

# МЭМС

Акселерометры и датчики давления

МЭМС - микроэлектромеханические системы - устройства, представляющие собой синтез микроэлектронных и микромеханических компонент.

В Японии МЭМС-технологии называют микромашинами (Micromachines), а в Европе - микросистемными технологиями (MicroSystemTechnology).

Разновидности МЭМС:

- 1) Сенсоры - измерительные устройства
- 2) Актуаторы - исполнительные устройства

Размеры МЭМС:

Типичные размеры микромеханических элементов лежат в диапазоне от 1 микрометра до 100 микрометров, тогда как размеры кристалла МЭМС-микросхемы имеют размеры от 20 микрометров до одного миллиметра.

## Изготовление МЭМС:

МЭМС-устройства обычно изготавливают на кремниевой подложке с помощью технологии микрообработки, аналогично технологии изготовления однокристалльных интегральных микросхем, методами:

- 1) Объёмная микрообработка
- 2) Поверхностная микрообработка

## Материалы для производства МЭМС:

- 1) Монокристаллические

Si	AlN	GaAs	AlGaAs	
----	-----	------	--------	--

- 2) Поликристаллические

Si	Различные металлы
----	-------------------

- 3) Аморфные

SiO <sub>2</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Полимеры
------------------	--------------------------------	----------

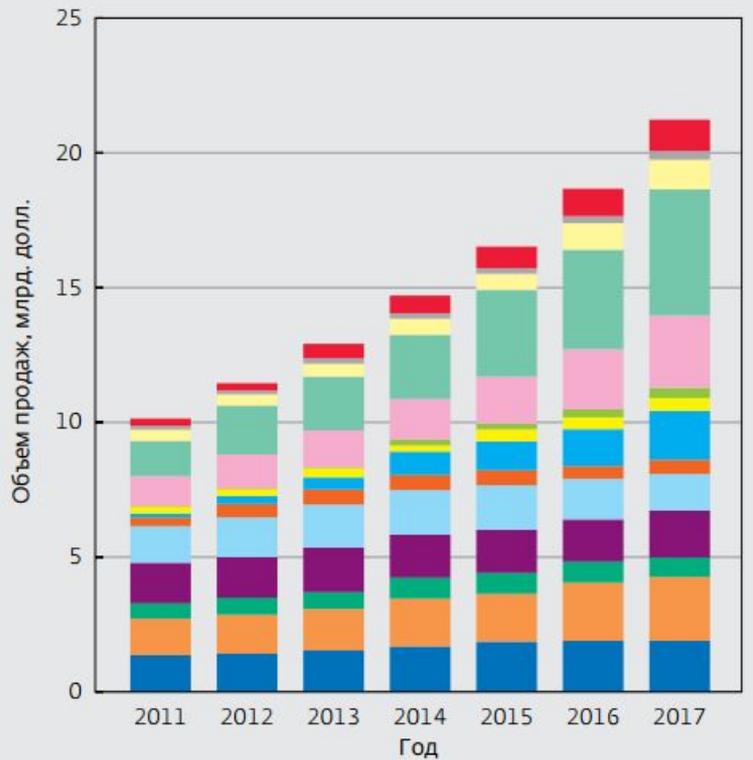
## Применение МЭМС:

Области применения МЭМС обширны: связь, системы подвижных зеркал для мультимедийных проекторов, микрофоны, гироскопы и акселерометры смартфонов и различных устройств, автомобилестроение, аэрокосмическое строительство, робототехника, медицина..

МЭМС - повсюду!

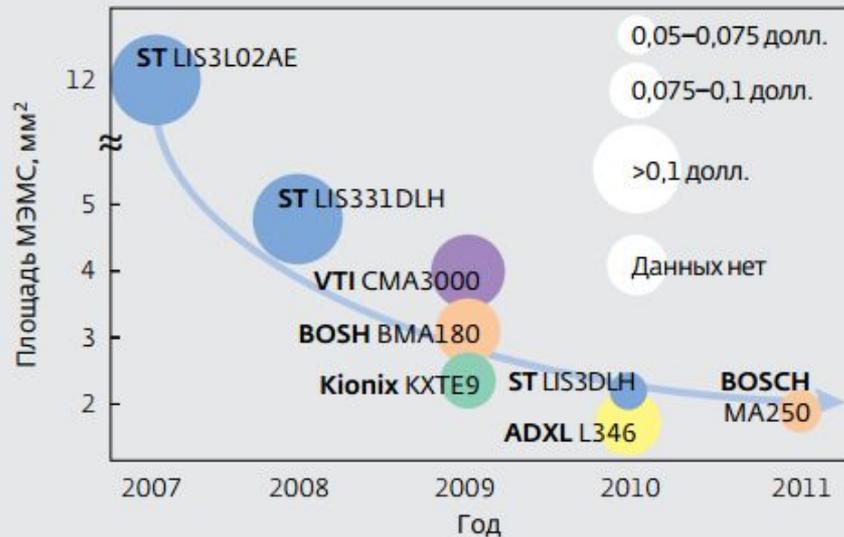
К преимуществам МЭМС можно отнести:

- 1) Миниатюрность
- 2) Высокая функциональность
- 3) Надежность
- 4) Малое энергопотребление
- 5) Возможность интеграции электроники с механическими, оптическими и прочими узлами
- 6) Малый разброс параметров в пределах одной партии изделий
- 7) Высокая технологичность и повторяемость



- Другие
- Генераторы
- РЧ МЭМС
- Микродозаторы
- Оптические МЭМС
- Микродисплеи
- Неохлаждаемые ИК-устройства
- Комбинированные датчики
- Компасы
- Гироскопы
- Акселерометры
- Микрофоны
- Датчики давления
- Головки струйных принтеров

Рынок полупроводниковых приборов к 2011 году достиг ~300 млрд. долл., то продажи МЭМС-компонентов составили всего 10,2 млрд. долл.



Все МЭМС – трехосевые акселерометры  
Данные в долларах относятся к стоимости производства

# АКСЕЛЕРОМЕТР

Датчик движения, измеряющий линейное изменение ускорения:

- a) Статическое - гравитационное
- b) Переменное - вызванное ускорение или вибрация

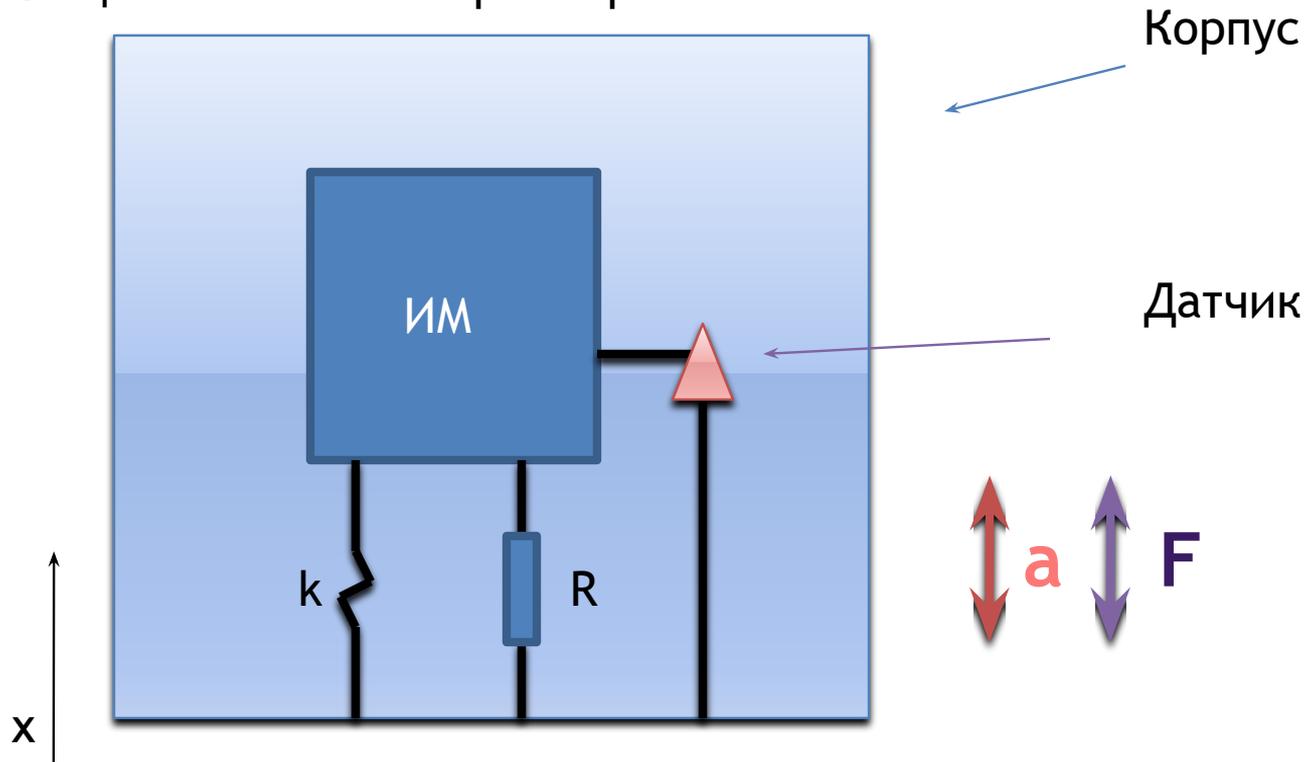
Виды акселерометров:

- 1. Ёмкостные
- 2. Пьезоэлектрические
- 3. Пьезорезистивные
- 4. Туннельные
- 5. Эмиссионные

Основные характеристики акселерометра:

- 1) Рабочий диапазон частот
- 2) Диапазон измеряемых ускорений
- 3) Разрешающая способность

# Общая схема акселерометра



Резонансная частота

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{k/m}$$

Спектральная плотность смещения

$$|Z_s(f)| = a/\omega_0^2$$

Соотношение спектральной  
плотности мощностей  
сигнал/шум

$$|Z_s / Z_n|^2 = a^2 m Q / 4k_B T \omega_0$$

Добротность резонанса

$$Q = \frac{\omega_0 m}{R}$$

Спектральная плотность силы  
термомеханического шума  
механического сопротивления

$$F_n = \sqrt{4k_B T R}$$

$$|Z_n(f)| = \sqrt{4k_B T R / k}$$

# ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ (КОМПРЕССИОННЫЙ) АКСЕЛЕРОМЕТР

Используемые материалы:

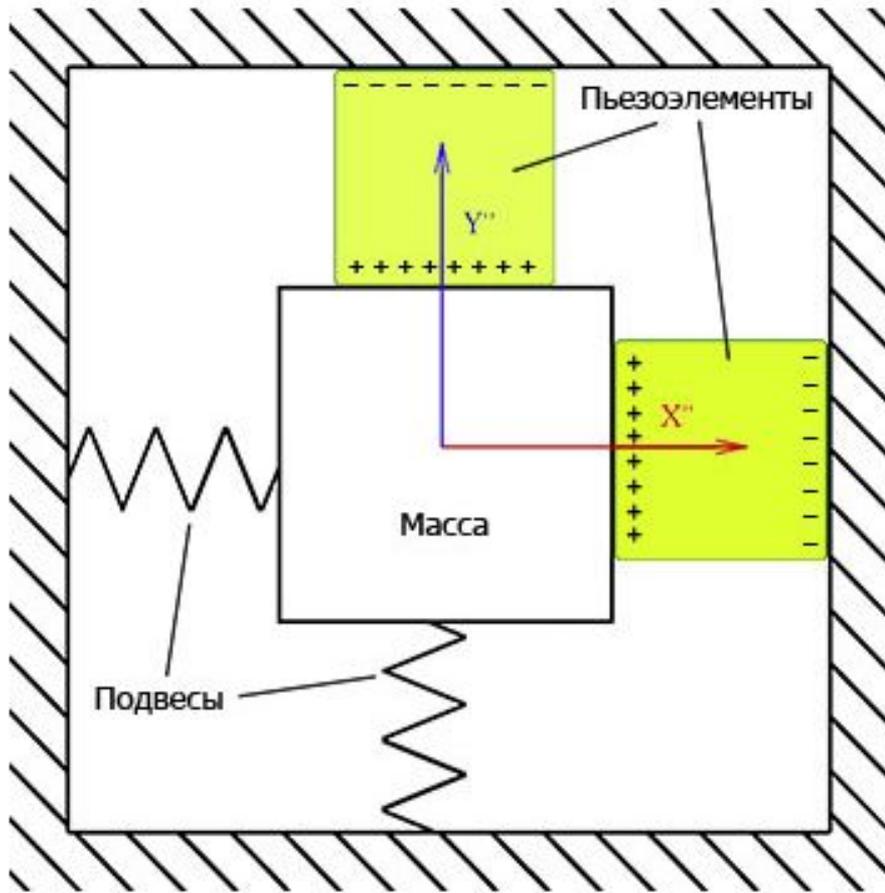
Кварц ( $\text{SiO}_2$ ), Керамика, Титанат-цирконат свинца ( $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ )

Преимущества:

- 1) миниатюрные (весом несколько десятых грамма),
- 2) низкочастотные (от сотых долей герца) и высокочастотные (до нескольких мегагерц)
- 3) криогенные (до  $-196^\circ\text{C}$ ), высокотемпературные (до  $+1000^\circ\text{C}$ )
- 4) не требуют электрического питания

Недостатки:

- 1) имеют невысокую чувствительность
- 2) Сложность калибровки и наличия компенсационных сил



Основной принцип работы акселерометров на пьезоэлементах

При продольной деформации пьезоэлемента генерируемый в результате прямого пьезоэффекта электрический заряд

$$Q_{\Pi} = d_{33}F = d_{33}m_{и}a_a(\sin \omega t).$$

Разность потенциалов на электродах электрически ненагруженного пьезоэлемента

$$U_{\Pi} = Q_{\Pi}/C_{\Pi} = d_{33}m_{и}a_a(\sin \omega t)/C_{\Pi}$$

$$g_{ij} = \frac{U/h}{F/S} = \frac{d_{ij}}{\epsilon \epsilon_0}$$

$g_{ij}$ -постоянная давления

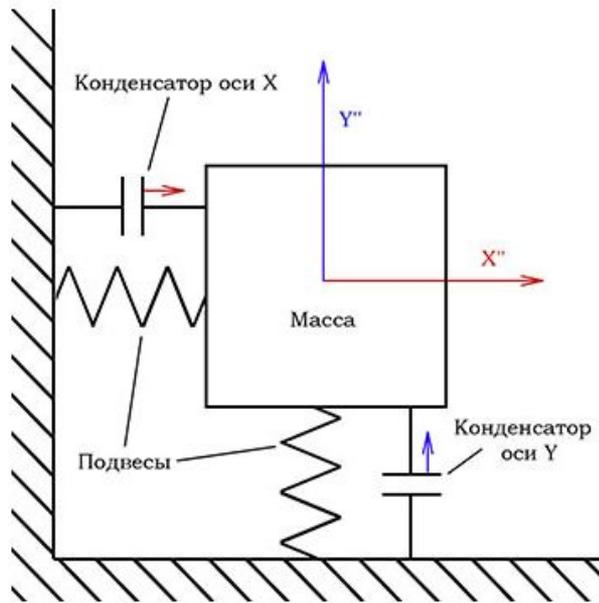
# ЁМКОСТНОЙ АКСЕЛЕРОМЕТР

## Преимущества:

- 1) Отсутствие необходимости материалов со специальными свойствами
- 2) Высокая чувствительность
- 3) Стабильность при детектировании стат.ускорения
- 4) Малая потребляемая мощность
- 5) Температурная стабильность
- 6) Высокая надёжность

## Недостатки:

- 1) Невысокая чувствительность
- 2) Требуется электрического питания



## Основной принцип работы конденсаторных акселерометров

$F_1 = a \cdot m$  – сила возникает из – за внешнего ускорения  $a$ ;  $m$  – масса грузика

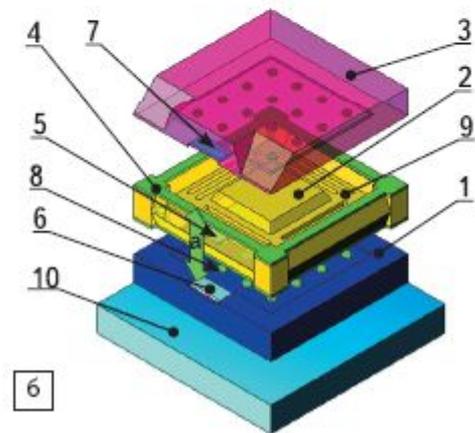
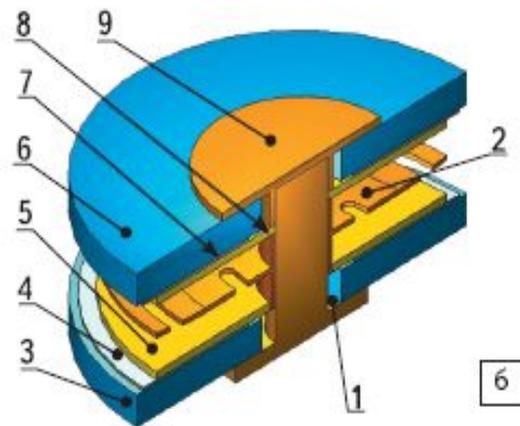
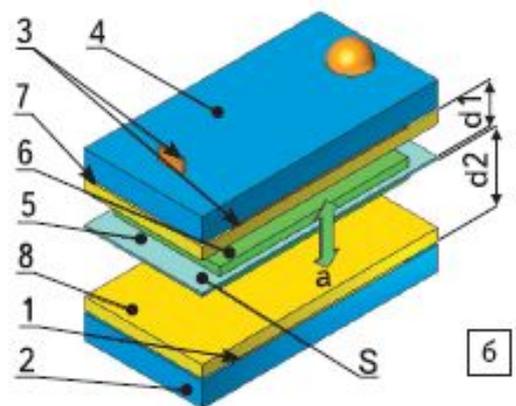
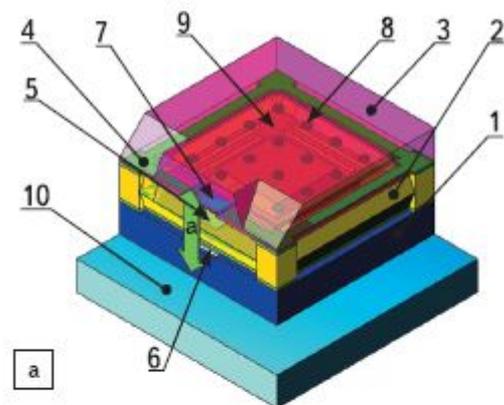
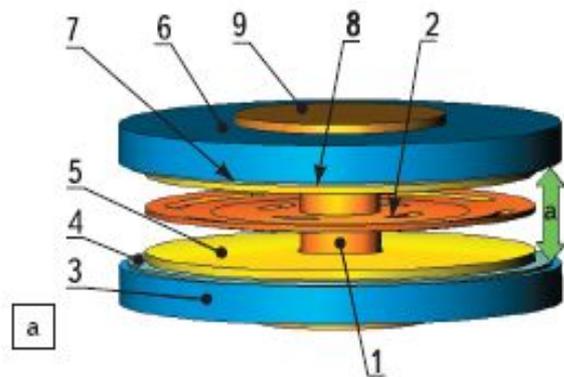
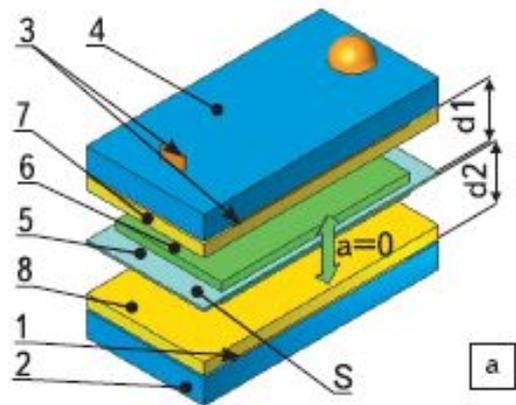
$F_2 = -k \cdot \Delta x$  – сила упругости вследствие деформации подвеса;  $k$  зависит от материала и геометрии

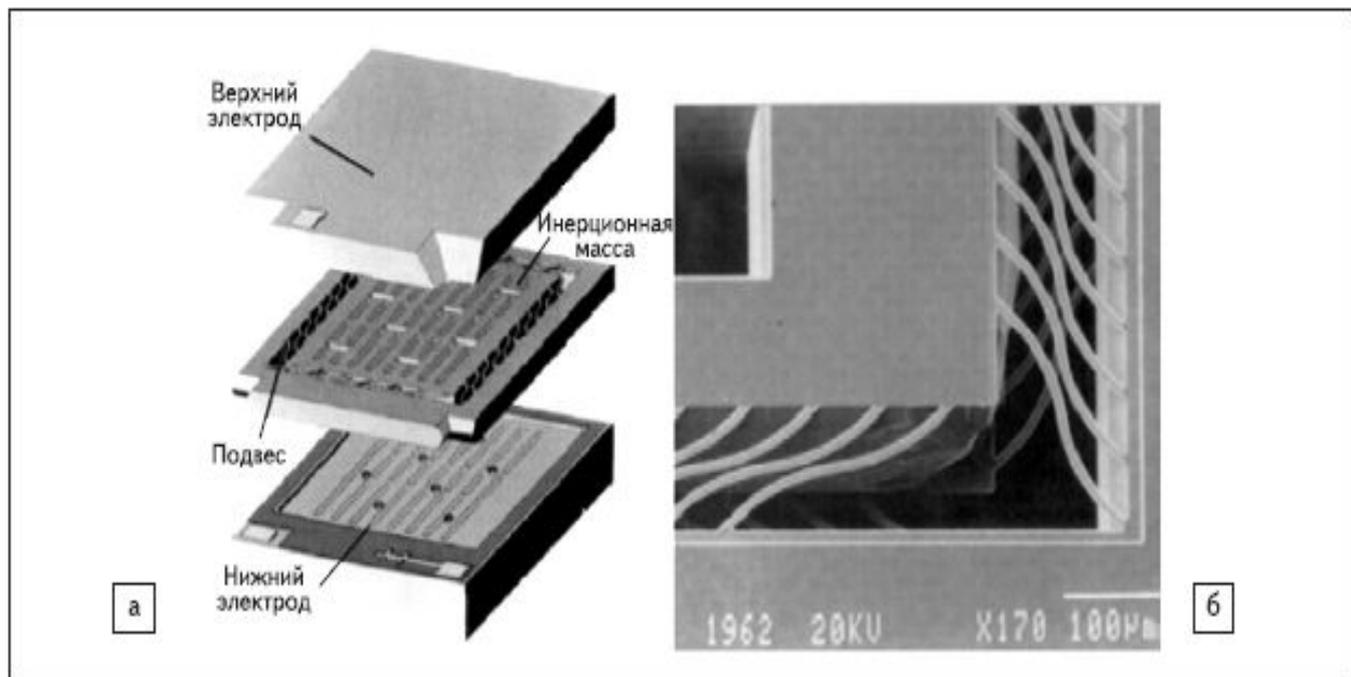
$$a \cdot m = -k \cdot \Delta x$$

$a = \frac{k \cdot \Delta x}{m}$ , где  $m, k$ , – известные и специфичные для датчика величины

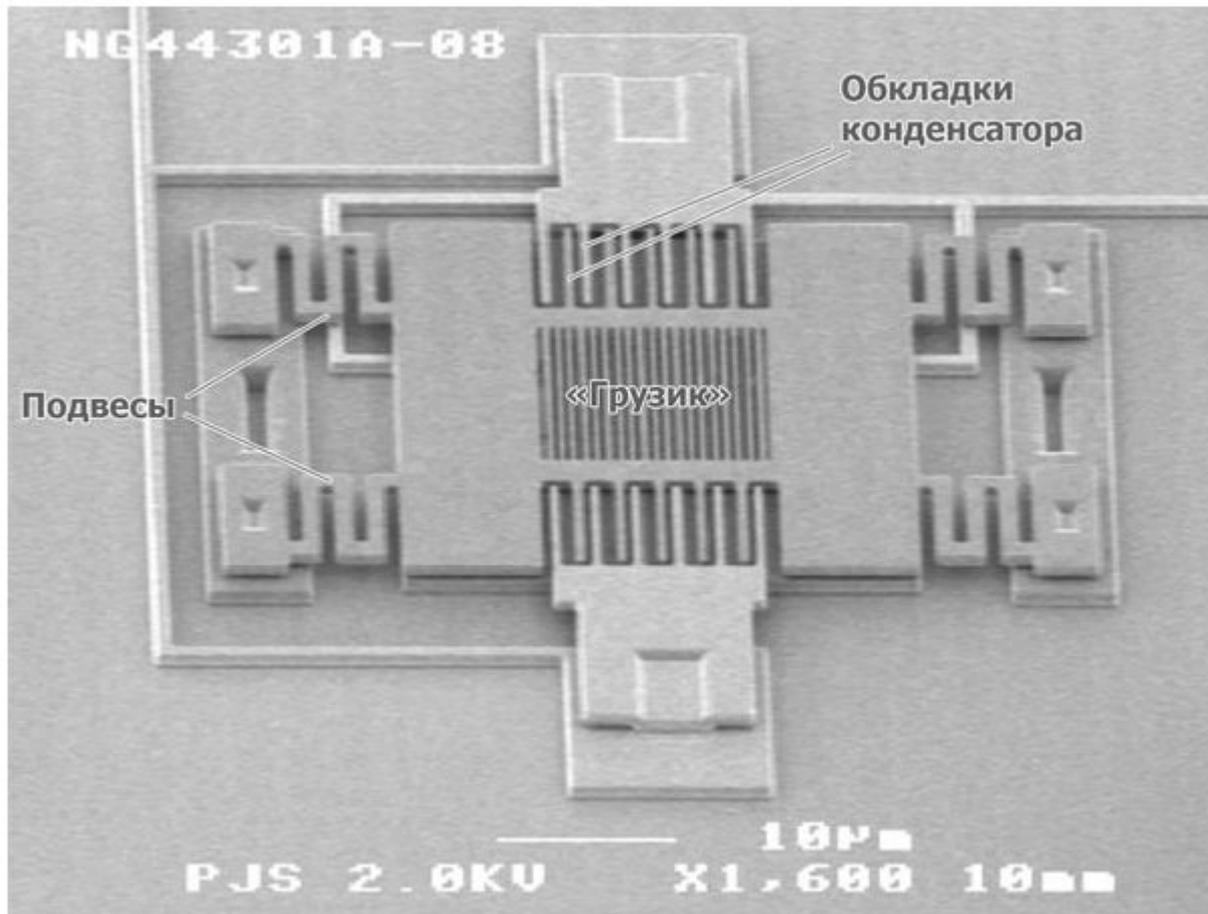
$\Delta x$  вычисляется на основе изменения емкости между обкладками конденсаторов в структурах расчесочного вида (comb drive) обкладок ( $\Delta C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{\Delta x}$ )

# Физические модели





Объемная кремниевая микроструктура емкостных датчиков Endevco: а— модульный дизайн; б— увеличенное микроскопическое изображение подвешенного массива инерционной массы



MEMS-акселерометр разработки Sandia Labs

# ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

-устройства, предназначенные для определения давления.

Виды датчиков:

- 1) Тензорезистивные
- 2) Ёмкостные

Основные характеристики датчиков:

- 1) Диапазон измерений давления
- 2) Рабочий диапазон температур
- 3) Долговременный дрейф от  $P_{max}$
- 4) Выходной сигнал при максимальном давлении

# ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ

Датчики изготавливают на основе следующих материалов:

- 1) На основе объёмного кремния
- 2) На основе поликремния с двуокисью кремния
- 3) На основе КНС (кремний на сапфире)
- 4) На основе Кремния на диэлектрике (КНД)

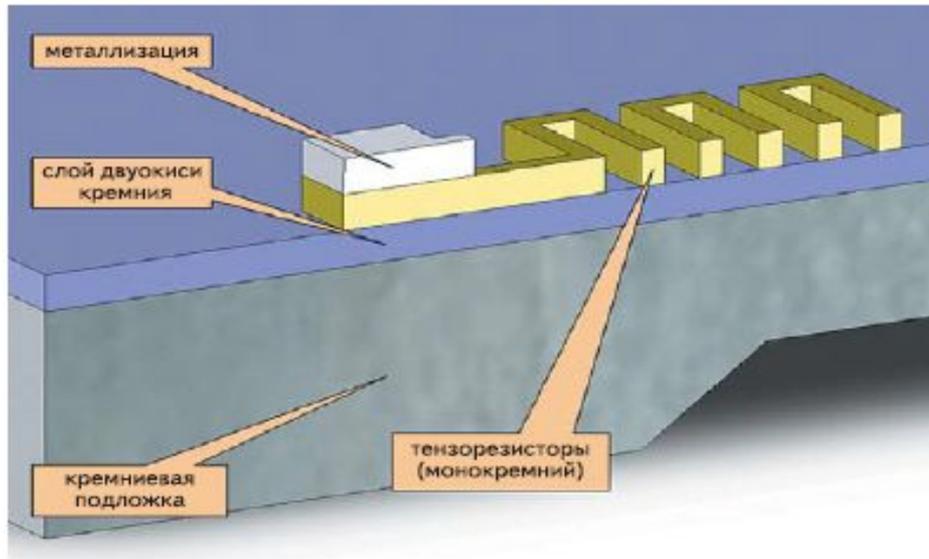


Рис. 1. Пример построения ПЧЭ на КНД-структуре



Рис.2. Упрощенный вид тензорезистивного чувствительного элемента



Рис.3. Кремниевый интегральный преобразователь давления

Достоинства	Недостатки
Тензометрический (КНС-преобразователи)	
<p>Высокая степень защиты от агрессивной среды</p> <p>Высокий предел рабочей температуры</p> <p>Налажено серийное производство</p> <p>Низкая стоимость</p>	<p>Неустраняемая нестабильность градуировочной характеристики</p> <p>Высокие гистерезисные эффекты от давления и температуры</p> <p>Низкая устойчивость при воздействии ударных нагрузок и вибраций</p>
Пьезорезистивный (на монокристаллическом кремнии)	
<p>Высокая стабильность характеристик</p> <p>Устойчивость к ударным нагрузкам и вибрациям</p> <p>Низкие (практически отсутствуют) гистерезисные эффекты</p> <p>Высокая точность</p> <p>Низкая цена</p> <p>Возможность измерять давление различных агрессивных средств</p>	<p>Ограничение по температуре (до 150°C)</p>

# ЁМКОСТНОЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ

Виды:

- 1) Керамические преобразователи
- 2) Кремниевые ёмкостные первичные преобразователи
- 3) Преобразователи с упругой металлической мембраной

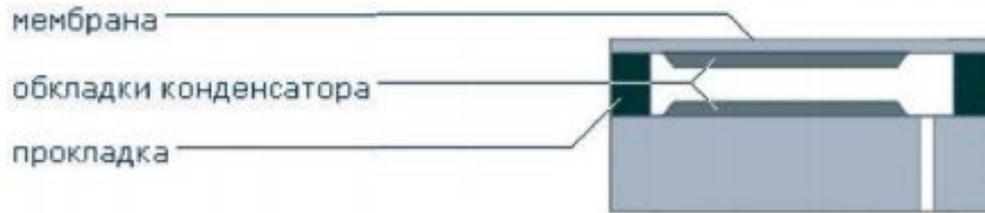


Рис.6. Емкостной керамический преобразователь давления, выполненный методами микромеханики

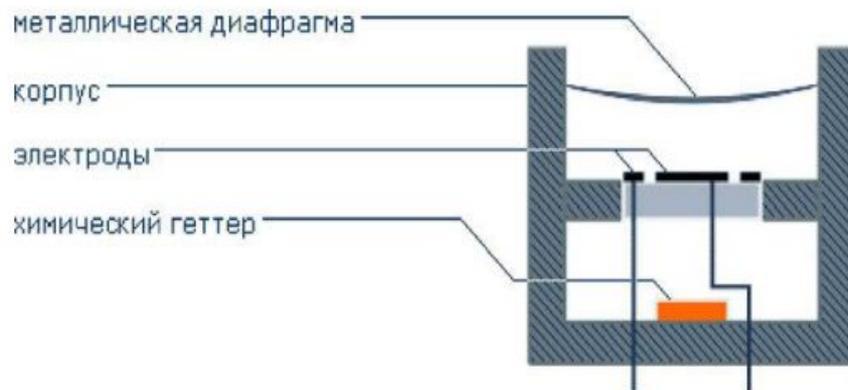


Рис.7. Емкостной преобразователь давления.  
 В данном варианте роль подвижной обкладки конденсатора выполняет металлическая диафрагма

Емкостной	
<p>Высокая точность</p> <p>Высокая стабильность характеристик</p> <p>Возможность измерять низкий вакуум</p> <p>Простота конструкции</p>	<p>Зачастую нелинейная зависимость емкости от приложенного давления</p> <p>Необходимо дополнительное оборудование или электрическая схема для преобразования емкостной зависимости в один из стандартных выходных сигналов</p>

# ЛИТЕРАТУРА:

- 1) <http://www.3dnews.ru/600098>
- 2) [http://dssp.petrso.ru/d/new\\_sem\\_devices/mems.ppt](http://dssp.petrso.ru/d/new_sem_devices/mems.ppt)
- 3) [http://volamar.ru/subject/03kolibri/view\\_post.php?cat=1&id=7](http://volamar.ru/subject/03kolibri/view_post.php?cat=1&id=7)
- 4) [http://www.electronics.ru/files/article\\_pdf/0/article\\_288\\_258.pdf](http://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_288_258.pdf)
- 5) <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-3-2013-13.pdf>
- 6) [http://www.issp.ac.ru/ebooks/disser/Vopilkin\\_E\\_A.pdf](http://www.issp.ac.ru/ebooks/disser/Vopilkin_E_A.pdf)
- 7) <http://mx-omsk.ru/sites/default/files/products/files/%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5%20%D1%80%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%20%D0%BF%D0%BE%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8E.pdf>
- 8) [http://iitt.fvt.sfedu.ru/files/documents/up/UP\\_Datchiki\\_uskoreniya.pdf](http://iitt.fvt.sfedu.ru/files/documents/up/UP_Datchiki_uskoreniya.pdf)
- 9) [http://kit-e.ru/articles/sensor/2006\\_3\\_10.php](http://kit-e.ru/articles/sensor/2006_3_10.php)
- 10) Датчики измерительных систем: в 2 кн. / Ж. Аттт [и др.] Кн. 1. -М .: Мир, 1992. 480 с
- 11) Мейзда, Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений / Ф. Мейзда. - М.: Мир, 1990. 535 с
- 12) [http://www.ssau.ru/files/education/metod\\_1/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%8E%D1%85%D0%BE%D0%B2%20%D0%92.%D0%9D.%20%D0%98%D1%81%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D0%B5%D0%BC%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%B4%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA%D0%B0.pdf](http://www.ssau.ru/files/education/metod_1/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%8E%D1%85%D0%BE%D0%B2%20%D0%92.%D0%9D.%20%D0%98%D1%81%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D0%B5%D0%BC%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%B4%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA%D0%B0.pdf)
- 13) [http://kit-e.ru/articles/sensor/2009\\_05\\_12.php](http://kit-e.ru/articles/sensor/2009_05_12.php)