

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (Microelectromechanical systems)

Почему бы нам не сверлить отверстия, резать или спаивать, штамповать или формовать предметы на бесконечно малом уровне?

Ричард Фейнман.

«Там внизу много места». 1959 г.

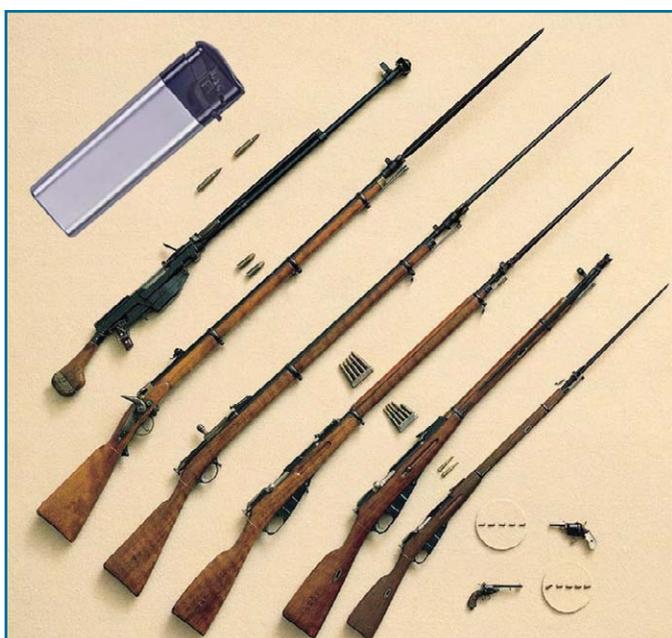


Рис. 1. Коллекция миниатюрных ружей и револьверов в Тульском музее оружия рядом с обычной зажигалкой

Если Вы загляните в Тульский музей оружия, то найдете в нем не только богатейшее собрание экспонатов на военную тему. Как известно, Тула – это родина не только самоваров, пряников и оружия. Здесь, если верить Н.С. Лескову, жил удивительный мастер Левша, сумевший подковать английскую блоху, здесь же сегодня живут мастера, создающие миниатюрные копии обычных и необычных предметов. Поэтому в музее Вас будет ждать сюрприз – коллекция действующего (!) микроскопического оружия, рассмотреть которую можно только под микроскопом. Вес самого маленького револьвера составляет всего 5,5 г. Поэтому кажется просто невероятным, что

его барабан способен вращаться, а сам револьвер вполне может стрелять крошечными пулями калибра 1,5 мм (рис. 1).

Но сегодня уже и эти экспонаты не удивят ученого: значительно более сложные микроразмерные механические устройства производятся в промышленных масштабах и окружают человека повсюду – мы просто не можем их увидеть! Причем особый интерес представляют не столько просто механические, сколь микроэлектро-механические системы или МЭМСы, способные на микроуровне преобразовывать механическую энергию в электрические или оптические сигналы и наоборот. Создание МЭМСов стало возможным только в последнее время, преимущественно благодаря стремительному развитию полупроводниковых технологий.

В конце 50-х годов прошлого XX в. известный физик Ричард Фейнман публично пообещал 1000 долларов (немалая по тем временам сумма) тому, кто создаст электрический мотор размером менее 1/64 дюйма (примерно 0,4 мм). Вызов принял молодой ученый Уильям Маклеллан, который вручную собрал требуемое устройство с помощью пинцета и оптического микроскопа. Сейчас микромотор Маклеллана можно увидеть в музее Калифорнийского технологического института. Интерес к микроэлектромеханическим системам постепенно охватывал все больше университетов и компаний, и уже к середине 80-х годов прошлого века успехи в области разработки МЭМС привели к созданию первых коммерческих продуктов на их основе.

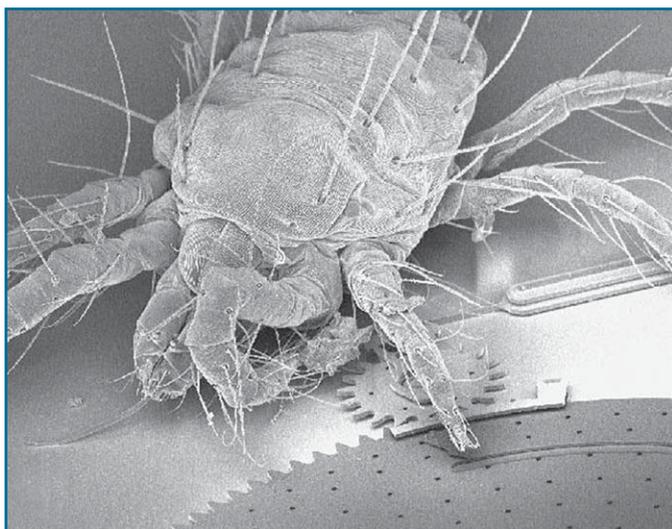


Рис. 2. Почти невидимый невооруженным глазом клещ с удивлением взирает на микроскопические шестеренки, изготовленные в METU (Турция)

Как правило, к МЭМС относят механические устройства размером от миллиметра до микрометра (рис. 2). Важно отметить, что на таком масштабе обычные законы макромеханики не всегда применимы. Поскольку отношение поверхности к объему для МЭМС на порядки больше, чем для макроскопических механических устройств, особое значение приобретают поверхностные эффекты, связанные с трением, электростатикой и смачиваемостью.

Основным материалом для изготовления МЭМС является кремний, что связано с его хорошими механическими свойствами и воспроизводимой технологией структурирования методом литографии, разработанной для создания современных интегральных схем и изделий *нанозлектроники*. Все это позволяет интегрировать МЭМС с уже существующими электронными компонентами. В то же время, несмотря на массовое производство последних, монокристаллический кремний остается весьма дорогим материалом, поэтому МЭМС нередко изготавливают на основе полимеров. Иногда для производства МЭМС используют и металлы (золото, никель, алюминий, хром, титан, вольфрам и другие). Как правило, производство МЭМС оказывается дешевле традиционной сборочной технологии, применяемой при создании макроскопических механических устройств, поскольку при создании МЭМС расходуется меньше материала, а

промышленное производство МЭМС является параллельным процессом, при котором за один производственный цикл на одной кремниевой пластине можно произвести сразу сотни готовых устройств. Кроме того, при создании сложных устройств, состоящих из множества компонентов, МЭМС-технология позволяет повысить надежность (поскольку все компоненты интегрированы в одной плате) и эффективность (т.к. компоненты расходуют мало энергии вследствие своего микроскопического размера и близкого расположения элементов).

Чрезвычайно малый размер позволяет использовать МЭМС в различных миниатюрных устройствах, начиная от механических часов и заканчивая имплантатами для человека. Можно выделить несколько применений МЭМС, получивших наиболее широкое распространение.

Акселерометры. Пожалуй, наиболее коммерчески успешными устройствами на основе МЭМС в настоящее время являются миниатюрные устройства для измерения ускорений. В частности, их широко используют в устройствах, контролирующих раскрытие подушек безопасности в автомобилях при авариях.

Микрозеркала. Устройства, использующие системы подвижных зеркал шириной всего 10 мкм, предложила компания Texas Instruments. Угол наклона каждого зеркала независимо управляется МЭМС-устройством, благодаря чему можно либо отражать, либо блокировать свет. Подобные системы используются в проекторах для графических презентаций. В свою очередь, благодаря совмещению акселерометров на основе МЭМС для регистрации внешних вибраций с МЭМС-микрозеркалами для коррекции лазерного луча, компания Xerox создала лазерные принтеры с чрезвычайно высоким разрешением печати.

Микрокапиллярные устройства. Кремниевые чипы с микроскопическими каналами могут быть использованы для адресной *in vivo* доставки контролируемых количеств лекарственных препаратов. В частности, специально для больных сахарным диабетом было разработано интегрированное МЭМС-устройство, объединяющее сенсор на глюкозу и диспергатор инсулина. Микрокапиллярные устройства на основе МЭМС

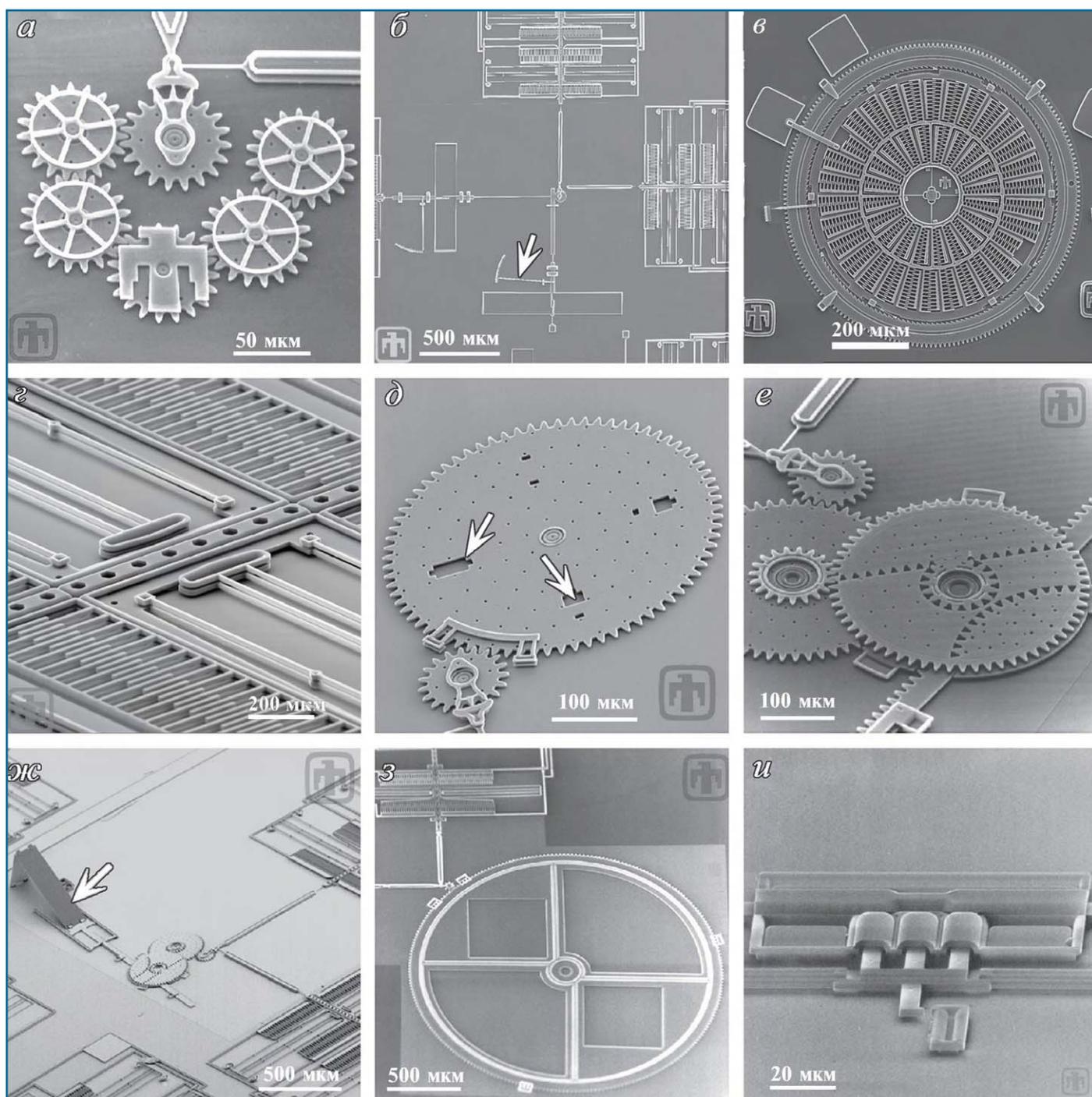


Рис. 3. Устройства на основе МЭМС: а – подвижное соединение микрошестеренок; б – микродинамометр, позволяющий измерять как тангенциальные, так и нормальные силы, а также оценивать микротрение. Подвижный стержень и дуговая шкала отмечены стрелкой; в – микроактуатор; г – приводной микромеханизм; д – оптический переключатель. Зубчатый кремниевый диск может быть механически выставлен в 4 положения, условно соответствующих сигналам (0,0), (1,0), (0,1) и (1,1) (два положения отмечены стрелками); информация считывается неподвижным сфокусированным лазерным лучом; е – передаточное микроустройство, преобразующее вращательное движение в поступательное; ж – подвижное кремниевое микрозеркало (показано стрелкой), которое может изменять угол наклона за счет поступательного движения поршня, приводимого в движение передаточным устройством (е); з – оптический затвор; и – трехцилиндровый паровой двигатель: вода внутри каждого цилиндра нагревается электрическим током, и образовавшийся пар выталкивает поршень, при охлаждении жидкости поршень втягивается обратно в цилиндр под действием капиллярных сил. Адаптировано на основе микрофотографий с сайта Sandia National Laboratories (<http://www.mems.sandia.gov>)

могут использоваться в струйных принтерах для нанесения чернил на бумагу.

Биомедицинские имплантаты. Недавно были созданы кремниевые МЭМС-устройства, содержащие звуковой сенсор и микропроцессор, который раскладывает звуковые волны на Фурье-гармоники. Устройство имплантируется непосредственно в человеческое ухо, после чего полученные Фурье-компоненты напрямую передаются слуховому нерву, благодаря чему глухие люди обретают возможность слышать. В настоящее время разрабатываются аналогичные устройства для восстановления зрения. Как ожидается, рынок биомедицинских имплантатов на основе МЭМС в ближайшее время будет стремительно расти.

Помимо перечисленных устройств, на основе МЭМС созданы оптические переключатели и затворы, сенсоры напряжений и давления, гироскопы и даже вибросенситивные джойстики в новых игровых приставках NiNtendo. Размер МЭМС уменьшается от года к году, открывая новые перспективы для их использования, и лишь наше воображение способно подсказать нам, какие еще удивительные МЭМС-устройства появятся на свет в ближайшем будущем (рис. 3). Уже сегодня множество элементов конструкции МЭМС лежит в нанодиапазоне, открывая тем самым новую эру микросистемотехники – эру *на-
ноэлектромеханических систем* и *наноактюаторов*.

Литература:

1. Poole C.P., Owens F.J. Introduction to Nanotechnology Wiley-Interscience. 2003. P. 400.
2. <http://www.mems.sandia.gov>