лабораториях мира, они создаются по технологии, как и MEMS-устройства, в одном технологическом процессе.

Сравнивая физические принципы, которые могут лежать в основе работы микрогенераторов энергии, можно отметить следующее.

Электромагнитный микрогенератор не требует отдельного источника питания, но не может развивать большое напряжение на выходе, поэтому необходимо использование специального трансформатора с высоким коэффициентом трансформации. Его изготовление трудно совместить с технологией микроэлектроники, кроме того, предельная плотность генерируемой энергии составляет не более 100 мкВт/см^3 .

Пьезоэлектрический микрогенератор основан на прямом пьезоэлектрическом эффекте. Он не требует дополнительного источника напряжения. При использовании пьезоэлектрической керамики достижима высокая плотность генерируемой энергии (до 200 мкВт/см^3). Однако изготовление такого генератора практически несовместимо с КМОП-технологией. Тонкие же пьезоэлектрические пленки пока не отличаются высокими значениями пьезоэлектрического коэффициента.

Электростатический микрогенератор основан на механической модуляции емкости при сохранении ее заряда. Такой генератор может изготавливаться с помощью MEMS-технологии, имеет возможность генерировать высокое напряжение (до 200 В) и достаточно высокую предельную плотность энергии (до 1000 мкВт/см^3). Однако здесь необходимо использование отдельного источника напряжения или восстановление заряда за счет включения в цепь генерации дополнительных индуктивных элементов.

Использование двухконденсаторной конструкции генератора [212–214], когда заряд как рабочее тело за счет механических сил поочередно (по тактам) перекачивается от одного конденсатора к другому, совершая при этом полезную работу, дает возможность значительно снизить величину восстанавливаемого заряда и при высококачественной диэлектрической изоляции компонент генератора свести ее к минимуму.

Создание MEMS-генераторов находится в начальной стадии, большинство работ в этой области выполнено в последние 2–3 года. Изготовлены микрогенераторы, способные поставлять в микросхему электрическую энергию до $10\text{--}50 \text{ мкВт}$. В частности, экспериментально показано, что с использованием биморфного пьезоэлектрика PZT можно получить удельную мощность 70 мкВт/см^3 . При оптимизации параметров прибора можно достичь 250 мкВт/см^3 при вибрации с частотой 120 Гц и силой, дающей амплитуду ускорения $2,5 \text{ м}^2/\text{с}$.

Разработка новых принципов генерации энергии из внешней среды, основанных на использовании современных микроэлектронных технологий, сможет найти применение при создании макроскопических источников энергии, например при ее генерации за счет воздушных потоков, микросейсмики и т. п.

Перспективы развития наноэлектромеханики. В связи с развитием нанотехнологий и разработкой элементов наноэлектроники возникает вопрос о перспективах развития MEMS в нанометровом диапазоне, о создании наноэлектромеханических преобразователей энергии (NEMS). Наноэлектромеханика в рамках исследований в областях нанотехнологий и микроэлектромеханики в странах Запада входит в число наиболее приоритетных технических направлений на ближайшие 5 лет.

Известно большое число научных публикаций (например, [215–243]), посвященных развитию этого направления, но отсутствуют сведения об их коммерческом применении.

В отличие от MEMS-устройств приборы NEMS в значительной степени известны только в среде узких специалистов. Одним из барьеров на пути практического применения является регистрация в режиме реального времени перемещений нанометровых объектов, когда емкостные методы неэффективны на фоне паразитных шумов, не поддающихся точному контролю, а оптические — сталкиваются и с дифракционными явлениями. Несмотря на это в отдельных образцах наноэлектромеханики зафиксирован ряд результатов: одно-

электронный заряд, фиксирование массы 10^{-21} г и силы 10^{-21} Н. Речь идет о приближении к квантовым пределам указанных величин.

Общезначимый анализ перспектив широкого развития NEMS показывает, что часть современных микроэлектромеханических преобразователей, их функции и масштаб применения останутся неизменными. Например, не имеет смысла уменьшать далее размеры датчиков давления, которые получили массовое распространение. Эти микромеханические датчики уже имеют очень небольшие размеры и качественно передают электрический сигнал на исполнительные устройства. Маловероятно, что переход подвижных элементов в нанометровый диапазон сможет качественно улучшить характеристики таких датчиков. Аналогичная ситуация складывается и для инерционных MEMS (акселерометров, гироскопов и т. п.), включая приборы, используемые в мобильных устройствах, телефонах, видеокамерах и т. п. Также маловероятно, что переход на нанотехнологии сможет качественно изменить масштаб и качество работы указанных устройств.

Движущей силой перехода на новый масштаб выполнения MEMS должна стать либо перспектива получения принципиально новых функциональных возможностей приборов, либо значительное качественное улучшение уже достигнутых характеристик на MEMS-технологиях.

Примером такого направления дальнейшего развития MEMS — перехода микроэлектромеханики в нанометровый диапазон — является создание новых высокочувствительных датчиков, которые могут в реальном масштабе времени фиксировать присутствие и изменение нанобъемов концентраций химических элементов, токсических веществ, включая взрывчатые, малых концентраций компонент в газах и т. п. Такие наноустройства по прогнозам смогут стать высокорентабельными и выйти на широкий рынок в течение ближайших 5 лет.

Уже в настоящее время создаются электромеханические преобразователи, которые включают как MEMS-технологии, так и элементы с нанометровыми размерами. В этом плане микро- и нанотехнологии являются взаимодополняющими, а нанотехнологии — продуктом естественного развития процесса миниатюризации MEMS.

Одной из больших проблем в области нанотехнологий является создание возможностей прецизионного манипулирования объектами нанометровых размеров. Для этой цели применяются атомно-силовые и сканирующие туннельные микроскопы, которые недостаточно эффективны в управлении. Задачей наноэлектромеханики является создание наноманипуляторов, способных оперировать отдельными молекулами и атомами. Инструментом таких наноманипуляторов могут быть наноконсоли, используемые как молекулярные нанопинцеты, которыми можно перемещать отдельные молекулы и синтезировать новые вещества, в том числе новые органические наноструктуры.

Установлено, что биологические клетки динамически подстраивают механические внутренние силы, определяемые белковыми молекулами, под силы, возникающие в их окружении, по периферии клетки. Наноэлектромеханические устройства дадут возможность количественно определять реальные механические силы, действующие внутри органических клеток, и проникать во внутриклеточные механические процессы, которые играют важную роль в росте и функционировании живых тканей. NEMS смогут определять различия в возникновении механических сил и в реакции на них здоровых и больных клеток, а также разрабатывать новые терапевтические методы и способы модуляции клеточных взаимодействий.

Еще одним направлением дальнейшего развития MEMS (уменьшения их до нанометровых размеров) при использовании уже разработанных в MEMS принципов микро- и наноперемещений является возможность исследования особенностей преобразования энергии в наномасштабах, которая может иметь место, например, при молекулярном взаимодействии химических веществ или при изменении физической конфигурации наночастицы с

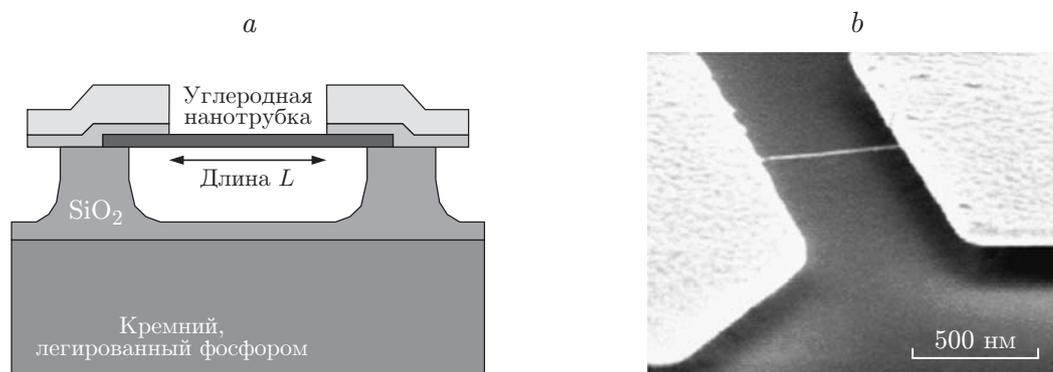


Рис. 22. Нанобалка на основе углеродной нанотрубки, закрепленной между двумя электродами: схема устройства (а), SEM-изображение устройства (b)

развитой поверхностью и т. п. Подобные задачи могут найти применение при создании биодатчиков в биотехнологии и медицинской диагностике.

Наиболее близким к практическому использованию NEMS является построение их на основе микронаконсольей, нанобалок. Микроконсоли — вибраторы с высокой добротностью и узкой резонансной полосой — уже являются одним из базовых элементов MEMS. Основными их преимуществами как датчиков являются: высокая чувствительность, низкая стоимость, простота и скорость процесса регистрации исследуемого параметра. При переходе размеров нанобалок, микроконсольей в нанометровый диапазон появляется возможность достижения еще более высоких значений параметров: частоты резонансных колебаний (гигагерцовый диапазон), чувствительности к изменению массы нановибратора и т. д.

Фундаментальная зависимость между изменением массы нанорезонатора и частотным сдвигом резонанса может стать ключевой для разработки новых поколений очень чувствительных преобразователей.

Пример технологического выполнения нанобалки из углеродной нанотрубки (CNT) представлен на рис. 22 [244]. Следует отметить, что нанотрубки, вероятно, не смогут найти в наномикроэлектромеханике широкого практического применения в силу недостаточной технологичности, воспроизводимости параметров и проблем с закреплением их концов. Поэтому при создании сложных наномасштабных конструкций более перспективно применение стандартных для микроэлектроники технологий с использованием электронной и рентгеновской литографий.

Пример такой технологии изготовления нанобалок, точнее матрицы из 20 нанобалок, закрепленных с двух концов, с использованием электронной литографии описан в работе [219] (рис. 23). В этой работе информация о колебаниях нанобалок (их резонансная частота лежит в диапазоне 10–100 МГц) считывается классическим емкостным методом с чувствительностью к изменению нанозазора $3 \cdot 10^{-19}$ Ф/нм. Присутствие множества расположенных рядом нанобалок с близкими резонансными частотами не сказывается на чувствительности сдвига частоты резонанса каждой нанобалки к изменению ее массы, например, за счет осаждения на ее поверхность отдельной молекулы.

С развитием технологии изготовления наноконсольей электромеханические преобразователи уже достигли чувствительности лучше 10^{-18} г, которая до недавнего времени казалась недостижимой, при этом есть реальные перспективы дальнейшего увеличения этой чувствительности вплоть до возможности определения числа молекул, адсорбируемых на поверхности наноконсоли.

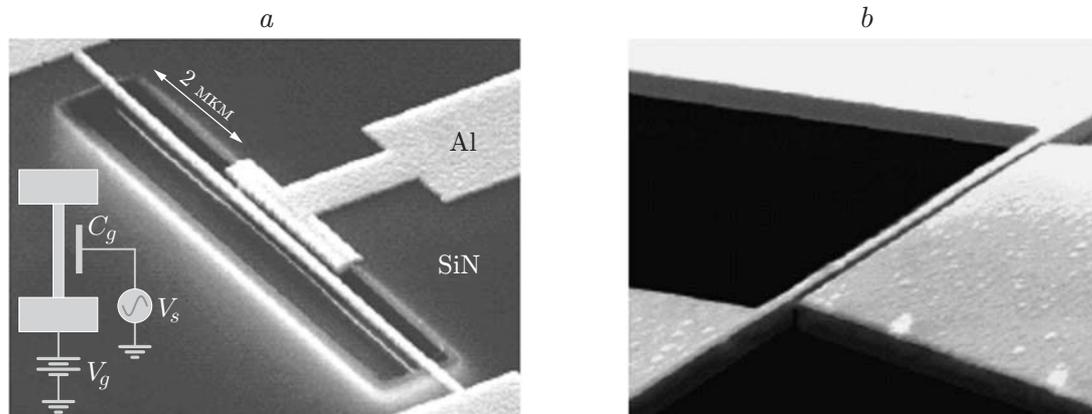


Рис. 23. SEM-изображения двух нанобалок, полученных с использованием электронной литографии: *a* — нанобалка с параметрами: длина 12 мкм, ширина 200 нм, толщина 150 нм (Si 100 нм + Al 50 нм), резонансная частота 11 МГц, емкость относительно неподвижного электрода $5 \cdot 10^{-18}$ Ф, зазор 180 нм, добротность 26500, масса $1,2 \cdot 10^{-15}$ кг; *b* — нанобалка с параметрами: длина 14 мкм, ширина 200 нм, толщина 205 нм (Si 125 нм + Al 80 нм), зазор 130 нм, чувствительность к изменению зазора $3 \cdot 10^{-19}$ Ф/нм

Полагая, что соотношение между дополнительной массой δm и сдвигом пика резонанса практически линейно: $\delta f \approx \delta m f_0 / m$, где m — масса вибратора, f_0 — резонансная частота его колебаний, можно оценить предельную чувствительность этого метода. Например, если в качестве вибратора используется углеродная нанотрубка длиной 10^{-6} м, диаметром 10^{-7} м, имеющая резонансную частоту свыше 1 ГГц при собственной массе 10^{-16} – 10^{-17} г, то теоретически возможно обнаружить изменение массы 10^{-23} г, т. е. порядка одного атома. При таких оценках необходимо учитывать как уровень шумов электронной схемы считывания изменений, так и шумовые характеристики самого нановибратора, которые также могут носить тепловой характер.

Отметим, что с уменьшением размеров нановибратора уменьшается влияние давления окружающего газа на добротность резонатора и на чувствительность датчика.

В работах [220, 221, 227] сообщается о достижении предельно высокой массовой чувствительности (сдвиг резонансной частоты $0,7$ Гц/ 10^{-21} г) устройства на базе наноконсоли (в качестве наноконсоли используется монокристалл SiC размером $600 \times 400 \times 70$ нм) при атмосферном давлении и резонансной частоте 127 МГц. Метод считывания — пьезорезистивный, время регистрации изменения массы — несколько секунд.

Матрица наноконсолей, нанобалок может применяться для однозначного диагноза большого числа различных болезней по характерным для них биомаркерам при высокой пропускной способности метода.

Важным моментом практического использования нановибраторов является возможность управления характером колебаний, выключением колебаний за время, меньшее периода одного цикла колебаний (меньше чем 1 нс). Этот уровень контроля нанорезонаторов делает реальным их использование в цифровых устройствах, например при создании на их основе элементов памяти, логики и т. п.

К настоящему времени известно несколько сообщений о возможности проникновения наномикроэлектромеханики в сферу, традиционную исключительно для электронных приборов, — создание устройств памяти и логики. В частности, компанией IBM разработан опытный образец микросхемы механической репрограммируемой памяти, способной хранить на чипе площадью $5,76$ см² до 125 Гбит информации, что эквивалентно емкости более десяти DVD.

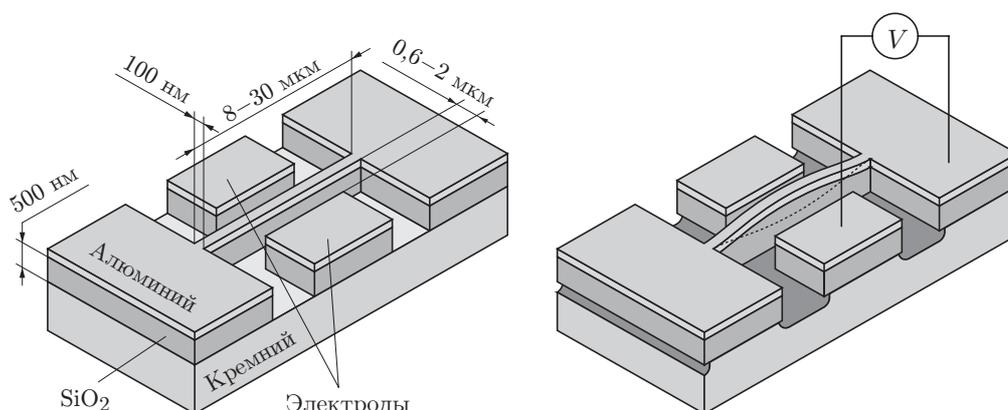


Рис. 24. Элемент NEMS постоянной памяти, репрограммируемой полем

Принцип работы такого устройства заключается в создании массива кремниевых наноконсолей (нанорычагов), с помощью которых в слое полимера, расположенного под ними, формируются отверстия размером 10 нм, наличие или отсутствие которых соответствует состоянию элемента памяти «0» или «1». С помощью тех же наноконсолей происходит и считывание данных. Стирание информации осуществляется нагревом наноконсоли, размягчающим полимер и уничтожающим отверстие, если оно было сформировано. Несмотря на механический способ записи и считывания, скорость передачи данных может составлять 20–30 Мбит/с. С такой скоростью работают современные чипы флэш-памяти. Новые электромеханические чипы со столь высокой емкостью могут значительно улучшить параметры ряда устройств бытовой электроники: цифровых камер, мобильных телефонов и флэш-памяти.

Еще один вариант наноэлектромеханической репрограммируемой памяти разрабатывается компанией "Cavendish Kinetics" (рис. 24). Наноконсоль замыкает или размыкает омический контакт как в ВЧ-коммутаторе. Отличие заключается только в том, что после возникновения контакта необходима дополнительная энергия для его разрыва (эффект памяти). Преимущество нового типа памяти заключается в том, что ток в режиме ожидания отсутствует, а для записи требуется затратить механическую энергию величиной всего $2,5 \cdot 10^{-11}$ Дж. Устройство остается работоспособным даже при температуре 200 °С, при этом количество циклов записи-перезаписи может превышать $2 \cdot 10^7$.

Кремниевые транзисторы имеют несколько существенных недостатков. Они не являются идеальными переключателями, так как в состоянии «выключено» заметны токи утечки. Кроме того, они работоспособны только при достаточно низких температурах (практически во всех современных электронных устройствах требуется наличие систем охлаждения, как минимум воздушного). Наконец, они плохо выдерживают перегрузку по напряжению. Эти недостатки уже являются ограничивающими факторами для дальнейшего развития элементной базы микроэлектроники в соответствии с законом Мура.

В рамках программ GE Global Research и DARPA по долгосрочным перспективам развиваются новые подходы в микро- и наноэлектронике, направленные на замену классических кремниевых транзисторов как логических элементов и коммутаторов наноэлектромеханическими элементами, способными выполнять логические функции с тактовой частотой не менее 1–3 ГГц. Оценки показывают, что реальное создание конкурентоспособного наноэлектромеханического компьютера станет возможным при уменьшении размеров элементов нанокоммутаторов до значений, меньших 30–20 нм.

Заключение. Современное состояние микроэлектромеханики показывает, что она из раздела поисковых научно-исследовательских работ, которые проводились, начиная с кон-

па 1960-х и начала 1970-х годов, превратилась за последние 7–9 лет в мощную промышленную индустрию, охватывающую в разной степени большинство областей современной электронной техники. Фактически за несколько лет произошла новая революция (не эволюция) в микроэлектронике, которая была подготовлена всем предшествующим развитием микроэлектронных технологий. Развитие микроэлектромеханики было настолько стремительным во всех ее многочисленных приложениях, что до сих пор большинство разработчиков электронных устройств и многомиллионных пользователей не полностью осознают возможности и перспективы MEMS-технологий. В этом заключается один из крупных резервов дальнейшего развития MEMS — расширение как рынков сбыта, так и областей использования MEMS, например микробиологии, техники прецизионных перемещений и измерений, быстродействующей микрооптики и т. д.

Один из ведущих разработчиков в области MEMS-технологий К. Petersen полагает, что в ближайшем будущем MEMS-устройства будут доминировать на рынке микроэлектроники.

Важнейшим итогом создания технологии и промышленности MEMS является появление понятий «цифровой конденсатор», «цифровое микрозеркало» и т. п., что позволяет оцифровывать аналоговые сигналы от микромеханических движений, включая микроперемещения в реальном мире, и управлять в цифровой форме движением микромасс с очень большим потенциалом практического применения. Ранее такая возможность была «освоена» только при обработке аналоговых аудио- и видеосигналов.

В физико-технологическом плане развитие MEMS должно проходить наряду с развитием технологической базы и созданием более прецизионных технологий по следующим направлениям:

- дальнейшее увеличение энергоемкости микроактюаторов;
- снижение межэлектродных зазоров в различных MEMS-конструкциях за счет повышения качества технологии, перехода литографии в область более коротких длин волн (в электронную и рентгеновскую области излучений);
- увеличение чувствительности схем считывания сигнала как за счет повышения качества диэлектрических слоев, так и за счет новых схемотехнических решений;
- увеличение добротности и резонансной частоты микрорезонаторов, повышение чувствительности регистрирующих схем относительно сдвига пика резонанса.

Одним из важнейших факторов ускорения дальнейшего развития и массового использования MEMS является их международная стандартизация, которая должна обеспечивать совместимость всех MEMS-изделий и гарантировать их качество. К настоящему времени уже опубликованы три международных стандарта, предложенные Японией.

Важным фактором расширения диапазона и масштабов применения микроэлектромеханики является переход ее в нанометровую область.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Nathanson H. C., Wickstrom R. A.** A resonant gate silicon surface transistor with high Q band pass properties // *IEEE Appl. Phys. Lett.* 1965. **7**. P. 84–86.
2. **Nathanson H. C., Newell W. E., Wickstrom R. A. et al.** The resonant gate transistor // *IEEE Trans. Electron Devices.* 1967. **ED-14**. P. 117–133.
3. **Petersen K. E.** Micromechanical light modulator array fabricated on silicon // *Appl. Phys. Lett.* 1977. **31**, N 8. P. 521–523.
4. **Kovacs G. T. A., Maluf N. I., Petersen K. E.** Bulk, micromachining of silicon // *Proc. IEEE.* 1998. **86**, N 8. P. 1536–1551.
5. **Renard S.** Industrial MEMS on SOI // *Journ. Micromech. Microeng.* 2000. **10**, Is. 2. P. 245–249.

6. **Scannell B.** Integrated MEMS sensors for industrial control // EPN. January, 2007.
7. **Esashi M., Ono T.** From MEMS to nanomachine // Journ. Phys. D: Appl. Phys. 2005. **38**. P. R223–R230.
8. **Lee D. W., Ono T., Abe T., Esashi M.** Microprobe array with electrical interconnection for thermal imaging and data storage // Journ. Microelectromech. Syst. 2002. **11**. P. 215–219.
9. **Kassner M. E., Nemat-Nasser S., Suo Z. et al.** New directions in mechanics // Mechanics of Materials. 2005. **37**. P. 231–259.
10. **Mendels D. A., Lowe M., Cuenat A. et al.** Dynamic properties of AFM cantilevers and the calibration of their spring constants // Journ. Micromech. Microeng. 2006. **16**. P. 1720–1733.
11. **Zhang W., Baskaran R., Turner K. L.** Tuning the dynamic behavior of parametric resonance in a micromechanical oscillator // Appl. Phys. Lett. 2003. **82**. P. 130–132.
12. **Gaspar J., Chu V., Conde J. P.** High quality factor amorphous silicon electrostatic microresonators // Appl. Phys. Lett. 2004. **84**. P. 622.
13. **Patil S. B., Adrega T., Chu V., Conde J. P.** Thin film silicon MEMS microresonators fabricated by hot-wire chemical vapor deposition // Journ. Micromech. Microeng. 2006. **16**. P. 2730–2735.
14. **Wegrzyn P.** Parametric resonance in a vibrating cavity // Phys. Lett. A. 2004. **322**. P. 263–269.
15. **Ono T., Li X., Miyashita H., Esashi M.** Mass sensing of adsorbed molecules in sub-picogram sample with ultrathin silicon resonator // Rev. Sci. Instrum. 2003. **74**. P. 1240–1243.
16. **Zhang W., Baskaran R., Turner K. L.** Effect of cubic nonlinearity on auto-parametrically amplified resonant MEMS mass sensor // Sensor and Actuators A. 2002. **102**, N 1–2. P. 139–150.
17. **Cioffi K., Hsu W.-T.** 32KHz MEMS based oscillator for ultra-low power applications // Technical Digest, IEEE Frequency Control Symp. Vancouver, September, 29-31, 2005.
18. **Kim B. H., Kern D. P., Raible S., Weimar U.** Fabrication of micromechanical mass-sensitive resonators with increased mass resolution using SOI substrate // Microelectron. Eng. 2002. **61–62**. P. 947–953.
19. **Dufour I., Fadel L.** Resonant microcantilever type chemical sensors: analytical modeling in view of optimization // Sensors and Actuators B. 2003. **91**. P. 353–361.
20. **Mattila T., Jaakkola O., Kiihamäki J. et al.** 14-MHz micromechanical oscillator // Sensors and Actuators A. 2002. **97–98**. P. 497–502.
21. **Zhang W., Turner K.** Frequency dependent fluid damping of micro/nano flexural resonators: experiment, model and analysis // Sensors and Actuators A. 2007. **134**. P. 594–599.
22. **Sandberg R., Svendsen W., Molhave K., Boisen A.** Temperature and pressure dependence of resonance in multi-layer microcantilevers // Journ. Micromech. Microeng. 2005. **15**. P. 1454–1458.
23. **Kang X., Tay C. J., Quan C., He X. Y.** Dynamic characterization of MEMS structures by ultrasonic wave excitation // Journ. Micromech. Microeng. 2007. **17**, N 12. P. 2426–2431.
24. **Koskenvuori M., Mattila T., Haara A. et al.** Long term stability of single-crystal silicon microresonators // Sensors and Actuators A. 2004. **115**, N 1. P. 23–27.
25. **Kwok P. Y., Weinberg M. S., Breuer K. S.** Fluid effects in vibrating micromachined structures // Journ. Microelectromech. Syst. 2005. **14**, N 4. P. 770–781.
26. **Petitgrand S., Bosseboeuf A.** Simultaneous mapping of out-of-plane and in-plane vibrations of MEMS with (sub)nanometer resolution // Journ. Micromech. Microeng. 2004. **14**. P. S97–S101.
27. **Carr S. M., Wyboune M. N.** Elastic instability of nanomechanical beams // Appl. Phys. Lett. 2003. **82**. P. 709–711.

28. **Baskaran R., Turner K. L.** Mechanical domain coupled mode parametric resonance and amplification in a torsional mode microelectromechanical oscillator // *Journ. Micromech. Microeng.* 2003. **13**. P. 701–707.
29. **Lin Y. C., Hocheng H., Fang W. L., Chen R.** Fabrication and fatigue testing of an electrostatically driven microcantilever beam // *Mater. and Manufacturing Proces.* 2006. **21**. P. 75–80.
30. **Hsu W.-T., Cioffi K.** Low phase-noise 70MHz micromechanical oscillators // *Intern. Microwave Symp.* June, 2004. P. 1927-1930.
31. **Requa M. V., Turner K. L.** Electromechanically driven and sensed parametric resonance in silicon microcantilevers // *Appl. Phys. Lett.* 2006. **88**, N 26. P. 263508.
32. **Zhu Y., Yan G., Fan J. et al.** Fabrication of keyhole-free ultra-deep high-aspect-ratio isolation trench and its applications // *Journ. Micromech. Microeng.* 2005. **15**, N 3. P. 636–642.
33. **Panhorst D. W., LeFevre V., Rider L. K.** Micro electro-mechanical systems (MEMS), inertial measurements unit (IMU) common guidance program // *Ferroelectrics.* 2006. **342**. P. 205–211.
34. **Acar C., Shkel A. M.** Experimental evaluation and comparative analysis of commercial variable-capacitance MEMS accelerometers // *Journ. Micromech. Microeng.* 2003. **13**, N 5. P. 634–645.
35. **Barbour N., Schmidt G.** Inertial sensor technology trends // *IEEE Sensors Journ.* 2001. **1**, N 4. P. 332–339.
36. **Sung S., Lee J. G., Lee B., Kang T.** Design and performance test of an oscillation loop for a MEMS resonant accelerometer // *Journ. Micromech. Microeng.* 2003. **13**. P. 246–253.
37. **Houlihan R., Kraft M.** Modelling squeeze film effects in a MEMS accelerometer with a levitated proof mass // *Journ. Micromech. Microeng.* 2005. **15**, N 5. P. 893–902.
38. **Yoshimi S., Hoshino K., Matsumoto K., Shimoyama I.** A cantilever microphone using resonance of closed-end air columns // *19th Intern. Conf. on MEMS'2006.* Istanbul, Turkey, 22–26 January, 2006. P. 574–577.
39. **Wu X., Yang Y., Cai J. et al.** Measurements of ferroelectric MEMS microphones // *Integrated Ferroelectrics.* 2005. **69**. P. 417–429.
40. **Kuusela T., Kauppinen J.** Photoacoustic gas analysis using interferometric cantilever microphone // *Appl. Spectroscopy Rev.* 2007. **42**. P. 443–474.
41. **Ren T.-L., Zhu Y.-P., Yang Y. et al.** Micro acoustic devices using piezoelectric films // *Integrated Ferroelectrics.* 2006. **80**. P. 331–340.
42. **Zhu Y.-P., Wu Y., Zhang N. et al.** Novel ferroelectrics-based micro-acoustic devices and their ultrasonic applications // *IEEE Intern. Electron Dev. Meeting.* San-Francisco, 2004. P. 51–54.
43. **Nam K., Park Y., Hong S. et al.** MEMS based bulk acoustic wave resonators for mobile applications // *Integrated Ferroelectrics.* 2005. **77**, N 1. P. 101–108.
44. **Kim S.-H., Lee S.-H., Kim Y.-K.** A high-aspect-ratio comb actuator using UV-LIGA surface micromachining and (110) silicon bulk micromachining // *Journ. Micromech. Microeng.* 2002. **12**, N 2. P. 128–135.
45. **Gaspar J., Chu V., Conde J. P.** Electrostatic actuation of thin-film microelectromechanical structures // *Journ. Appl. Phys.* 2003. **93**, N 12. P. 10018–10019.
46. **Chen C., Lee C.** Design and modeling for comb drive actuator with enlarged static displacement // *Sensors and Actuators A.* 2004. **115**, N 2–3. P. 530–539.
47. **Tilleman M.** Analysis of electrostatic comb-driven actuators in linear and nonlinear regions // *Intern. Journ. Solids and Structures.* 2004. **41**, Is. 18–19. P. 4889–4898.

48. **Huang W., Lu G.** Analysis of lateral instability of in-plane comb drive MEMS actuators based on a two-dimensional model // *Sensors and Actuators A*. 2004. **113**. P. 78–85.
49. **Pham P. H., Dao D. V., Sugiyama S.** A micro transportation system (MTS) with large movement of containers driven by electrostatic comb-drive actuators // *Journ. Micromech. Microeng.* 2007. **17**, N 10. P. 2125–2131.
50. **Lee K. B.** Non-contact electrostatic microactuator using slit structures: theory and a preliminary test // *Ibid.* N 11. P. 2186–2196.
51. **Grade J. D., Jerman H., Kenny T. W.** Design of large deflection electrostatic actuators // *Journ. Microelectromech. Syst.* 2003. **12**. P. 335–343.
52. **Lee K. B.** Closed-form expressions for pull-in parameters of two degree-of-freedom torsional microactuators // *Journ. Micromech. Microeng.* 2007. **17**. P. 1853–1862.
53. **Pham P. H., Dao D. V., Amaya S. et al.** Straight movement of micro containers based on ratchet mechanism and electrostatic comb-drive actuators // *Journ. Micromech. Microeng.* 2006. **16**. P. 2532–2538.
54. **Sun Y., Piyabongkarn D., Sezen A. et al.** A high-aspect-ratio two-axis electrostatic microactuator with extended travel range // *Sensors and Actuators A*. 2002. **102**. P. 49–60.
55. **Kostsov E. G., Dyatlov V. L.** Electrostatic microactuators on the basis of ferroelectric films // *Journ. Korean Phys. Soc.* 1998. **32**. P. S1755–S1756.
56. **Dyatlov V. L., Kostsov E. G.** Electromechanical energy converters of micromechanic devices on the basis of ferroelectric films // *Nuclear Inst. and Methods in Phys. Research A*. 1998. **405**. P. 511–513.
57. **Dyatlov V. L., Kostsov E. G., Baginsky I. L.** High-effective electromechanical energy conversion on the basis of thin ferroelectric films // *Ferroelectrics*. 2000. **241**. P. 99–106.
58. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** High-energy capacitance electrostatic micromotors // *Journ. Micromech. Microeng.* 2003. **13**. P. 190–200.
59. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** Electrostatic micromotor based on ferroelectric ceramics // *Journ. Micromech. Microeng.* 2004. **14**. P. 1569–1575.
60. **Kostsov E. G.** Ferroelectric-based electrostatic micromotors with nanometer gaps // *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectric and Frequency Control. Special Issue on Nanoscale Ferroelectric*. 2006. **53**, N 12. P. 2294–2299.
61. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** High energy-density MEMS based on thin ferroelectric layers // *Ferroelectrics*. 2007. **351**. P. 69–78.
62. **Kostsov E. G.** Electromechanical energy conversion in the nanometer gaps // *Proc. SPIE*. 2008. **7025**. P. 70251.
63. **Chen F., Brotz J., Arslan U. et al.** CMOS-MEMS resonant RF mixer-filters // *IEEE Inter. Conf. MEMS 2005*. **24**. P. 21–24.
64. **Jackson R. Jr., Ramadoss R.** A MEMS-based electrostatically tunable circular microstrip patch antenna // *Journ. Micromech. Microeng.* 2007. **17**. P. 1–8.
65. **Wong A., Nguyen C. T.-C.** Micromechanical mixer-filters // *Journ. Microelectromech. Syst.* 2004. **13**, N 1. P. 100.
66. **Pourkamali S., Abdolvand R., Ho G. K., Ayazi F.** Electrostatically coupled micromechanical beam filters // *Proc. of the MEMS'04*. 2004. P. 584–587.
67. **Fern'andez L. J., Wiegerink R. J., Flokstra J. et al.** A capacitive RF power sensor based on MEMS technology // *Journ. Micromech. Microeng.* 2006. **16**. P. 1099–1107.
68. **Rebeiz G. M., Muldavin J. B.** RF MEMS switches and switch circuits // *IEEE Microwave Mag.* 2001. **2**. P. 59–71.

69. **Bannon F., Clark J., Nguyen C.T.-C.** High-frequency micromechanical filters // IEEE Journ. Solid-State Circuits. 2000. **35**, N 4. P. 512–526.
70. **Tilmans H. A. C., De Raedt W., Beyne E.** MEMS for wireless communications: from RF-MEMS components to RF-MEMS-SiP // Journ. Micromech. Microeng. 2003. **13**. P. S139–S163.
71. **Rottenberg X., Brebels S., De Raedt W. et al.** RF-power: driver for electrostatic RF-MEMS devices // Journ. Micromech. Microeng. 2004. **14**. P. S43–S48.
72. **Elshurafa A. M., El-Masry E. I.** The effects of non-uniform nanoscale deflections on capacitance in RF MEMS parallel-plate variable capacitors // Journ. Micromech. Microeng. 2008. **18**. P. 045012.
73. **Kassem M., Mansour R.** A high-tuning-range MEMS variable capacitor using carrier beams // Can. Journ. Electron. Comp. Eng. 2006. **31**. P. 89–95.
74. **Bakri-Kassem M., Mansour R.** Two movable-plate nitride-loaded MEMS variable capacitor // IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. 2004. **52**. P. 831–837.
75. **Walker J. A.** Topical Review: The future of MEMS in telecommunications networks // Journ. Micromech. Microeng. 2000. **10**. P. R1–R7.
76. **Nguyen C. T.-C.** Transceiver front-end architectures using vibrating micromechanical signal processors // Dig. of papers Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Syst. 12–14 September 2001. P. 23–32.
77. **Brouwer D. M., De Jong B. R., Soemers H. M. Jr., Van Dijk J.** Sub-nanometer stable precision MEMS clamping mechanism maintaining clamp force unpowered for TEM application // Journ. Micromech. Microeng. 2006. **16**. P. S7–S12.
78. **Guo F. M., Zhu Z. Q., Long Y. F. et al.** Study on low voltage actuated MEMS RF capacitive switches // Sensors and Actuators A. 2003. **108**. P.128–133.
79. **Lucyszyn S.** Review of radio frequency microelectromechanical systems technology // IEE Proc. Sci. Meas. Technol. 2004. **151**, N 2.
80. **Yao J. J.** Topical Review: RF MEMS from a device perspective // Journ. Micromech. Microeng. 2000. **10**. P. R9–R38.
81. **Murakoshi T., Endo Y., Fukatsu K. et al.** Electrostatically levitated ring-shaped rotational-gyroaccelerometer // Jpn. Journ. Appl. Phys. I. 2003. **42**. P. 2468–2472.
82. **Gallacher B. J., Burdess J. S.** Dynamic analysis of a microelectromechanical systems resonant gyroscope excited using combination parametric resonance // Journ. Mechanical Eng. Sci. 2006. **220**, N C9. P. 1463–1479.
83. **Trusov A., Acar C., Shkel A. M.** Comparative analysis of distributed mass micromachined gyroscopes fabricated in SCS-SOI and EFAB // Proc. SPIE; Intern. Soc. Opt. Eng. 2006. P. 6174(II), P. 6142A.
84. **Gallacher B. J., Hedley J., Burdess J. S. et al.** Electrostatic correction of structural imperfections present in a microring gyroscope // Journ. Microelectromech. Syst. 2005. **14**, N 2. P. 221–234.
85. **Nistorica C., Zhang J., Padmini P. et al.** Integrated PNZT structures for MEMS gyroscope // Integrated Ferroelectrics. 2004. **63**. P. 49–54.
86. **Acar C., Shkel A. M.** Structural design and experimental characterization of torsional micromachined gyroscopes with non-resonant drive mode // Journ. Micromech. Microeng. 2004. **14**. P. 15–25.
87. **Jeong C., Seok S., Lee B. et al.** A study on resonant frequency and Q factor tunings for MEMS vibratory gyroscopes // Ibid. P. 1530–1536.
88. **Kim S., Lee B., Lee J., Chun K.** A gyroscope array with linked-beam structure // Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'2001). 2001. P. 30–33.

89. **Kawai H., Atsuchi K.-I., Tamura M., Ohwada K.** High-resolution microgyroscope using vibratory motion adjustment technology // *Sensors and Actuators A*. 2001. **90**. P. 153–159.
90. **Lee M. C., Kang S. J., Jung K. D. et al.** A high yield rate MEMS gyroscope with a packaged SiOG process // *Journ. Micromech. Microeng.* 2005. **15**. P. 2003–2010.
91. **Acar C., Shkel A. M.** Structurally decoupled micromachined gyroscopes with post-release capacitance enhancement // *Ibid.* P. 1092–1101.
92. **Mochida Y. et al.** A micromachined vibrating rate gyroscope with independent beams for drive and detection modes // *Sensors and Actuators A*. 2000. **80**. P. 170–178.
93. **Gallacher B. J., Burdess J. S., Harish K. M.** A control scheme for a MEMS electrostatic resonant gyroscope excited using combined parametric excitation and harmonic forcing // *Journ. Micromech. Microeng.* 2006. **16**. P. 320–331.
94. **Sung W.-T., Sung S., Lee J. G., Kang T.** Design and performance test of a MEMS vibratory gyroscope with a novel AGC force rebalance control // *Journ. Micromech. Microeng.* 2007. **17**. P. 1939–1948.
95. **Tsai N.-C., Sue C.-Y.** Fabrication and analysis of a micro-machined tri-axis gyroscope // *Journ. Micromech. Microeng.* 2008. **18**. P. 115014.
96. **Tsai N.-C., Wu B. Y.** Nonlinear dynamics and control for single-axis gyroscope systems // *Nonlinear Dyn.* 2008. **51**. P. 355–64.
97. **Tsai D. H., Fang W.** Design and simulation of a dual-axis sensing decoupled vibratory wheel gyroscope // *Sensors and Actuators A*. 2006. **126**. P. 33–40.
98. **Acar C., Shkel A. M.** Structural design and experimental characterization of torsional micromachined gyroscopes with non-resonant drive mode // *Journ. Micromech. Microeng.* 2004. **14**. P. 15–25.
99. **Tsai N.-C., Sue C. Y., Lin C. C.** Design and fabrication of a novel tri-axis micro-gyroscope // *IEEE Intern. Conf. Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. 2008. P. 457–461.
100. **Sung W.-T., Sung S., Lee J.-Y. et al.** Development of a lateral velocity-controlled MEMS vibratory gyroscope and its performance test // *Journ. Micromech. Microeng.* 2008. **18**. P. 055028.
101. **Lee J., Jeon S., Jung H. et al.** Vacuum packaged low noise gyroscope with sub mdeg/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$ resolution // *Proc. IEEE MEMS'2005*. Miami, USA, 2005. P. 359–362.
102. **Hwang K., Lee K., Park G. et al.** Robust design of a vibratory gyroscope with an unbalanced inner torsion gimbal using axiomatic design // *Journ. Micromech. Microeng.* 2003. **13**. P. 8–17.
103. **Acar C., Shkel A. M.** Inherently robust micromachined gyroscopes with 2-DOF sense-mode oscillator // *Journ. Microelectromech. Systems*. 2006. **15**. P. 380–387.
104. **Ayazi F., Najafi K.** A HARPSS polysilicon vibrating ring gyroscope // *Journ. Microelectromechanical Systems*. 2001. **10**. P. 169–179.
105. **Alper S. E., Akin T.** A single-crystalsilicon symmetrical and decoupled MEMS gyroscope on an insulating substrate // *Journ. Microelectromech. Syst.* 2005. **14**. P. 707–717.
106. **Arnaudov R., Angelov Y.** Earth rotation measurement with micromechanical yaw-rate gyro // *Meas. Sci. Technol.* 2005. **16**. P. 2300–2306.
107. **Varadan V. K., Suh W. D., Xavier P. B. et al.** Design and development of a MEMS-IDT gyroscope // *Smart Mater. Struct.* 2000. **9**. P. 898–905.
108. **Maenaka K., Kohara H., Nishimura M. et al.** Novel solid micro-gyroscope // *MEMS'2006*. Istanbul, Turkey, 22–26 January, 2006.
109. **Tay F. E. H., Liang Y. C., Logeeswaran V. J.** Design and fabrication of a micromachined resonant gyroscope // *Intern. Journ. Electronics*. 1999. **86**, N 10. P. 1179–1191.

110. **Acar C., Shkel A. M.** An approach for increasing drive-mode bandwidth of MEMS vibratory gyroscopes // *IEEE Journ. Microelectromech. Syst.* 2005. **14**, N 3. P. 520–528.
111. **Bae S. Y., Hayworth K. J., Yee K. Y. et al.** High performance MEMS micro-gyroscope // *Proc. SPIE.* 2002. **4755**. P. 316–324.
112. **De Dobbelaere P. et al.** Digital MEMS for optical switching // *IEEE Commun. Mag.* 2002. **40**, N 3. P. 88–95.
113. **Syms R. R. A., Moore D. F.** Optical MEMS for telecommunications // *Mater. Today.* 2002. Is. July/August. P. 20–29.
114. **Chu P. B., Lee S.-S., Park S.** MEMS: The path to large optical cross connects // *IEEE Commun. Mag.* 2002. **40**, N 3. P. 80–87.
115. **Evans J. W., Macintosh B., Poyneer L.** Demonstrating sub-nm closed loop MEMS flattening // *Opt. Express.* 2006. **14**, N 12. P. 5558–5570.
116. **Castracane J., Yang D., Madison S. et al.** Low power MOEMS components for active optical systems // *Journ. Microlithog. Microfab. Microsyst.* 2005. **4**. P. 4.
117. **Poyneer L. A., Bauman B., Macintosh B. A. et al.** Spatially filtered wave-front sensor for high-order adaptive optics // *Opt. Lett.* 2006. **31**. P. 293–295.
118. **Comtois J., Michalick A., Cowan W., Butler J.** Surface-micromachined polysilicon MOEMS for adaptive optics // *Sensors and Actuators.* 1999. **78**. P. 54–62.
119. **Nortona A., Evans J. W., Gavela D. et al.** Preliminary characterization of Boston micromachines' 4096-actuator deformable mirror // *Proc. SPIE.* 2009. **7209**. P. 72090I-1.
120. **Zhou Y., Bifano T.** Characterization of contour shapes achievable with a MEMS deformable Mirror, Manufacturing Engineering Department, Boston University // *SPIE.* 2006. **6113**. P. 123–130.
121. **Hishinuma Y., Yang E.-H. E.** Piezoelectric unimorph microactuator arrays for single-crystal silicon continuous-membrane deformable mirror // *Journ. Microelectromech. Syst.* 2006. **15**. P. 370–379.
122. **Wallace B. P., Hampton P. J., Bradley C. H., Conan R.** Evaluation of a MEMS deformable mirror for an adaptive optics test bench // *Opt. Express.* 2006. **14**, N 22. P. 10132–10138.
123. **Xu X.-H., Li B.-Q., Feng Y., Chu J.-R.** Design, fabrication and characterization of a bulk-PZT-actuated MEMS deformable mirror // *Journ. Micromech. Microeng.* 2007. **17**. P. 2439–2446.
124. **Doble N., Williams D. R.** The application of MEMS technology for adaptive optics in vision science // *IEEE Journ. Selected Topics in Quantum Electronics.* 2004. **10**, Is. 3. P. 629–635.
125. **Verheggen J., Panaman G., Khan-Raja W., Castracane J.** Optimization of diffractive MEMS for optical switching // *Proc. of the MEMS, NEMS, Sensing.* Boston: MA, 2006. Vol. 3. P. 401–404.
126. **Verheggen, J. P., Khan-Raja W., Castracane J.** Optimization of diffractive MEMS for optical switching // *Journ. Experimental Nanosci.* 2007. **2**, N 1–2. P. 87–100.
127. **Trisnadi J., Carlisle C., Monteverde R.** Overview and applications of grating light valve based optical write engines for high-speed digital imaging // *SPIE.* 2004. **5348**. P. 52–64.
128. **Poyneer L. A., Brian B., Macintosh B. et al.** Experimental demonstration of phase correction with a 32×32 microelectricalmechanical systems mirror and a spatially filtered wavefront sensor // *JOSA A.* 2004. **21**. P. 810–819.
129. **Lee J. H., Ko Y. C., Kong D. H. et al.** Design and fabrication of scanning mirror for laser display // *Sensors and Actuators A.* 2002. **96**. P. 223–230.
130. **Wu M. C., Solgaard O., Ford J. E.** Optical MEMS for light wave communication // *Journ. Light Wave Technol.* 2006. **24**. P. 4433–4454.

131. **Van Kessel P. F., Hornbeck L. J., Meier R. E., Douglass M. R.** A MEMS-based projection display // *Proc. IEEE*. 1998. **86**. P. 1687–1704.
132. **Field L. A., Burriesci D. L., Robrish P. R., Ruby R. C.** Micromachined 1×2 optical-fiber switch // *Sensors and Actuators A*. 1996. **53**. P. 311–315.
133. **Marxer C., Griss P., De Rooij N. F.** A variable optical attenuator based on silicon micromechanics // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 1999. **11**. P. 233–235.
134. **Li L., Uttamchandani D.** Design and evaluation of a MEMS optical chopper for fibre optic applications // *IEE Proc. Sci. Meas. Technol.* 2004. **151**. P. 77–84.
135. **Yano M., Yamagishi F., Tsuda T.** Optical MEMS for photonic switching — compact and stable optical crossconnect switches for simple, fast and flexible wavelength application in recent photonic networks // *IEEE Journ. Selected Topics in Quantum Electronics*. 2005. **11**. P. 383–394.
136. **Luo C., Goossen K. W.** Optical microelectromechanical system array for free-space retro communication // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2004. **16**. P. 2045–2047.
137. **Rabinovich W. S., Stievater T. H., Papanicolaou N. A. et al.** Demonstration of a microelectromechanical tunable asymmetric Fabry — Pérot quantum well modulator // *Appl. Phys. Lett.* 2003. **83**. P. 1923–1925.
138. **Bishop D. J., Giles C. R., Austin G. P.** The lucent lambda-router: MEMS technology of the future here today // *IEEE Commun. Mag.* 2002. **40**, N 3. P. 75–79.
139. **Suhonen M., Graeffe J., Sillanpa T. et al.** Scanning micromechanical mirror for fine-pointing units of inter satellite optical links // *Smart Mater. Struct.* 2001. **10**. P. 1204–1210.
140. **Djordjev K., Seung-June C., Sang-Jun C., Dapkus R. D.** Microdisk tunable resonant filters and switches // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2002. **14**. P. 828–830.
141. **Lee M. C. M., Wu M. C.** MEMS-Actuated microdisk resonators with variable power coupling ratios // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2005. **17**. P. 1034–1036.
142. **Lee M. C. M., Wu M. C.** Tunable coupling regimes of silicon microdisk resonators using MEMS actuators // *Opt. Express*. 2006. **14**, N 11. P. 4703.
143. **Lee A. P., McConaghy C. F., Sommargren G. et al.** Vertical-actuated electrostatic comb drive with in situ capacitive position correction for application in phase shifting diffraction interferometry // *Journ. Microelectromech. Syst.* 2003. **12**. P. 960–971.
144. **Van den Berg A., Wessling M.** Nanofluidics: Silicon for the perfect membrane // *NATURE*. 2007. **445**. P. 726.
145. **Woiias P.** Micropumps-past, progress and future prospects // *Sensors and Actuators B*. 2005. **105**. N 1. P. 28–38.
146. **Laser D. J., Santiago J. G.** A review of micropumps // *Journ. Micromech. Microeng.* 2004. **14**. N 6. P. 35–64.
147. **De Jong J., Lammertink R. G. H., Wessling M.** Membranes and microfluidics: a review // *Lab Chip*. 2006. **6**, N 9. P. 1125–1139.
148. **Sparks D., Smith R., Straayer M. et al.** Measurement of density and chemical concentration using a microfluidic chip // *Lab Chip*. 2003. **3**. P. 19–21.
149. **Adrega T., Chu V., Conde J. P.** Electrostatically actuated resonance of amorphous silicon microresonators in water // *Appl. Phys. Lett.* 2006. **89**. P. 143109.
150. **Collier J., Wroblewski D., Bifano T.** Development of a rapid-response flow-control system using MEMS microvalve arrays // *Journ. Microelectromech. Syst.* 2004. **13**, N 6. P. 912–922.
151. **Husband B., Bu M., Evans A. G. R., Melvin T.** Investigation for the operation of an integrated peristaltic micropump // *Journ. Micromech. Microeng.* 2004. **14**. P. S64–S69.
152. **Tesar V., Hung C.-H., Zimmerman W.** No-moving-part hybrid-synthetic jet actuator // *Sensors and Actuators A*. 2006. **125**, Is. 2. P. 159.

153. **Kim L. Y., Vahey M. D., Lee H.-Y., Voldman J.** Microfluidic arrays for logarithmically perfused embryonic stem cell culture // *Lab Chip*. 2006. **6**, N 3. P. 394–406.
154. **Raccurt O., Tardif F., D'Avitaya F. A., Vareine T.** Influence of liquid surface tension on stiction of SOI MEMS // *Journ. Micromech. Microeng.* 2004. **14**. P. 1083–1090.
155. **Hsiung S.-K., Chen C.-T., Lee G.-B.** Micro-droplet formation utilizing microfluidic flow focusing and controllable moving-wall chopping techniques // *Journ. Micromech. Microeng.* 2006. **16**. P. 2403–2410.
156. **Garstecki P., Gitlin I., Di Luzio W., Whitesides G. M.** Formation of monodisperse bubbles in a microfluidic flow-focusing device // *Appl. Phys. Lett.* 2004. **85**. P. 2649–2651.
157. **Tan Y. C., Cristini V., Lee A. P.** Monodispersed microfluidic droplet generation by shear focusing microfluidic device // *Sensors and Actuators B*. 2006. **114**. P. 350–356.
158. **Huang S.-B., Wu M.-H., Cui Z. F. et al.** A membrane-based serpentine-shape pneumatic micropump with pumping performance modulated by fluidic resistance // *Journ. Micromech. Microeng.* 2008. **18**. P. 045008.
159. **Koch M., Harris N., Evans A. et al.** A novel micromachined pump based on thick-film piezoelectric actuation // *Sensors and Actuators A*. 1998. **70**. P. 98–103.
160. **Nguyen N. T., Truong T. Q.** A fully polymeric micropump with piezoelectric actuator // *Sensors and Actuators B*. 2004. **97**. P. 137–143.
161. **Kan J. W., Yang Z. G., Peng T. J. et al.** Design and test of a high-performance piezoelectric micropump for drug delivery // *Sensors and Actuators A*. 2005. **121**. P. 156–161.
162. **Zhang T., Wang Q.-M.** Performance evaluation of a valveless micropump driven by a ring-type piezoelectric actuator // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*. 2006. **53**. P. 463–473.
163. **Cui J., He G. W., Qi D. W.** A constrained particle dynamics for continuum-particle hybrid method in micro- and nano-fluidics // *Acta Mechanica Sinica*. 2006. **22**, N 6. P. 503–508.
164. **Wu C. H., Yang R. J.** Improvements on the electrokinetic injection technique for microfluidic chips // *Electrophoresis*. 2006. **27**, N 24. P. 4970–4981.
165. **Chen C. T., Lee G. B.** Formation of microdroplets in liquids utilizing active pneumatic choppers on a microfluidic chip // *Journ. Microelectromech. Syst.* 2006. **15**, N 6. P. 1492–1498.
166. **Rajaraman S. et al.** Microfabrication technologies for a coupled three-dimensional micro-electrode, microfluidic array // *Journ. Micromech. Microeng.* 2007. **1**. P. 163–171.
167. **Fazal I., Louwerse M. C., Jansen H. V., Elwenspoek M. C.** Design, fabrication and characterization of a novel gas microvalve using micro- and fine-machining // *Journ. Micromech. Microeng.* 2006. **16**. P. 1207–1214.
168. **Lavrik N. V., Sepaniak M. J., Datskos P. G.** Cantilever transducers as a platform for chemical and biological sensors // *Rev. Sci. Instrum.* 2004. **75**. P. 2229–2253.
169. **Ernst H., Jachimowicz A., Urban G. A.** High resolution flow characterization in Bio-MEMS // *Sensors and Actuators A*. 2002. **100**. P. 54–62.
170. **Kim L., Rosenthal A., Sampattavanich S. et al.** BioMEMS for control of the stem cell microenvironment // *MEMS & BIO-MEMS MTL Annual Research Report*. 2004. P. 4–58.
171. **Savran C., Knudson S., Ellington A. D., Manalis S. R.** Micromechanical detection of proteins using aptamer-based receptor molecules // *Analytical Chemistry*. 2004. **76**. P. 3194–3198.
172. **Schurr M. O., Schostek S., Ho C.-N. et al.** Microtechnologies in medicine: An overview // *Minimally Invasive Therapy*. 2007. **16**, N 2. P. 76–86.
173. **Moghimi S. M., Hunter A. C., Murray J. C.** Nanomedicine: current status and future prospects // *FASEB Journ.* 2005. **19**. P. 311–330.

174. **Gupta A., Akin D., Bashir R.** Single virus particle mass detection using microresonators with nanoscale thickness // *Appl. Phys. Lett.* 2004. **84**. P. 1976–1978.
175. **Weibel D. B., Whitesides G. M.** Applications of microfluidics in chemical biology // *Current Opinion in Chemical Biology.* 2006. **10**, N 6. P. 584–591.
176. **Gunther A., Jensen K. F.** Multiphase microfluidics: from flow characteristics to chemical and materials synthesis // *Lab Chip.* 2006. **6**, N 12. P. 1487–1503.
177. **Sotiropoulou S., Chaniotakis N. A.** Carbon nanotube array-based biosensor // *Anal. Bioanal. Chem.* 2003. **375**. P. 103–105.
178. **Ilic B., Yang Y., Craighead H. G.** Virus detection using nanoelectromechanical devices // *Appl. Phys. Lett.* 2004. **85**, N 13. P. 2604–2606.
179. **Brueckner K., Cimalla V., Niebelschütz F. et al.** Strain- and pressure-dependent RF response of microelectromechanical resonators for sensing applications // *Journ. Micromech. Microeng.* 2007. **17**. P. 2016–2023.
180. **Battiston F. M., Ramseyer J. P., Lang H. P. et al.** A chemical sensor based on a microfabricated cantilever array with simultaneous resonance-frequency and bending readout // *Sensors and Actuators B.* 2001. **77**. P. 122–131.
181. **Sparks D., Trevino J., Massoud-Ansari S., Najafi N.** An all-glass chip-scale MEMS package with variable cavity pressure // *Journ. Micromech. Microeng.* 2006. **16**. P. 2488–2491.
182. **Zhang W., Turner K. L.** A mass sensor based on parametric resonance // *Solid-State Sensor, Actuator and Microsystems: Workshop Hilton Head Island, South Carolina, June 6–10, 2004.* P. 49–52.
183. **Zhang W., Turner K. L.** Application of parametric resonance amplification in a single-crystal silicon micro-oscillator based mass sensor // *Sensors and Actuators A.* 2005. **122**. P. 23–30.
184. **Ono T., Xinxin L., Miyashita H., Esashi M.** Mass sensing of adsorbed molecules in sub-picogram sample with ultrathin silicon resonator // *Rev. Sci. Instrum.* 2003. **74**. P. 1240–1243.
185. **Larsen K. P., Rasmussen A. A., Ravnkilde J. T. et al.** MEMS device for bending test: measurements of fatigue and creep of electroplated nickel // *Sensors and Actuators A.* 2003. **103**. P. 156–164.
186. **Li X. D., Bhushan B.** Fatigue studies of nanoscale structure for MEMS/NEMS applications using nanoindentation techniques // *Surface and Coatings Technol.* 2003. **163–164**. P. 521–526.
187. **Fadel L., Lochon F., Dufour I., Francois O.** Chemical sensing: millimeter size resonant microcantilever performance // *Journ. Micromech. Microeng.* 2004. **14**. P. S23–S30.
188. **Zhou J., Li P., Zhang S. et al.** Self-excited piezoelectric microcantilever for gas detection // *Microelectron. Eng.* 2003. **69**. P. 37–46.
189. **Jensenius H., Thaysen J., Rasmussen A. A. et al.** A microcantilever-based alcohol vapor sensor-application and response model // *Appl. Phys. Lett.* 2000. **76**. P. 2615–2617.
190. **Ko C.-T. et al.** A highly sensitive CMOS-MEMS capacitive tactile sensor // *MEMS'2006.* Istanbul, Turkey, 22–26 January, 2006.
191. **Pramanik C., Saha H.** Low pressure piezoresistive sensors for medical electronics applications // *Mater. and Manufacturing Proces.* 2006. **21**. P. 233–238.
192. **Zhou X., Huang Q.-A., Qin M., Zhou W.** A novel capacitive pressure sensor based on sandwich structures // *Journ. Microelectromech. Syst.* 2005. **14**, N 6. P. 1272–1282.
193. **Cheung R., Argyrakis P.** Microscale sensors based on silicon carbide and silicon // *Proc. IMechE.* 2008. Vol. 222, Pt. C. P. 19–26.
194. **Ikehara T., Lu J., Konno M. et al.** A high quality-factor silicon cantilever for a low detection-limit resonant mass sensor operated in air // *Journ. Micromech. Microeng.* 2007. **17**. P. 2491–2494.

195. **Beeby S. P., Tudor M. J., White N. M.** Energy harvesting vibration sources for microsystems applications // *Meas. Sci. Technol.* 2006. **17**. P. R175–R195.
196. **Stephen N. G.** On energy harvesting from ambient vibration // *Journ. Sound Vib.* 2006 **293**. P. 409–425.
197. **Richards C. D., Anderson M. J., Bahr D. F., Richards R. F.** Efficiency of energy conversion for devices containing a piezoelectric component // *Journ. Micromech. Microeng.* 2004. **14**. P. 717–721.
198. **Lu F., Lee H. P., Lim S. P.** Modeling and analysis of micropiezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications // *Smart Mater. Struct.* 2004. **13**. P. 57–63.
199. **Meninger S., Mur-Miranda J., Lang J. et al.** Vibration to electric energy conversion // *IEEE Trans. Very Large Scale Integration (VLSI) Syst.* 2001. **9**. P. 64–76.
200. **Chen C.-T., Islam R. A., Priya. S.** Electric energy generator, ultrasonics, ferroelectrics and frequency control // *IEEE Trans. on March.* 2006 **53**, Is. 3. P. 656–661.
201. **Mitcheson P. D., Reilly E. K., Toh T. et al.** Performance limits of the three MEMS inertial energy generator transduction types // *Journ. Micromech. Microeng.* 2007. **17**. P. S211–S216.
202. **Mitcheson P. D., Green T. C., Yeatman E. M., Holmes A. S.** Architectures for vibration-driven micropower generators // *Journ. Microelectromech. Syst.* 2004. **13**. P. 429–440.
203. **El-hami M., Glynn-Jones P., White N. M. et al.** Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator // *Sensors and Actuators A.* 2001. **92**. P. 335–342.
204. **Miyazaki M., Tanaka H., Ono G. et al.** Electric-energy generation using variable-capacitive resonator for power-free-LSI // *IEICE Trans. Electron.* 2004. **E87-C**. P. 549–555.
205. **Mitcheson P. D., Miao P., Stark B. H. et al.** MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation // *Sensors and Actuators A.* 2004. **115**. P. 523–529.
206. **White N. M., Glynn-Jones P., Beeby S. P.** A novel thick-film piezoelectric micro-generator // *Smart Mater. Struct.* 2001. **10**. P. 850–852.
207. **Guyomar D., Badel A., Lefeuvre E., Richard C.** Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 2005. **52**. P. 584–595.
208. **Du Toit N. E., Wardle B. L., Kim S.-G.** Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters // *Integrated Ferroelectrics.* 2005. **71**. P. 121–160.
209. **Mizuno M., Chetwynd D. G.** Investigation of a resonance microgenerator // *Journ. Micromech. Microeng.* 2003. **13**. P. 209–221.
210. **Roundy S., Wright P. K.** A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics // *Smart Mater. Struct.* 2004. **13**. P. 1131–1142.
211. **Roundy S., Wright P. K., Rabaey J.** A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes // *Comput. Commun.* 2003. **26**. P. 1131–1144.
212. **Багинский И. Л., Косцов Э. Г.** Анализ возможности создания микроэлектронного электростатического генератора энергии // *Автометрия.* 2002. № 1. С. 107–122.
213. **Багинский И. Л., Косцов Э. Г.** Микроэлектронные высокоэнергоемкие генераторы энергии // *Микросистемная техника.* 2002. № 6. С. 24–28.
214. **Драгунов В. П., Косцов Э. Г.** МЭМ электростатический генератор энергии // *Нано- и микросистемная техника.* 2007. № 11. С. 47–53.
215. **Ekinci K. L., Roukes M. L.** Nanoelectromechanical systems // *Rev. Sci. Instrum.* 2005. **76**. P. 1101.
216. **Craighead H. G.** Nanoelectromechanical systems // *Science.* 2000. **290**. P. 1532–1535.

217. **Hierold C.** From micro- to nanosystems: mechanical sensors go nano // *Journ. Micromech. Microeng.* 2004. **14**. P. S1–S11.
218. **Esashi M., Ono T.** From MEMS to nanomachine // *Journ. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. **38**. P. R223–R230.
219. **Truitt P. A., Hertzberg J. B., Huang C. C. et al.** Efficient and sensitive capacitive read-out of nanomechanical resonator arrays // *Nano Lett.* 2007. **7**, N 1.
220. **Yang Y. T., Callegari C., Feng X. L. et al.** Zeptogram-scale nanomechanical mass sensing // *Nano Lett.* 2006. **6**, N 4. P. 583–586.
221. **Ilic B., Craighead H. G., Krylov S. et al.** Attogram detection using nanoelectromechanical oscillators // *Journ. Appl. Phys.* 2004. **95**. P. 3694–3703.
222. **Ekinici K. L., Yang Y. T., Roukes M. L.** Ultimate limits to inertial mass sensing based upon nanoelectromechanical systems // *Ibid.* P. 2682–2689.
223. **Abadal G. et al.** Electromechanical model of a resonating nano-cantilever-based sensor for high-resolution and high-sensitivity mass detection // *Nanotechnology.* 2001. **12**. P. 100–104.
224. **Lavrik N. V., Datskos P. G.** Femtogram mass detection using photothermally actuated nanomechanical resonators // *Appl. Phys. Lett.* 2003. **82**. P. 2697–2699.
225. **Dharap P., Li Z., Nagarajaiah S., Barrera E. V.** Nanotube film based on single-wall carbon nanotubes for strain sensing // *Nanotechnology.* 2004. **15**. P. 379–382.
226. **Zhao Q., Frogley M. D., Wagner H. D.** Direction-sensitive strain-mapping with carbon nanotube sensors // *Composite Sci. Technol.* 2002. **62**. P. 147–150.
227. **Li M., Tang H. X., Roukes M. L.** Ultra-sensitive NEMS-based cantilevers for sensing, scanned probe and very high-frequency applications // *Nature Nanotechnology.* 2007. **2**. P. 114–120.
228. **Cleland A. N., Pophoristic M., Ferguson I.** Single crystal aluminum nitride nanomechanical resonators // *Appl. Phys. Lett.* 2001. **79**. P. 2070–2072.
229. **Wang X., Song J., Liu J., Wang Z. L.** Direct-current nanogenerator driven by ultrasonic waves // *Science.* 2007. **316**. P. 102–105.
230. **Gao Y., Wang Z. L.** Electrostatic potential in a bent piezoelectric nanowire. The fundamental theory of nanogenerator and nanopiezotronics // *Nano Lett.* 2007. **7**, N 8. P. 2494–2505.
231. **Cleland A. N., Roukes A. N.** Fabrication of high frequency nanometer scale mechanical resonators from bulk Si crystals // *Appl. Phys. Lett.* 1996. **69**. P. 2653–2655.
232. **Charlot B., Sun W., Yamashita K. et al.** Bistable nanowire for micromechanical memory // *Journ. Micromech. Microeng.* 2008. **18**. P. 045005 (7pp).
233. **Agachè V., Legrand B., Collard D. et al.** GHz silicon blade nano-electromechanical resonator featuring 20 nm gap lateral transducers // *IEEE.* 2005. N 241. P. 50.
234. **Wang Z. L., Song J.** Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays // *Science.* 2006. **312**. P. 242–246.
235. **Scott J. F., Morrison F. D., Miyake M., Zubko P.** Nano-ferroelectric materials and devices // *Ferroelectrics.* 2006. **336**. P. 237–245.
236. **Peano V., Thorwart M.** Nonlinear response of a driven vibrating nanobeam in the quantum regime // *New Journ. Physics.* 2006. **8**. P. 21.
237. **Kim H. C., Kim D. H., Chun K.** Photo-assisted electrochemical etching of a nano-gap trench with high aspect ratio for MEMS applications // *Journ. Micromech. Microeng.* 2006. **16**. P. 906–913.
238. **Hoshino K., Yamada K., Matsumoto K., Shimoyama I.** Creating a nano-sized light source by electrostatic trapping of nanoparticles in a nanogap // *Ibid.* P. 1285–1289.
239. **Sinha P. M., Valco G., Sharma S.** Nanoengineered device for drug delivery // *Appl. Nanotechnology.* 2004. **15**. P. S585–S589.

240. **Yu M.-F., Wagner G. J., Ruoff R. S., Dyer M. J.** Realization of parametric resonances in a nanowire mechanical system with nanomanipulation inside a scanning electron microscope // Phys. Rev. B. 2002. **66**. P. 073406.
241. **Ziegler K. J., Lyons D. M., Holmes J. D.** Bistable nanoelectromechanical devices // Appl. Phys. Lett. 2004. **84**. P. 4075–4076.
242. **Badzey R. L., Zolfagharkhany G., Gaidarzhy A., Mohanty P. A.** A controllable nanomechanical memory elements // Appl. Phys. Lett. 2004. **85**. P. 3587–3589.
243. **Davis Z. J., Abadal G., Kuhn O. et al.** Fabrication and characterization of nanoresonating devices for mass detection // Journ. Vac. Sci. Technol. B. 2000. **18**. P. 612.
244. **Hüttell A. K., Poot M., Witkamp B., Van der Zant H. S. J.** Nanoelectromechanics of suspended carbon nanotubes // New Journ. Physics. 2008. **10**. P. 095003.

Поступила в редакцию 6 апреля 2009 г.
