

НЭМС

Наноэлектромеханические  
системы

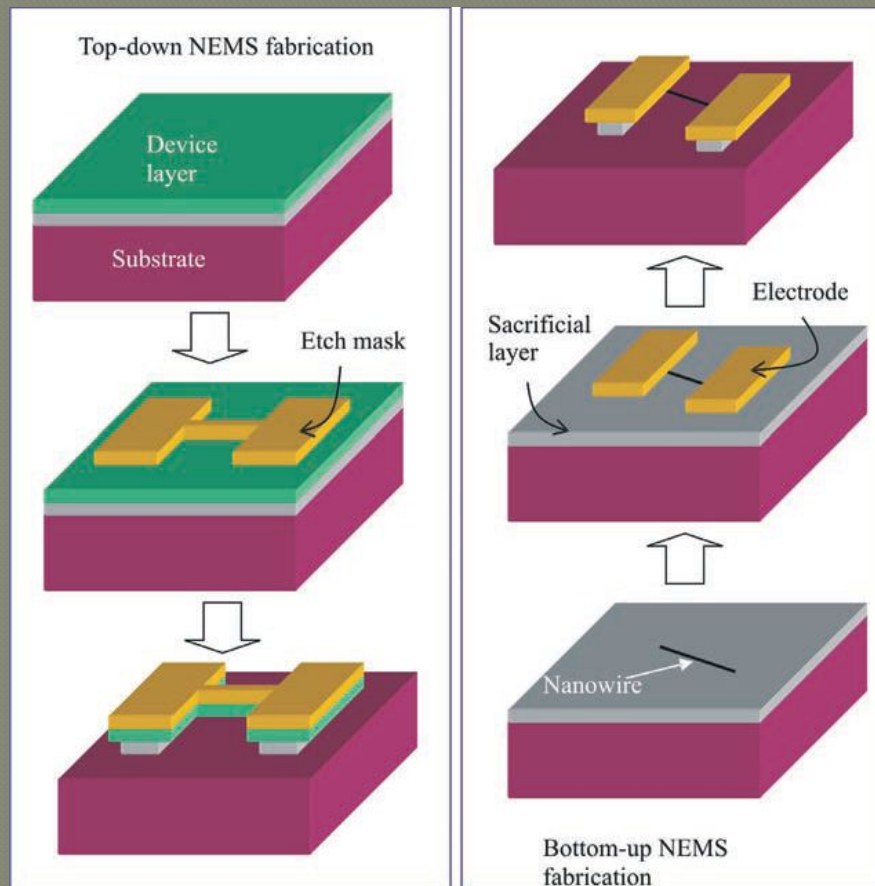
# НЭМС

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) – это уже отработанная технология производства интегральных устройств с механическими и электрическими подсистемами с микрометровыми размерами. Если размеры системы уменьшаются меньше 1 микрона, то такие системы стали называть по аналогии – наноэлектромеханическими системами (НЭМС).

НЭМС – технология зарождающаяся, находится на стадии научных исследований, в производстве практически не задействована.

# Способы изготовления

Две основные концепции изготовления НЭМС:  
сверху-вниз и снизу-вверх



# Способы изготовления

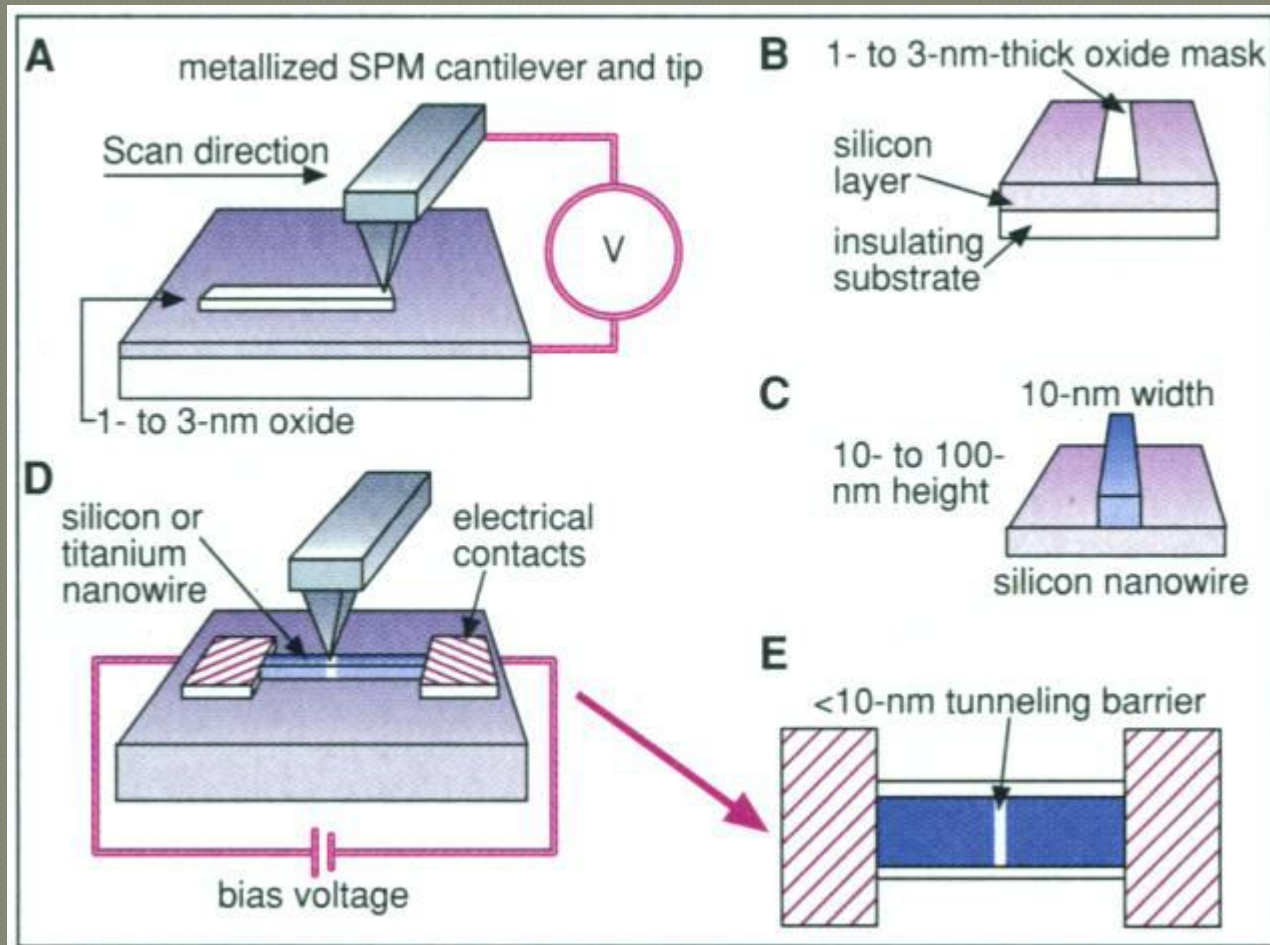
---

Подход сверху-вниз(top-down):

- Фотолитография в глубоком ультрафиолете
- Электронно-лучевая литография
- Рентгеновская литография
- Зондовая литография
- Нанопечатная литография

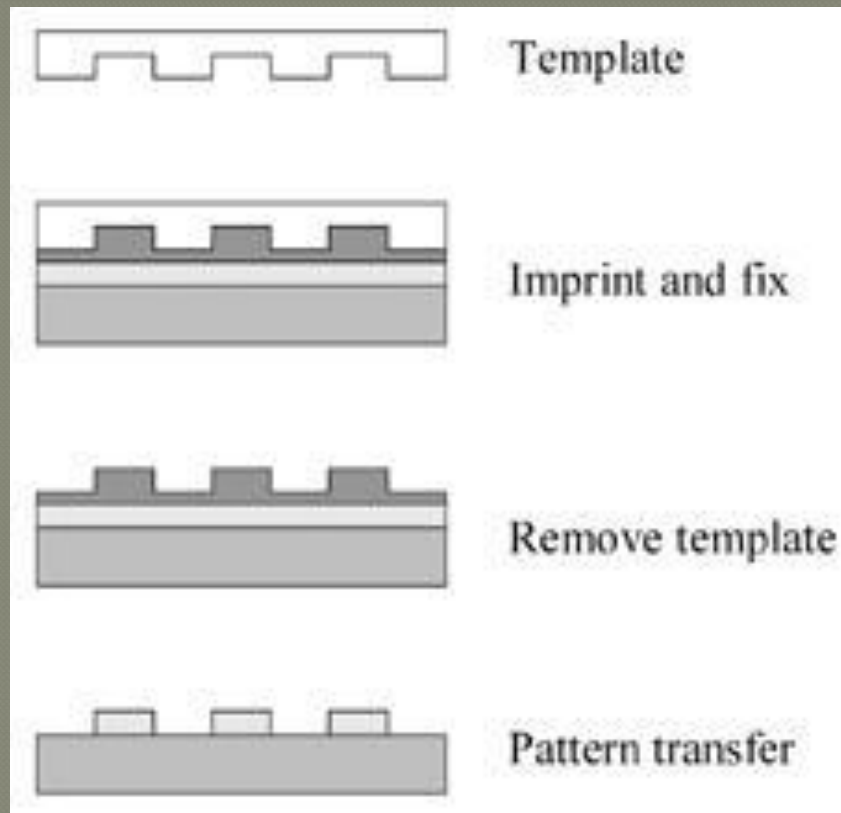
# Способы изготовления

## Зондовая литография



# Способы изготовления

## Нанопечатная литография



# Способы изготовления

---

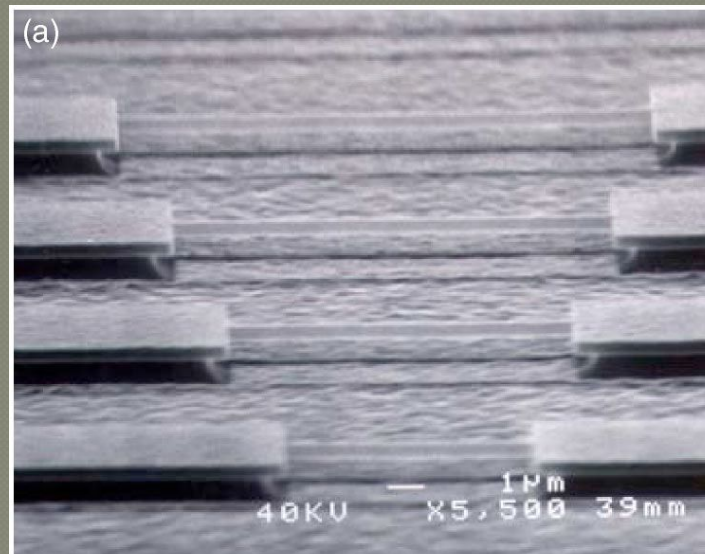
Подход снизу-вверх (bottom-up):

Изготовление нанонитей др. наноструктур для НЭМС:

1. Бескаталитическое осаждения из газовой фазы .
2. Каталитическое осаждение из газовой и жидкой фазы
3. Темплатное изготовление
4. Электроспиннинг .

# Применение НЭМС

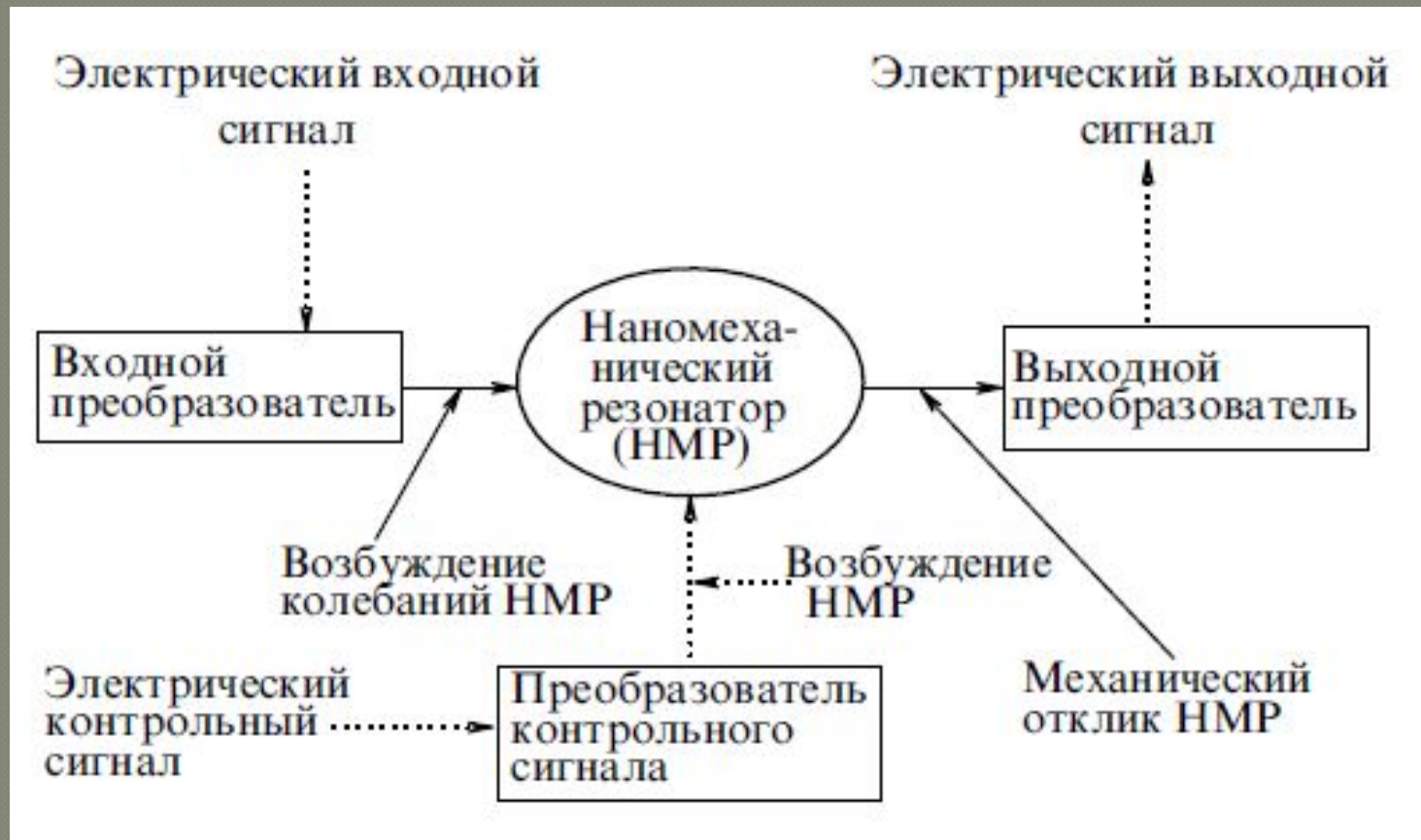
Не смотря на то, что существуют НЭМС – нано-захваты или нано-электромеханические реле, основное и самое перспективное применение НЭМС – это датчики ультрамалых масс, сил, смещений и заряда. Все эти высокочувствительные датчики строятся по схожему принципу – используя в качестве основного элемента механические нанорезанаторы различной конфигурации.





# НЭМС - резонатор

Обобщенная схема работы датчиков на основе наномеханических резонаторов



# НЭМС - резонатор

---

## Плюсы:

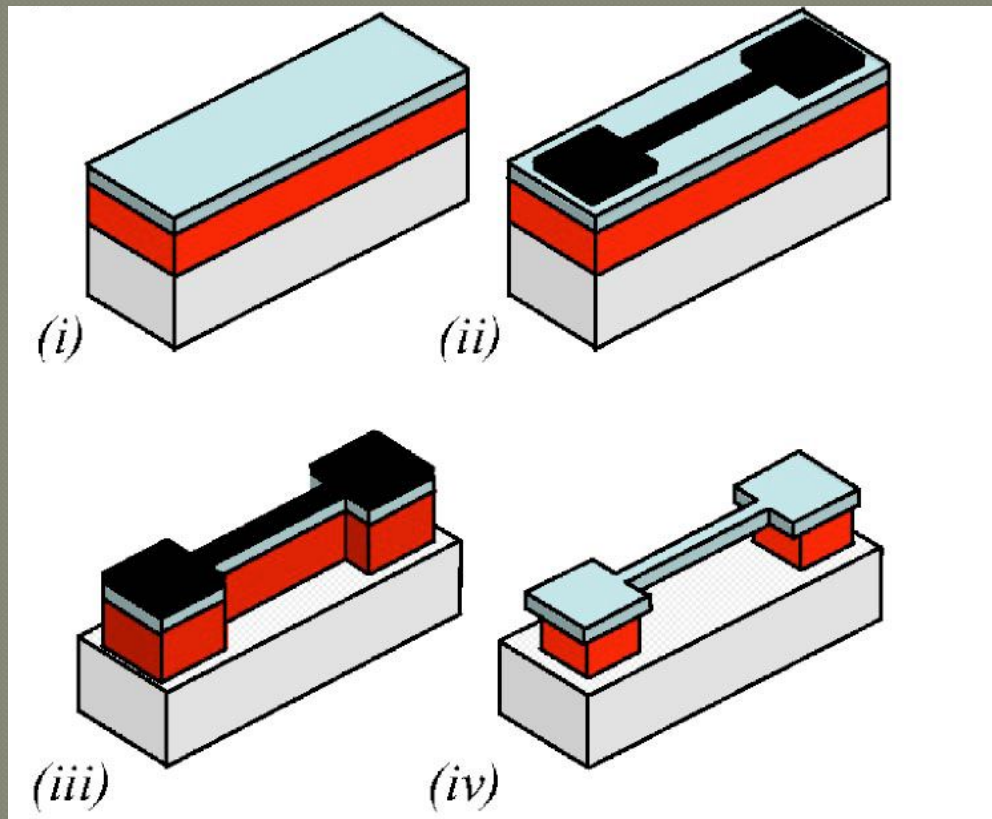
- Высокие частоты – возможность избавиться от сторонних воздействий (при 50 мК – 1 ГГц);
- Высокая добротность (до 10000) и
- Малое энергопотребление ( $< 1$  мкВт);

## Минусы:

- Сложность сохранения точных геометрических размеров;
- Необходимость охлаждения;

# НЭМС - резонатор

Процесс изготовления  
НЭМС-резонатора (подход  
сверху-вниз, электронно-  
лучевая литография):



# Характеристики НЭНС-резонаторов

Для случая колебаний резонатора, описываемого выше можно вывести резонансную частоту основной моды:

$$f_0 = 1.03 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{t}{L^2}, \text{ где } E \text{ – модуль Юнга, } \rho \text{ – плотность, } t \text{ – толщина балки вдоль направления движения, } L \text{ – длина балки}$$

Основные материалы, из которых изготавливаются наномеханические резонаторы

Material	Young's modulus (GPa)	Mass density ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ )
Si	110	2.4
SiC	440	3.2
AlN	345	3.3
Diamond	1000	3.5

# Измерение малых масс

При осаждении на поверхность балки резонатора молекул исследуемого вещества, увеличивается ее эффективная масса, а следовательно уменьшается резонансная частота колебаний:

$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}}$ , где  $\omega_0$  - резонансная частота,  $k$  – коэффициент жесткости,  $M$  – эффективная масса балки.

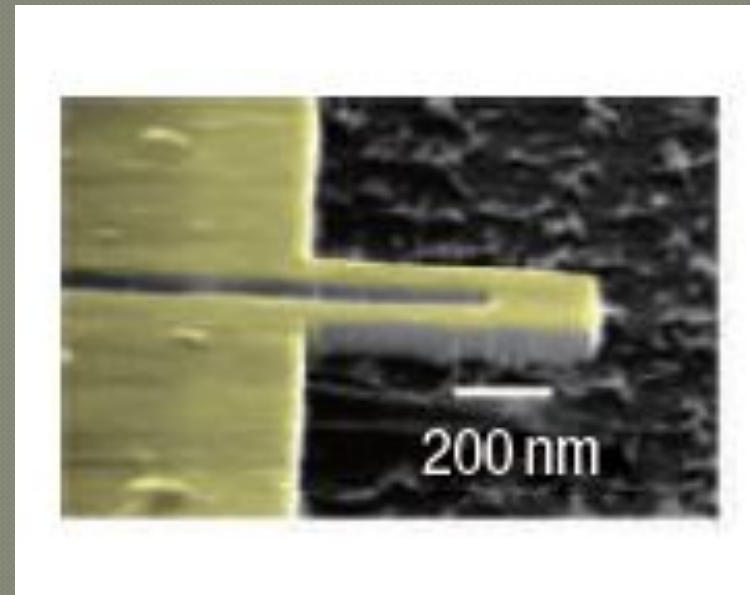
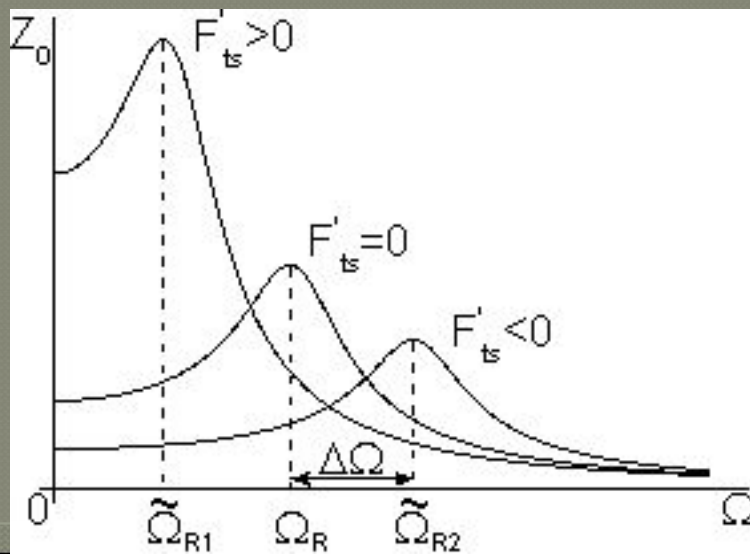
Наименьшая измеренная масса, а.е.м.	Чувствительность по сдвигу частоты $\delta f_0/\delta M$ , Гц $(10^{-21} \text{ г})^{-1}$	Резонансная частота $f_0$ , МГц	Добротность резонатора
$4,9 \times 10^4$	12	428	
$1,52 \times 10^6$	$3 \times 10^{-3}$	32,8	3000
$4,0 \times 10^3$	1	133 190	5000
$15 \times 10^3$ (300 К) 840 (5 К)	$11 \times 10^3$	143	50 (300 К) 865 (5 К)
200 (300 К)	0,104	328,5	1000 (300 К)
$2,35 \times 10^5$		13,36	8500
50 (6 К)		300	200
$1,8 \times 10^9$	0,01		10000

# Измерение малых сил и смещений

При воздействии внешней силы  $F$  на колебательный контур, резонансная частота меняется:

$\Delta\omega_0 = \omega_0 \left( \sqrt{1 - \frac{F'}{k}} - 1 \right)$ , где  $\omega_0$  - резонансная частота,  $k$  - коэффициент жесткости,  $F'$  - производная силы по смещению вдоль движения балки.

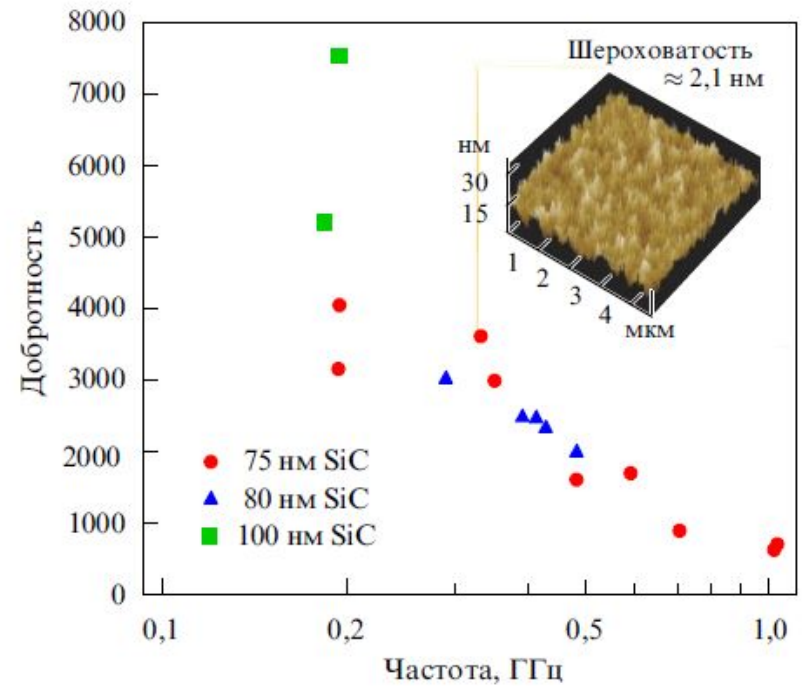
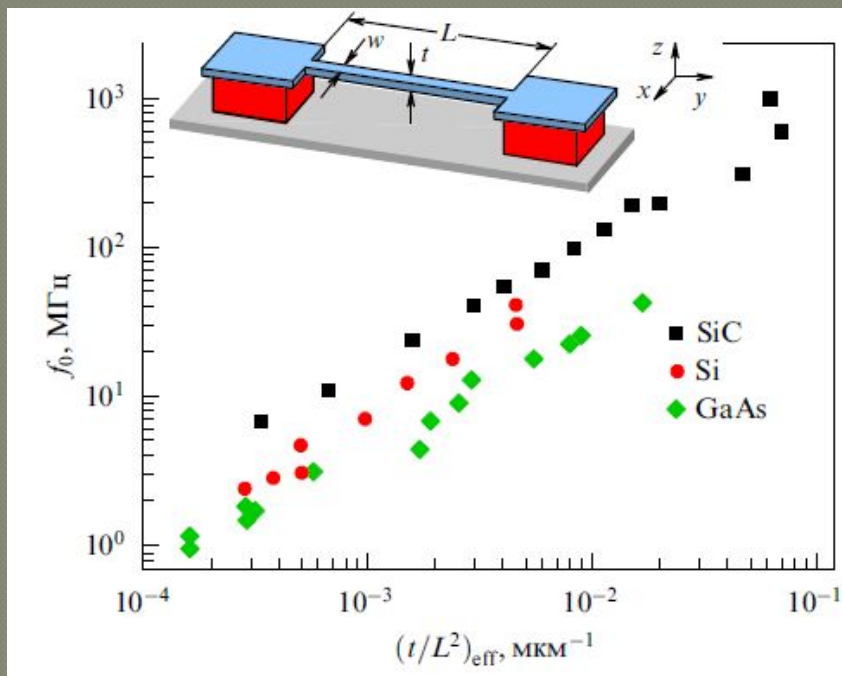
Измерения смещения связаны с измерением силы (по аналогии с атомно-силовым микроскопом).



# Параметры современных НЭМС

Материал НМР	Темпера- тура, К	Частота основной гармоники $f_0$ , МГц	Доброт- ность $Q$
Si	4,2	70	$2 \times 10^4$
Si	25	80	$1,3 \times 10^4$
Si	20	25,598	$3 \times 10^4$
SiC	4,2	198	$1 \times 10^3$
SiC	20	71,91	4000
SiC	4,2	190 – 1029	500 – 5200
Pt	4	105,3	8500
Au	4	39	5000
Au	4,2	54,38	7510
Ti	4,2	194,47	3180
Al	4,2	180,86	5320
SiN	293	0,133	$1,1 \times 10^6$

# Параметры современных НЭМС





# Список литературы

---

1. “Наномеханические резонаторы” Гринберг Я.С., Пашкин Ю. А., Ильичев Е. В., Успехи Физических Наук, т. 182, №4, 2012,
2. “Nanoelectromechanical systems”, K. L. Ekincia, M. L. Roukes, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, 76, 061101, 2005.
3. “Nano- and Microelectromechanical Systems”, S. E. Lyshevski, CRC Press, 2001.