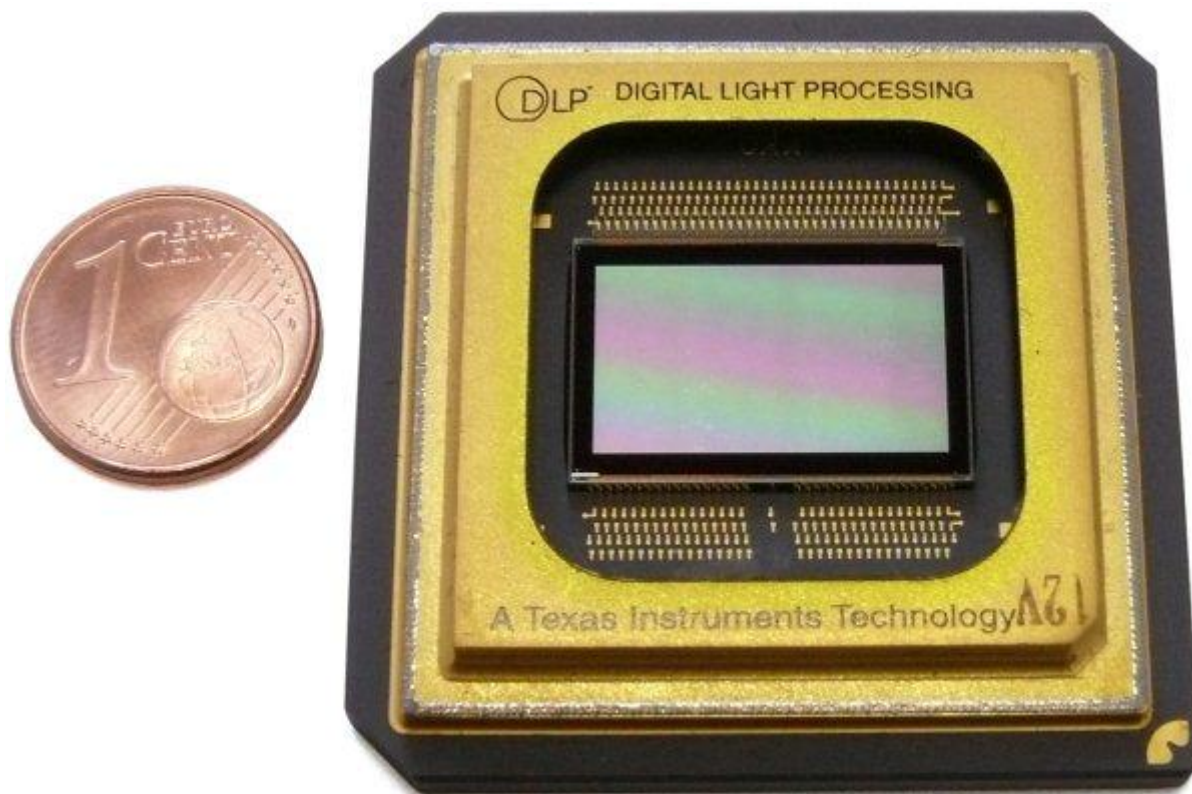


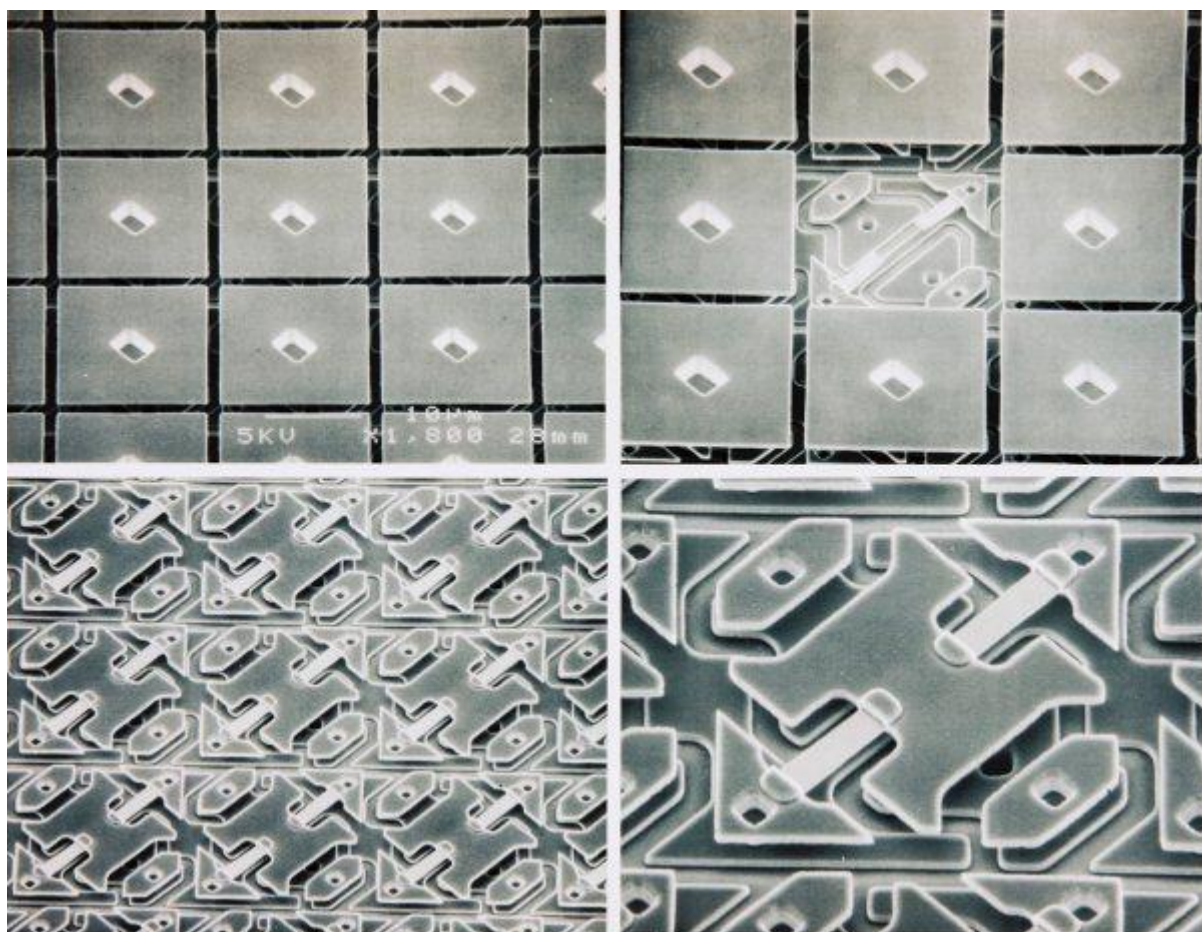
В первой части рассказа о MEMS мы разобрали несколько примеров микроэлектромеханических сенсоров – устройств, преобразующих механическое воздействие в электрические импульсы. Теперь настало время обсудить MEMS-актуаторы – системы, которые превращают информацию в движение.

Одни из самых ярких представителей устройств с MEMS-актуаторами – DLP-проекторы (DLP – Digital Light Processing). В основе этих проекторов лежит относительно крупная – по общему размеру готового чипа – микроэлектромеханическая система под названием DMD (Digital Micromirror Device, цифровое микрозеркальное устройство). Это эксклюзивная разработка одного из гигантов полупроводниковой индустрии, компании Texas Instruments.



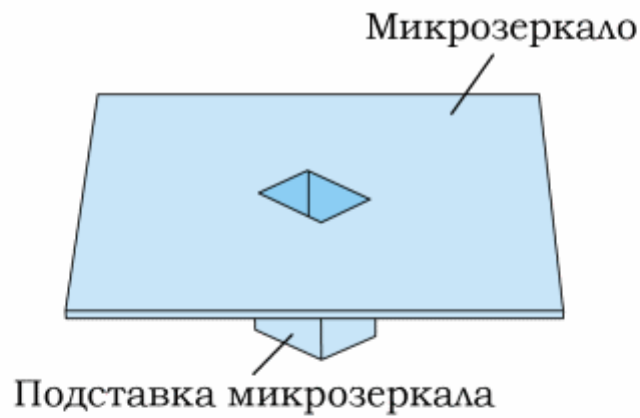
*DMD-чип в сборе. Сравнительно с другими MEMS, устройство достаточно крупное*

DMD-чип представляет собой матрицу микрозеркал, количество «боевых единиц» в которой равно разрешению итогового устройства. Скажем, для разрешения 1920x1080 – чуть больше 2 миллионов. Каждое микрозеркало – крошечная алюминиевая пластинка размером порядка 0,00001 на 0,00001 метра. Или, выражаясь в более удобных для микромира величинах – 10x10 микрон.

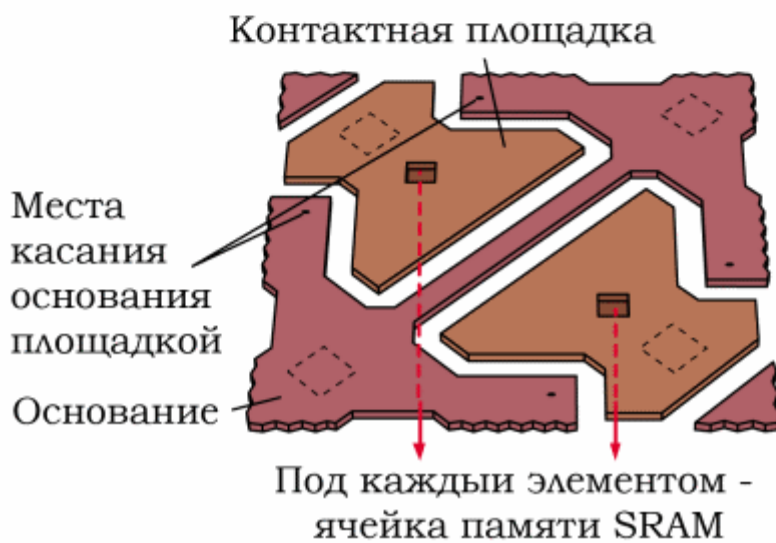
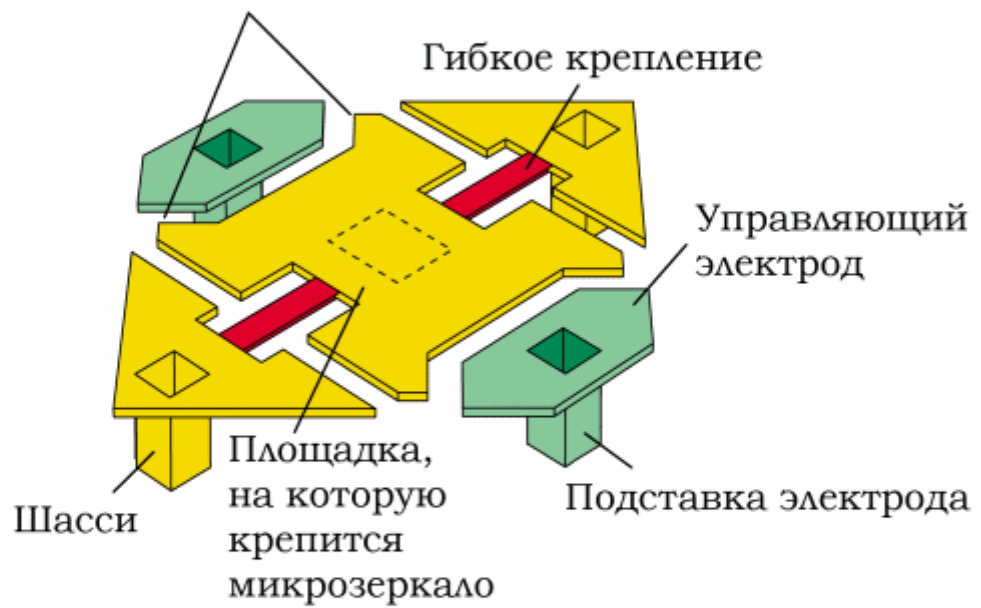


*Сами микрозеркала чрезвычайно миниатюрны. На фото изображена одна из старых матриц с размером ячейки 16x16 микрон. В более новых DMD-чипах зеркала еще меньше*

Зеркало покоится на сравнительно массивной площадке, которая прикреплена к более тонкой и более гибкой, чем прочие детали системы, полоске – подвесу – натянутой между опорами. В двух других углах основания, не занятых опорами, расположены электроды, которые за счет кулоновской силы могут притягивать один из краев зеркала. Таким образом, зеркало может наклоняться в одну и в другую сторону: не слишком сильно, обычно угол поворота составляет 12 градусов.

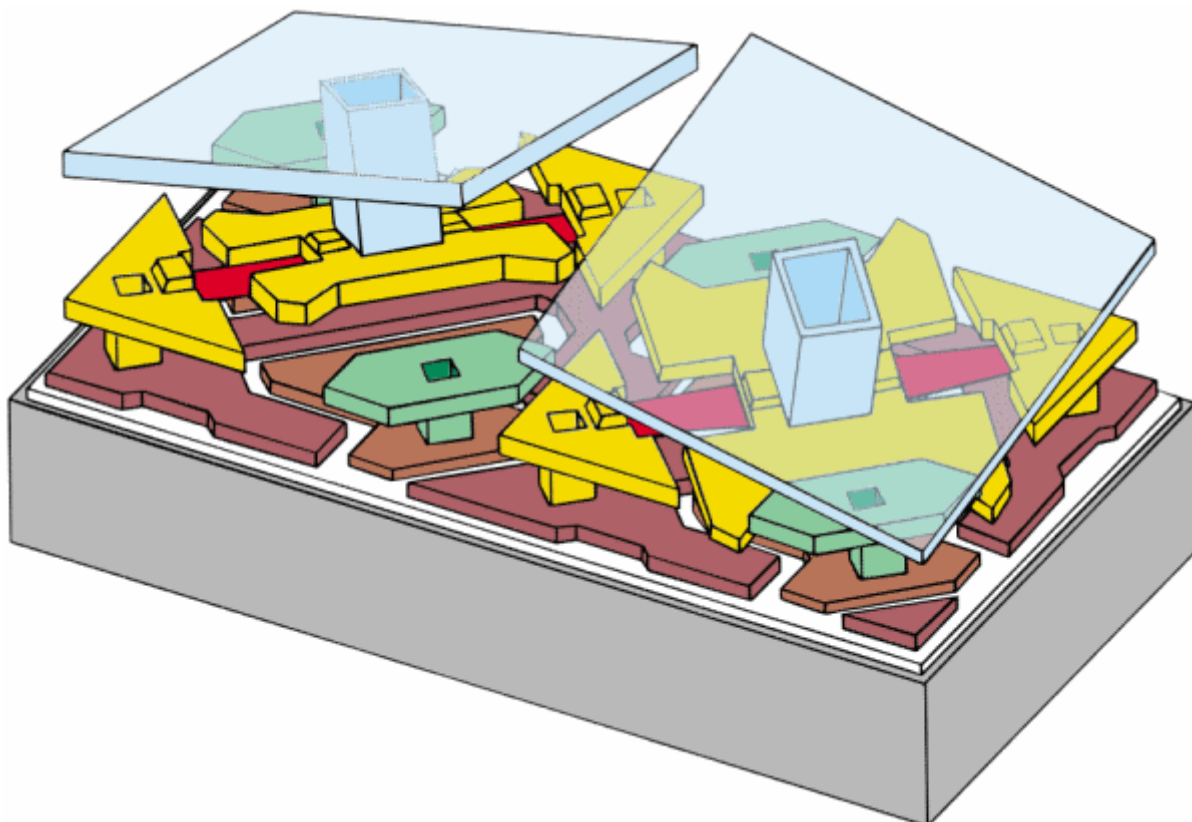


Кончики площадки, упирающиеся в основание при наклоне



*Так устроен каждый из миллионов используемых в микрозеркальной матрице элементов*

В одном из этих двух положений зеркальце отражает попадающий на него свет в сторону линзы и далее на экран. В другом положении – направляет световой поток в сторону, на теплоотвод. В первом случае на экране получается белая точка, во втором – черная. В результате слаженного действия всей матрицы создается картинка, состоящая из двух цветов: черного и белого.



*Два микрозеркала. Одно в «черном» положении, другое – в «белом». Среднее – «горизонтальное» – положение зеркала занимают только в припаркованном состоянии, когда проектор выключен*

Разумеется, такое однобитное изображение – не совсем то, что нужно в XXI веке. Для начала, к чистым черному и белому возникает желание добавить градации серого. Поскольку полупрозрачность, в отличие от ЖК-матриц, здесь использовать нельзя, свет приходится отмерять механически. Для этого зеркальце «мигает» с большой частотой. Эти «подмигивания» способны обеспечить до 1024 градаций серого. Между прочим, это в 16 раз больше, чем у среднестатистической ЖК-матрицы.

Итак, градации серого есть. Остается лишь добавить цвет. Непосредственно DMD-чип к этому уже не имеет почти никакого отношения (равно как не имеют непосредственного отношения к цвету и жидкие кристаллы). Но раз уж мы начали разбираться, как работают DLP-проекторы, то имеет смысл дойти до конца. Для добавления к изображению цветовой составляющей используется колесо с несколькими секторами, каждый из которых представляет собой светофильтр.

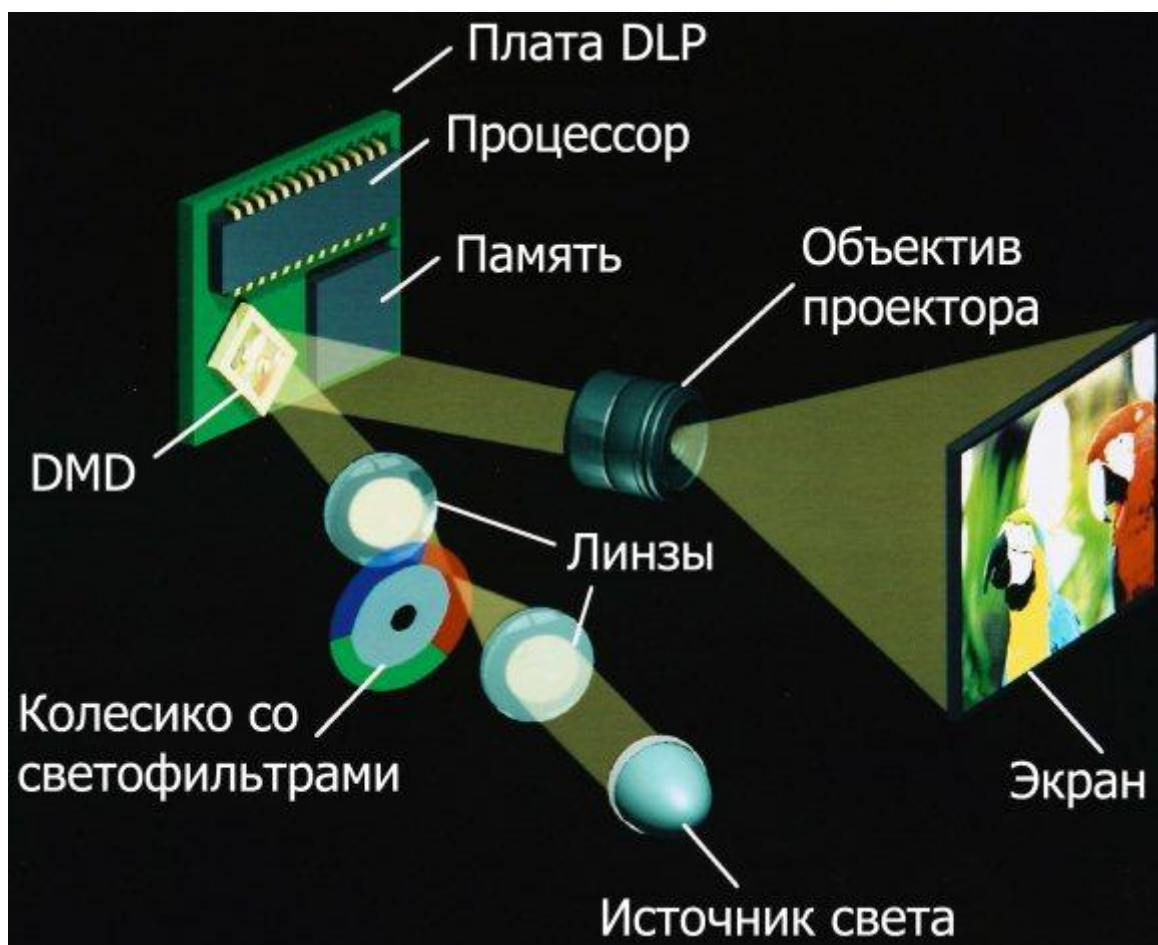


*Достаточно простое колесико, в нем есть светофильтры только трех стандартных цветов, RGB*



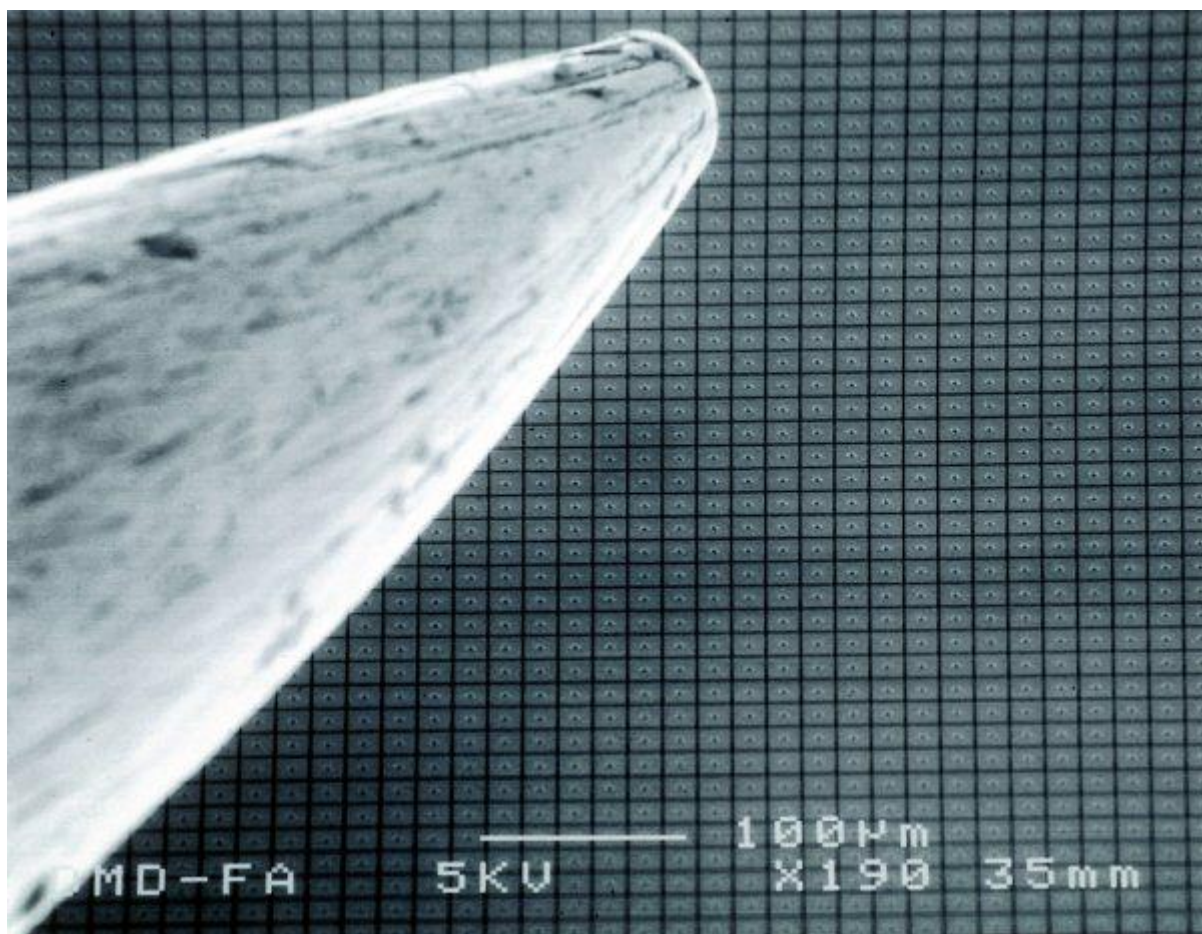
*Встречаются и более сложные колеса*

К базовым красному, синему и зеленому для большей яркости изображения обычно добавляется еще и прозрачный сектор. Иногда для более аккуратной передачи полутонов используются дополнительные светофильтры – как дополнительные ванночки с чернилами у фотопринтеров. Колесо вращается, опять-таки, очень-очень быстро, – микрозеркальная матрица выдает для каждого светофильтра свой кадр.

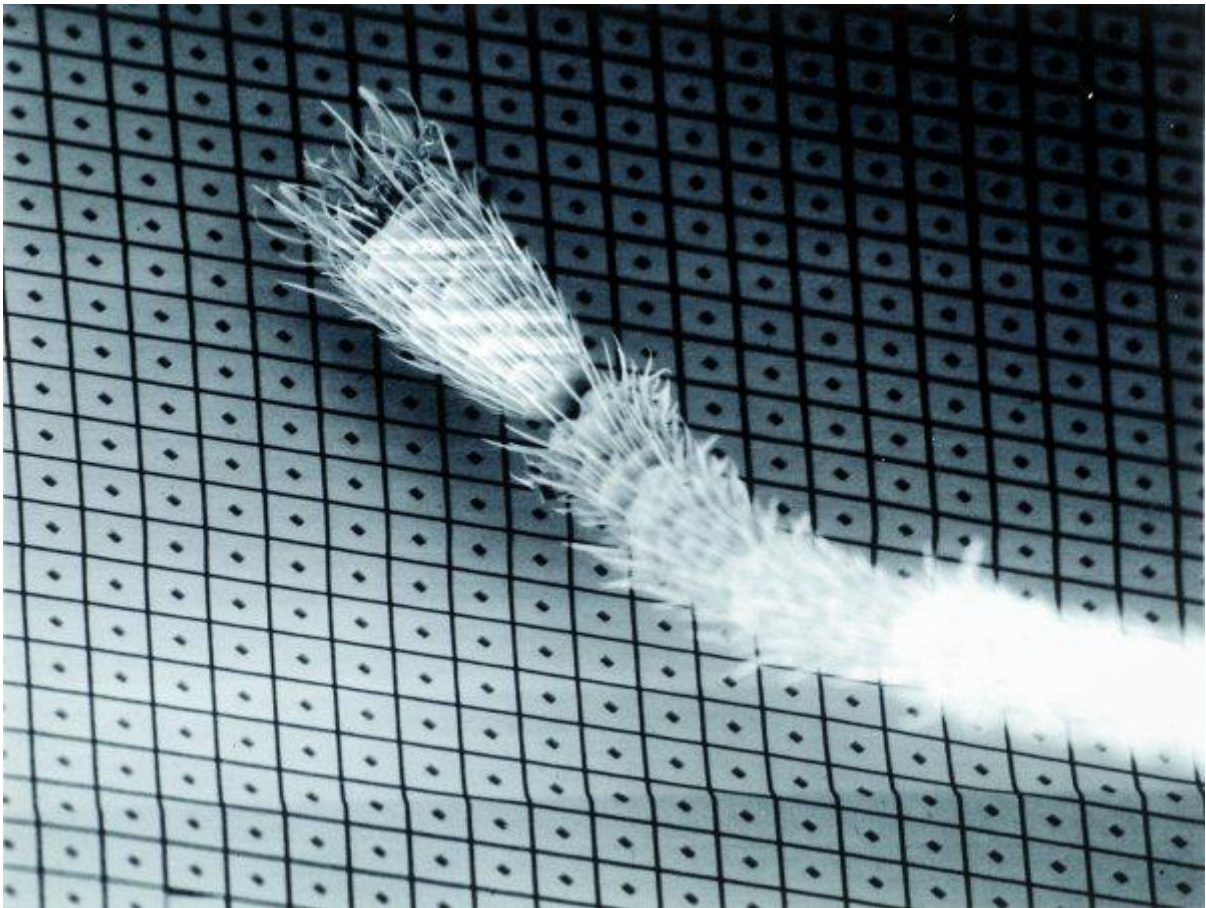


*Общий принцип работы стандартного DLP-проектора – с одним DMD-чипом*

В итоге зеркалам приходится «подмигивать» несколько тысяч раз в секунду: для обеспечения градаций серого, по полному «серому» кадру на каждую из цветовых составляющих, да умножить на требуемое количество кадров в секунду. И все это – чистая механика. Миниатюрная настолько, что даже на кончике иглы помещается несколько десятков элементов матрицы.



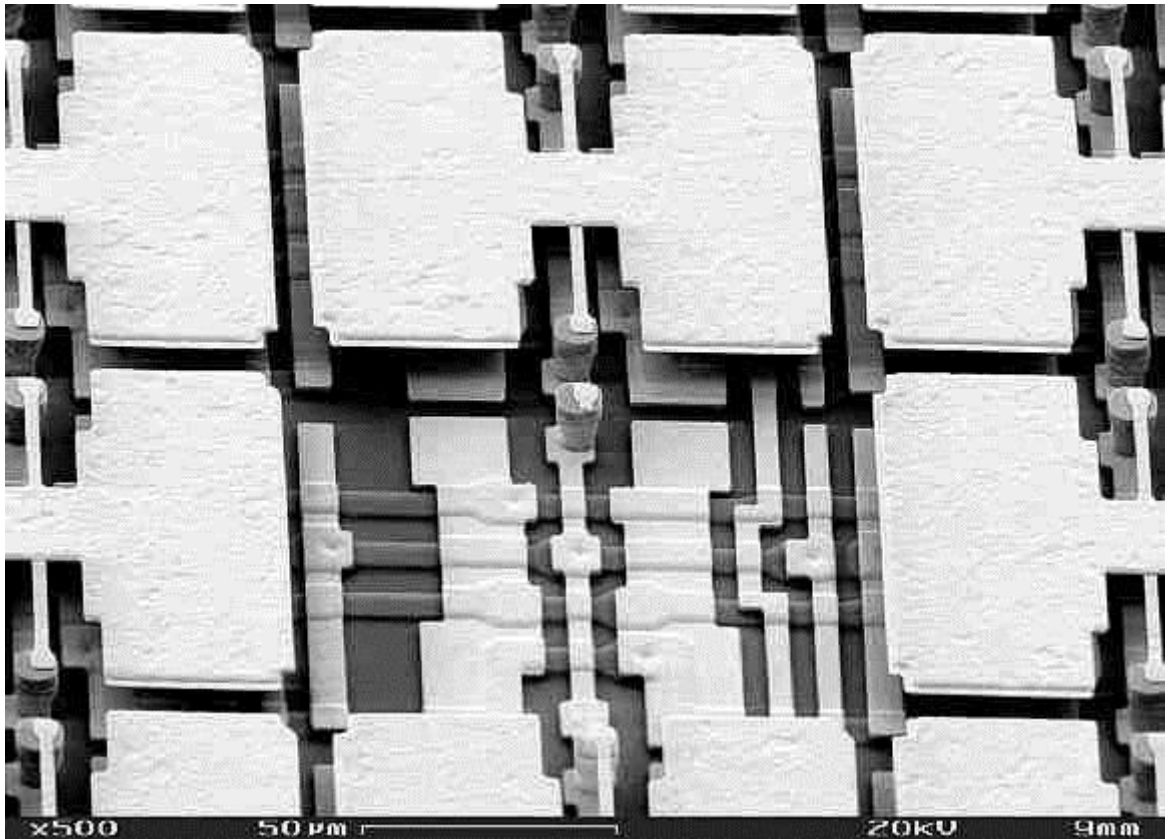
*Сходу человеческий разум едва ли способен адекватно оценить размер в 10 микрон.  
Другое дело – фото в масштабе*



*Лапка муравья. На фото изображена довольно старая модель DMD-чипа, современные микрозеркала Texas Instruments еще миниатюрнее*

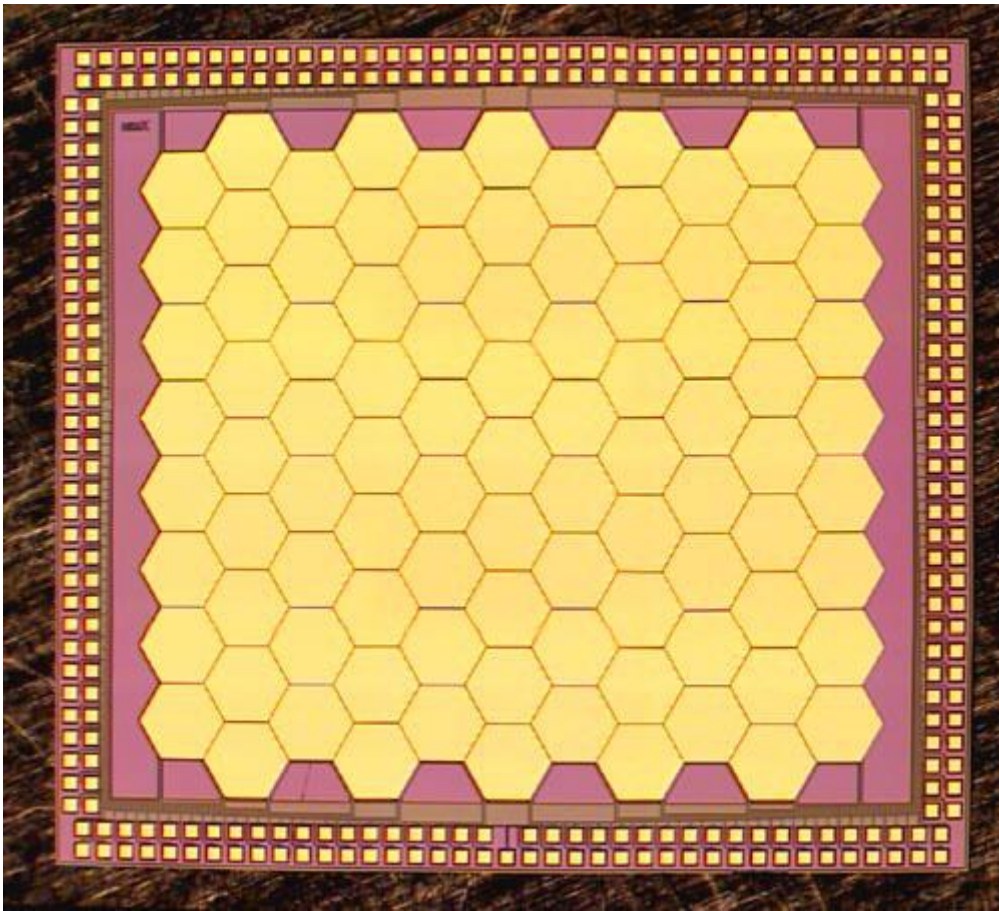
Похожие на DMD устройства разработаны Фраунгоферовским институтом полупроводниковых технологий (Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie). Используются они исключительно в научных целях. Зеркала в устройствах Фраунгоферовского института более крупные и выполнены несколько более грубо.



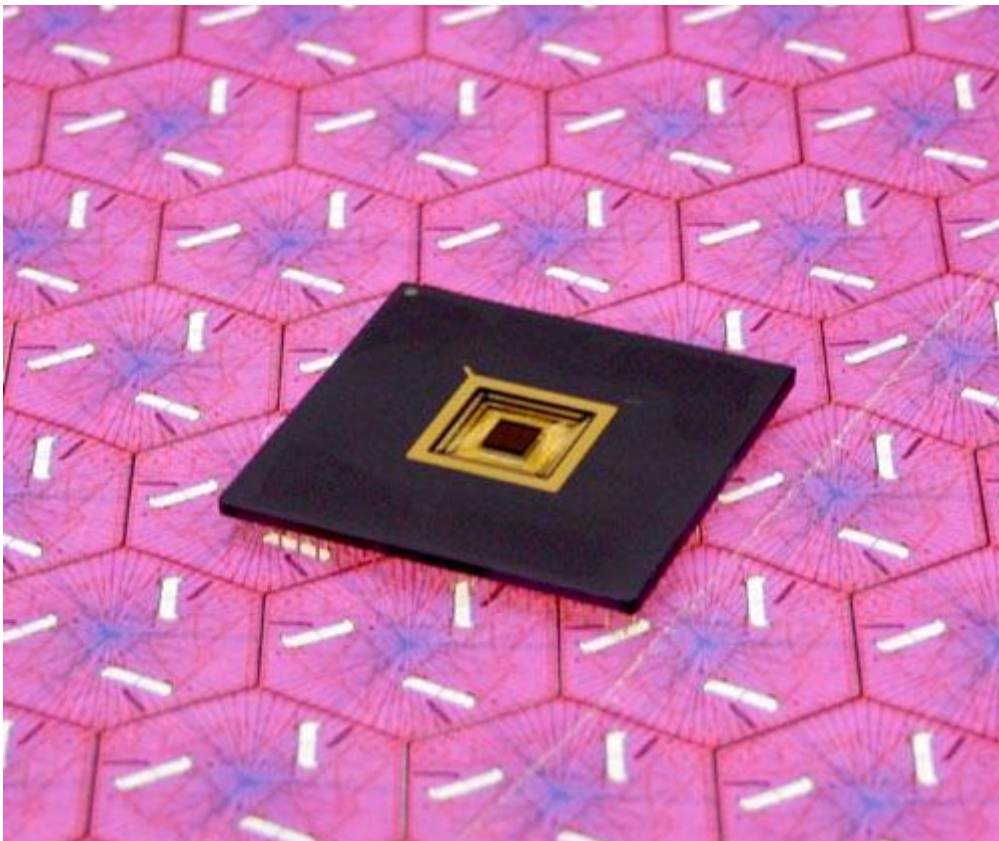


*Микрозеркальная матрица разработки Фраунгоферовского института полупроводниковых технологий*

Микрозеркальные матрицы – частный случай оптических MEMS. Но есть и многие другие микросистемы, работающие со светом. Например, в астрономии существует весьма важная задача борьбы с искажениями, возникающими при прохождении света через неоднородную среду – атмосферу. Та же проблема актуальна и для микроскопии.

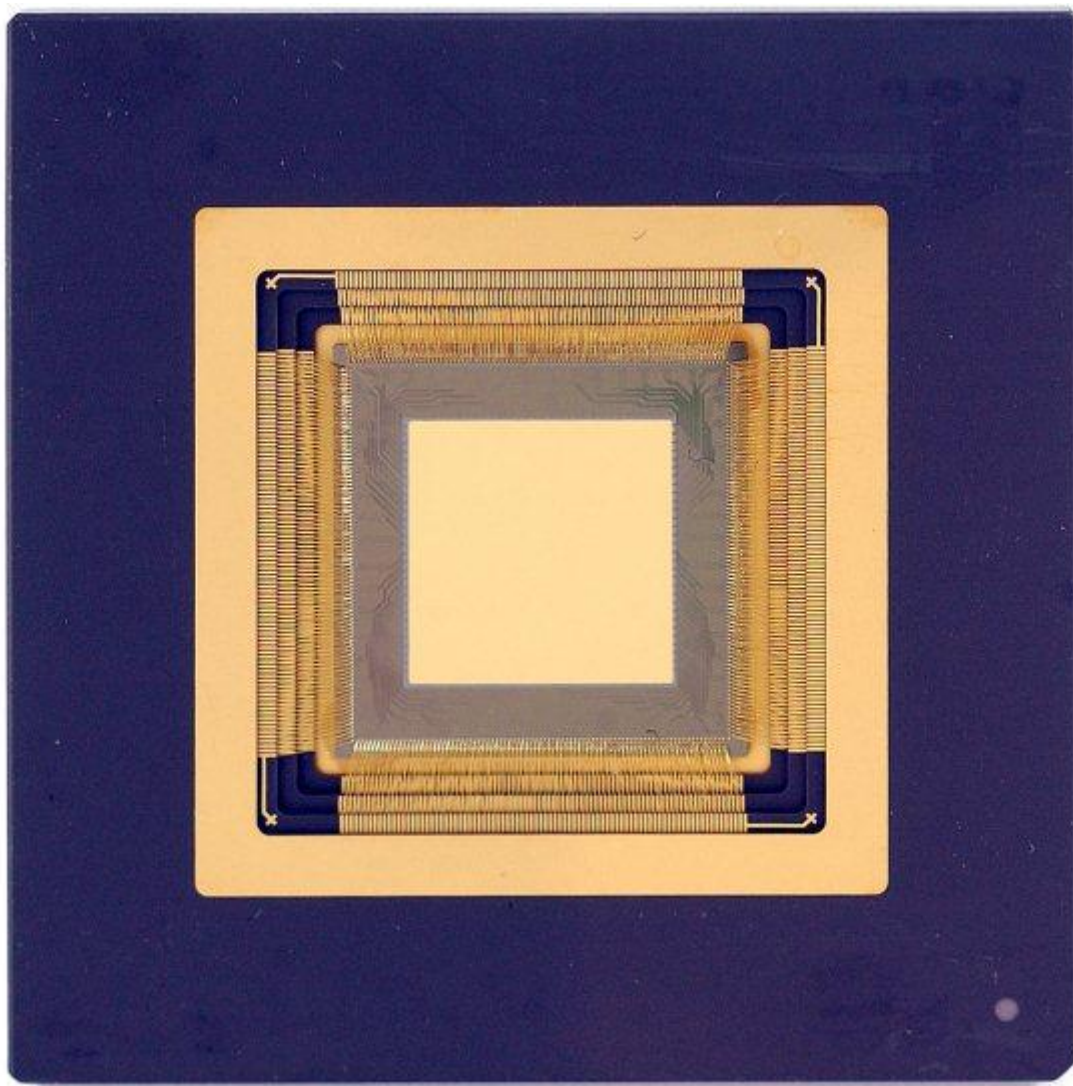


*Зеркало с изменяемой геометрией, состоящее из 93 элементов*



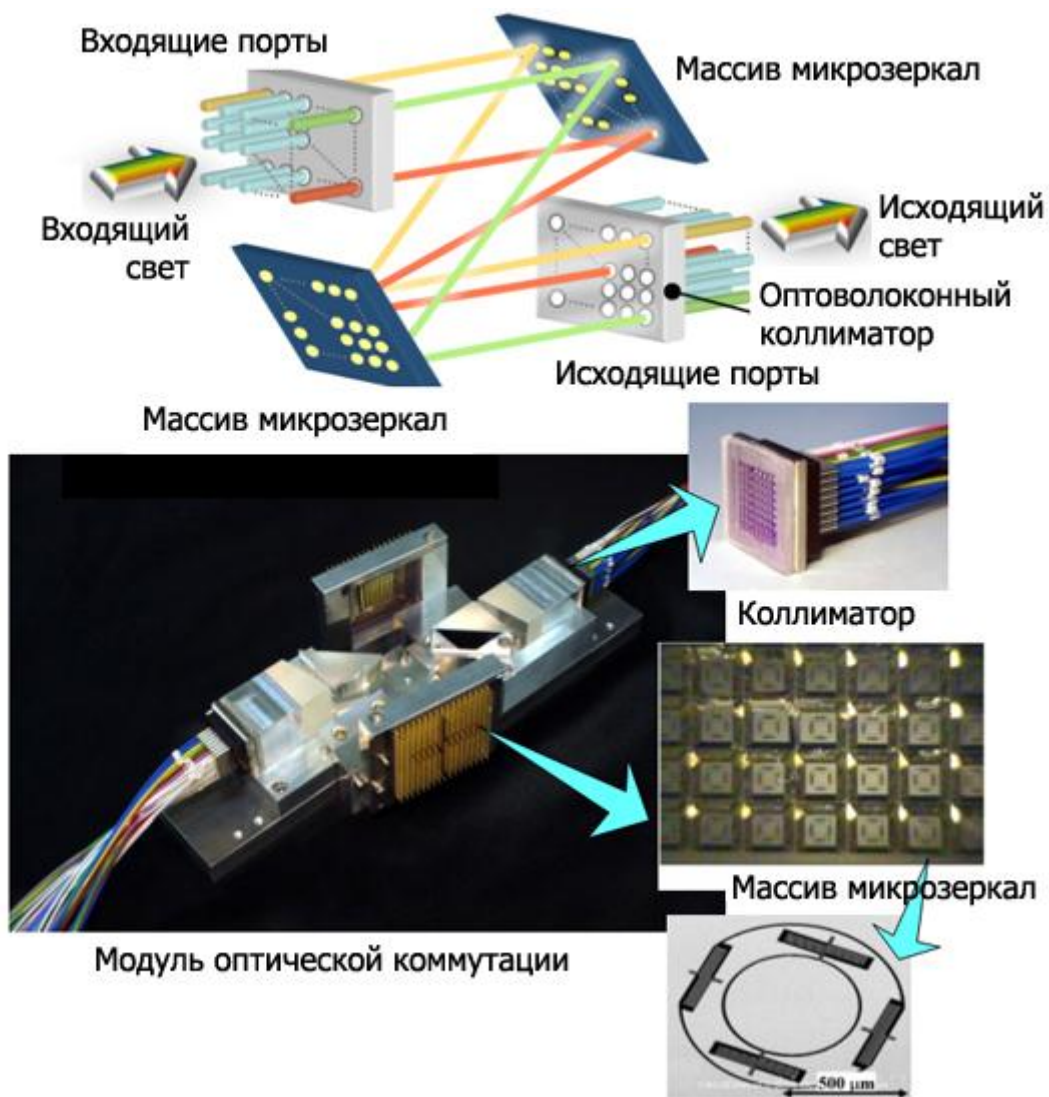
*Готовый чип на основе той же системы (размер 5 на 5 см) на фоне более крупного снимка поверхности зеркала*

Задача решается с помощью адаптивной оптики – в частности, зеркал с изменяемой геометрией. Разумеется, существуют и макроскопические устройства такого рода. Но MEMS, как обычно, позволяет снизить цены и значительно увеличить компактность – если для телескопов последнее не так уж важно, то для микроскопов это очень даже актуально. Такие MEMS состоят из массива микрзеркал, которые могут наклоняться, подстраивая форму поверхности массива для борьбы с искажениями.



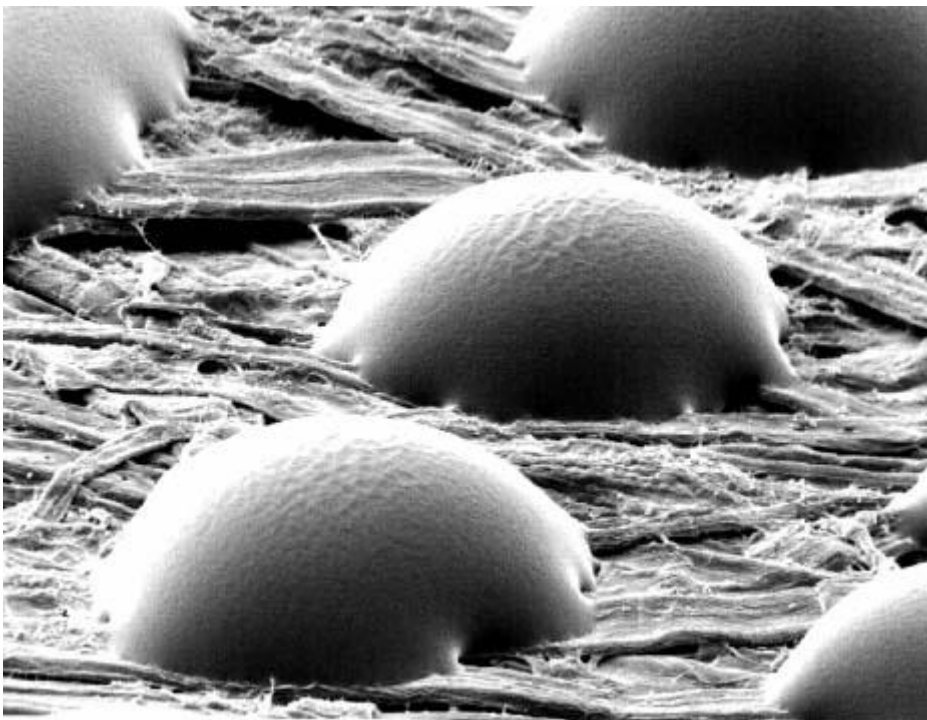
*Зеркало с изменяемой геометрией, состоящее из 1020 элементов. Разработка Boston Micromachines Corporation*

Еще один интересный случай использования микрзеркал – коммутация оптоволоконных сетей. В сложных системах задействуются зеркала, умеющие поворачиваться не по одной оси, как в DMD-чипе, а сразу по двум осям. Это позволяет создавать коммутаторы с большим количеством обслуживаемых каналов.



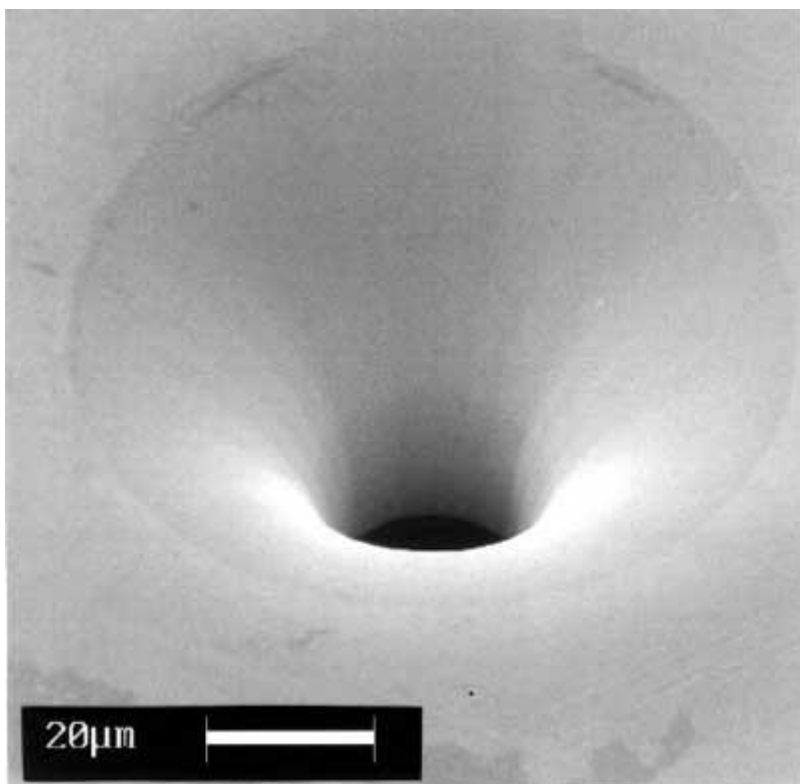
*Один из вариантов устройства двухосного микрзеркала*

Современные принтеры оперируют с каплями краски объемом порядка пиколитра. А что такое пиколитр? Это шарик диаметром около 13 микрон. В одном кубическом миллиметре таких капелек помещается с десяток тысяч! Для того чтобы сформировать столь малый объем жидкости – и сформировать его строго в нужный момент – очевидно, требуется тончайшая механика. Так что и тут работает MEMS.



*Капли чернил на бумаге*

Происходит это следующим образом. Печатающая головка представляет собой массив из множества микроотверстий. Под отверстиями – миниатюрные полости, в которые чернила поступают из основного резервуара картриджа.



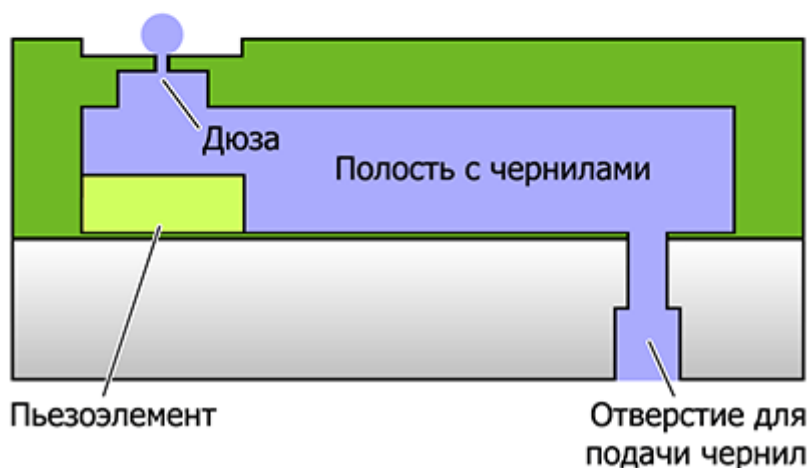
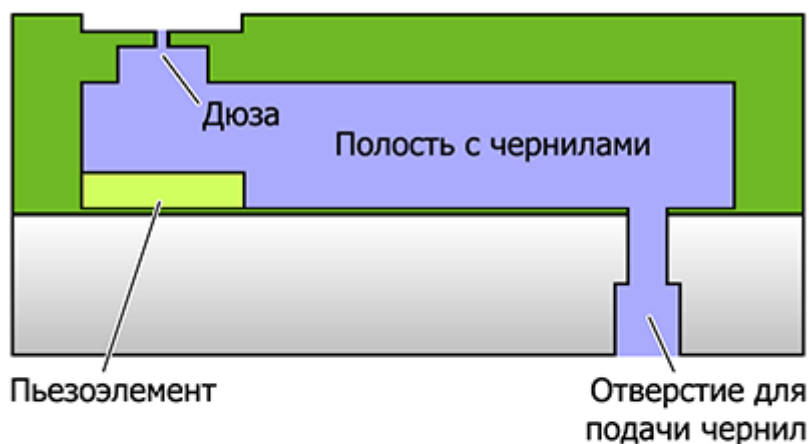
*Крупный план одной дюзы печатающей головки струйного принтера*

Сами собой чернила через дюзы не выливаются: диаметр отверстий настолько мал, что сила поверхностного натяжения не дает жидкости просто так вытечь наружу. Краску

необходимо выдавить принудительно. Для этого можно воспользоваться несколькими различными технологиями.

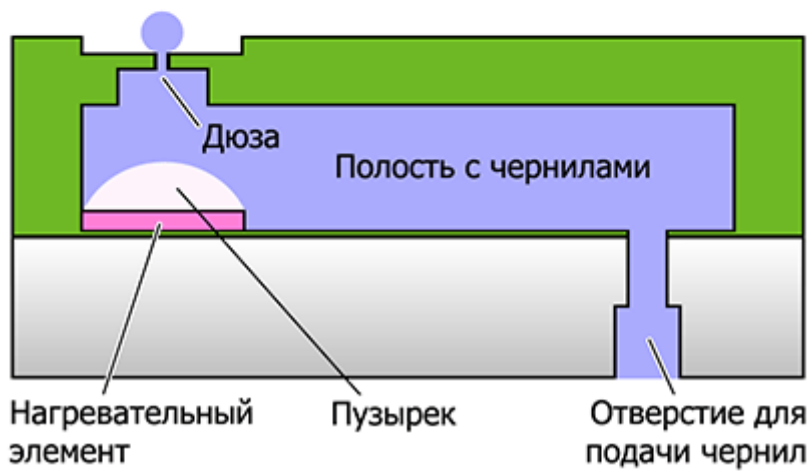
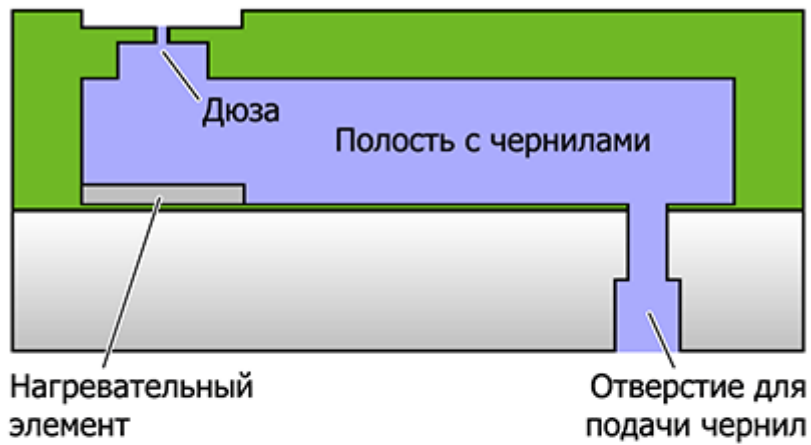
Например, можно разместить в микрополости пьезоэлемент. Примерно такой же, как те, что используются в зажигалках. Только процесс в данном случае идет в обратную сторону. В зажигалках пьезоэлемент вырабатывает электричество от деформации (следующей от нажатия кнопки) кристалла. В печатающей головке принтера на пьезокристалл подается ток, вследствие чего кристалл увеличивается в объеме и толкает мембрану, которая, в свою очередь, выталкивает краску наружу. Именно такой метод использует компания Epson.

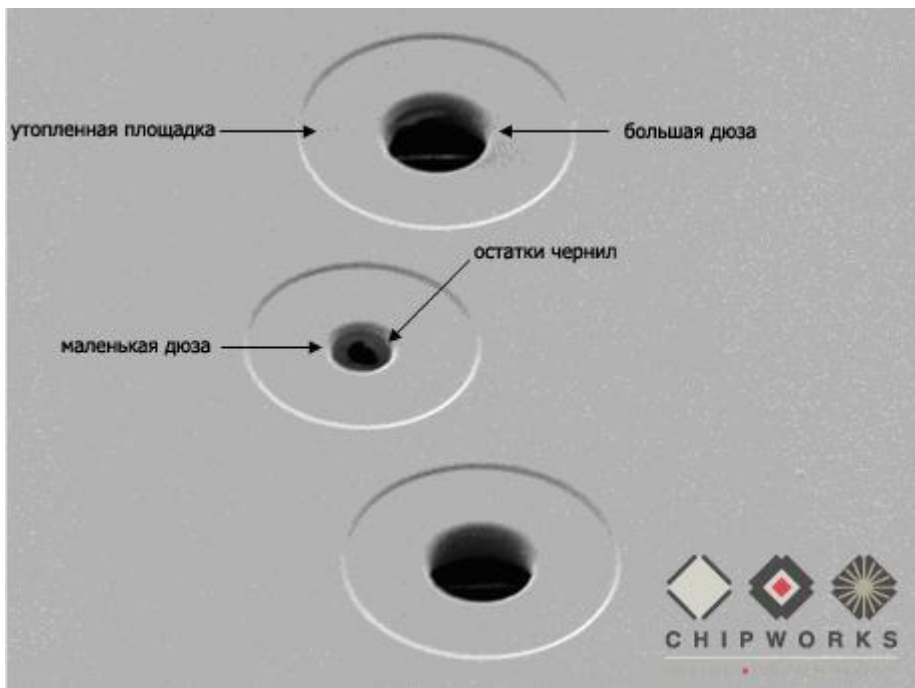
### Принцип работы пьезоструйной печатающей головки



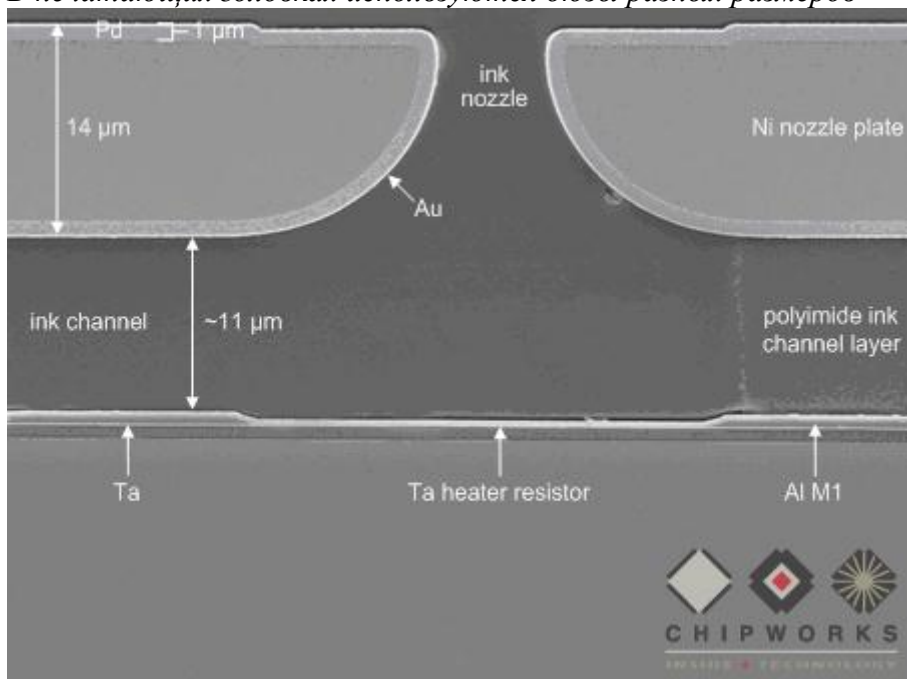
Более популярный подход, который практикуют компании HP, Canon и Lexmark: термоструйная печать. В полости размещается нагревательный элемент, который мгновенно нагревает чернила до очень высокой температуры. Жидкость вскипает, увеличивается в объеме и выплескивается из полости на поверхность.

Принцип работы термоструйной  
печатающей головки





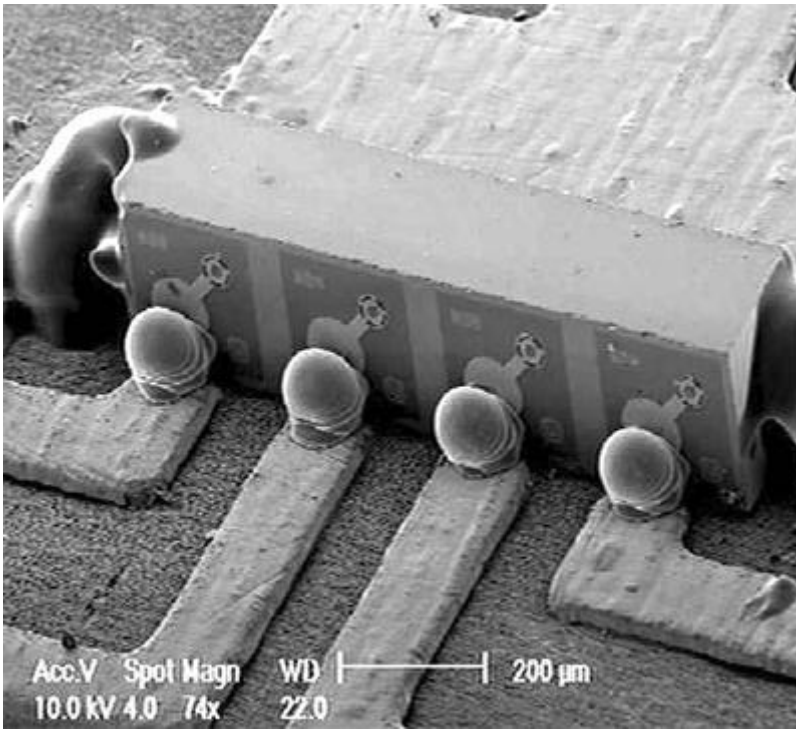
*В печатающих головках используются дюзы разных размеров*



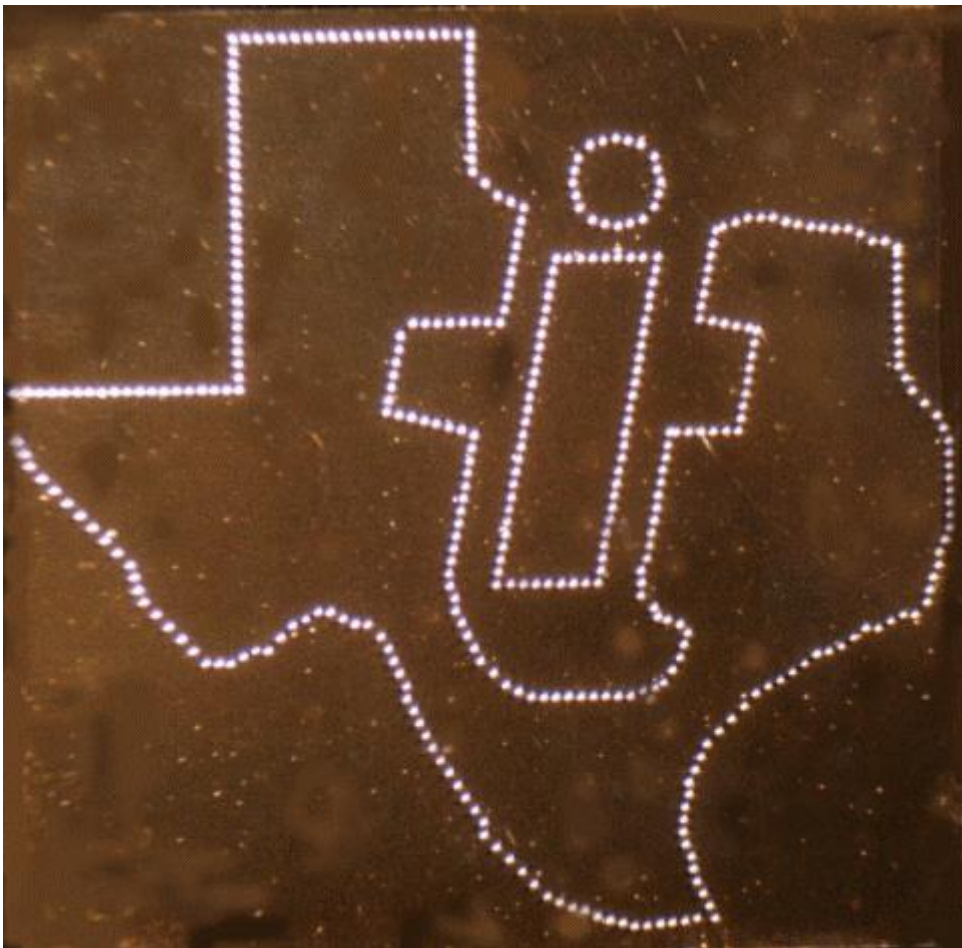
*Одна из ячеек печатающей головки HP 60 в разрезе*

Что любопытно, струйная печать может служить не только конечной целью производства MEMS, но и промежуточным этапом. Дело в том, что при современном уровне развития технологий струйной печати, она вполне подходит для изготовления микроструктур. Говоря по-простому, с помощью струйных принтеров можно печатать те или иные микроэлектронные или микроэлектромеханические устройства. Просто для этого надо использовать не обычные чернила, а растворы тех веществ, из которых можно изготовить требующуюся структуру.



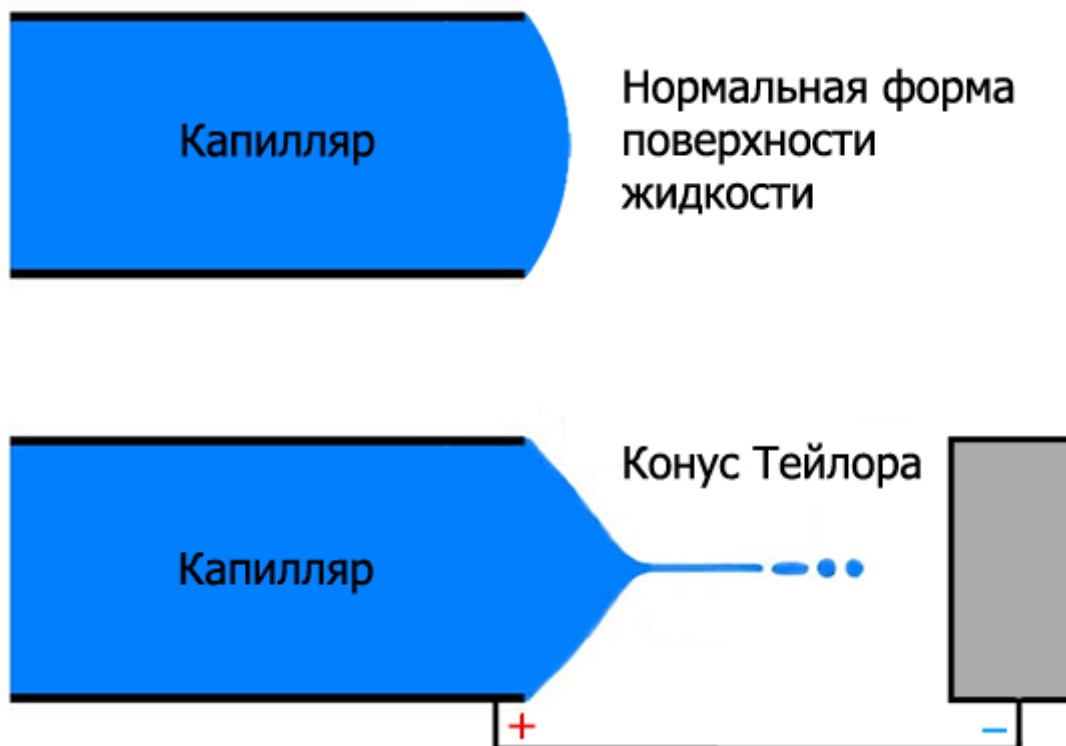


*«Пайка» контактов на этом снимке произведена с помощью пьезоструйной печати*



*Микроскопический логотип Texas Instruments напечатан каплями диаметром 60 микрон*

Правда, есть технологические ограничения: в классических методах струйной печати не может быть получена капля размера меньшего, чем диаметр отверстия, из которого она вытекает – при таких размерах вернее будет сказать «выдавливается». Впрочем, если есть желание получить очень маленькую каплю, то выход есть.



Если капилляр с проводящей жидкостью поместить в электрическое поле, то форма поверхности жидкости будет отличаться от нормальной формы, обусловленной поверхностным натяжением. По мере увеличения напряжения она будет все ближе к конусу (так называемому конусу Тейлора), а при достижении некоего порогового значения напряжения с конца этого конуса начнут отрываться мельчайшие капли – их размер будет значительно меньше диаметра капилляра.

На сегодня на этом и закончим. А в следующей части статьи рассмотрим самые необычные и впечатляющие концепты микроэлектромеханических систем. А также разберемся, как все эти замечательные устройства производятся. Оставайтесь с нами!