

# Компоненты микросистемной техники и устройства на их основе.

## Актуаторы

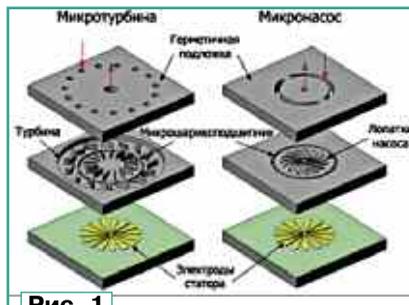
**Н. НЕЧАЕВА, канд. техн. наук, г. Москва**

**А**ктуатор, или актюатор (от англ. *actuator*), — исполнительное устройство (микропривод) или его активный элемент, преобразующий электрическую, магнитную, тепловую или химическую энергию в механическую, что приводит к выполнению определённых действий, например, вращению или линейному перемещению.

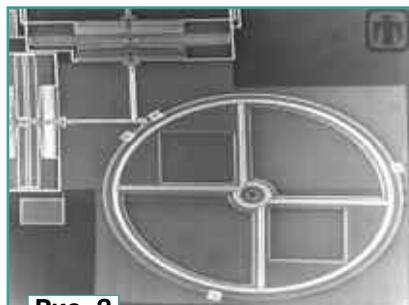
Часть МСТ-актуаторов копируют принцип действия и в какой-то мере конструкцию своих "старших братьев", но такие устройства создаются в основном не для практического применения, а для демонстрации достижений технологии. Примером может служить паровой двигатель, разработанный фирмой Sandia National Laboratories [1]. Более перспективны для практического применения микротурбины и микронасосы, конструкция которых показана на **рис. 1**. Они разработаны в Массачусетском технологическом институте. Размеры турбины относительно велики — несколько миллиметров, но она отличается большой удельной энергоёмкостью на единицу массы — в перспективе может достигнуть 1,2...1,5 кВт·ч/кг.

Оптический затвор [1], разработанный упомянутой ранее фирмой Sandia National Laboratories, состоит из трёх частей (**рис. 2**): самого затвора (большое колесо на фотографии), микродвигателя и трансмиссии. Двигатель состоит из двух расположенных перпендикулярно друг к другу электростатических актуаторов. Каждый из них может вращать шестерню только в одном направлении. Совместными усилиями они обеспечивают двунаправленное вращательное движение, которое с помощью маленькой шестерни передаётся на большую, окантовывающую затвор. Понятно, что быстродействие такого устройства невелико.

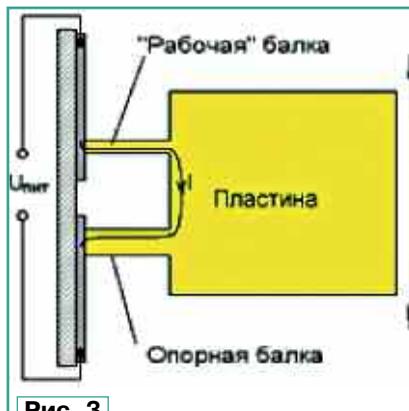
Объём традиционного теплового двигателя, рабочее тело которого представляет собой жидкость или газ, можно довести примерно до  $10 \times 7 \times 3$  мкм, но дальнейшее уменьшение размеров даётся очень тяжело. Зная это, инженеры нидерландской компании NXP Semiconductors предложили иной принцип работы: в их версии двигатель твердотельный и изготовлен из кристаллического кремния [2]. Его работа основана на пьезорезистивном эффекте. Конструкция показана на **рис. 3**, он состоит из трёх основных частей: "массивной" пластины размерами  $60 \times 12,5 \times 1,5$  мкм и двух выступающих балок длиной 800 нм. Первая из них — "рабочая" шириной 280 нм, а вторая — опорная шириной 3 мкм.



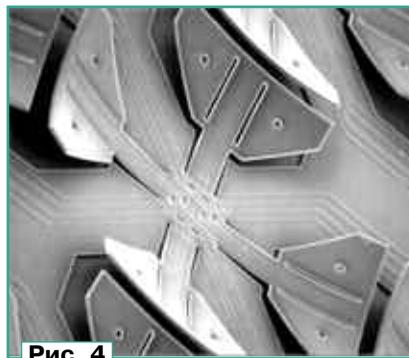
**Рис. 1**



**Рис. 2**



**Рис. 3**



**Рис. 4**

Для старта двигателя необходимо через балки пропустить постоянный ток немногом более 1 мА. После этого свободный конец пластины начинает двигаться вверх и вниз, что вызвано деформированием "рабочей" балки и изменением её сопротивления и температуры. Когда она сжимается (конец пластины перемещается вверх), то начинает разогреваться сильнее и её размеры увеличиваются. В результате пластина смещается вниз, балка увеличивается в размерах и её температура уменьшается. Охлаждение снова вызывает изменение размеров, и цикл повторяется. Экспериментальный образец двигателя работал на частоте около 1,25 МГц. Конструкция двигателя позволяет использовать его и как датчик, поскольку рабочая частота зависит от массы пластины. В этом случае его питают от источника тока, а переменный сигнал снимают с "рабочей" балки.

Транспортёр, состоящий из массива микроскопических "ресничек" (**рис. 4**), разработан в Вашингтонском университете (США) [1]. "Реснички" упругие и в "выключенном" состоянии отогнуты. Чтобы притянуть их к основанию, используются электростатические силы. Каждый элемент может занимать только два устойчивых положения — верхнее и нижнее, но вследствие их совместного действия оказывается возможным перемещение предметов по поверхности массива. Если снабдить такими актуаторами нижнюю часть объекта, получится платформа, которая сможет перемещать по гладкой поверхности груз, превышающий собственную массу в семь раз.

В Токийском университете для реализации транспортёра использовали совсем другой метод: перемещение микрообъектов с помощью регулируемого потока воздуха. Преимущество состоит в том, что он бесконтактный и позволяет свести к минимуму вероятность повреждения поверхности перемещаемого объекта. В таком транспортёре создан массив отверстий, размеры которых не превышают 200 мкм. С нижней стороны каждой из них установлена заглушка. Электростатическими силами её можно сдвигать в одну или другую сторону. Поток воздуха при этом направляется на перемещаемый объект под углом и "сдувает" его в нужном направлении.

Современные струйные принтеры оперируют с каплями краски объёмом около пиколитра — это шарик диаметром около 13 мкм. В одном кубическом миллиметре их можно разместить около десяти тысяч. Капли чернил на бумаге показаны на **рис. 5**. Для того чтобы сформировать столь малый объём жидкости и управлять им, требуется миниатюрная техника, в частности, элементы МСТ [3]. Печатающая головка представляет собой массив из множества микроотверстий, под которыми размещены миниатюрные полости, чернила туда поступают из основного резервуара картриджа.

Сила поверхностного натяжения не даёт краске просто так выливаться через отверстия, поскольку их диаметр слишком мал (**рис. 6**). Поэтому её

необходимо выдавить принудительно, и для этого существуют несколько способов. Компания Epson в своих струйных принтерах применяет пьезоэлементы. При подаче напряжения они деформируются и толкают мембрану, а она выталкивает краску через отверстие. Более распространённый метод, который используют компании Hewlett-Packard, Canon и Lexmark, — термоструйная печать. В полостях с чернилами размещены нагревательные элементы, которые очень быстро нагреваются до температуры кипения и они выплёскиваются из полости. Но струйная печать может применяться и в технологических целях, например, для изготовления МСТ-элементов или их монтажа. Если применять не обычные чернила, а растворы различных веществ, можно "печатать" требуемые структуры или проводить "пайку" микроразъемов (рис. 7).

В DLP-проекторах (Digital Light Processing) заложена технология цифровой обработки света, разработанная корпорацией Texas Instruments. Основа этой технологии — новый тип формирователя изображения на основе МСТ-элементов. В 1987 г. Ларри Хорнбек (Larry J. Hornbeck) изобрёл цифровое мультисеральное устройство, названное DMD (Digital Micromirror Device), которое, в отличие от микромеханических деформируемых зеркальных устройств, состояло из матрицы жёстких зеркал, имеющих всего два устойчивых положения [3]. DMD-матрица (рис. 8) представляет собой массив микрорезеркал, число которых определяет разрешение проектора, например, для разрешения 1920×1080 их должно быть более двух миллионов. Каждое микрорезеркало — алюминиевая пластина размерами 10×10 мкм (рис. 9), размещённая на площадке, которая закреплена на тонкой и гибкой полоске — подвесе, натянутом между опорами. В двух других углах, не занятых опорами, расположены электроды, которые электростатическими силами притягивают один из краёв зеркала. Таким образом, оно может наклоняться в одну или другую сторону на угол примерно 12 градусов.

В одном из этих крайних положений микрорезеркало отражает падающий на него свет в сторону линзы и затем на экран. В другом положении оно направляет световой поток в сторону — на теплоотвод. В первом случае на экране получается белая точка, во втором — чёрная, из чёрных и белых точек формируется изображение. Для изменения яркости свет "отмеряют" механически, для чего каждое микрорезеркало "мигает" с большой частотой. В результате удалось получить 1024 градации серого. А для получения цветного изображения применяют вращающиеся светофильтры с несколькими разноцветными секторами. Поскольку "всё познаётся в сравнении", на рис. 10 показано острое швейной иглы на фоне DMD-матрицы.

В устройствах МСТ широко применяют так называемый кантилевер (англ. cantilever — кронштейн, консоль) — устойчивее название наиболее распространённой конструкции микромеханического зонда в сканирующем атомно-

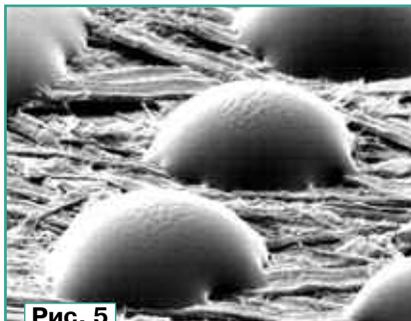


Рис. 5

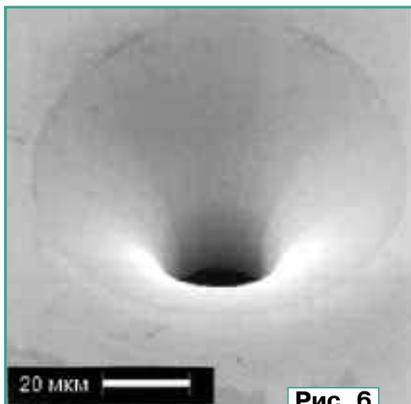


Рис. 6

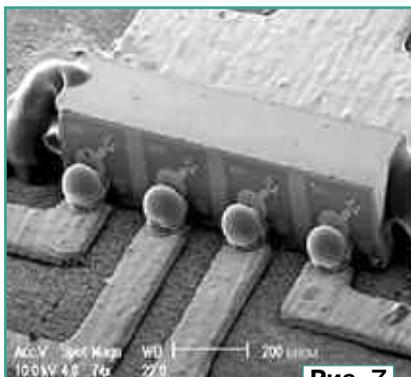


Рис. 7

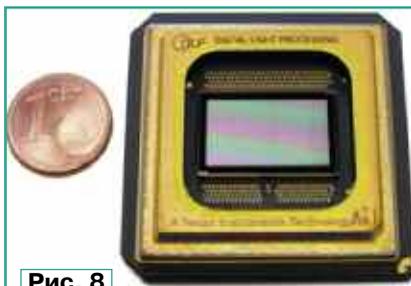


Рис. 8

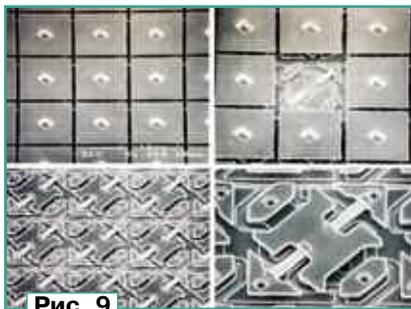


Рис. 9

силовом микроскопе. Кантилевер представляет собой гибкую пластину, закреплённую с одной стороны. На его основе компания Cavendish Kinetics разработала технологию хранения информации, названную Nanomesh. Принцип работы одной ячейки памяти поясняет рис. 11 [4]. В исходном состоянии пластина кантилевера расположена над контактной площадкой (рис. 11,а). Если между пластиной и контактной площадкой создать разность потенциалов, пластина изогнётся и коснётся поверхности площадки (рис. 11,б), в результате чего электрическое сопротивление между ними уменьшится практически до нуля. После снятия напряжения пластина в исходное положение не возвращается (рис. 11,в). Так осуществляются запись информации и её хранение.

Для "выпрямления" пластины кантилевера необходима дополнительная энергия, поэтому для "стирания" информации достаточно над пластиной установить дополнительный электрод. Если подать на него напряжение, контакт разомкнётся (рис. 11,г). Поэтому запоминающие устройства Cavendish Kinetics могут выпускаться в двух вариантах: с однократной записью и с перезаписью. Действующие прототипы были созданы по 0,35 мкм технологии, но в дальнейшем планируется существенно уменьшить размеры ячейки. Преимущества нового типа памяти — экономичность и возможность работы при температуре 200 °С, а число циклов перезаписи может достигать двадцати миллионов.

Компания IBM продемонстрировала накопитель информации, который обеспечивает плотность записи, превышающую 19,2 Гбайт на 1 см<sup>2</sup> [4]. Это устройство назвали Millipede (многоножка), поскольку у него тысячи очень мелких кремниевых шипов, которые могут "прошивать" рисунок из отдельных битов в тонкой полимерной плёнке. Принцип работы Millipede напоминает почти забытые перфокарты. Ключевым элементом служит массив V-образных кремниевых кронштейнов, на конце каждого из которых находится миниатюрная игла. Данные записываются на носитель, представляющий собой тонкий слой полимерного материала на кремниевой подложке.

Наконечник каждого кронштейна с размещённой на нём иглой одновременно служит зоной повышенного сопротивления. При пропускании импульса тока игла разогревается до температуры, превышающей температуру плавления полимера, и "выплавляет" в нём воронку диаметром около 10 нм. Когда игла остывает, полимер затвердевает. Чтобы считать данные, измеряют сопротивление наконечника. Для этого его также разогревают, но до меньшей температуры, чтобы полимер не размягчился. Поверхность носителя сканируют, и при попадании иглы в воронку отвод тепла от неё возрастает, температура наконечника уменьшается, а его сопротивление изменяется, что и фиксируется как бит информации. По заявлению специалистов IBM, на сегодняшний день им удалось достичь долговеч-

ности носителя, превышающей 100 000 циклов перезаписи.

Очень перспективно применение технологий МСТ в дисплеях для мобильных устройств, таких как электронные книги и планшетные компьютеры. Компания Qualcomm MEMS Technologies наладила выпуск 5,7-дюймового цветного дисплея Mirasol, а также панелей других размеров [5]. В этих устройствах применена технология IMOD Display, ключевым элементом которой является интерферометрический модулятор — Interferometric Modulator (IMOD). Он состоит из полупрозрачной плёнки, которая нанесена на стеклянную подложку и может частично отражать и частично пропускать свет, и гибкой металлической мембраны.

Мембрана может находиться в двух устойчивых состояниях: в первом — между ней и плёнкой есть воздушный зазор, во втором — нет. Переход из одного состояния в другое осуществляется электростатическими силами в результате приложения внешнего напряжения, причём после его отключения мембрана сохраняет своё положение. Меняя полярность приложенного напряжения, изменяют состояние мембраны. Когда воздушный зазор есть, световые волны, отразившиеся от плёнки, интерферируют с волнами, прошедшими сквозь неё и отразившимися от мембраны, в результате чего выделяется излучение определённого цвета. Полностью закрытый пиксель кажется чёрным.

В природе такое явление можно наблюдать в виде радужных цветковых пятен на мыльном пузыре, на крыльях некоторых насекомых, например, бабочек или на перьях павлина. Если же зазор отсутствует, то никакой интерференции не происходит. Изменяя его длину, можно получить три основных цвета: при наибольшей — красный, при средней — зелёный и при наименьшей — синий. Размеры одного интерференционного модулятора — десятки микрон. Один пиксел в таком дисплее состоит из трёх субпикселей: красного, зелёного и синего, каждый из которых образован несколькими рядами модуляторов.

Преимущества таких дисплеев (рис. 12) — отсутствие источников подсветки и светофильтров, а при статичном изображении потребление энергии практически отсутствует. Именно поэтому со временем они не должны утратить яркость и цветовую насыщенность, а при ярком солнечном свете не "слепнут", а наоборот, изображение видно лучше, чем при слабом освещении.

Южнокорейская компания Samsung Electronics разработала механический оптический затвор для компактных фотоаппаратов и мобильных телефонов [6]. С его помощью планируется существенно повысить качество цифровых камер, встраиваемых в мобильные телефоны, и продолжить гонку по наращиванию разрешения всех мобильных фотокамер. Потребность в механическом затворе обусловлена тем, что с увеличением разрешения пропорционально растёт время передачи одного кадра. Поэтому качественные снимки быстро движущихся объектов без оптического затвора сделать затруднительно.

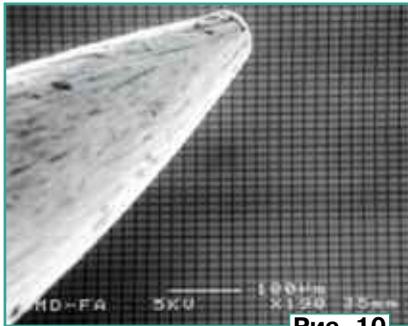


Рис. 10

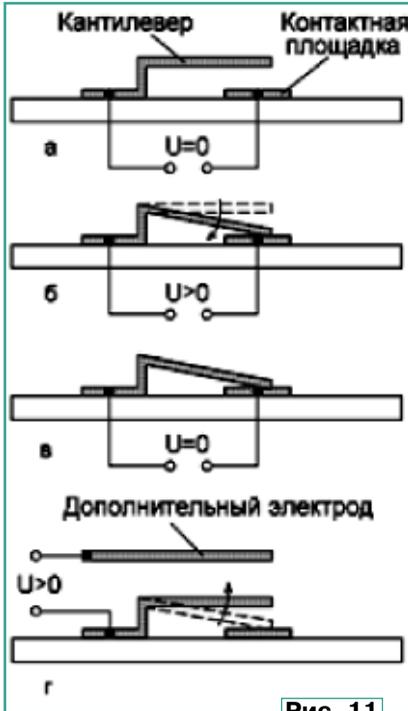


Рис. 11



Рис. 12



Рис. 13

Диаметр разработанного затвора — 2,2 мм. На стеклянной подложке размещён прозрачный электрод, а на него наложена экранирующая блenda — 36 элементов, имеющих форму сектора круга с углом 10 градусов. Располагаются вплотную друг к другу, они составляют полный круг (рис. 13) и соединены с общим круговым электродом. При отсутствии напряжения между электродами все 36 элементов свернуты и, соответственно, затвор открыт. Когда поступает напряжение около 30 В, элементы распрямляются, приводя затвор в закрытое состояние. Способность элементов сворачиваться достигнута применением двухслойной структуры (алюминий и нитрид кремния), в которой в электрическом поле возникают механические напряжения. Несмотря на наличие действующих макетов, информации о серийном производстве этих устройств пока нет.

Об МСТ-радиоэлементах, применяемых в телекоммуникационной аппаратуре, будет рассказано в третьей, заключительной статье.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дрожжин А. MEMS: микроэлектромеханические системы, часть 3. — <<http://www.3dnews.ru/editorial/MEMS-microelectromechanicalsystems-Part-3>>.
2. Cartwright J. Heat engine may be world's smallest. — <<http://physicsworld.com/cws/article/news/2011/jan/16/heat-engine-may-be-worlds-smallest>>.
3. Дрожжин А. MEMS: микроэлектромеханические системы, часть 2. — <<http://www.3dnews.ru/editorial/mems-mikroelektromehicheskie-sistemi-chast-2>>.
4. Борзенко А. Технология MEMS. — <<http://www.bytemag.ru/articles/detail.php?ID=6756>>.
5. Qualcomm MEMS Technologies. — <<http://www.qualcomm.com/about/businesses/qmt>>.
6. Samsung разработала компактный MEMS-затвор для мобильных фотокамер. — <<http://allnokia.ru/news/31797/>>.

РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ  
ЖУРНАЛА "РАДИО"

**Предлагаем размещение рекламы на страницах журнала "Радио".**

**Приглашаем к сотрудничеству рекламные агентства. С условиями размещения рекламы вы можете ознакомиться на нашем сайте <[www.radio.ru](http://www.radio.ru)>.**

**Стоимость модульной рекламы можно определить, умножив полное число символов в объявлении (включая знаки препинания и пробелы) на коэффициент 3.**

**Вот пример для объявления в 257 символов:**

**257 × 3 = 771 руб.**

**Эта сумма и подлежит оплате.**