

НЭМС

**Наноэлектромеханические
системы**

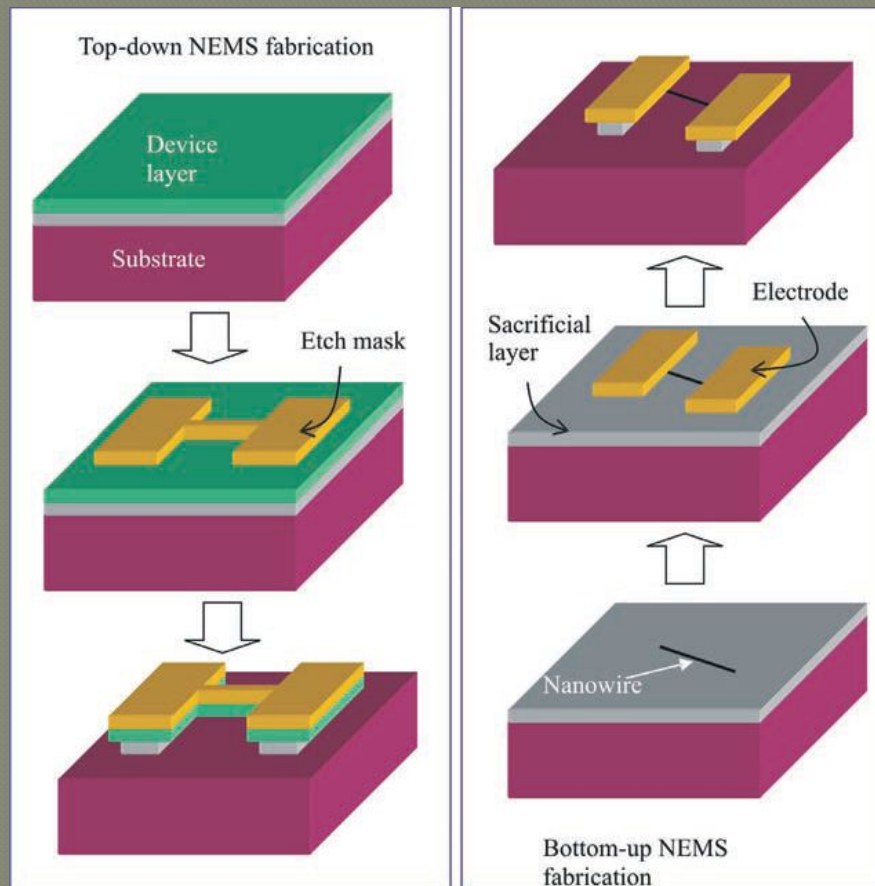
НЭМС

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



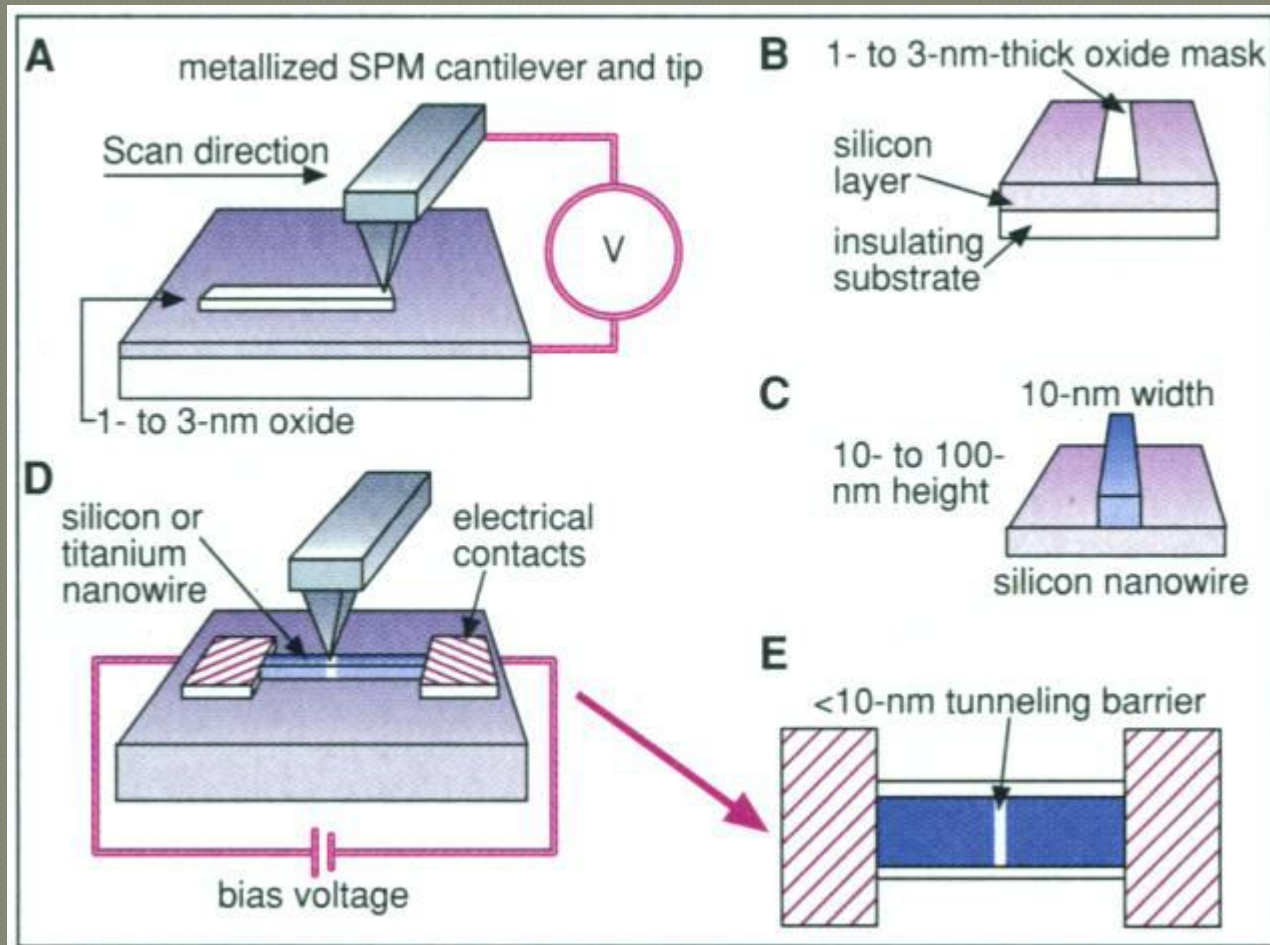
Способы изготовления

Подход сверху-вниз(top-down):

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

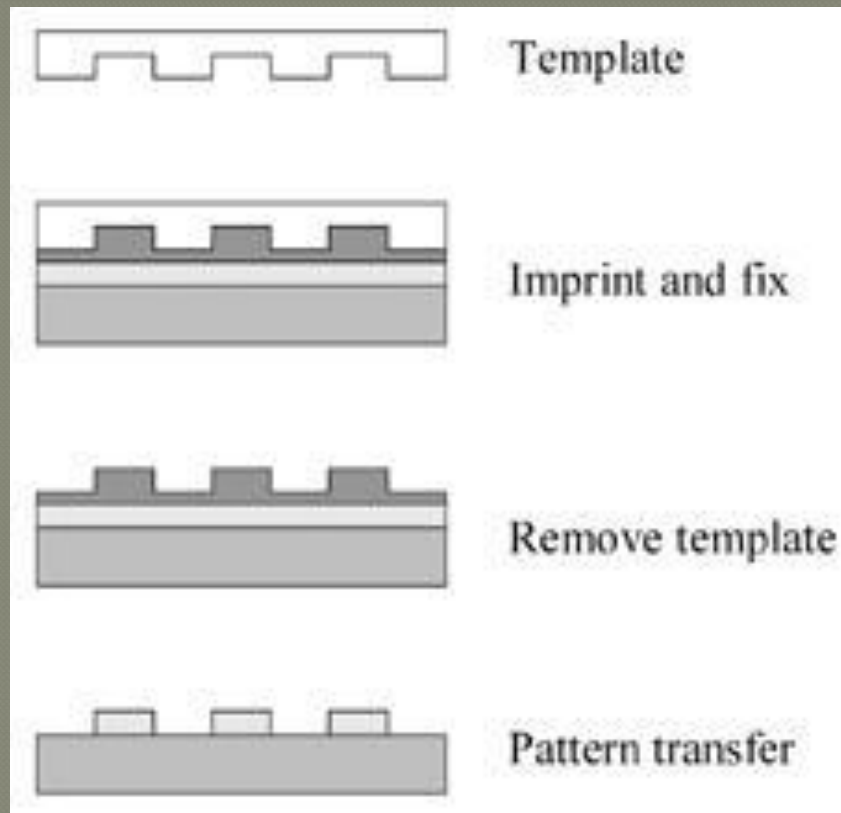
Способы изготовления

Зондовая литография



Способы изготовления

Нанопечатная литография



Способы изготовления

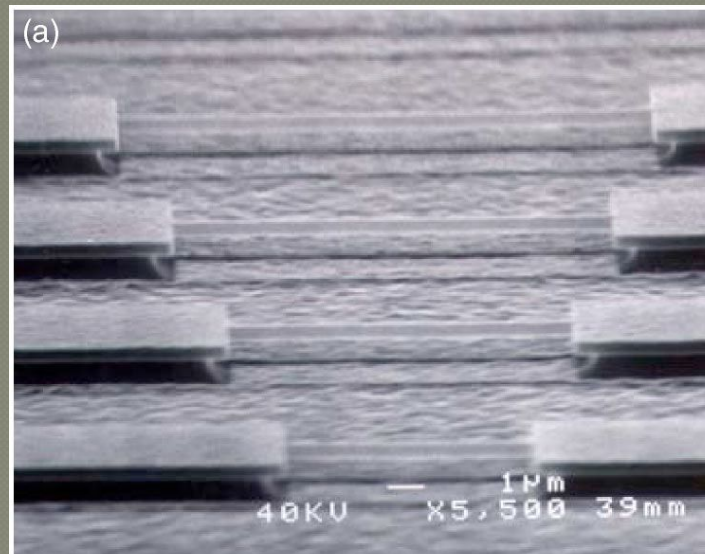
Подход снизу-вверх (bottom-up):

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 .

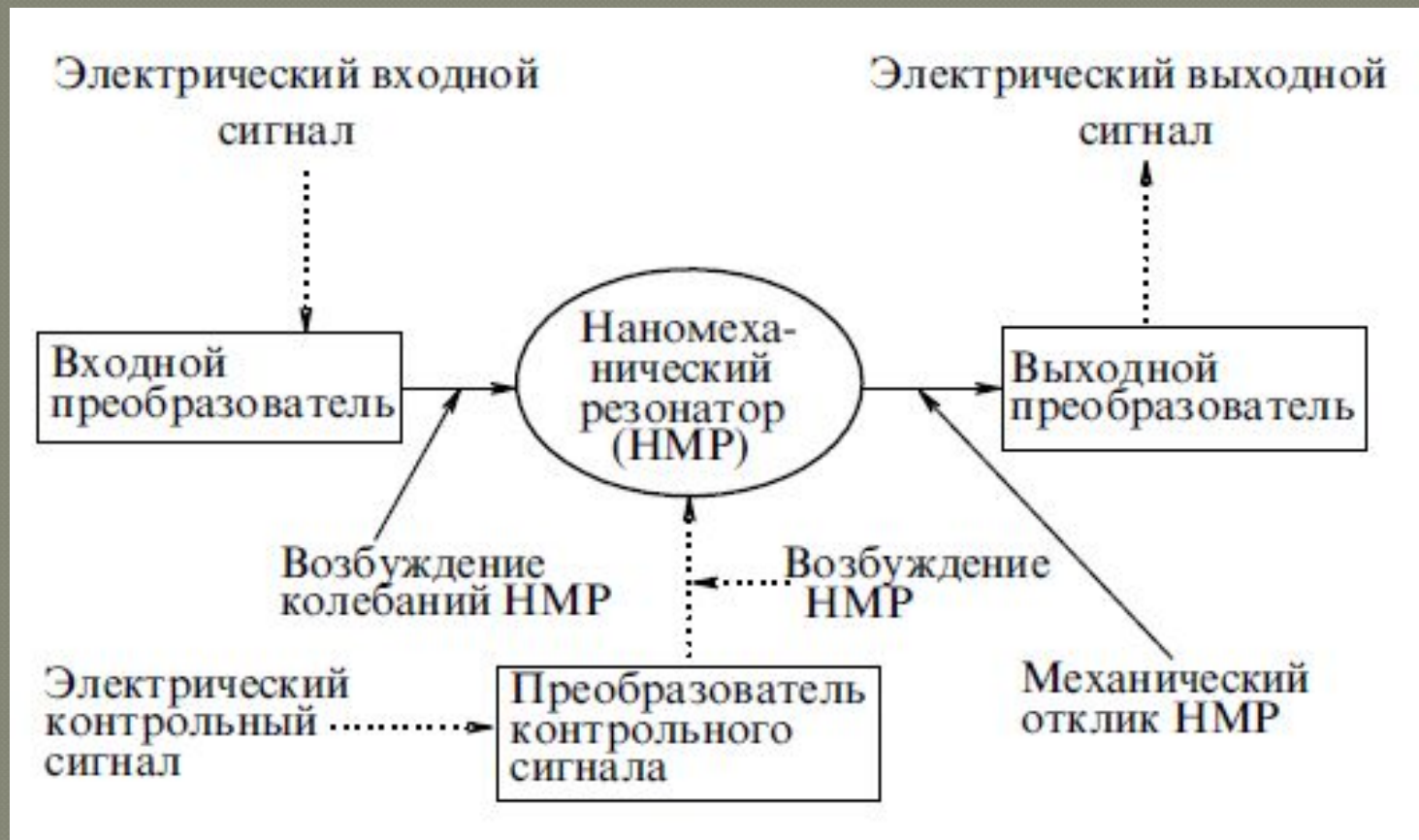
Применение НЭМС

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:

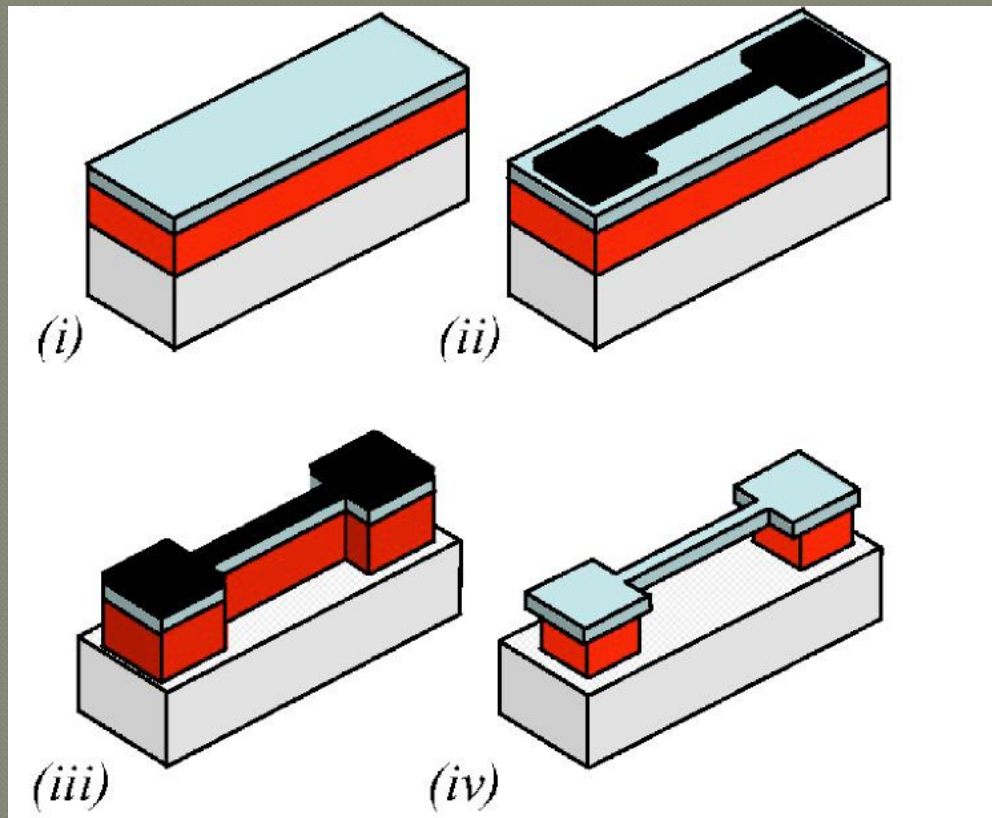
- Высокие частоты – возможность избавиться от сторонних воздействий (при 50 мК – 1 ГГц);
- Высокая добротность (до 10000) и
- Малое энергопотребление (< 1 мкВт);

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 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 ω_0 - резонансная частота, k – коэффициент жесткости, M – эффективная масса балки.

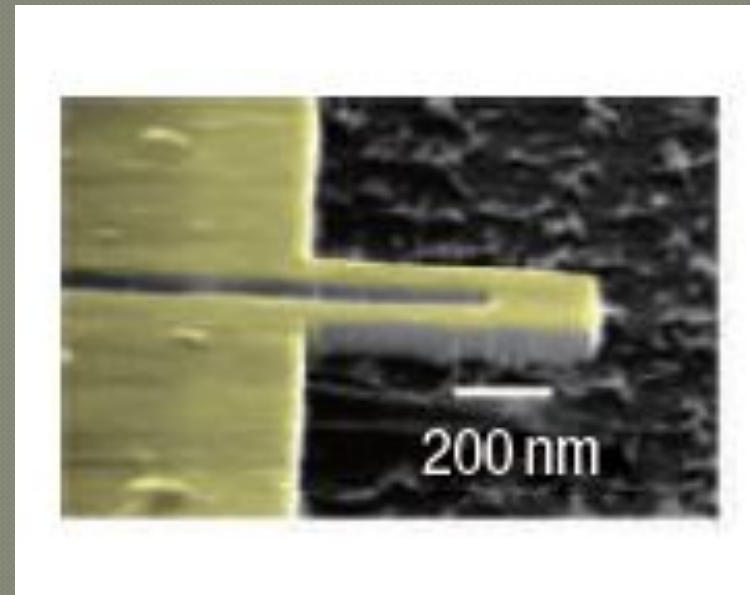
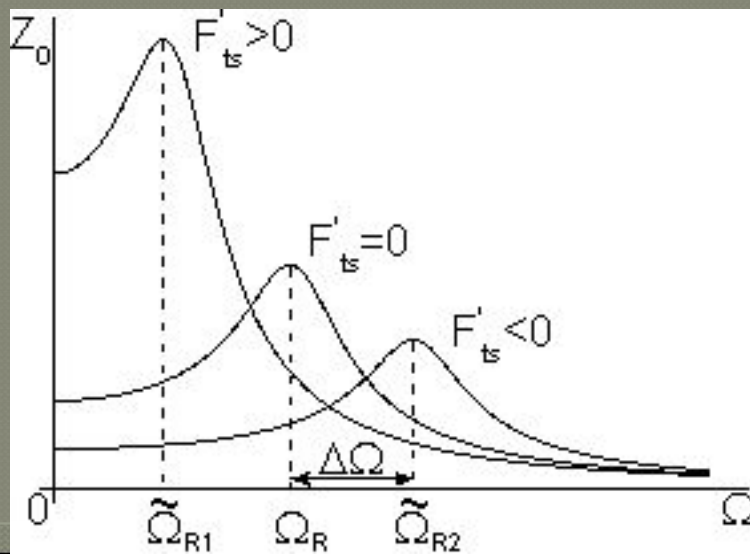
Наименьшая измеренная масса, а.е.м.	Чувствительность по сдвигу частоты $\delta f_0/\delta M$, Гц $(10^{-21} \text{ г})^{-1}$	Резонансная частота f_0 , МГц	Добротность резонатора
$4,9 \times 10^4$	12	428	
$1,52 \times 10^6$	3×10^{-3}	32,8	3000
$4,0 \times 10^3$	1	133 190	5000
15×10^3 (300 К) 840 (5 К)	11×10^3	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 ω_0 - резонансная частота, k - коэффициент жесткости, F' - производная силы по смещению вдоль движения балки.

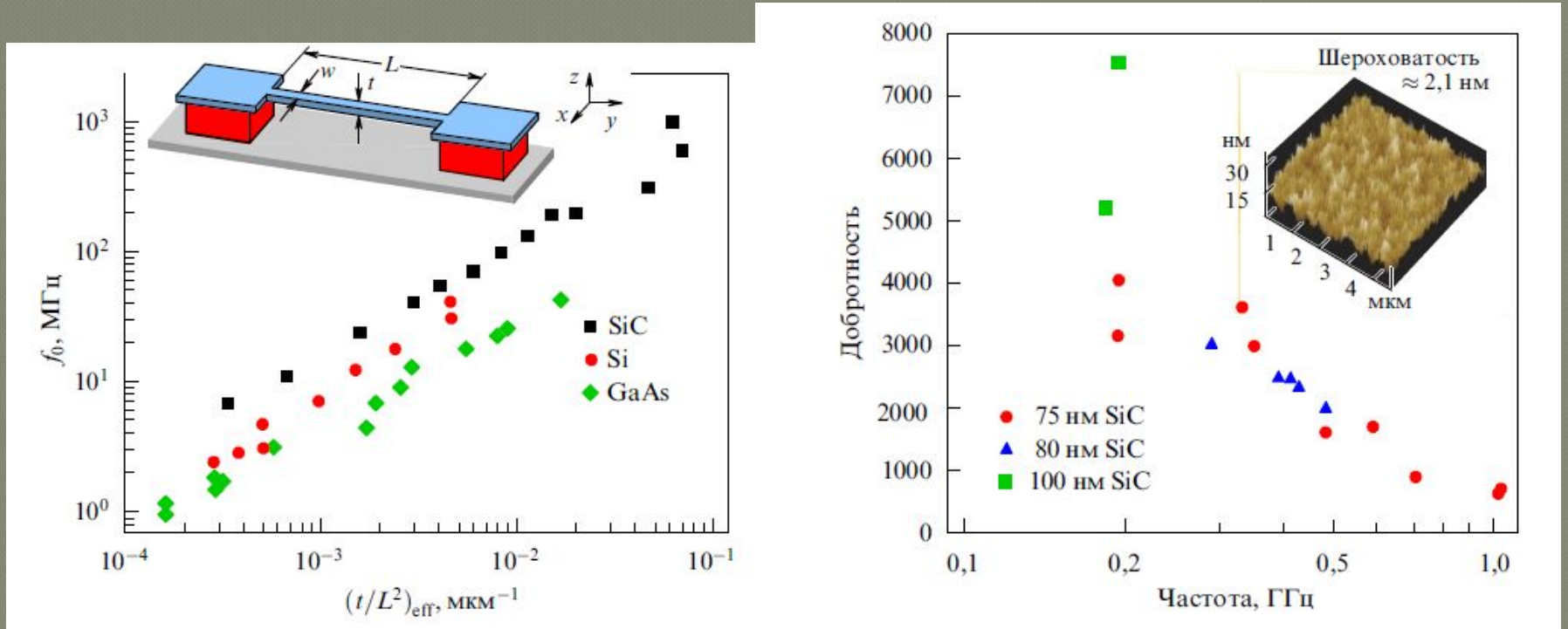
Измерения смещения связаны с измерением силы (по аналогии с атомно-силовым микроскопом).



Параметры современных НЭМС

Материал НМР	Темпера- тура, К	Частота основной гармоники f_0 , МГц	Доброт- ность Q
Si	4,2	70	2×10^4
Si	25	80	$1,3 \times 10^4$
Si	20	25,598	3×10^4
SiC	4,2	198	1×10^3
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.