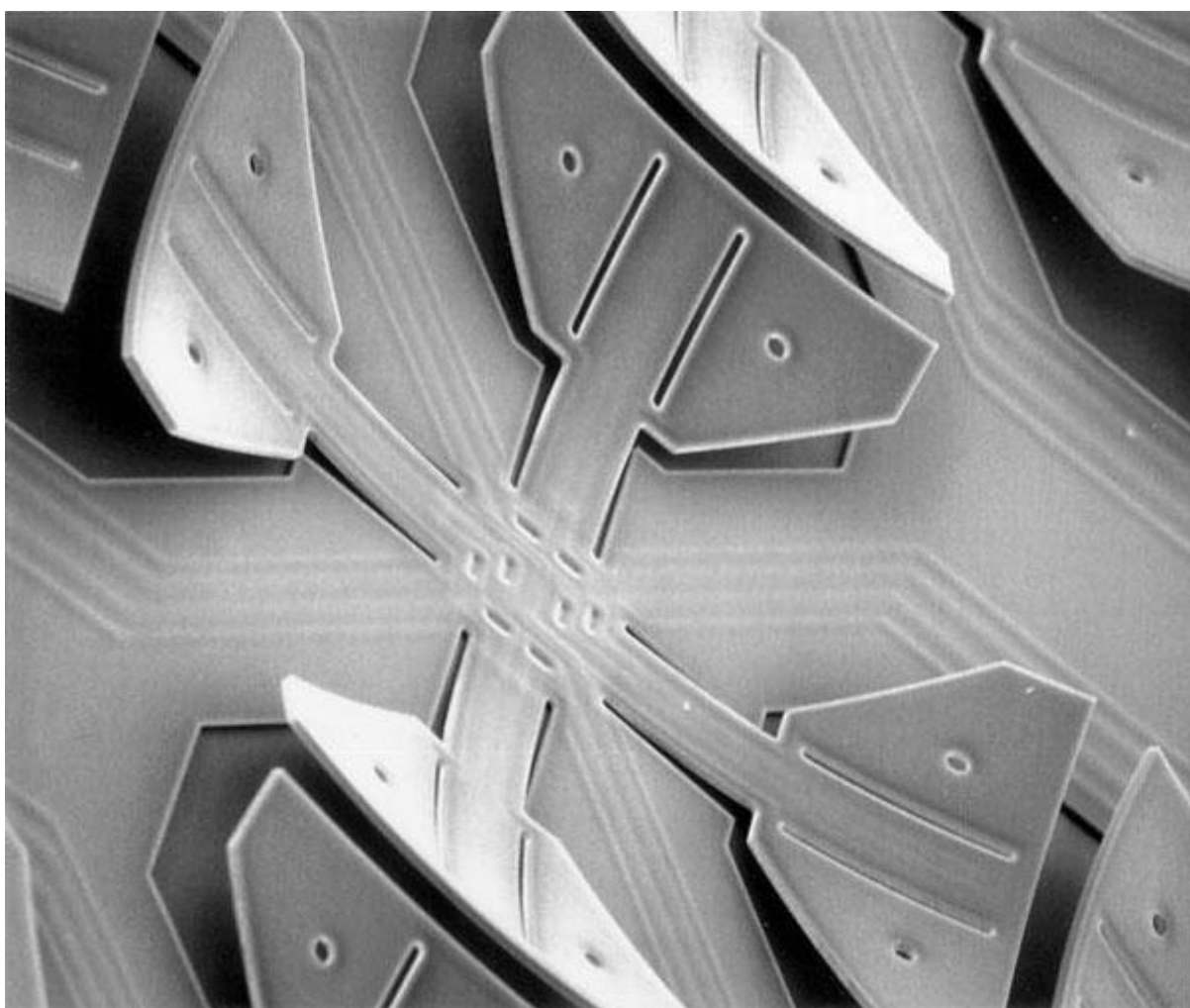


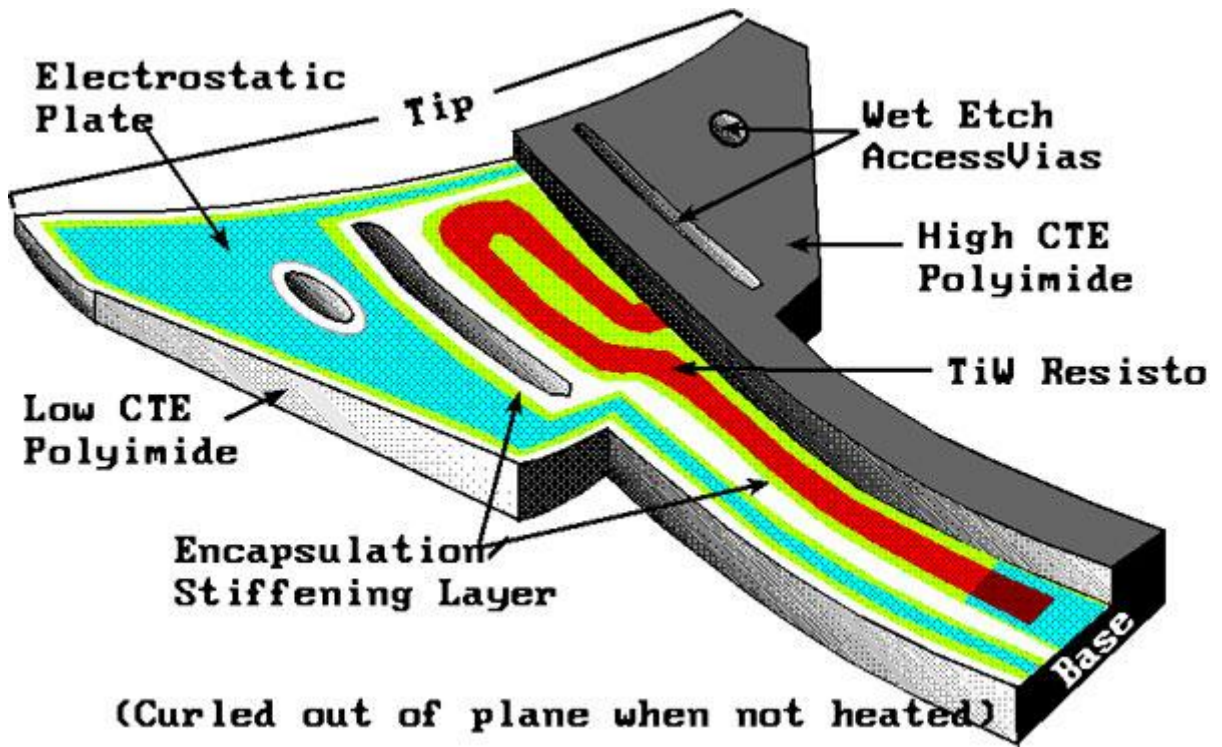
В предыдущих двух частях мы рассмотрели нескольких наиболее массовых микроэлектромеханических систем. Микрозеркальные матрицы DLP-проекторов, миниатюрные микрофоны, печатающие головки струйных принтеров и датчики движения – устройства интересные, но достаточно привычные. Однако существуют и куда более экзотические MEMS. О них и поговорим.

Начнем с одного из наиболее впечатляющих устройств. Это MEMS-транспортер, состоящий из массива микроскопических ресничек. Реснички упругие и в «выключенном» состоянии они отогнуты от основания. Чтобы притянуть их к подложке, используется уже знакомый нам по DMD-чипам метод – электростатическое притяжение. Кроме того, в реснички встроен терморезистор, за счет нагрева изменяющий упругость реснички.

Как и в микрозеркальных матрицах, каждый из элементов системы может занимать только два положения – верхнее и нижнее, включено/выключено – но этого, оказывается, вполне хватает для перемещения предметов по поверхности массива.

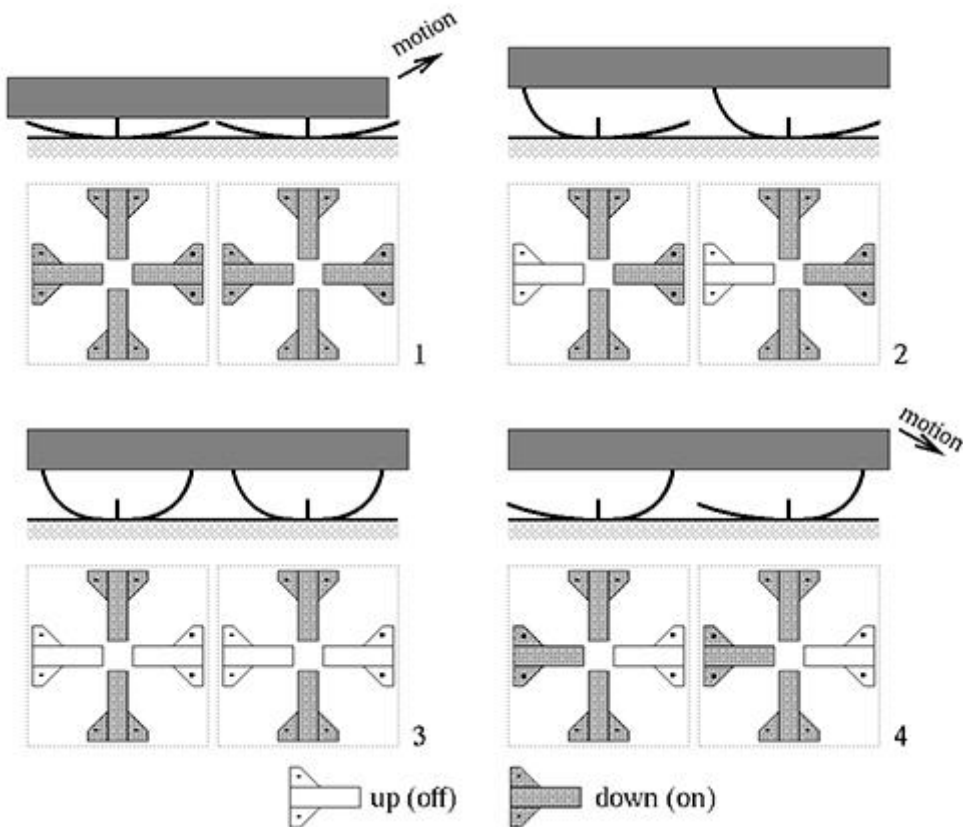


Крупный план одной ячейки MEMS-транспортера. Разработка лаборатории MEMS Вашингтонского университета

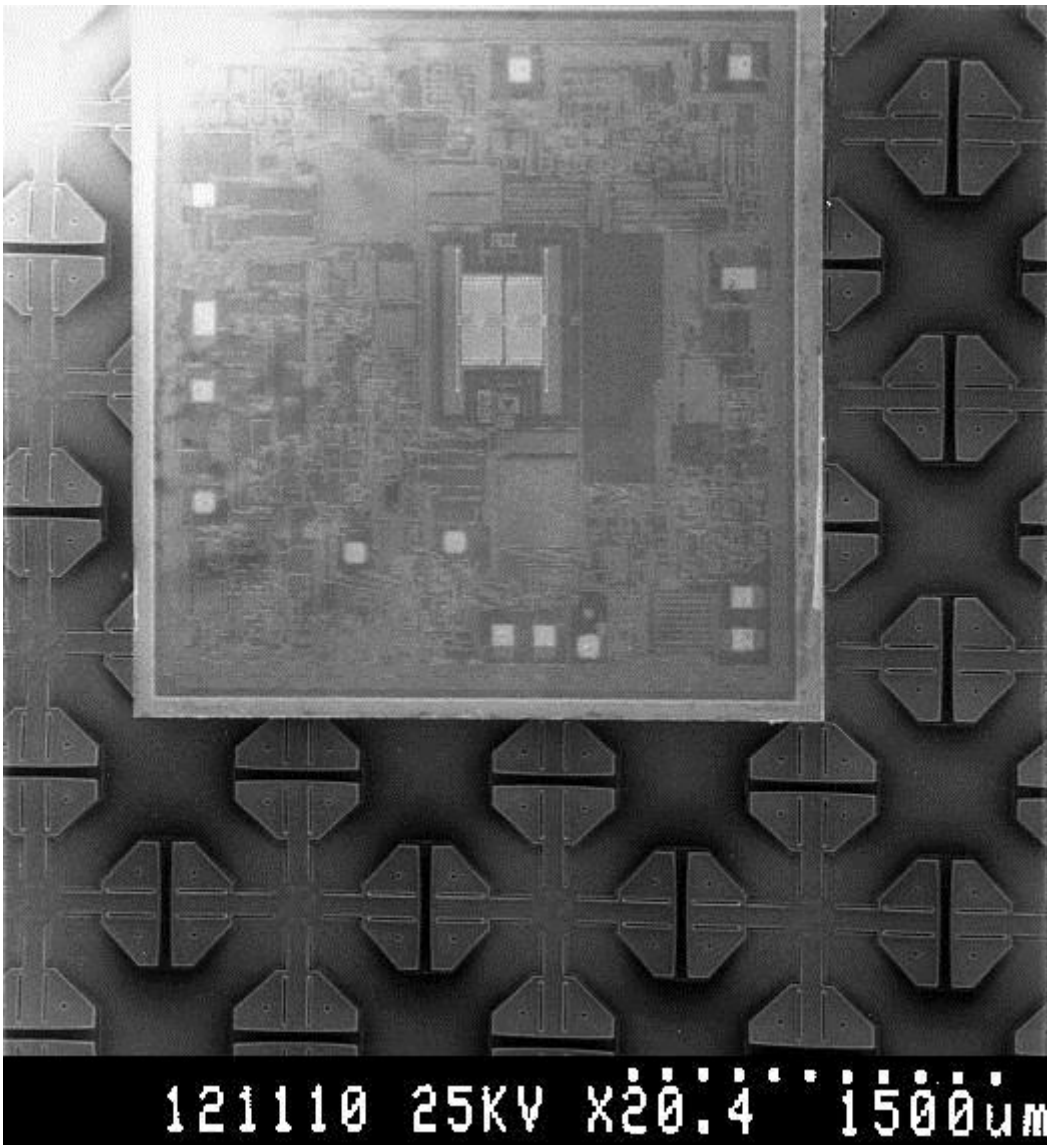
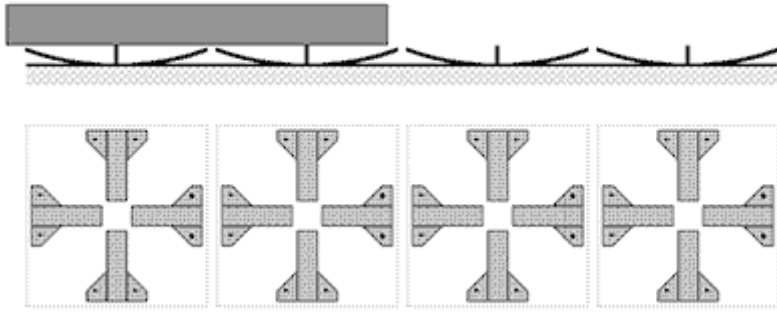


Ресничка MEMS-транспортера в разрезе

Транспортер можно задействовать не только для поступательного движения вдоль оси массива. Можно перемещать предмет под любым углом, его можно даже вращать – необходимо лишь правильно составить программу.



Ресничковый MEMS-транспортер: примерная схема передвижения предмета

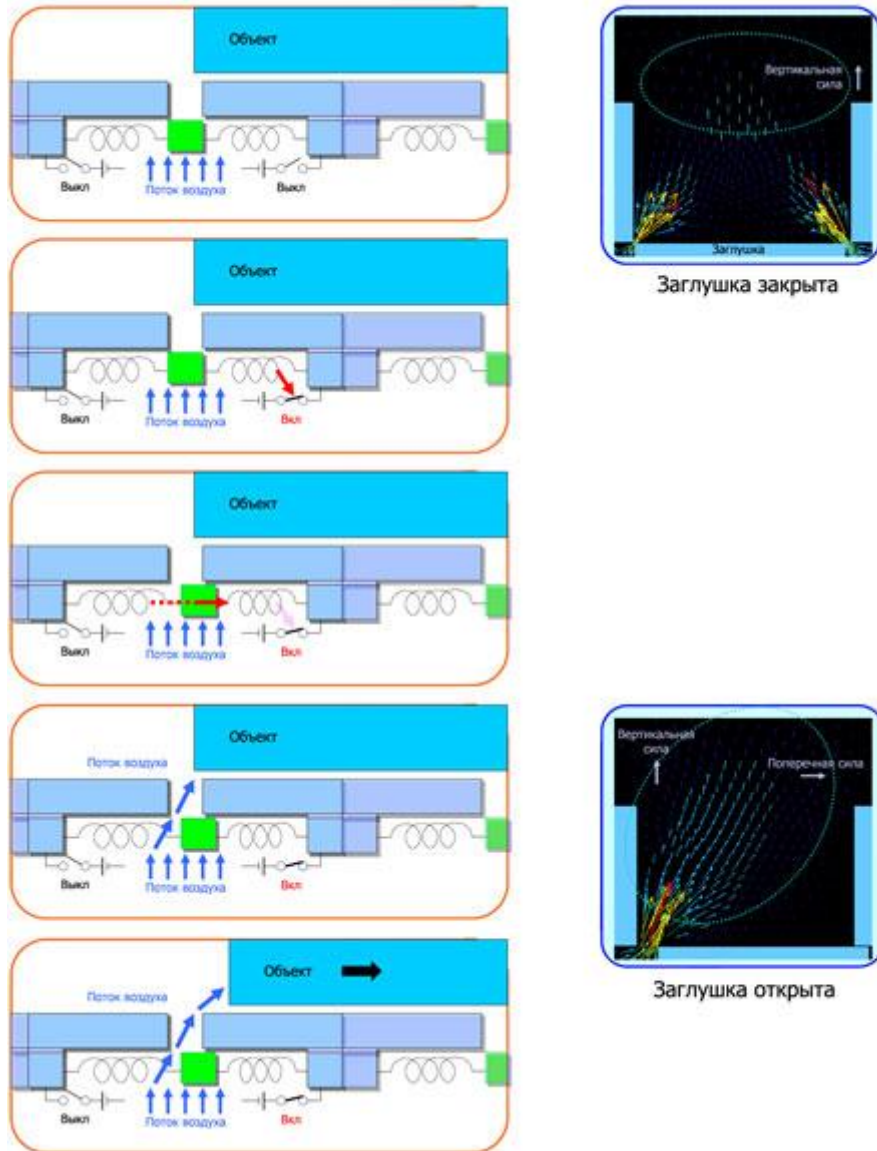


MEMS-транспортер перемещает MEMS-акселерометр

Что любопытно, это не единственный вариант MEMS-транспортера. Например, в Токийском университете для реализации схожего функционала использовали совсем другой метод: перемещение микрообъектов с помощью регулируемого потока воздуха. Дополнительное преимущество такого подхода состоит в том, что он бесконтактный – что позволяет свести к минимуму вероятность повреждения поверхности перемещаемого объекта.

А работает это следующим образом: создается массив дюз, каждая из которых закрывается снизу управляемой заглушкой. За счет электростатического притяжения заглушка может сдвигаться в одну или другую сторону. Поток воздуха при этом направляется на перемещаемый объект под углом – и «сдувает» его в нужном направлении.

Принцип действия MEMS-транспортера, работающего на регулируемом потоке воздуха



Поскольку дюзы в данной реализации транспортера могут работать только в двух направлениях – «вправо» и «влево» – массив создается двойной: одна часть ячеек перемещает объект «вправо-влево», а другая часть – «вверх-вниз». Остается только написать правильную программу – и, точно так же, как и с ресничковым транспортером, предметы можно перемещать по достаточно сложным траекториям.

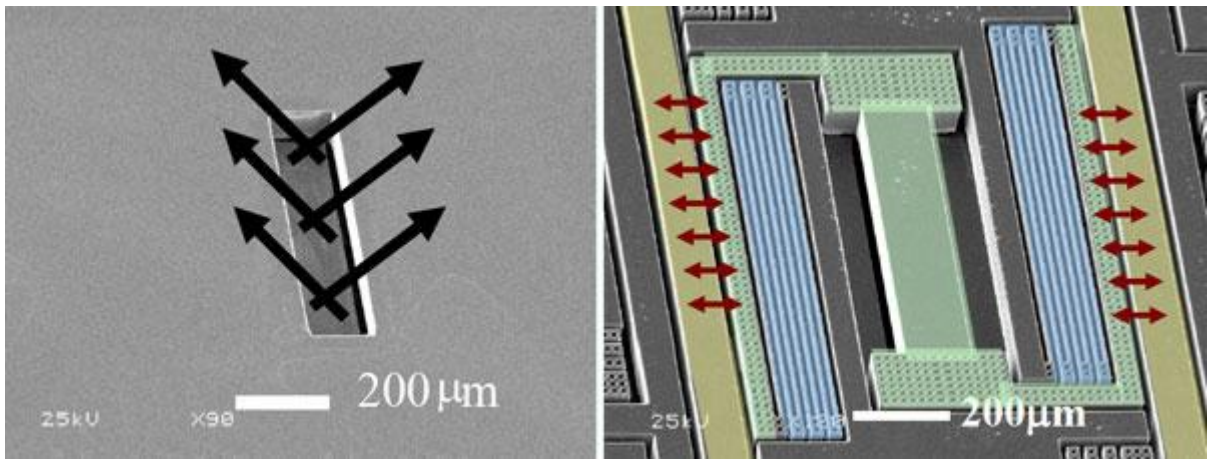
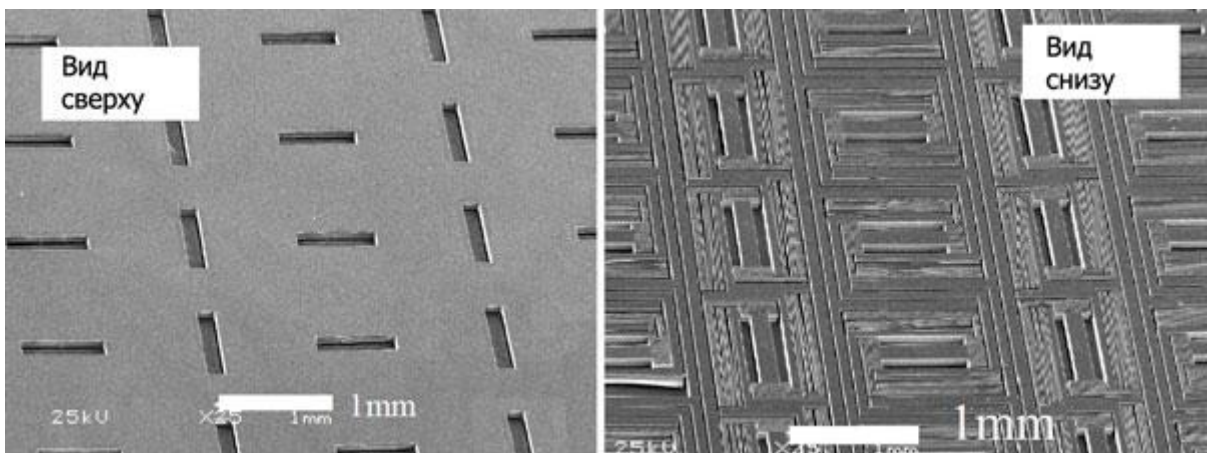
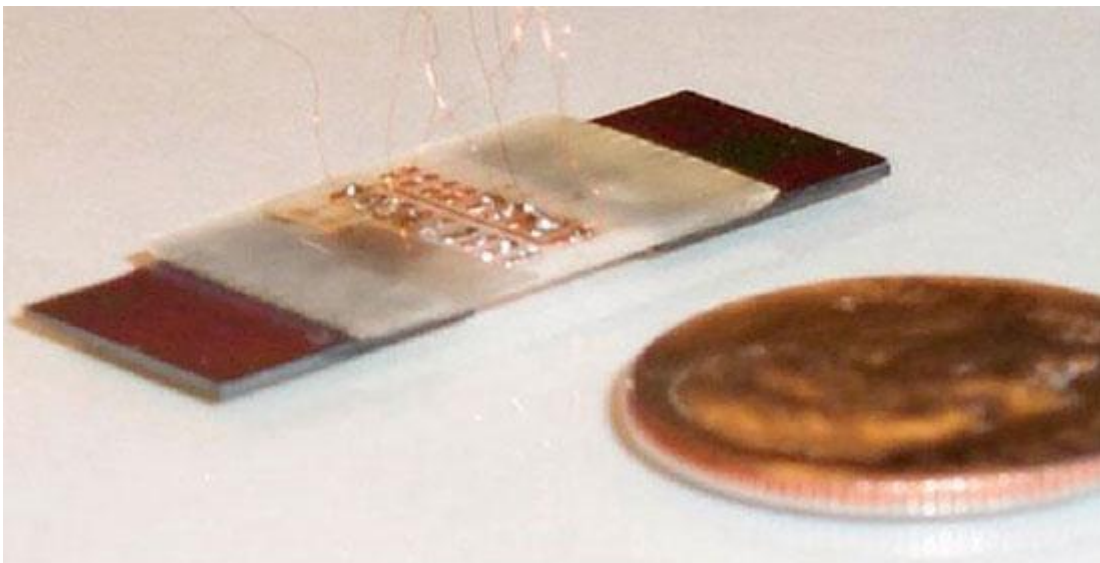


Фото одной дюзы MEMS-транспортера крупным планом. Слева изображена рабочая поверхность транспортера, справа – механизм, спрятанный под ней



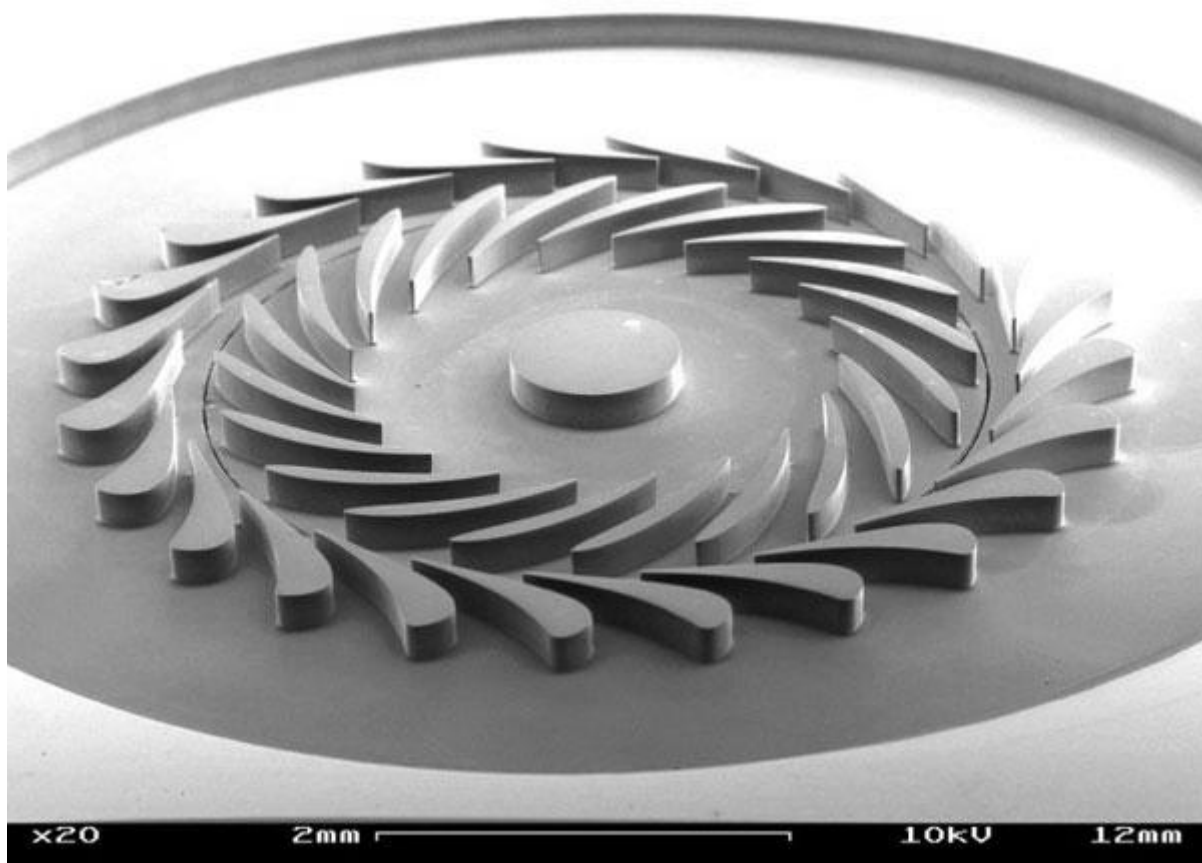
Массив дюз MEMS-транспортера

Те же принципы можно использовать, вывернув наизнанку. Вместо перемещения объекта по поверхности массива актуаторов, можно снабдить такими устройствами сам объект, установив актуаторы на его нижней поверхности. Правда, пока достаточно сложно решить вопросы с питанием и массой таких «самодвижущихся MEMS».



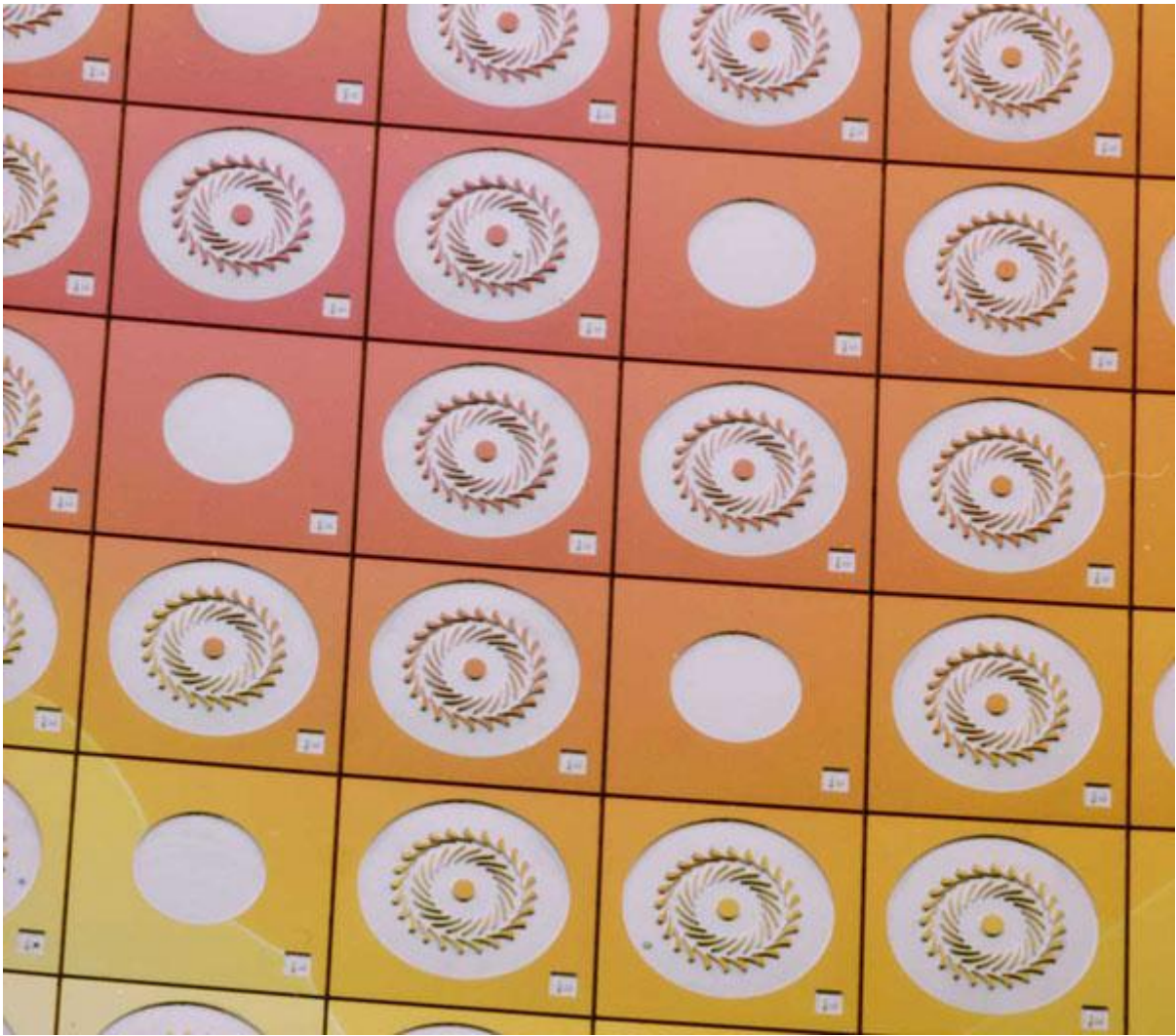
«Ходячий чип». Две площадки слева и справа – массивы ресничковых актуаторов. Чип может перемещать груз массой в 7 раз больше собственной

Раз уж зашла речь о потоках и энергии, нельзя не упомянуть и разработку Массачусетского технологического института – MEMS-турбину. Вполне типичная турбина, но очень, очень маленькая. Разрабатывается она в качестве замены традиционных литий-полимерных аккумуляторов – в первую очередь, для тех приложений, где требуется достичь минимальных размеров и максимальной энергоемкости на килограмм.

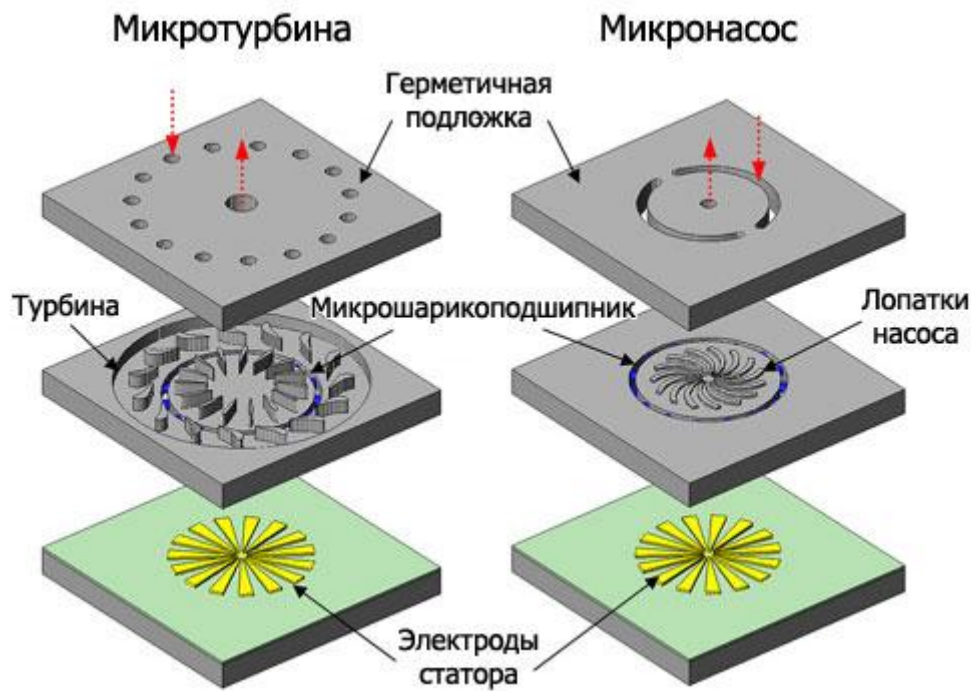


Один из ранних образцов микротурбины, разработанный в Массачусетском технологическом институте

Скажем, для современных литий-ионных аккумуляторов, используемых в ноутбуках, характерны показатели порядка 200 Вт*ч/кг. В MIT уже к 2007 году должны были довести показатель до 500-700 Вт*ч/кг, а в перспективе собираются замахнуться на 1200-1500 Вт*ч/кг. Что существенно превышает любые разумные прогнозы по развитию традиционной Li-Ion технологии.

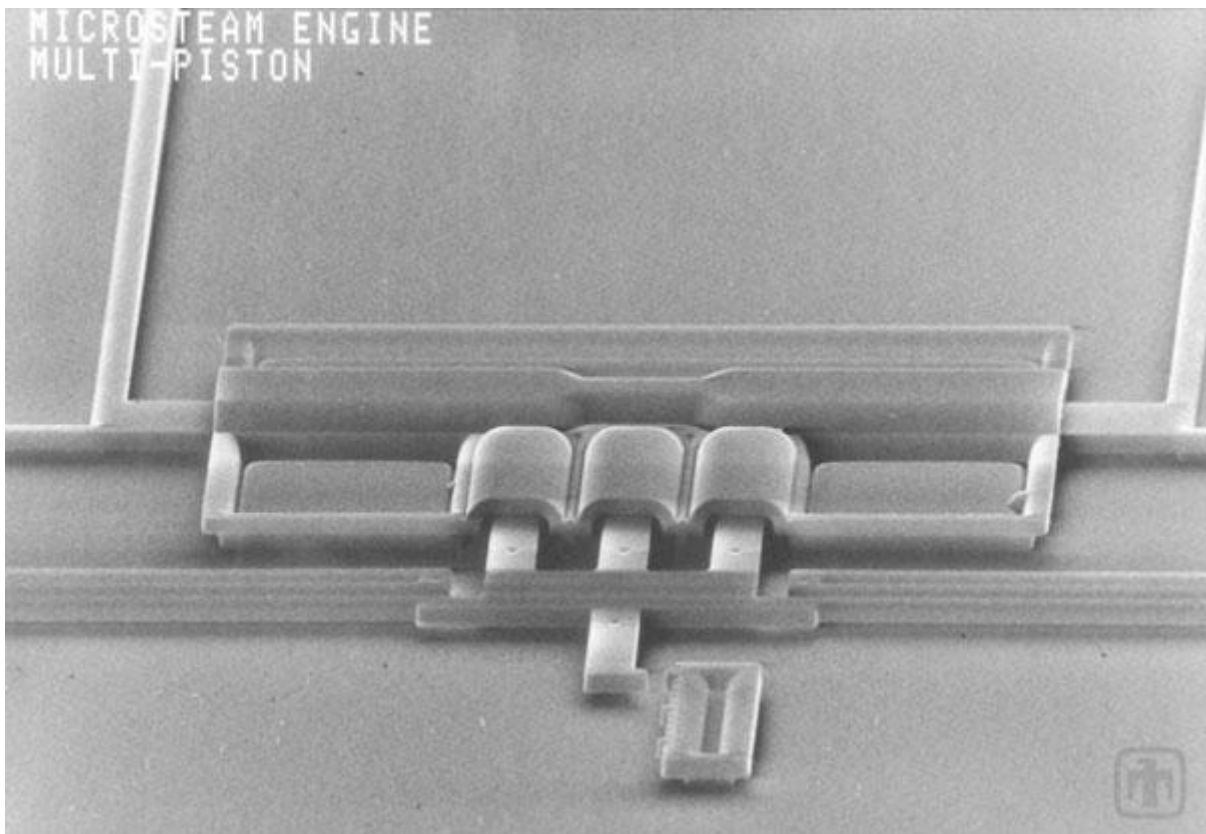


Как и с большинством MEMS, принцип можно использовать в обратном направлении: вместо того, чтобы превращать давление в электроэнергию, можно поступить наоборот. В этом случае из микротурбины после «обработки напильником» получается микронасос.



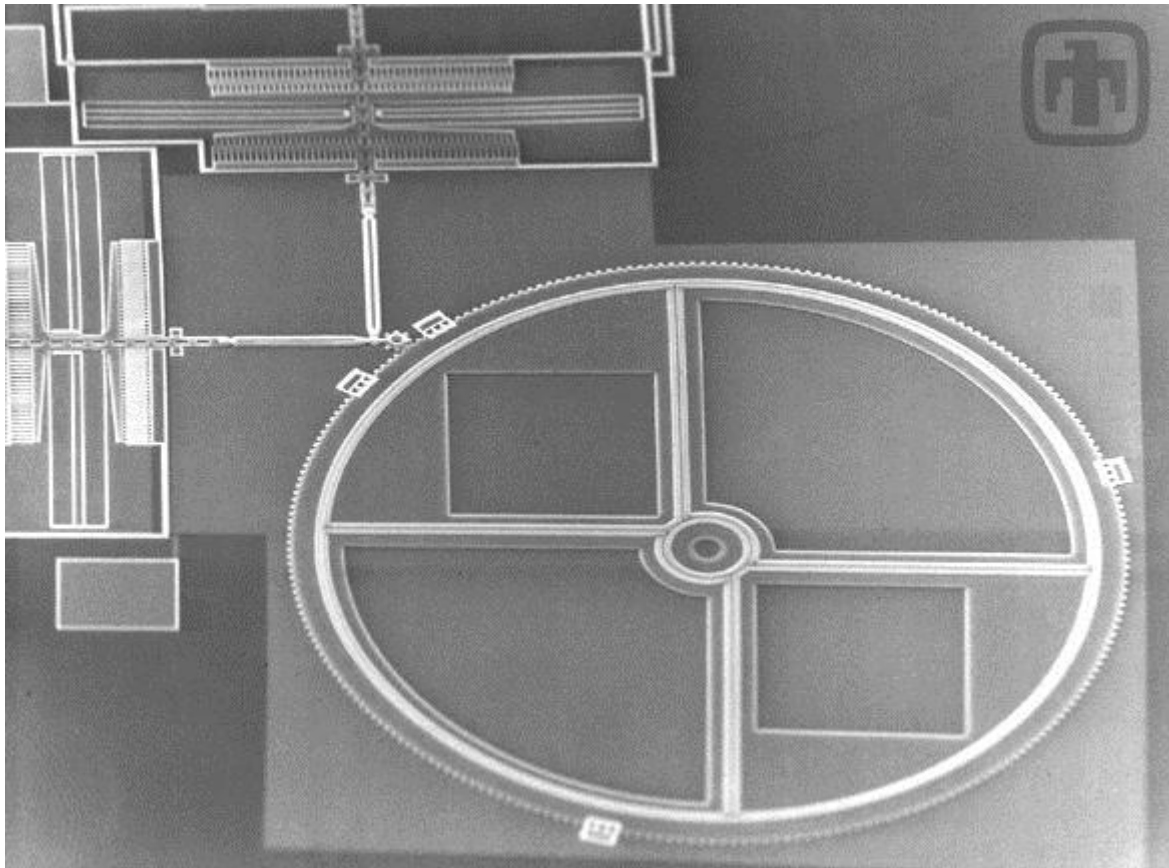
Сложно себе представить, чтобы кто-то решил от современного энергогенератора – турбины – двигаться в сторону прошлого. И все же такие нашлись и нашлись они в достаточно интересном месте. В американской государственной лаборатории Sandia, основной профиль которой — работа над ядерным оружием и прочими технологическими проектами, касающимися национальной безопасности США. Выросла эта лаборатория из проекта Манхэттен, если вы понимаете, о чем речь.

Сотрудники Sandia создали микроскопический паровой двигатель. А вернее, даже целых два: одноцилиндровый и трехцилиндровый. Сложно сказать, какие цели они преследовали на самом деле – не исключено, что ученые и сами до конца это знали. Однако получилось весьма экстравагантно. Ну и потом – как ни крути, это самый миниатюрный паровой двигатель в мире!



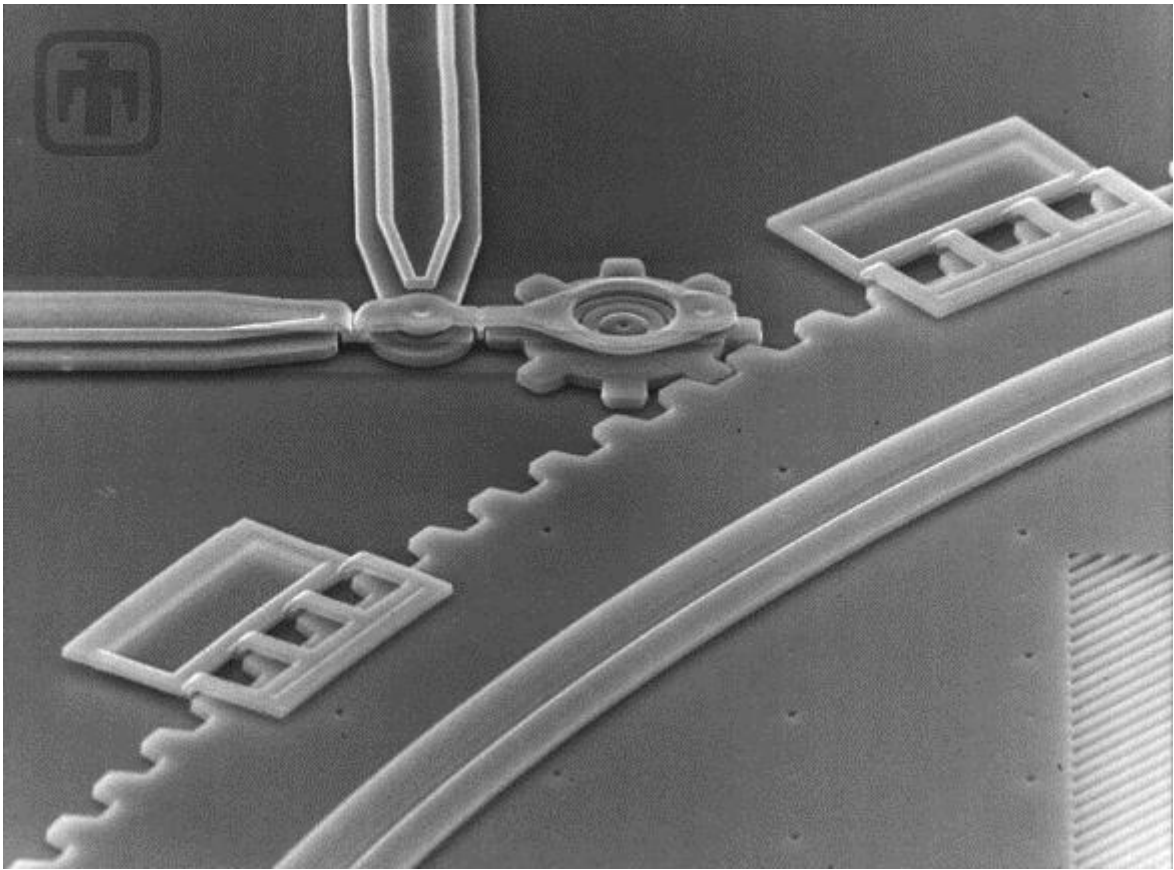
Самый маленький в мире паровой двигатель: трехцилиндровая версия

Вообще, в Sandia очень любят MEMS. И на удивление охотно – в отличие от наших «оборонщиков», которые и поныне не спешат выглядывать из своих «ящиков» – делятся своими разработками и концептами с общественностью. В Sandia успели разработать массу элементов, складывающихся в достаточно сложные MEMS-устройства. Возьмем, к примеру, оптический затвор.

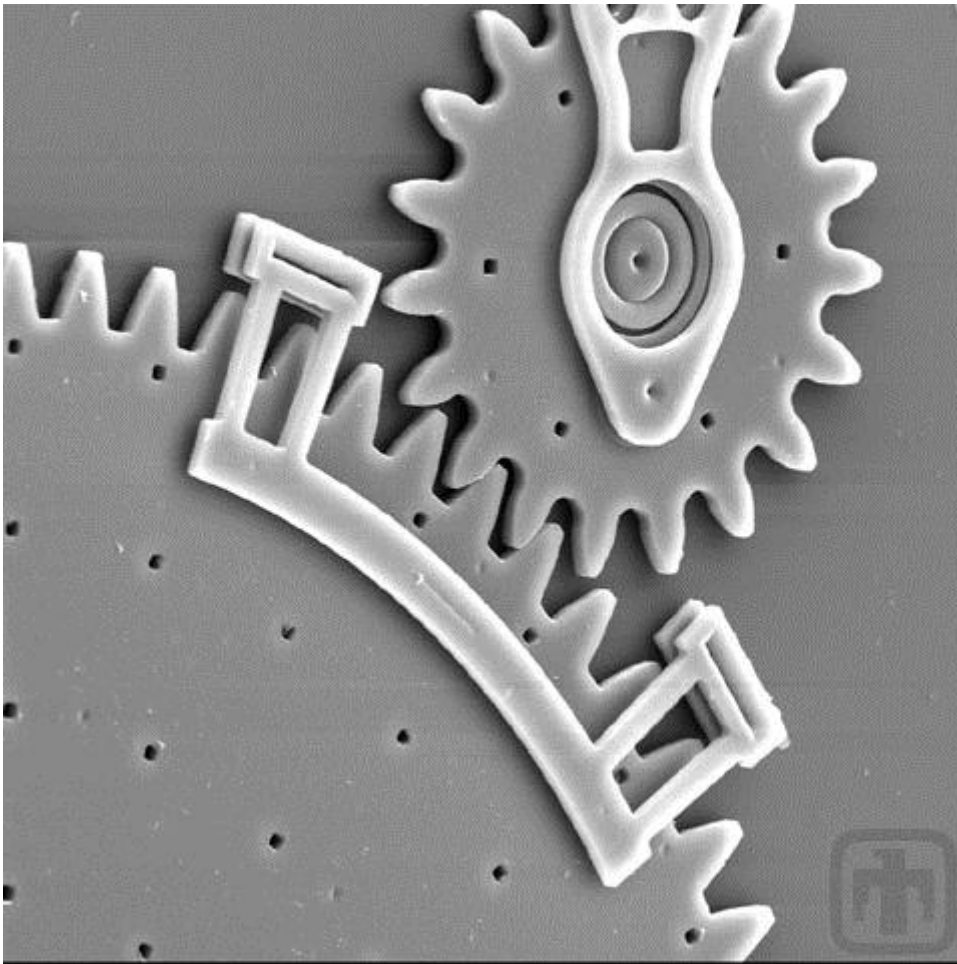


Оптический затвор разработки Sandia

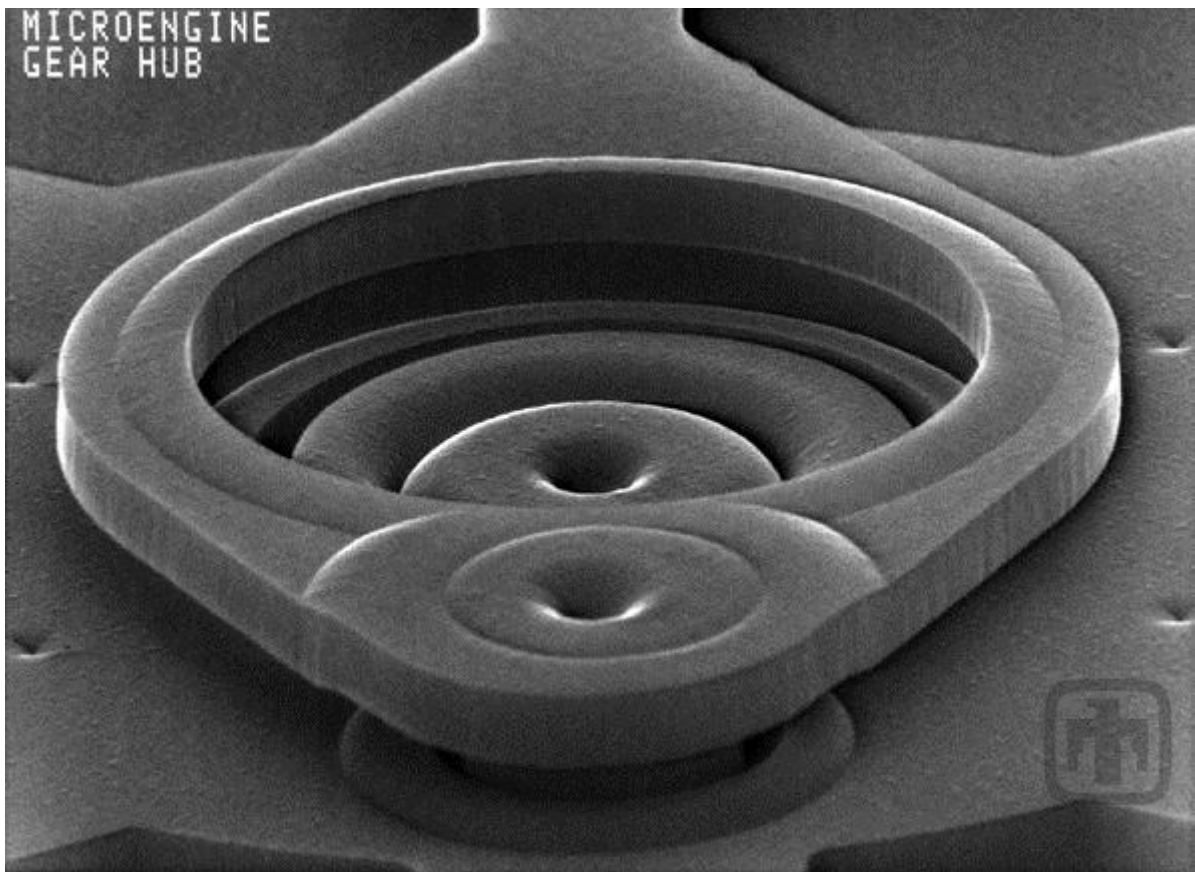
Устройство состоит из трех частей: самого затвора (большое колесико на фотографии), микродвигателя и трансмиссии. Двигатель состоит из двух расположенных перпендикулярно друг к другу электростатических актуаторов. Каждый из них может двигать шестеренку только в одном направлении: вперед и назад. Совместными усилиями они обеспечивают двумерное вращательное движение. Это движение с помощью маленькой шестеренки передается на большую, окантовывающую затвор.



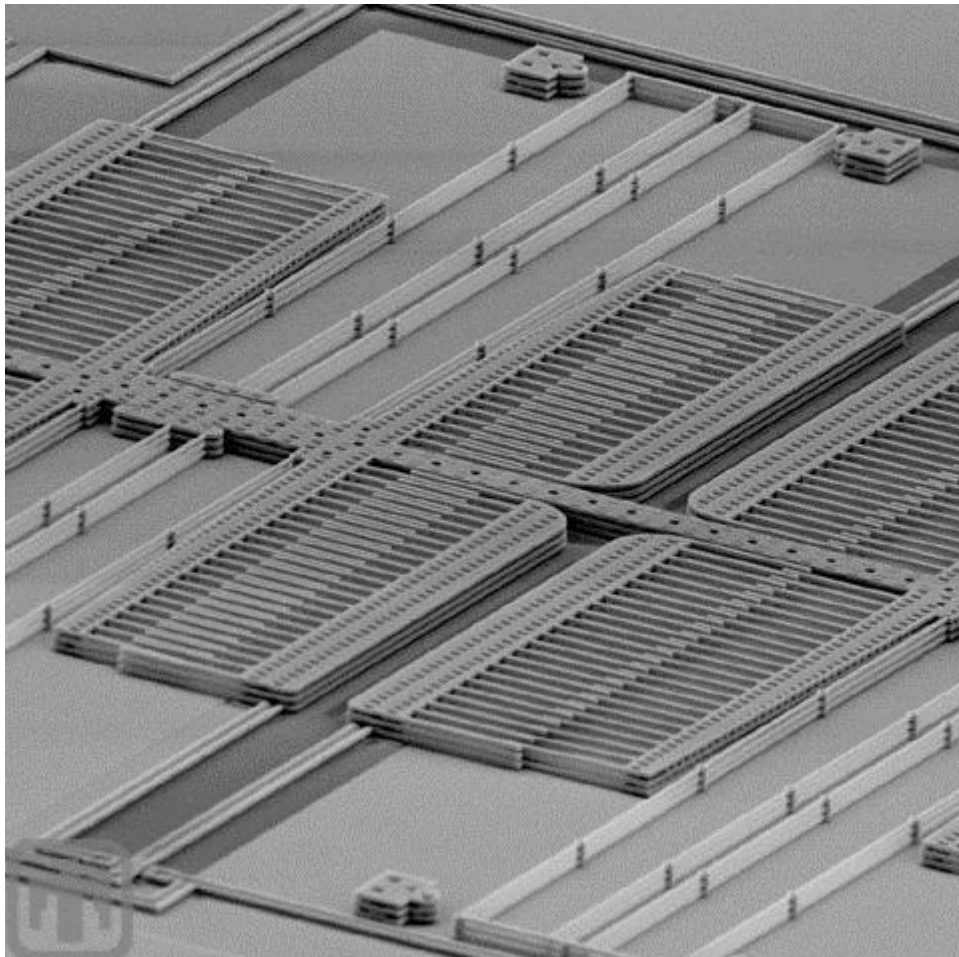
Миниатюрная шестеренка передает движение на затвор, за счет чего он может поворачиваться – с весьма большой скоростью



Элемент другой системы, но принцип тот же. Чтобы большое колесико не меняло при вращении угол наклона, его удерживают микроскопические направляющие

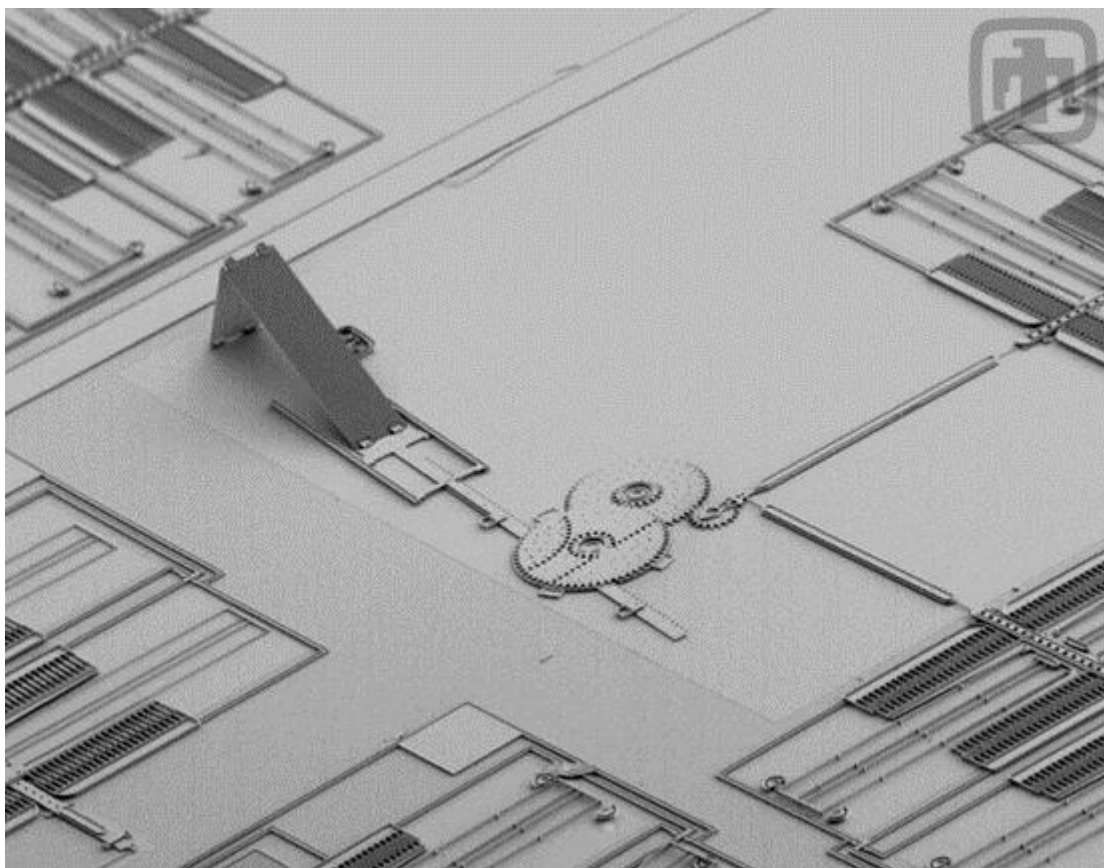


Это сопряжение переводит движения актуаторов во вращение шестеренки

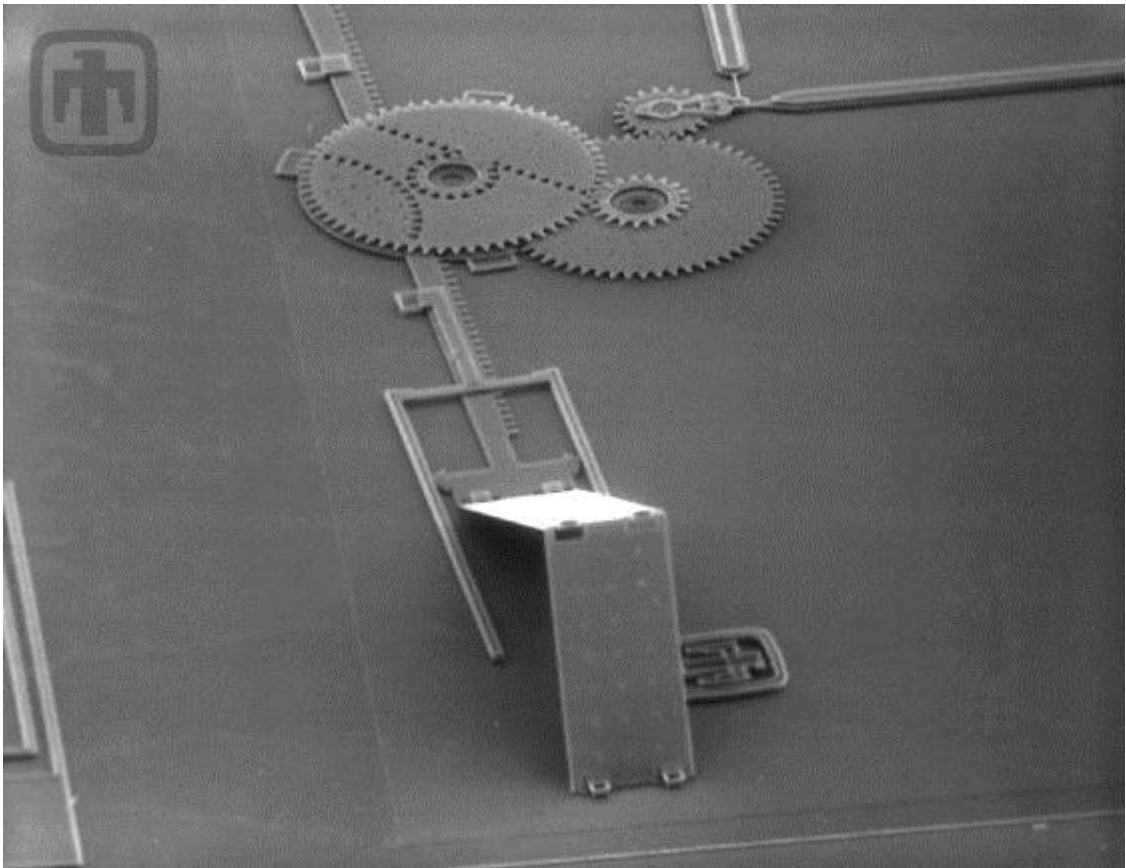


Рабочая часть электростатического актуатора. Работает так же, как акселерометр, только ровно наоборот – в MEMS очень много устройств, принципы работы которых зеркальны

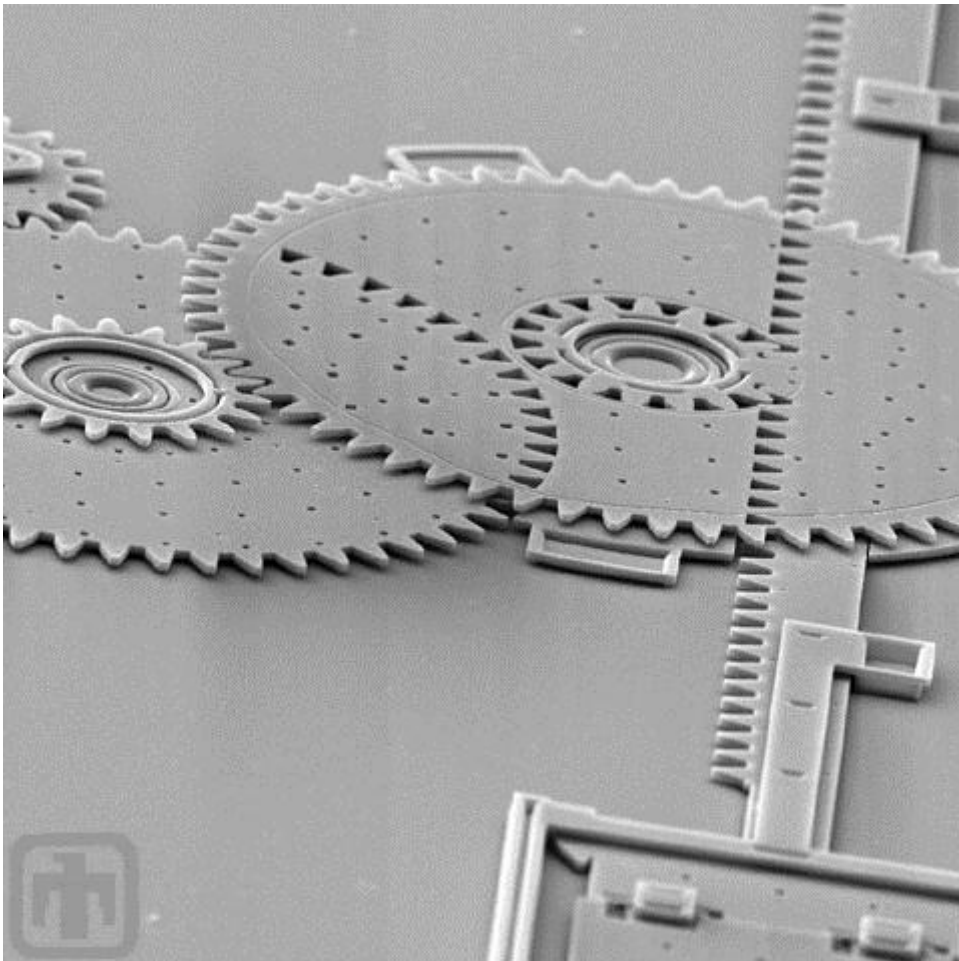
Несколько более сложное устройство: микрозеркало с плавным изменением угла наклона. В качестве двигателя используются все те же электростатические актуаторы. А вот трансмиссия похитрее: движение передается через шестеренки на зубчатую рейку, которая переводит вращение в линейное движение. За счет чего и меняет наклон зеркала.



Микрозеркало с изменяемым углом наклона

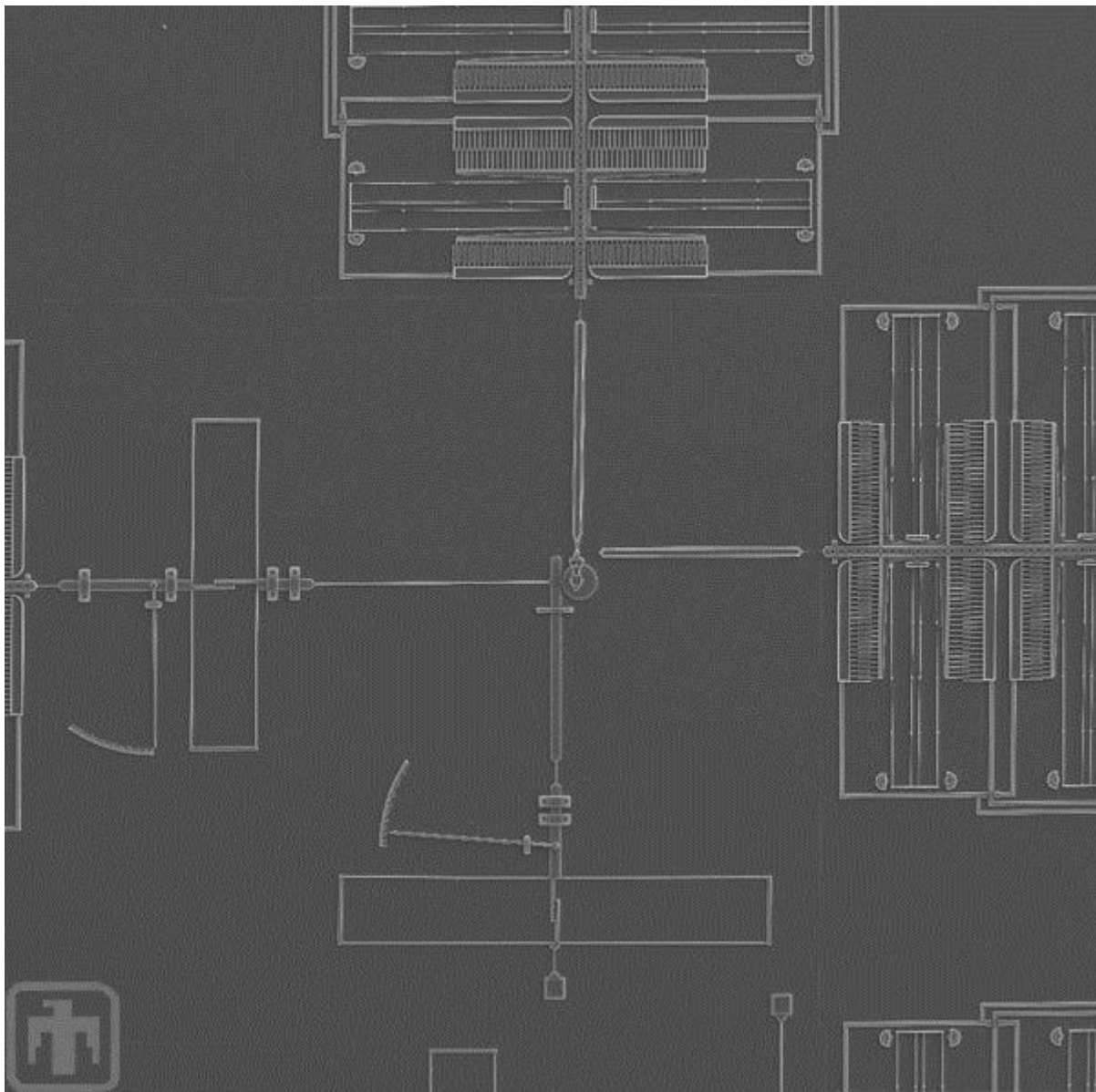


То же самое микрозеркало, снятое под другим углом и с большим увеличением

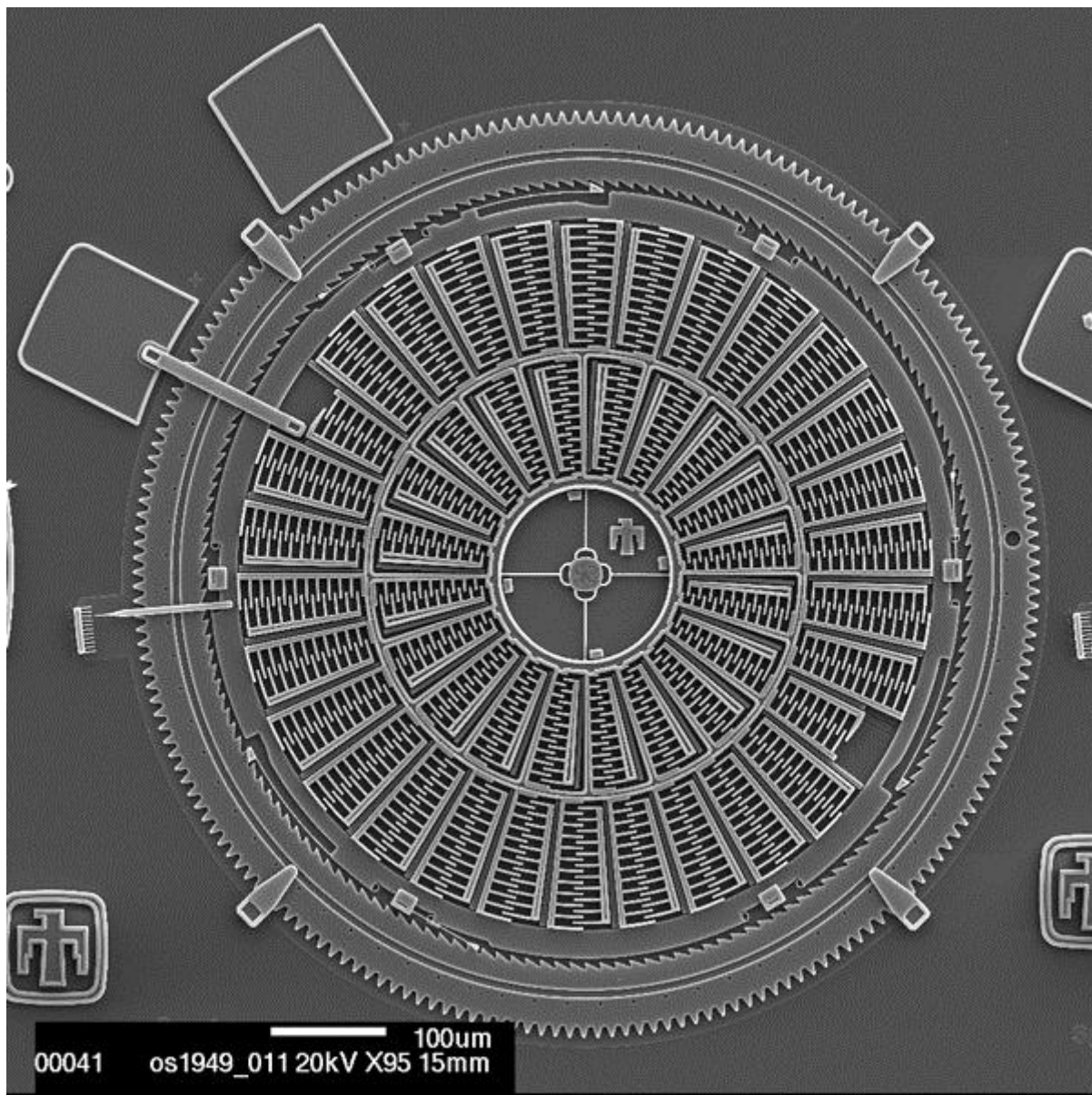


Крупный план трансмиссии и рейки

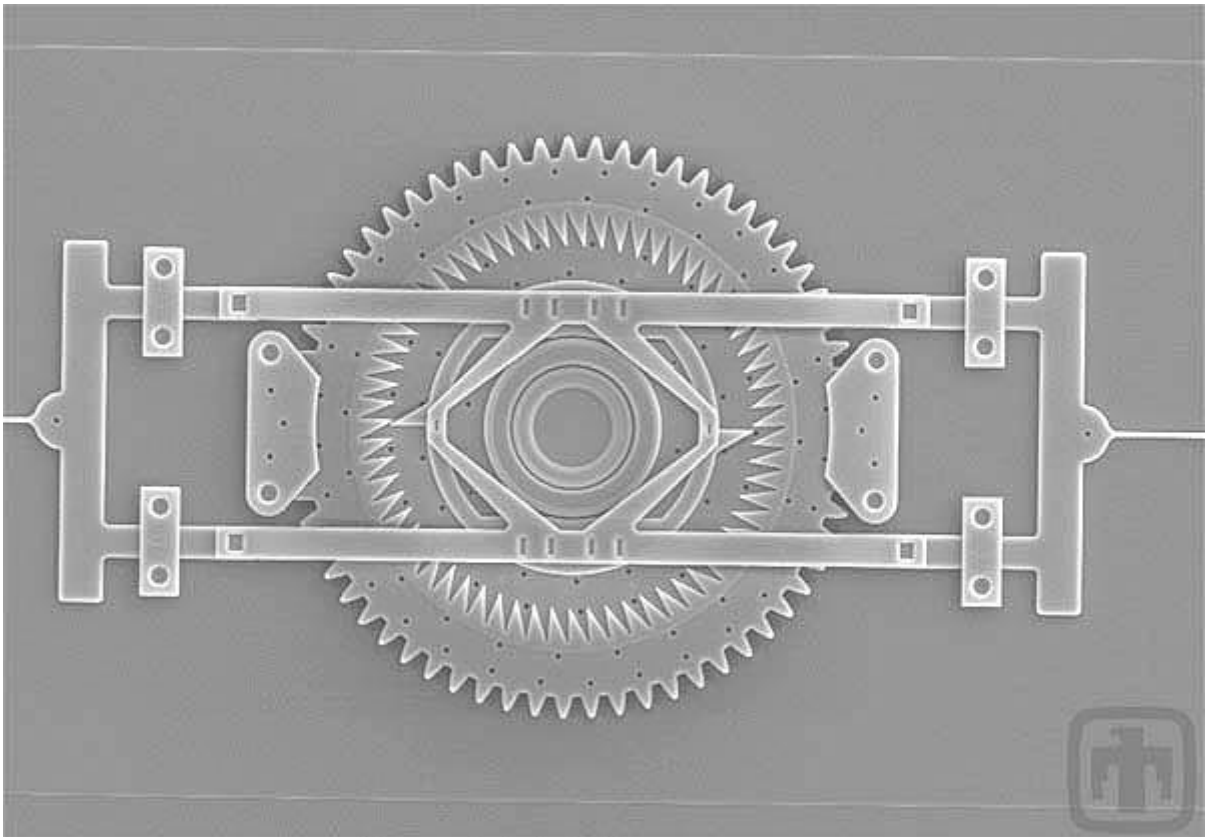
В это непросто поверить, но в арсенале Sandia есть и еще более замысловатые устройства. Например, микромеханический динамометр. Или прямо-таки ювелирной работы храповой механизм. Или микроскопическое индексирующее устройство. Или неимоверно замысловатое вращающее микрозеркало...



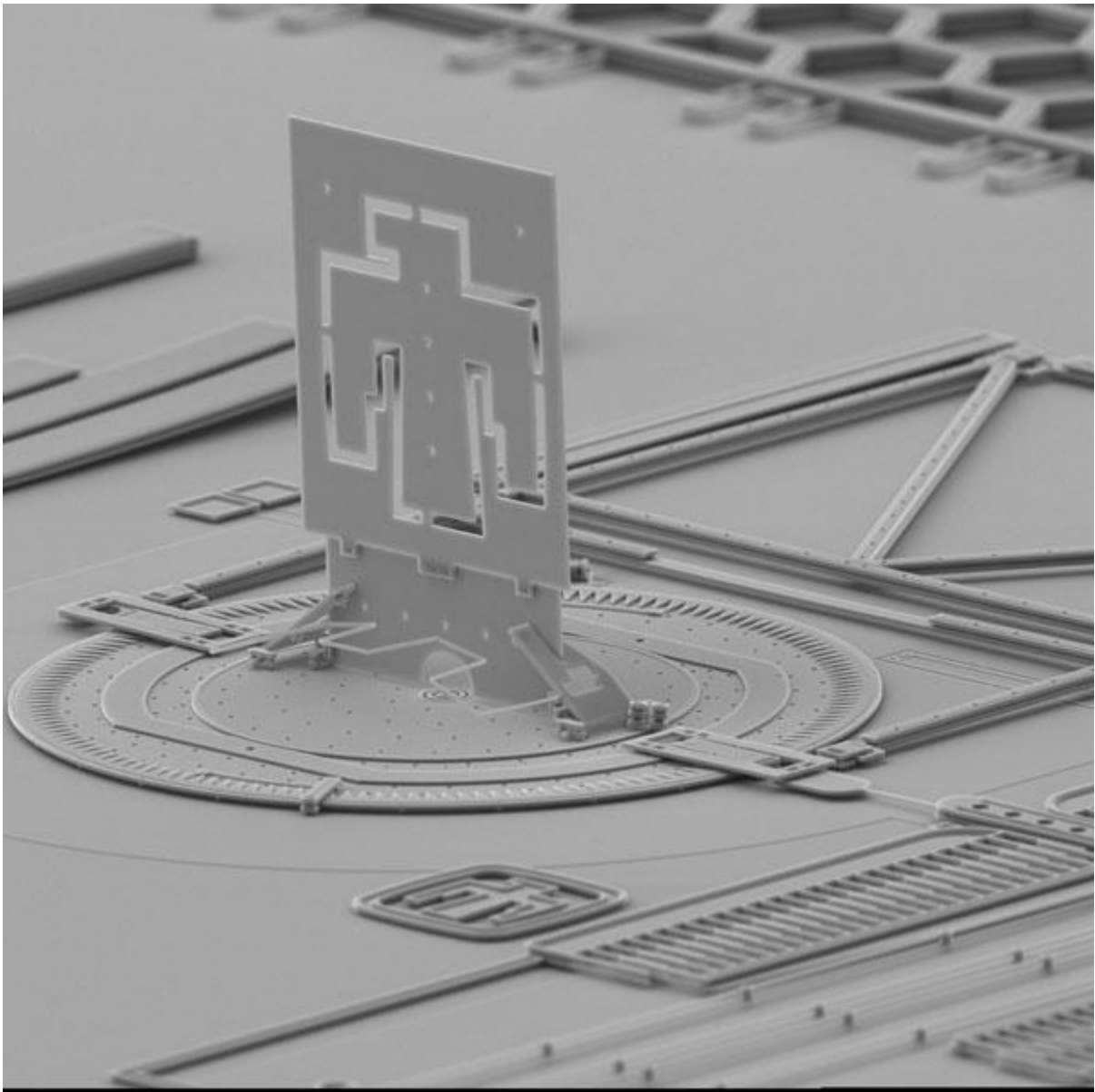
Микродинамометр



Микрохранивик

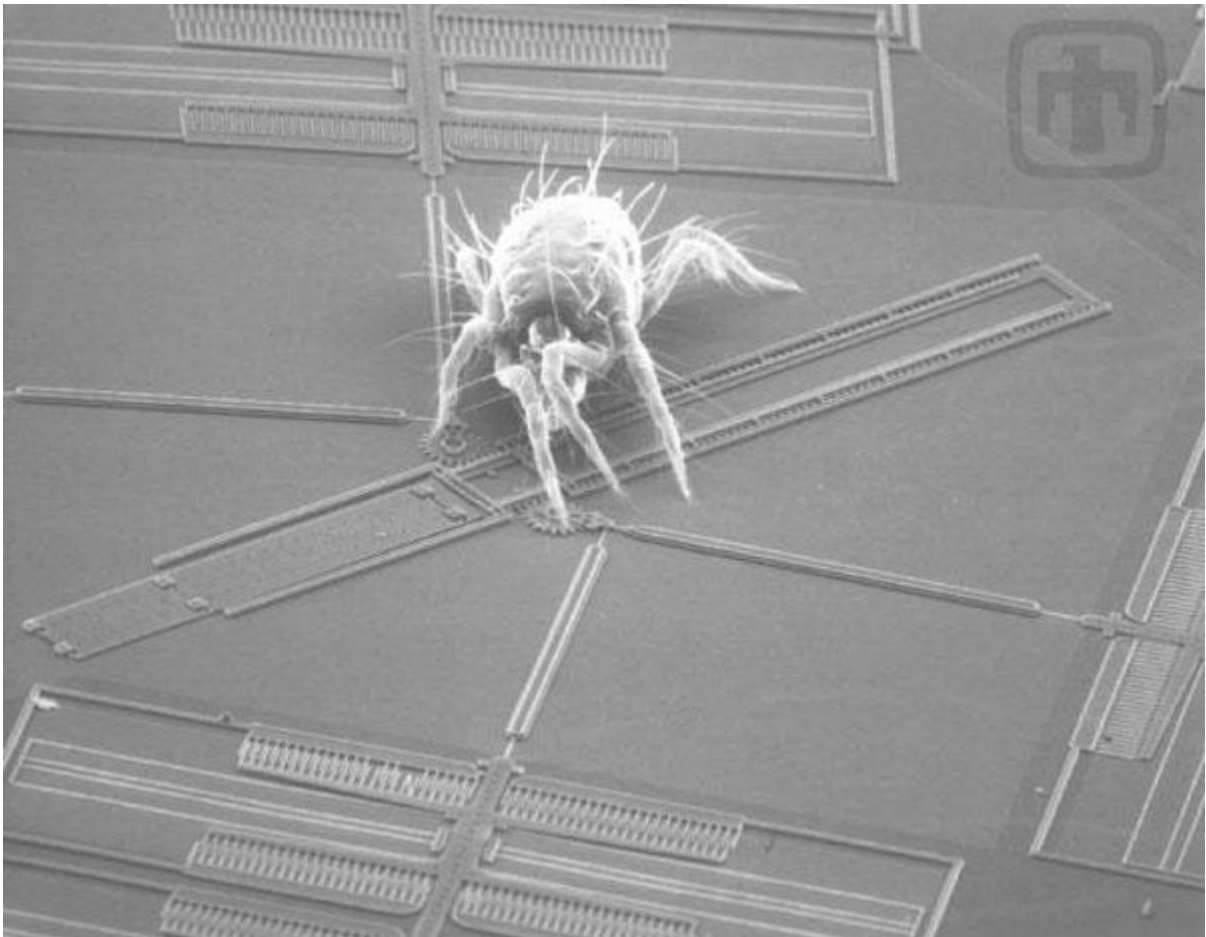


Индексирующее устройство



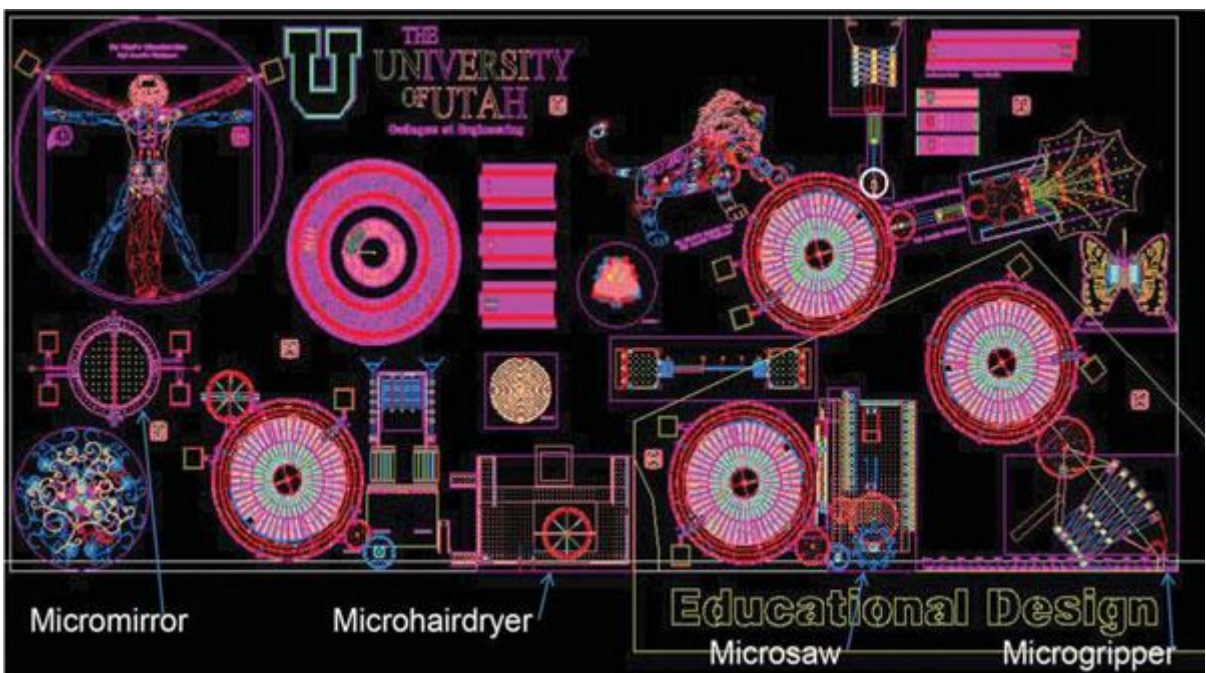
Микрозеркало с логотипом Sandia – любимое фото автора этой статьи

Самой же необычной разработкой Sandia стал самый маленький в мире работающий аттракцион. Сотрудники лаборатории умудрились покатать на одном из механизмов собственной разработке микроскопического клещика. Как говорят сами участники этого действия, сложнее всего было убедить насекомое, что ему действительно хочется кататься на этой импровизированной карусели.



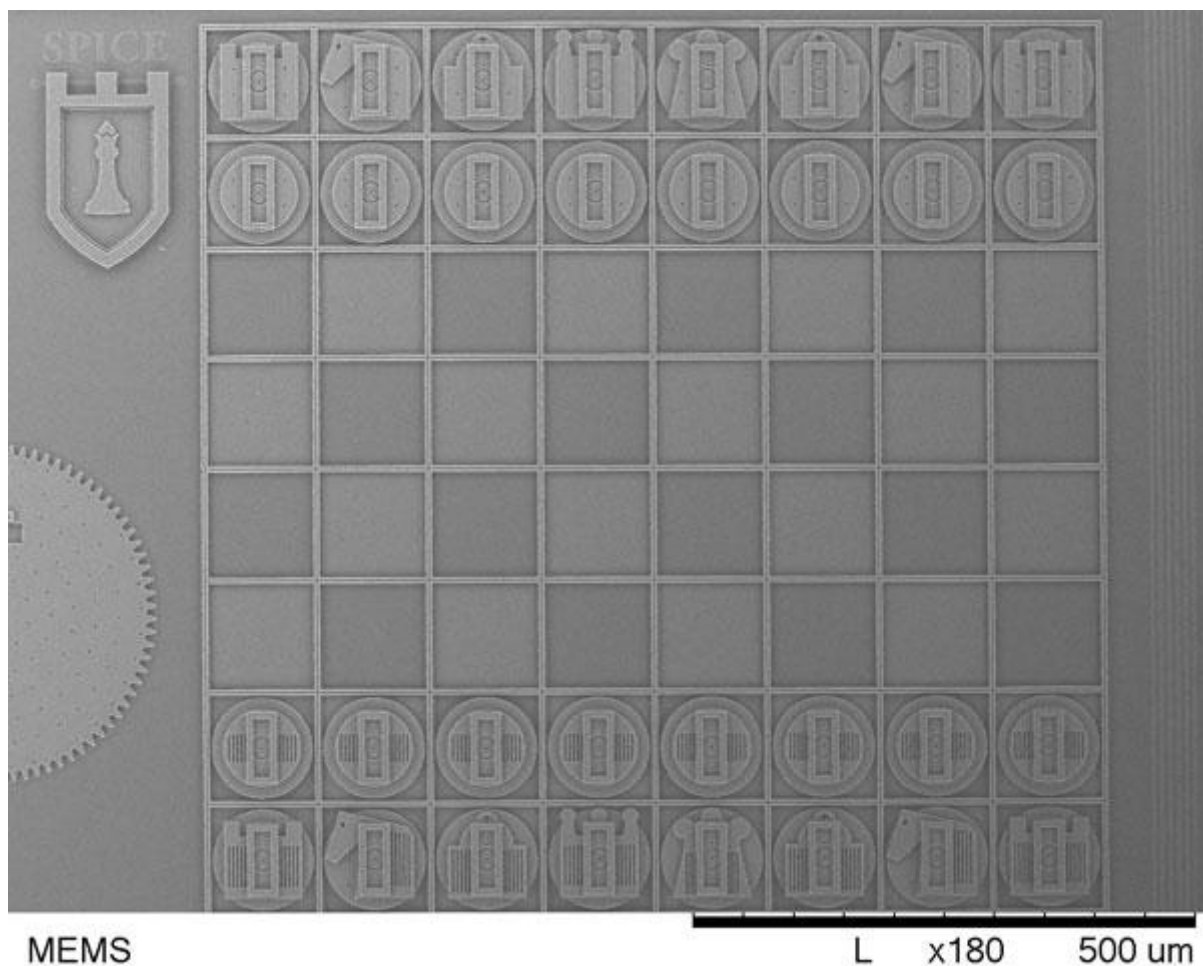
Самка паутинового клеща – длина тела меньше миллиметра! – изучает микрзеркало

Если уж серьезные дядьки в американской оборонке занимаются порой весьма легкомысленными вещами, то что уж говорить о студентах технических вузов? Например, в университете штата Юты изготовили микропарихмахерскую. Которая рассчитана на работу с одним-единственным человеческим волосом – его толщина, 100 микрон, как раз сравнима с габаритами получившейся конструкции.

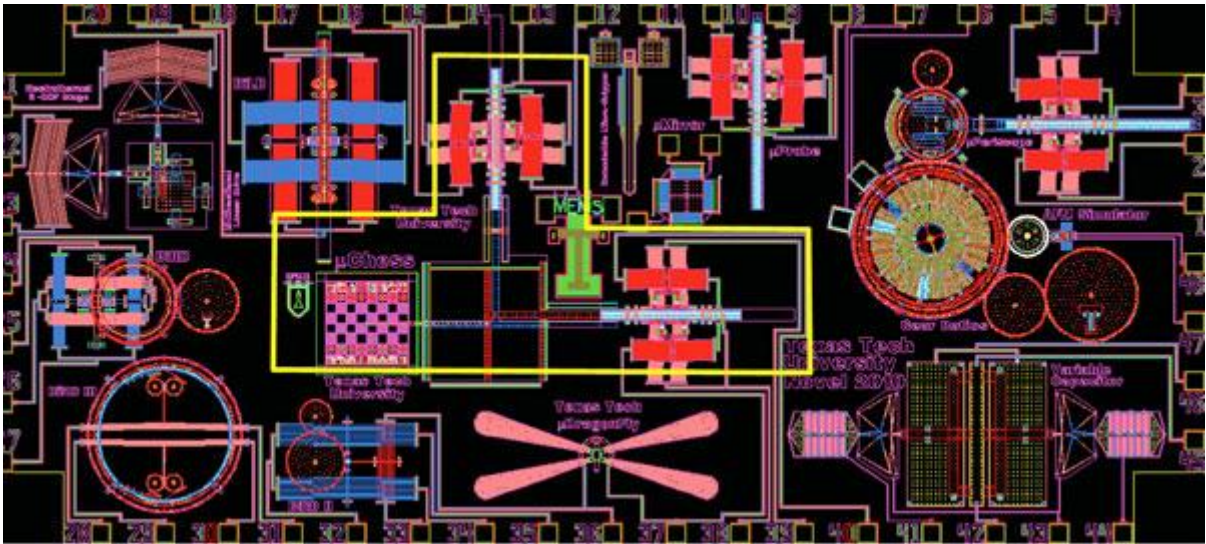


Микрозажим, микропила, микрофен и микрозеркало – микропарихмахерская полностью оснащена и готова к работе

Студенты Техасского технического университета, похоже, люди несколько более серьезные: они предпочли сконструировать самую маленькую в мире шахматную доску. И это не просто микроскопическое изображение – доска полностью функциональна. Фигуры выполнены в виде отдельных частей, и могут перемещаться по доске с помощью микроскопической роботизированной руки.



Микроскопическая шахматная доска, изготовленная Техасского технического университета. Размеры фигур – порядка 50 микрон



Для перемещения фигур по доске предусмотрена роботизированная рука

Теперь немного о том, как вся эта красота появляется на свет. Если в двух словах: при производстве MEMS-устройств используются примерно те же процессы и материалы, что и при производстве микроэлектроники. В качестве примера рассмотрим одну небольшую и относительно несложную задачу: производство массива микроэлектродов.

Первым делом, на кремниевую подложку – стандартную для микроэлектроники основу – наносится слой изолятора. Как вариант, вместо кремния с изолятором может использоваться стеклянная или даже пластиковая подложка – в данном случае вся идея в том, чтобы основа была электрически нейтральна.

Изготовление массива микроэлектродов с помощью фотолитографии



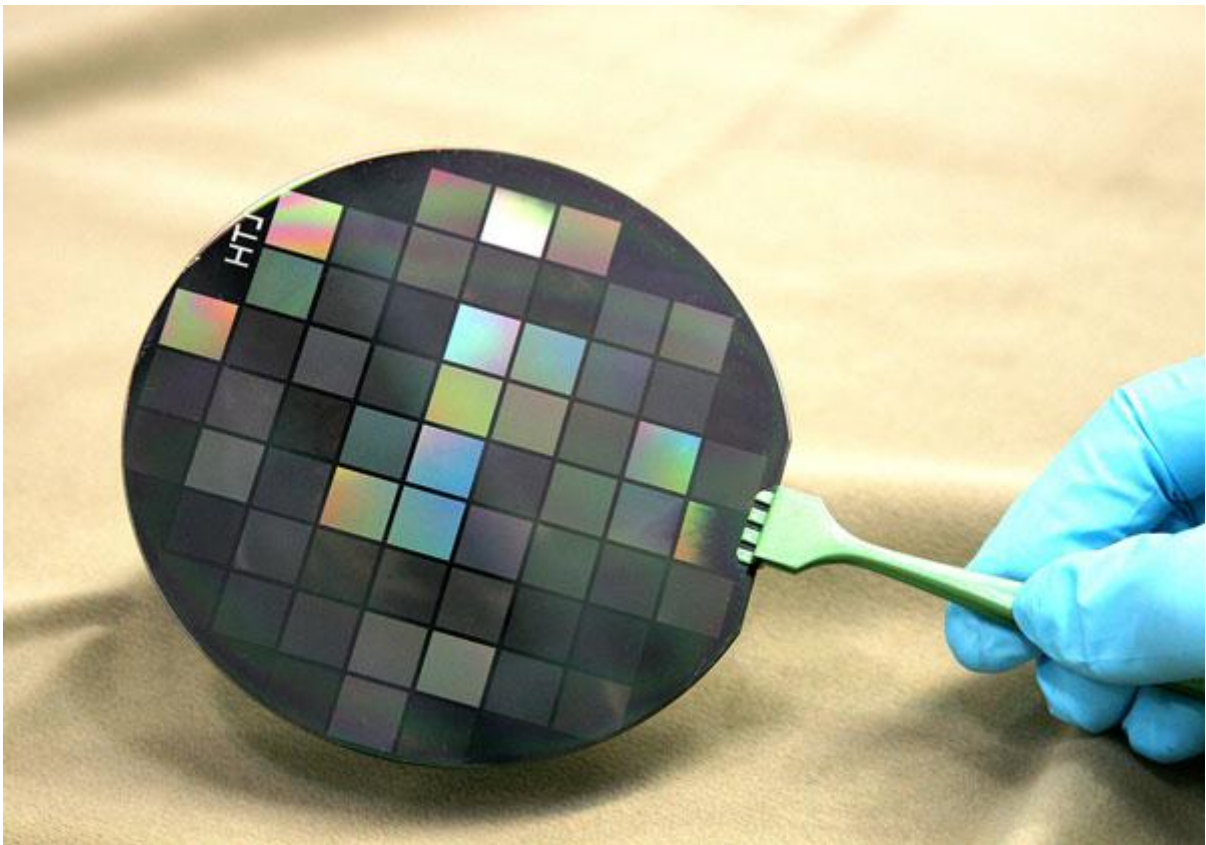
После этого наносится слой металла, из которого впоследствии и получатся электроды. Он покрывается фоторезистом. Что такое фоторезист и зачем он нужен было достаточно подробно объяснено в обзоре технологии производства компакт-дисков.

Следующий этап – литография. Пропущенный через маску ультрафиолет (вполне может быть использовано и другое излучение – зависит от конкретной технологии) изменяет свойства фоторезиста. Та его часть, на которую попали лучи, становится нестойкой к растворителю и удаляется, обнажая слой металла. Неприкрытый фоторезистом металл вытравливается.

После удаления уже ненужного слоя фоторезиста на получившуюся поверхность наносится слой изолятора. Снова наносится фоторезист, снова через маску он облучается ультрафиолетом, снова производится травление, но уже слоя изолятора. В итоге получаются аккуратные углубления, в каждом из которых располагается электрод.

Разумеется, это был простейший, в прямом смысле слова элементарный пример – любые MEMS в десятки и сотни раз сложнее. Но производятся они примерно так же: с помощью постепенного наращивания одного слоя за другим. Как и в микроэлектронике, устройства производятся не по отдельности, а достаточно крупными пластинами, которые в конце

процесса разрезаются на отдельные чипы и упаковываются в пластиковые, керамические и так далее корпуса.



Четырехдюймовая пластина MEMS. Данные конкретные устройства изготовлены компанией Advanced Diamonds Technologies. Это не просто красивое название – компания действительно делает алмазные микроустройства

Достаточно сложно представить, что полученное столь непростым способом устройство может стоить пару-тройку десятков рублей. Однако это действительно так – спасибо отработанным производственным процессам и многомиллионным партиям готовых чипов.

На этом мы завершаем разговор о MEMS. Впрочем, прогресс на месте не стоит, так что наверняка к этой теме нам еще придется вернуться. В конце концов, уже идет разработка еще более тонких устройств – NEMS, нанозлектромеханических систем. А значит, еще будет о чем поговорить.