

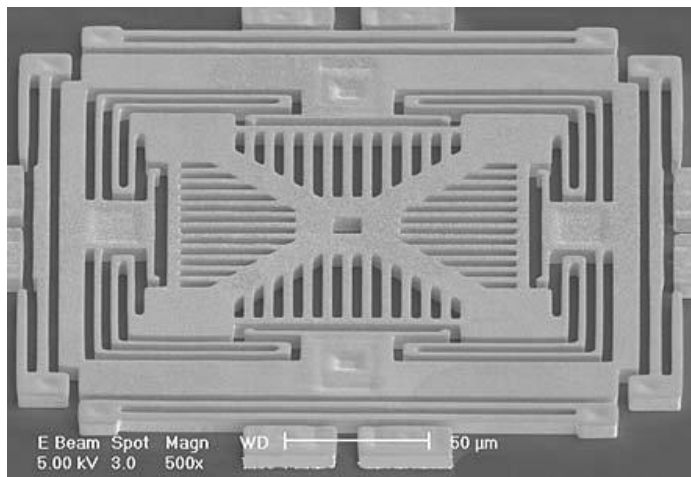
# МЭМС

---

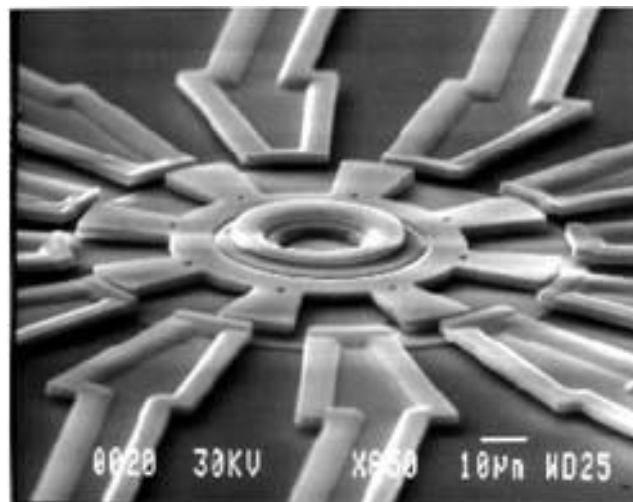
Микроэлектромеханические системы

# Что такое МЭМС?

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) – это системы, включающие в себя взаимосвязанные механические и электрические компоненты микронных размеров.



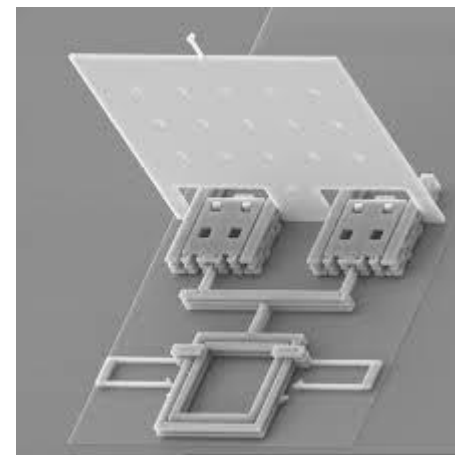
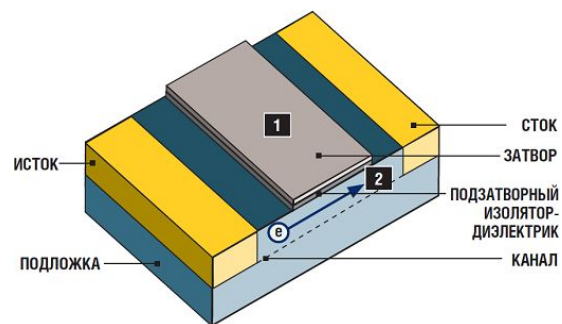
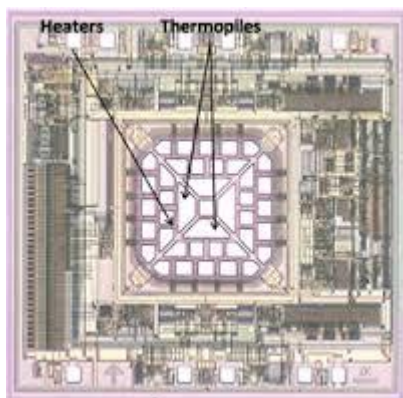
*Трехосевой  
акселерометр*



*Электрический  
микродвигатель*

# Что такое МЭМС?

МЭМС = Электроника + Микромеханика



# История создания

- 1958 г. - первые прототипы интегральных схем (ИС);
- 1960 г. - мелкосерийный выпуск ИС;
- 1974 г. - промышленный выпуск тензодатчиков на основе кремния (National Semiconductors);
- 1982 г. - термин микрообработка (micromachining) используется для описания процессов изготовления механических подсистем (диафрагм и микробалок);
- 1986 г. - в одном из отчетов министерства обороны США был впервые использован термин “микроэлектромеханические системы” (МЭМС);

# Способы изготовления

## Изготовление МЭМС



Объемная  
микрообработка  
(bulk micromachining)

Субтрактивный подход – от  
целого отсекаем лишнее  
(как изготовление статуи)

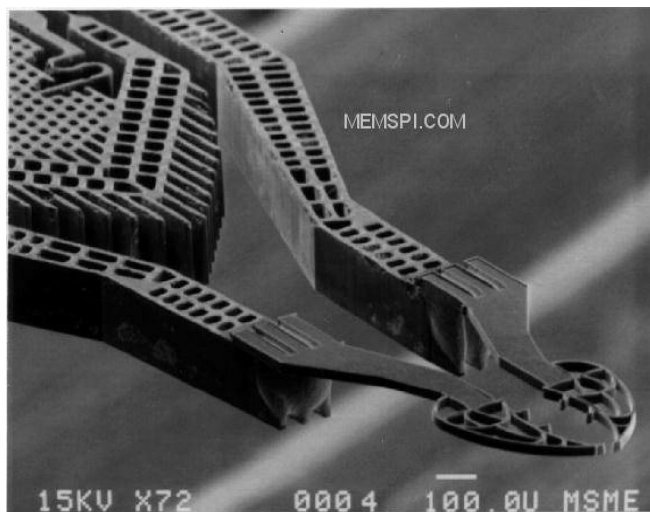


Поверхностная  
микрообработка  
(surface micromachining)

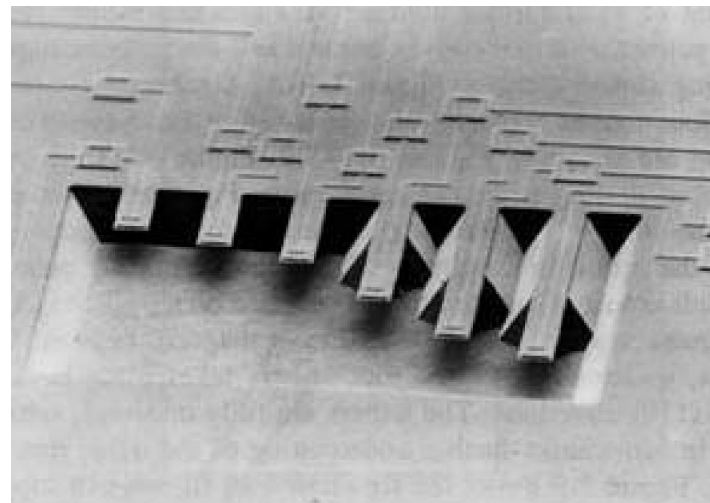
Аддитивный подход –  
строим целое из  
кирпичиков  
(как строительство дома)

# Объемная микрообработка

Это процесс, идущий от поверхности материала-основы вглубь, при которой травлением последовательно удаляются ненужные участки этого материала, в результате чего остаются механические структуры необходимой формы.

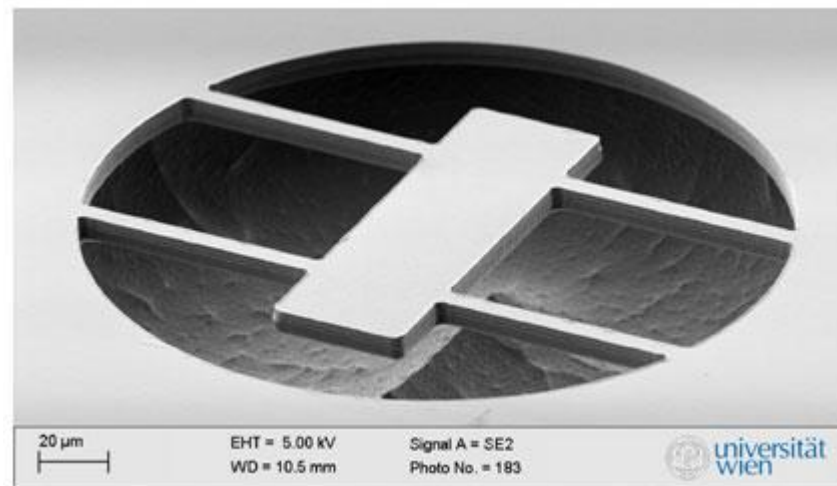
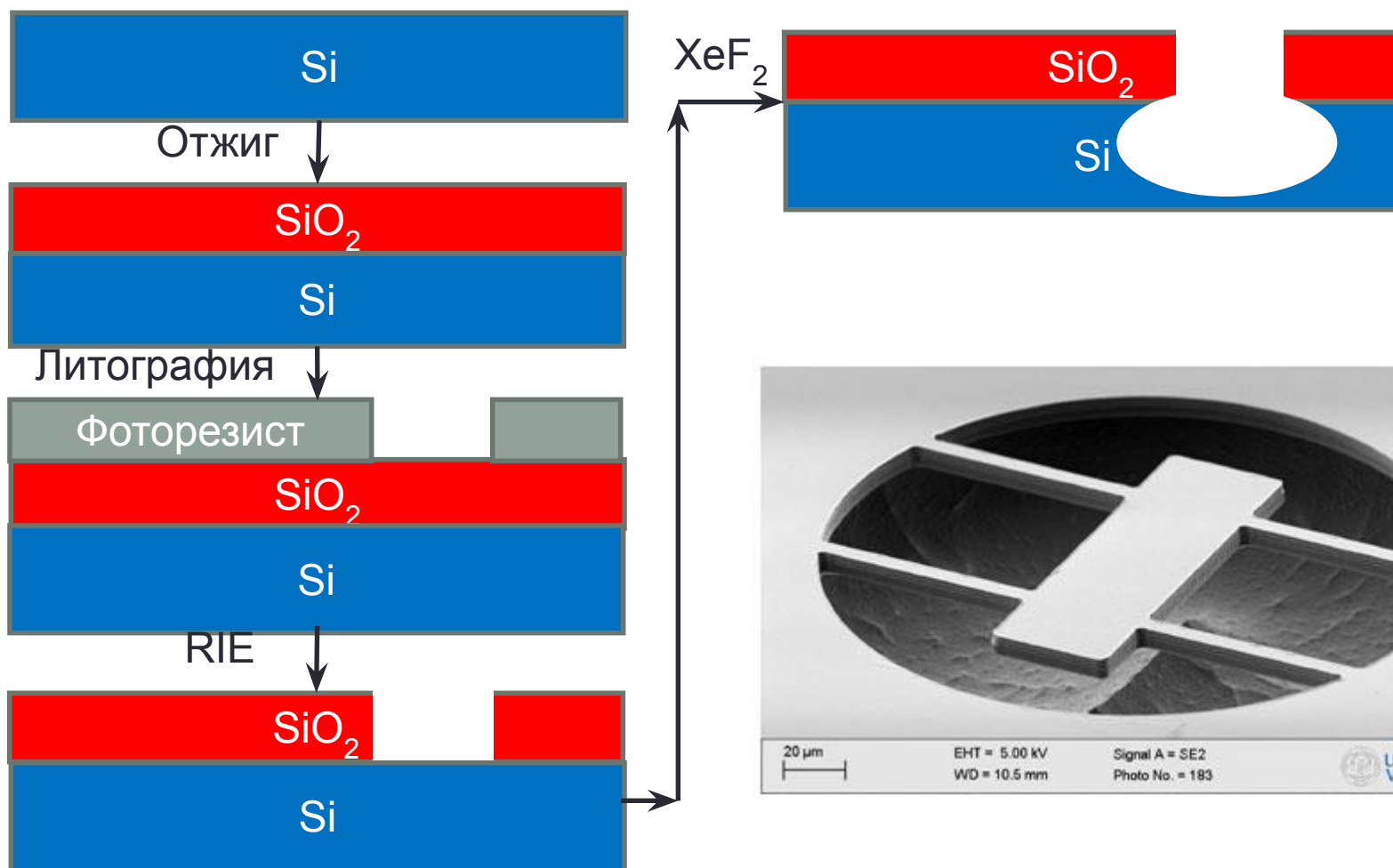


*Микрозахват (microgripper)*



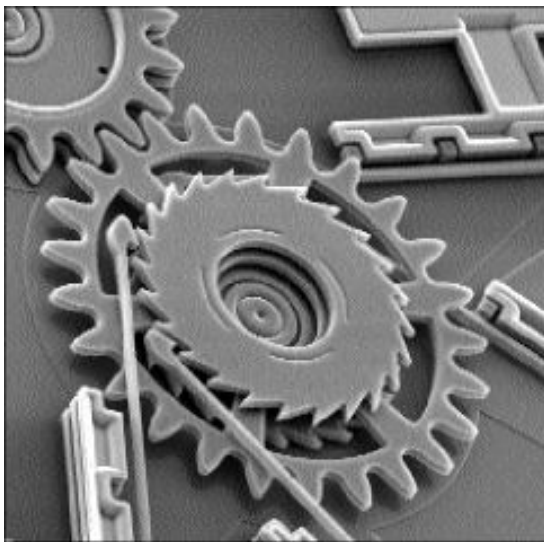
*Микрокантилеверы*

# Объемная микрообработка

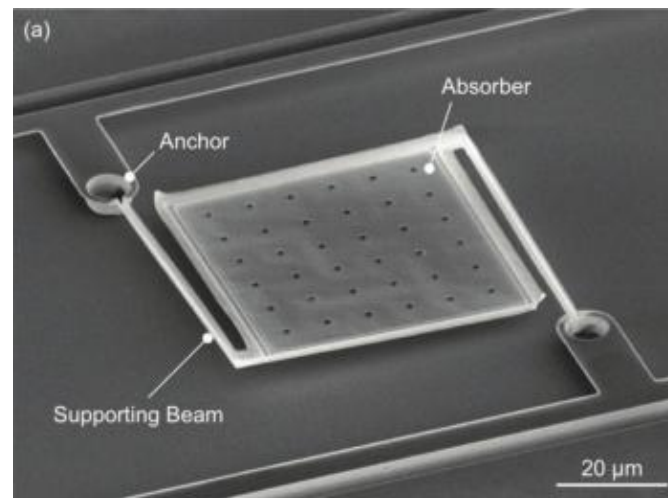


# Поверхностная микрообработка

Это процесс, заключающийся в последовательных циклах нанесения тонких слоев материала, которые затем с помощью литографии и последующего травления приобретает необходимую геометрическую форму



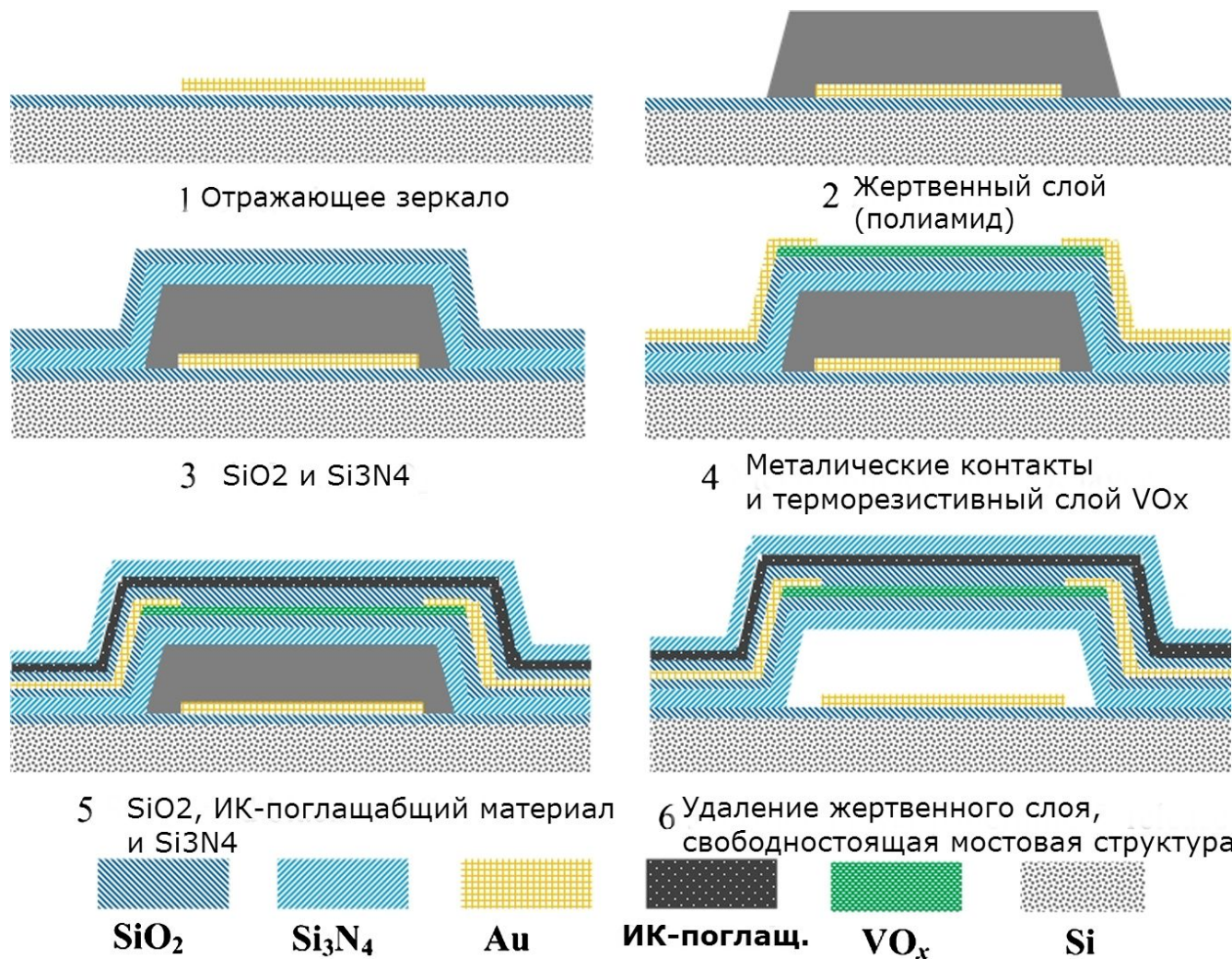
*Система зубчатой передачи*



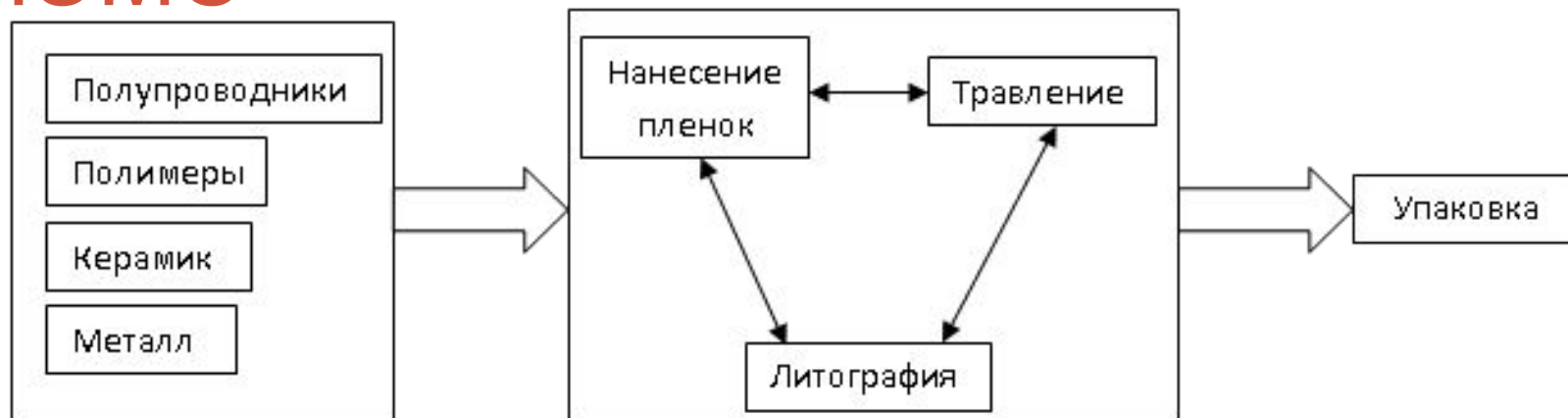
*Элемент  
тепловизионной  
матрицы*



# Поверхностная микрообработка



# Обобщенная схема изготовления МЭМС



# Применение МЭМС

```
graph TD; A[Применение МЭМС] --> B[Датчики]; A --> C[Исполнительные механизмы (актуаторы)];
```

## Датчики:

- Акселерометры;
- Гироскопы;
- Магнетометры;
- Датчики давления
- расходомеры

## Исполнительные

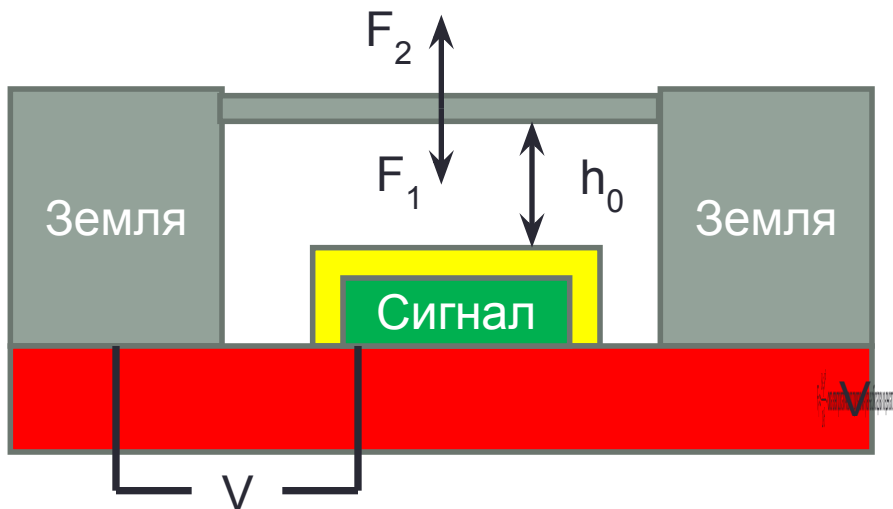
## механизмы (актуаторы):

- Микродвигатели;
- Микрозахваты;
- Микрозеркала;

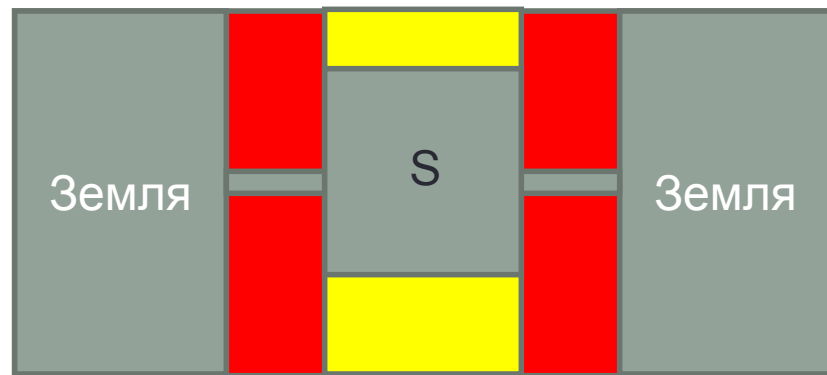
## Области применения:

1. МЭМС-компоненты для высокочастотной электроники (RF MEMS);
2. Датчики на основе сил инерции;
3. Акустические и ультразвуковые МЭМС, датчики давления;
4. Оптические МЭМС;
5. Биомедицинские МЭМС;
6. Микроманипуляторы.

# Высокочастотные МЭМС ключи



Вид сбоку



Вид сверху

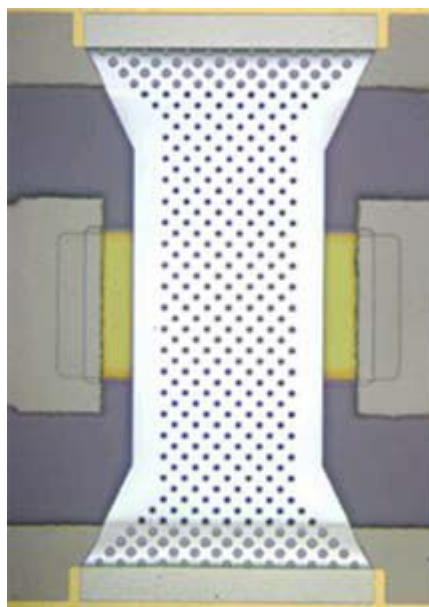
$F_1 \approx \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2}$  - сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)

$F_1 \approx \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2}$  - сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)

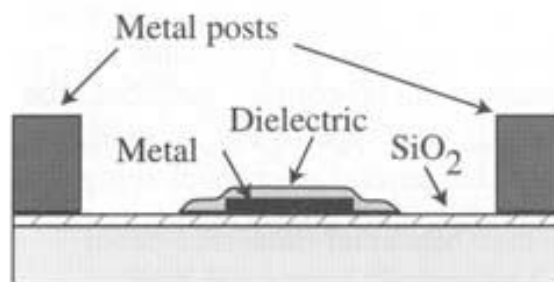
$F_1 \approx \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2}$  - сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)

$F_1 \approx \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2}$  - сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)  $\rightarrow \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2}$  - сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)  $\rightarrow V' = 0 \rightarrow F_1 \approx \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2}$  - сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)  $\rightarrow \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2}$  - сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)

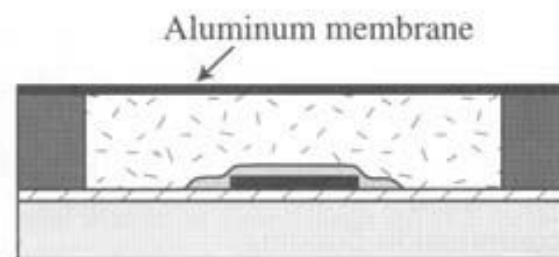
# Высокочастотные МЭМС ключи



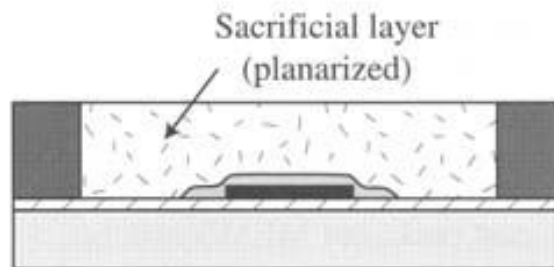
$$V_{кр} = 30-50В$$



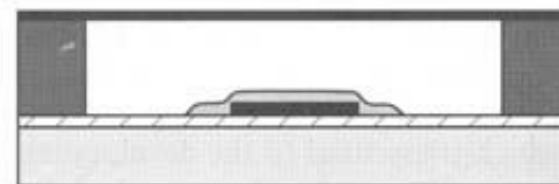
(a)



(c)

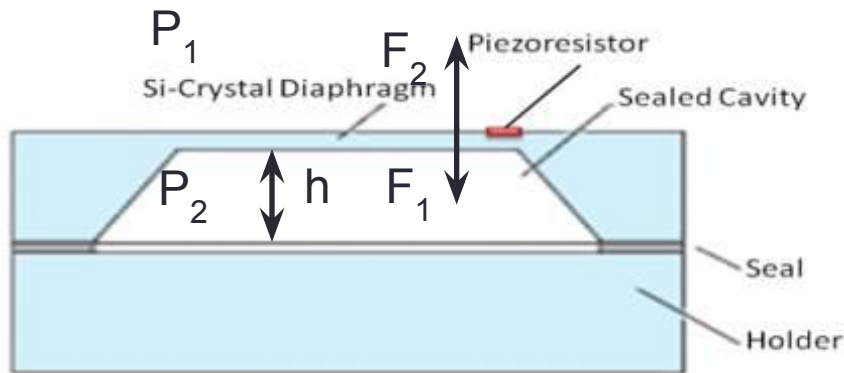


(b)

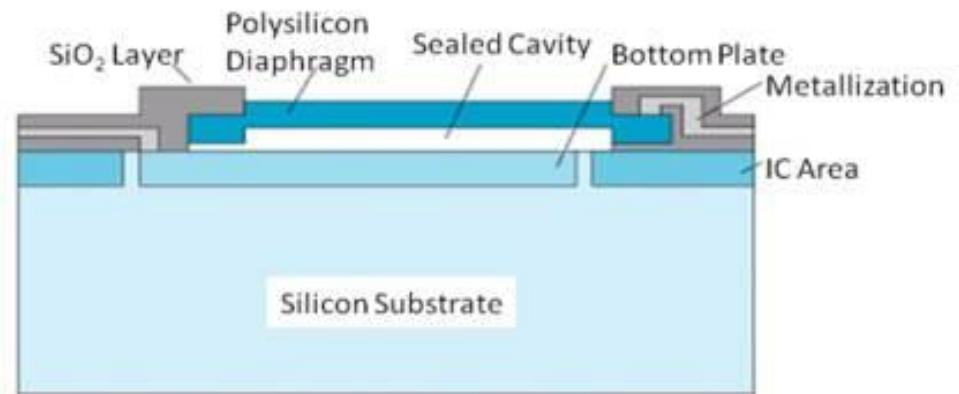


(d)

# Датчик давления на основе МЭМС



Датчики давления  
пьезорезистивного типа



Датчики давления  
емкостного типа

$$F_1 \approx \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2} - \text{сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)}$$

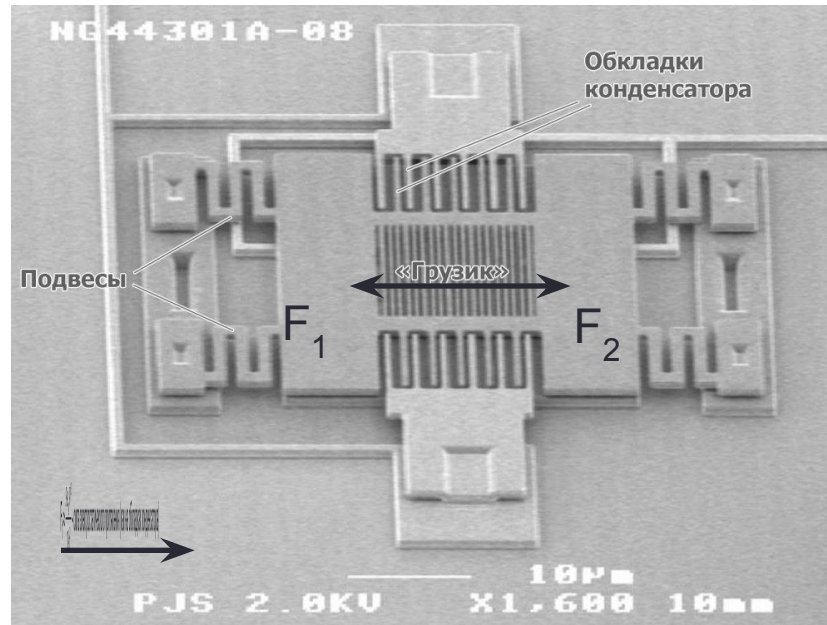
$$F_1 \approx \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2} - \text{сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)}$$

$$F_1 \approx \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2} - \text{сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)}$$

$$F_1 \approx \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2} - \text{сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)}$$

$$F_1 \approx \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2} - \text{сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)}$$

# Акселерометры и гироскопы



$$F_1 \approx \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2} - \text{сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)}$$

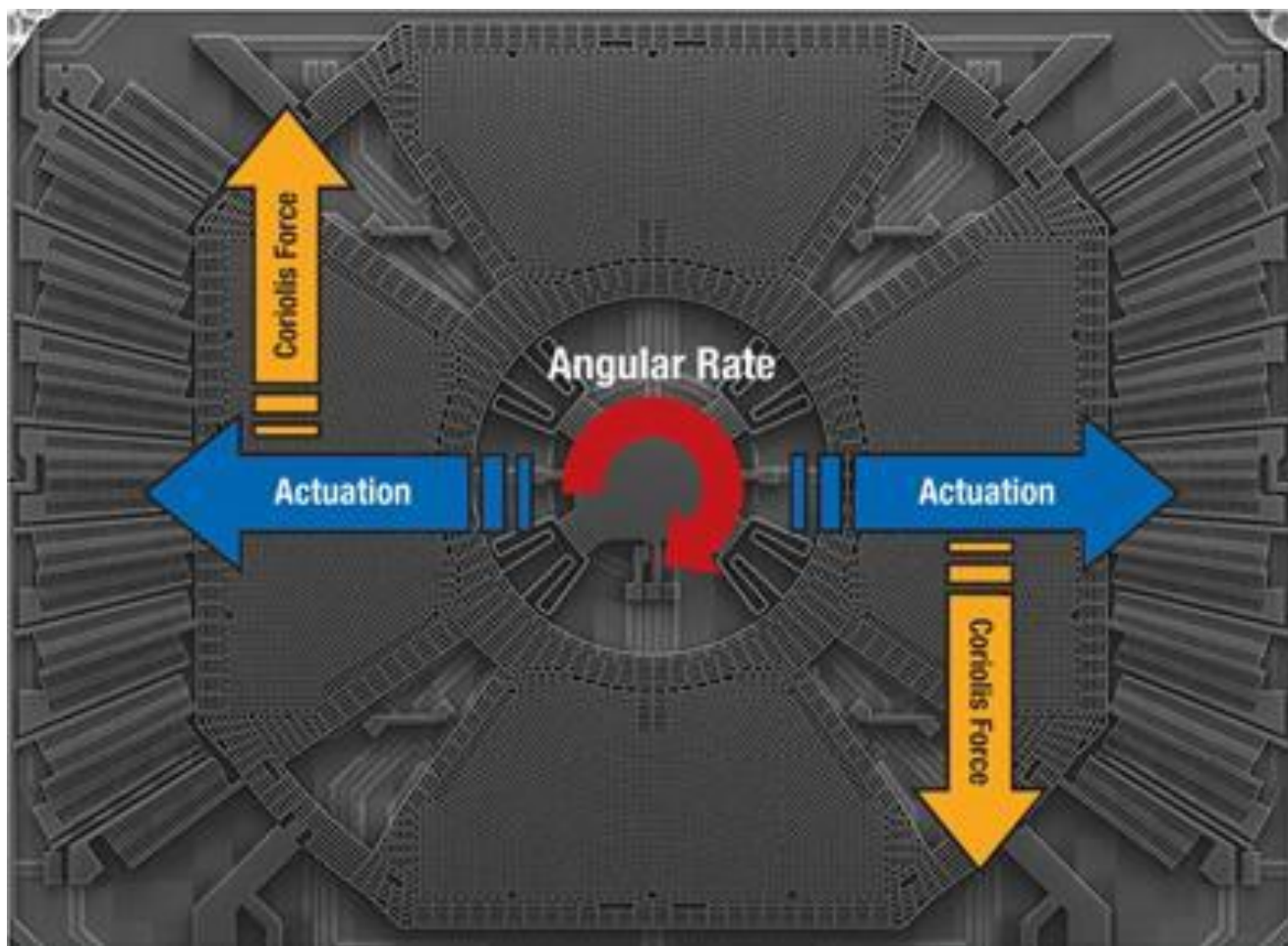
$$F_1 \approx \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2} - \text{сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)}$$

$F_1 \approx \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2}$  - сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)

$$F_1 \approx \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2} - \text{сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)}$$

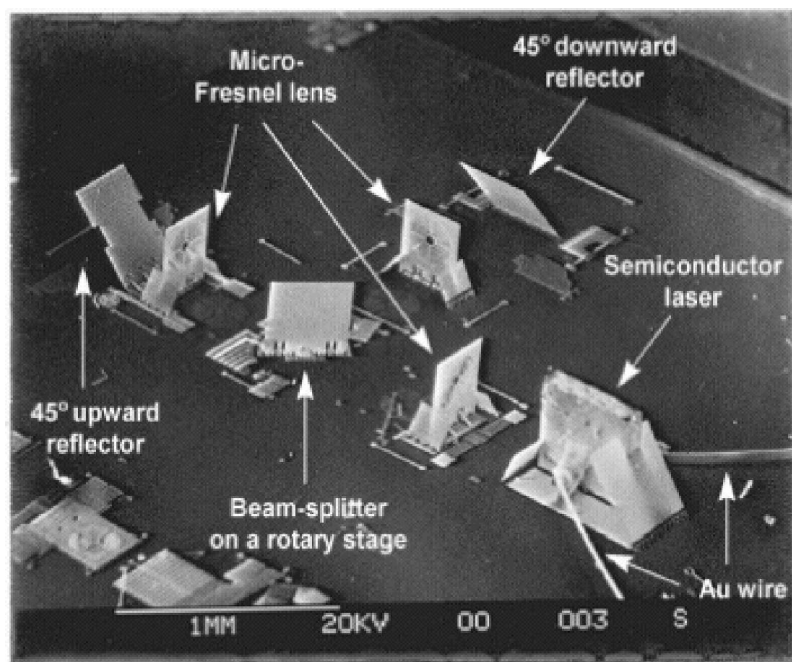
$$F_1 \approx \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot V^2}{2 \cdot h^2} - \text{сила электростатического притяжения (как на обкладках конденсатора)}$$

# Акселерометры и гироскопы

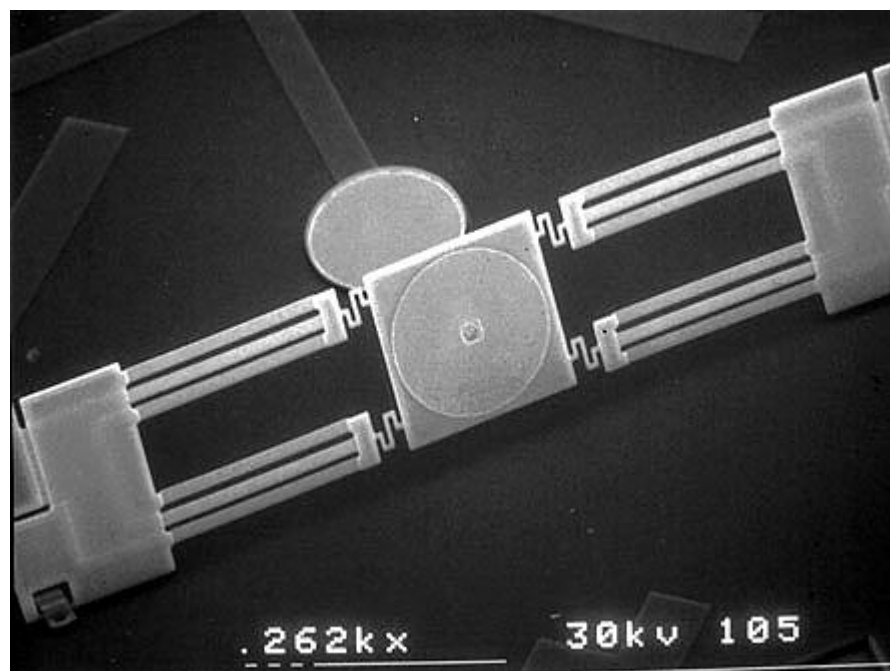




# Оптические МЭМС



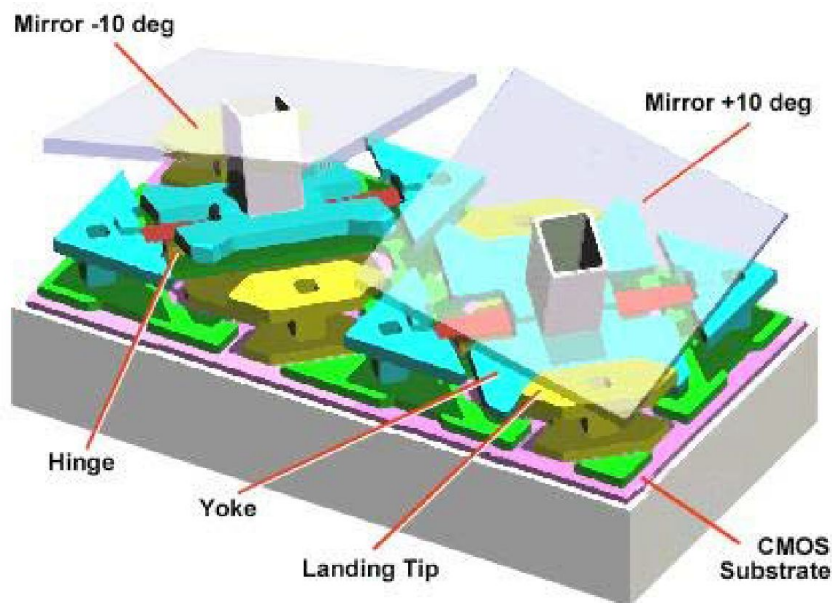
*Элементы МОЭМС: зеркала, призмы, линзы*



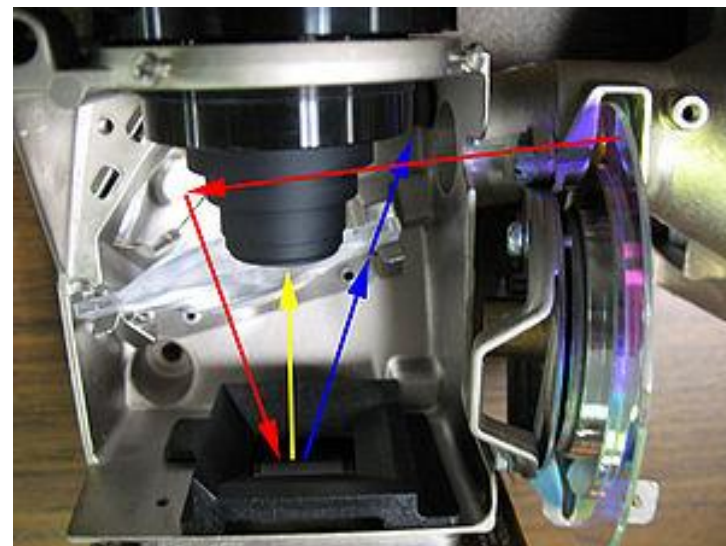
*Электростатически управляемое микрзеркало*

# Оптические МЭМС: DLP

DLP (Digital Light Processing) - технология, используемая во многих проекторах

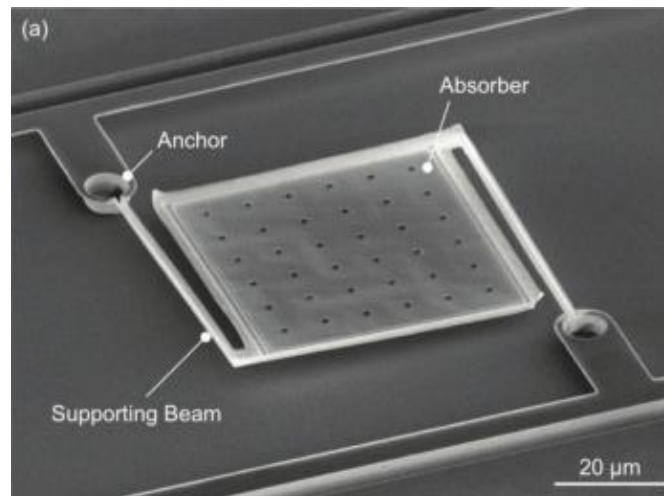
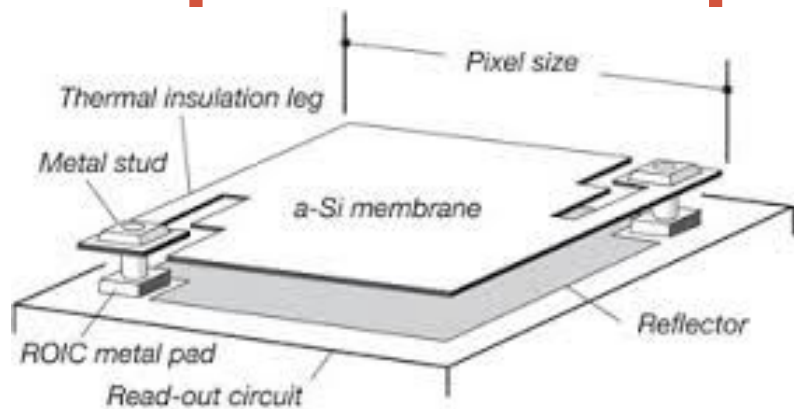


*Устройство отклоняющих зеркал*



Красной стрелкой показан путь луча света от лампы к матрице, через диск светофильтров, зеркало и линзу. Далее луч отражается либо в объектив (жёлтая стрелка), либо на радиатор (синяя стрелка).

# Оптические МЭМС: микроболометры



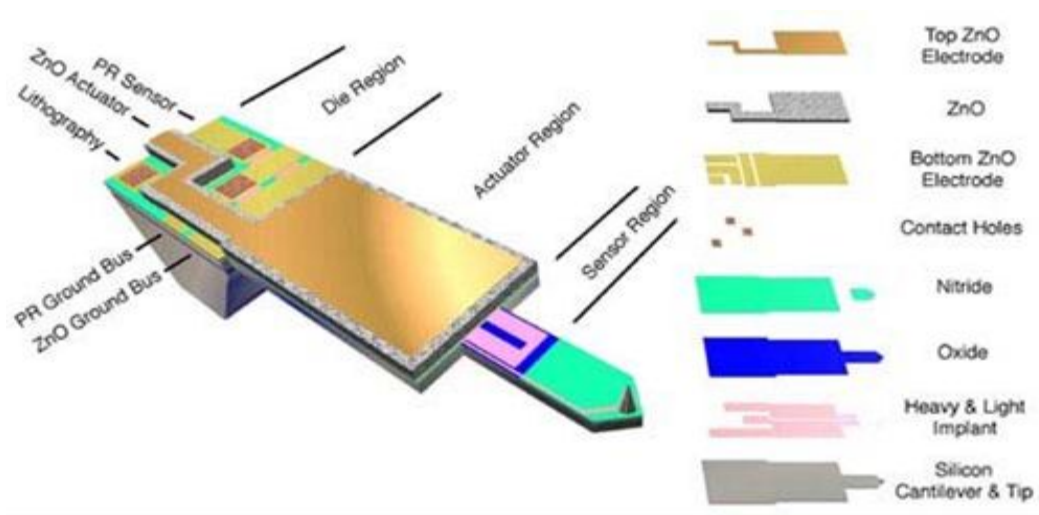
Инфракрасное излучение пройдя сквозь систему линз попадает на поглощающий элемент, нагревая его. Рядом с этим элементов находится терморезистивная пленка, меняющее свое сопротивление от нагрева. Так как температурные коэффициент изменения сопротивления при комнатной температуре невелик (порядка 2% на градус для диоксида ванадия)

# Исполнительные механизмы МЭМС

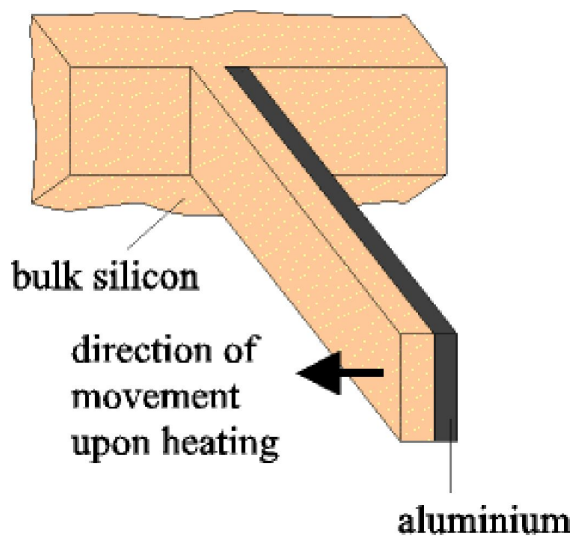
В исполнительных механизмах на основе МЭМС технологий обычно задействуются следующие компоненты:

1. Элементы на основе обратного пьезоэлектрического эффекта – можно получать большие величины силы, но величина смещения мала. Требуется высоких электрических напряжений;
2. Биморфные элементы на основе двух материалов с разным температурным коэффициентом расширения. Можно получать большие величины силы и смещения, процесс происходит медленно и им сложно управлять;
3. Электростатические элементы, работающие за счет электростатического притяжения и отталкивания между обкладками конденсатора. Небольшие величины силы и смещения, легко изготовить, требуются большие значения электрического напряжения;
4. Элементы на основе магнитных катушек. Слабые величины силы, сложно изготовить;

# Исполнительные механизмы МЭМС

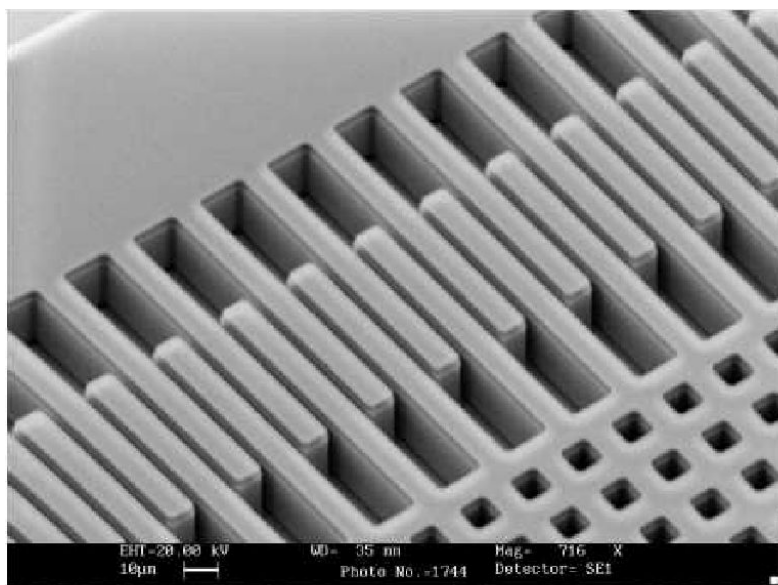


*Пьезокерамический элемент сканера атомно-силового микроскопа*

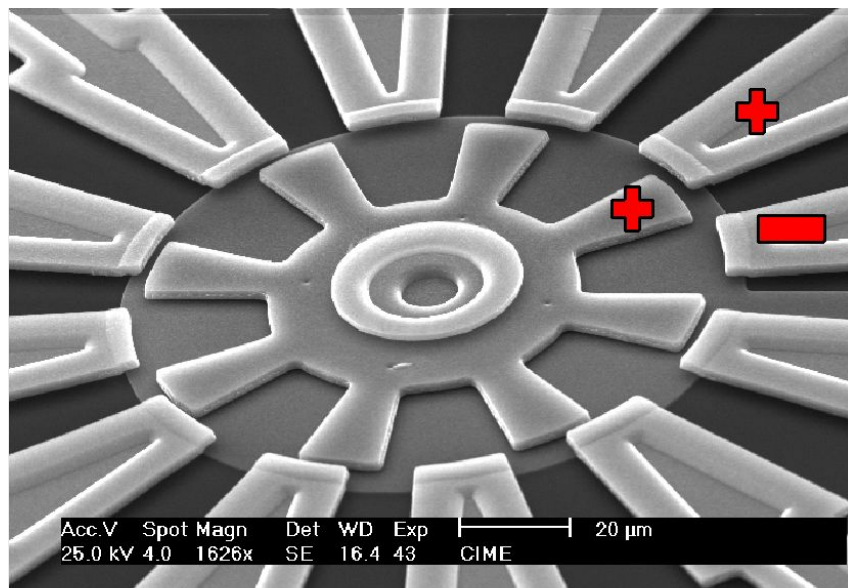


*Биморфный (Si - Al) элемент. Стрелкой показано направление изгиба при его нагреве*

# Исполнительные механизмы МЭМС



*Электростатические актуатор  
линейного движения*



*Электростатические актуатор  
углового движения*

# Список литературы

1. “ВЧ МЭМС и их применение” Варадан В., Виной К., Джозе К., Техносфера, 2004.
2. “Электромеханические микроустройства”, Н. Мухуров, Г. Ефремов, Litres, 2014.
3. MEMS and MOEMS Technology and Applications, P. Rai-Choudhury, SPIE Press, 2000.
4. MEMS: Introduction and Fundamentals, M. Gad-el-Hak, CRC Press, 2005.
5. An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering, N. Maluf, 2000.