

НЭМС: надежды и разочарования

МЭМС, НЭМС микро-, наноэлектромеханические системы – объединение механических осцилляторов с электронными элементами: одноэлектронными транзисторами, полевыми транзисторами с пьезоэффектом, с ячейками Куперовской пары (КПБ, СРВ), квантовыми точками.

Надежды:

на коммерческое применение в качестве приборов для высокоточного измерения силы, электрического заряда, массы, в качестве биосенсоров;

на наблюдения квантовых свойств мезоскопических систем;

на возможность применения НМ осцилляторов в нелинейном режиме в качестве элементов памяти, в комбинации с ячейками КП – в качестве элементов квантовых компьютеров;

на использование размерных эффектов в пластине осциллятора в элементах спинтроники для связывания без магнитного поля степеней свободы спина электрона со степенями свободы НМ осциллятора.

Углеродные нанотрубки.

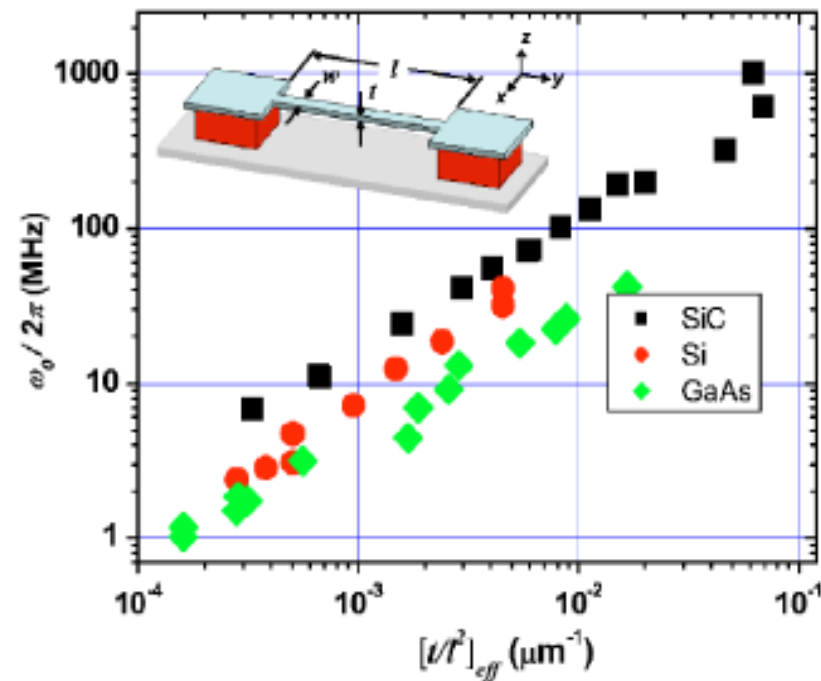
Уникальные механические и другие физические свойства.

Углеродные нанотрубки, особенно многослойные, могут играть ключевую роль в наноприборах и в наномеханизмах из-за способности относительного движения их стенок.

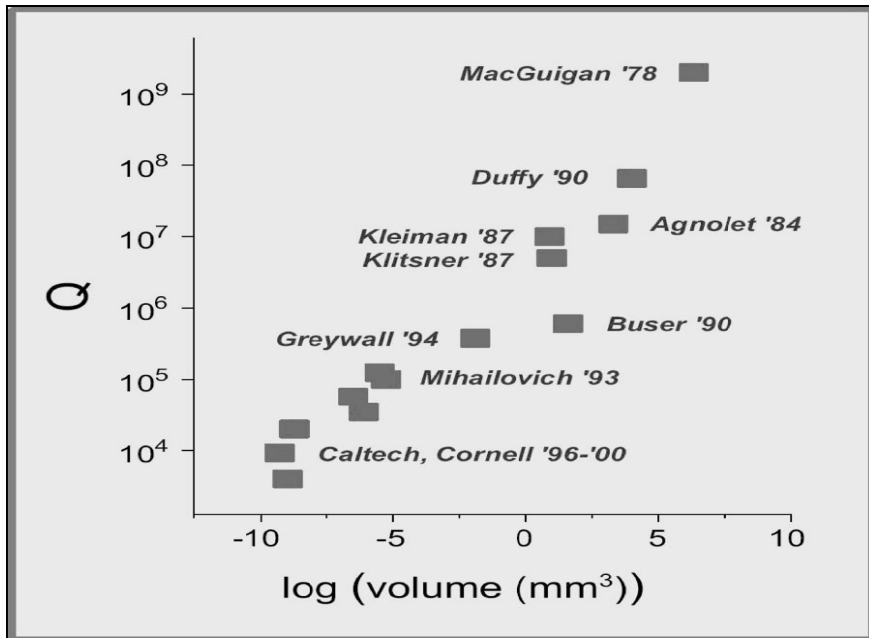
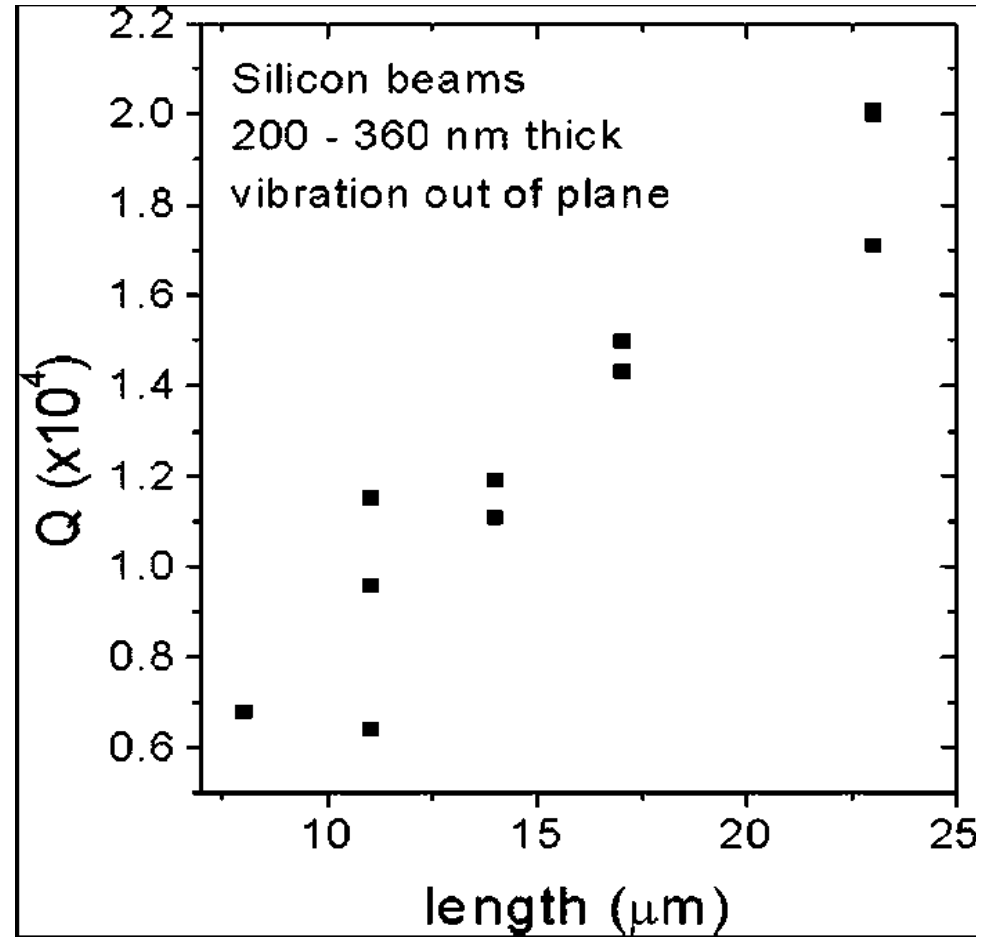
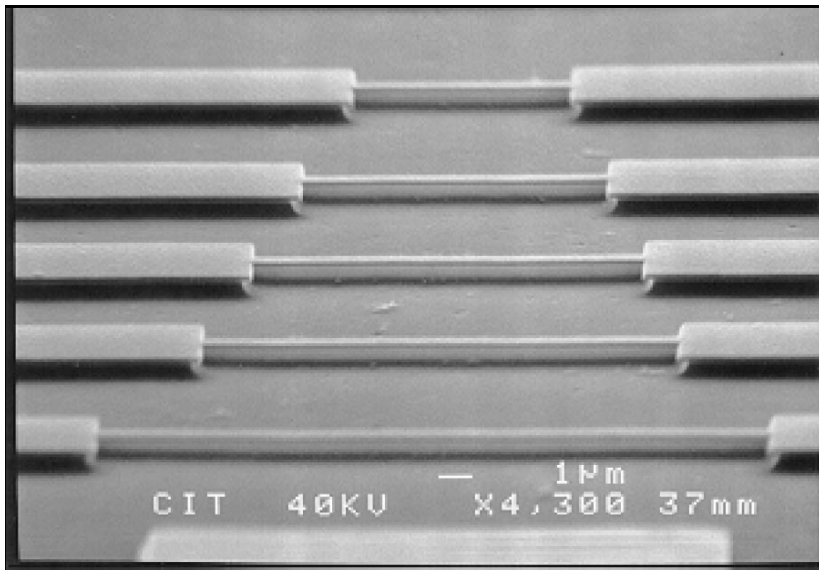
Двухстенные нанотрубки подобны системе гайка-болт. Можно сконструировать такие устройства, как нанодрель и нанорезистор, наноподшипники, наношестерни, управляемые электростатической силой механические наноключи. Использование в качестве нанопинцетов, наноразмерных актуаторов, ключей в устройствах памяти с произвольным доступом.

Питаемый от лазера вращательный мотор. Нанотрубки перспективны и как гигагерцовые осцилляторы.

Наномеханические осцилляторы: технологические достижения



$$m = 0,735(ltw\rho), \quad \omega = 2\pi(1,05)\sqrt{E/\rho}(t/l^2), \quad k = 32Ewt^3/l^3.$$



Потенциальная чувствительность (при вероятности ошибки обнаружения 0,25) к действию силы вида $F_0 \sin \Omega t$ ($0 < t \leq \tau = 2n\pi/\Omega$) любого пробного тела определяется известной формулой Найквиста

$$F_{pot} = \sqrt{4k_B T \eta / \tau}, \quad (1)$$

где η , T -- коэффициент и эффективная температура трения.

В случае осциллятора $\eta = m\omega_0/Q$.

Для основной моды мостикового резонатора

$$m_{eff} = 0,735/tw\rho, \quad k_{eff} = 32Et^3w/l^3, \quad \omega_0 = 2\pi(1,05)\sqrt{\frac{E}{\rho}}(t/l^2)$$

(l – длина, w -- ширина, t – толщина, Q – добротность, E -- модуль Юнга, ρ -- плотность).

Из (1)

$$F_{pot} = \left(\frac{wt^2}{lQ}\right)^{1/2} (E\rho)^{1/4} (k_B T \Delta f)^{1/2}, \quad (2)$$

где $\Delta f = 1/\tau$ – эффективная ширина спектра силы.

У кремния $E = 1,5 \times 10^{11} \text{ Н/М}^2$, $\rho = 2,33 \times 10^3 \text{ кг/М}^3$. Соответственно, $E\rho \approx 3,5 \times 10^{14} \text{ Нкг}^2 / \text{М}^5$. Положив $l = 10 \text{ мкм}$, $w = 100 \text{ нМ}$, $t = 100 \text{ нМ}$, $T = 1 \text{ К}$ получим

$$F_{pot} \approx \frac{2,5 \times 10^{-16}}{\sqrt{Q}} \text{ Н} / \Gamma \eta^{1/2}. \quad (8A.2a)$$

Из экспериментов $\eta \sim \omega$, соответственно, $Q \sim m$, ($Q \sim wtl \rightarrow Q = qwtl$)

$$\left(\frac{wt^2}{lQ} \right) = \left(\frac{wt^2}{lqwtl} \right) = \left(\frac{t}{ql^2} \right),$$

$$F_{pot} = \left(\frac{t}{ql^2} \right)^2 (E\rho)^{1/4} (k_B T \Delta f)^{1/2}$$

Чувствительность зависит от отношения t/l^2 , и можно получить заданную чувствительность при микронных, а не нанометровых толщинах, увеличив l .

Инструментальную чувствительность определяется силой обратного флуктуационного влияния со спектральной плотностью S_F и измерительным шумом со спектральной плотностью S_x .

При детектировании резонансной силы вида $f(t) = F \sin \omega t$ инструментальная чувствительность

$$F_{(\sim)instr} = \frac{1}{\tau} \sqrt{8 \sqrt{S_x S_F} m_{eff} \omega},$$

(τ -- длительность действия силы).

Шумовая температура прибора $T_w = \frac{\omega}{k_B} \sqrt{S_F S_x}$.

Квантовый предел шумовой температуры при $\omega = 10^9$ равен $5 \cdot 10^{-3}$ К.

Сравнив потенциальную и инструментальную чувствительности, найдем, что чувствительность будет определяться шумами осциллятора, а не прибора, если

$$T < T_w \frac{Q}{\omega \tau}, \quad Q/\omega \tau \gg 1. \quad (5)$$

$$T_w \frac{Q}{\omega \tau} > \frac{Q}{\omega \tau} \frac{\hbar \omega}{2k_B} \approx 5 \cdot 10^{-3} Q / \omega \tau$$

Экспериментально достигнута чувствительность $5,6 \times 10^{-18} \text{ Н} / \sqrt{\text{Гц}}$ при 4,8 К в вакууме на кремниевом монокристаллическом кантилере с $t = 600$ А, $k_{eff} = 6,5 \times 10^{-6} \text{ Н/М}$ (в 10^3 раз меньше, чем в обычных атомно-силовых микроскопах)

Резонансный измеритель массы на основе НМ осциллятора

(Прогнозируется чувствительность 1 Дальтон ($1,66 \cdot 10^{-27}$ кг). Получено 10^{-21} кг.)

1. Термомеханические флуктуации.

$$\Delta m = \sqrt{\frac{D}{\tau}} \frac{2m_{eff}}{\omega}, \quad D \text{ -- коэффициент диффузии фазы.}$$

$$D = \left(\frac{\omega}{Q}\right)^2 \frac{1}{2P} k_B T_g$$

2. Температурные флуктуации,

3. Сорбции-десорбции, бомбардировк

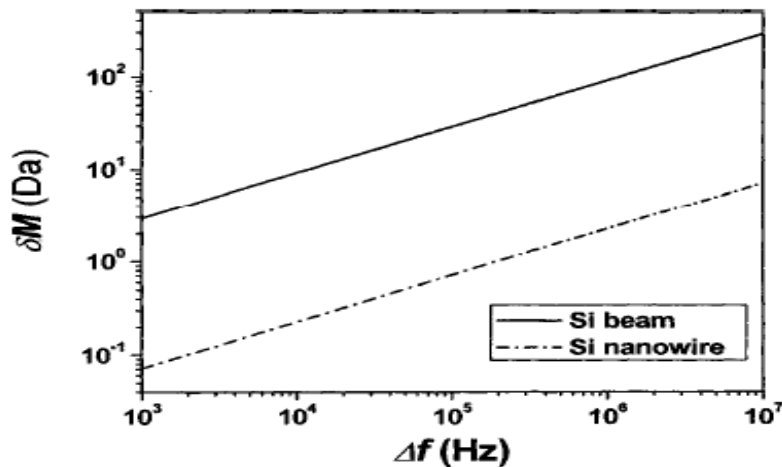


FIG. 4. Mass sensitivity limits imposed by temperature fluctuations as a

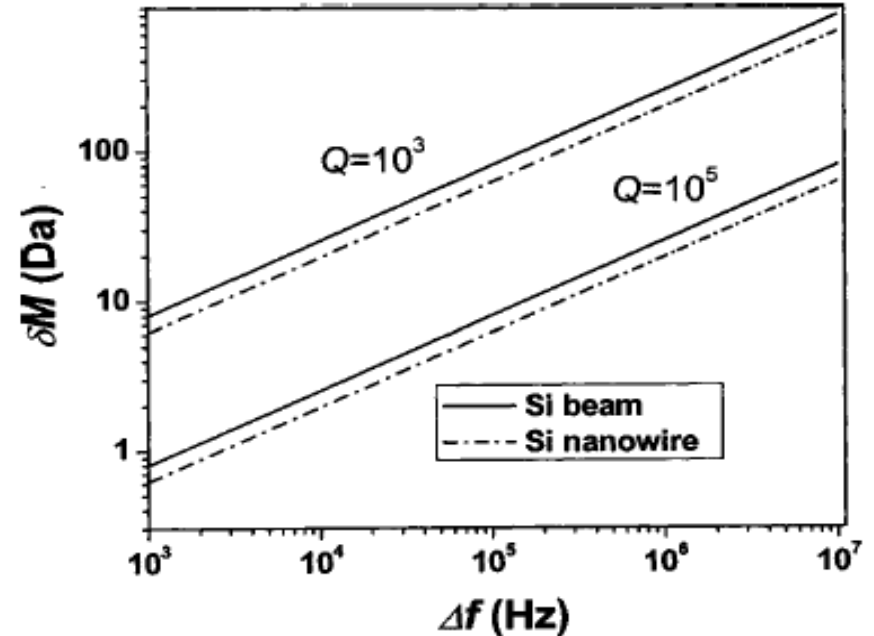
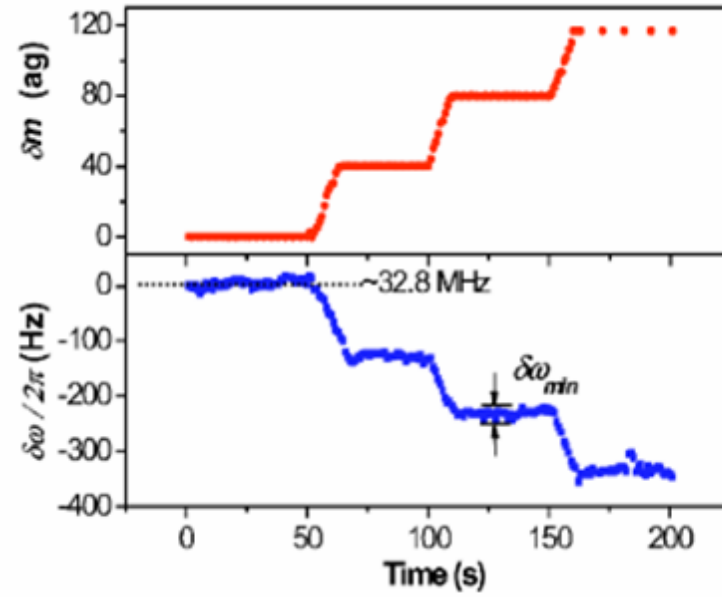
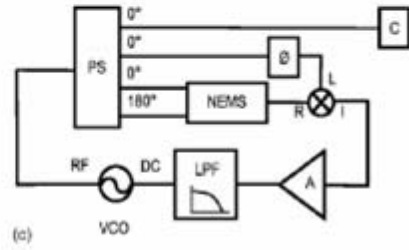
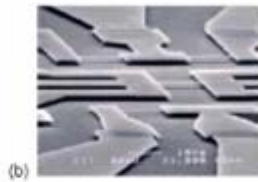
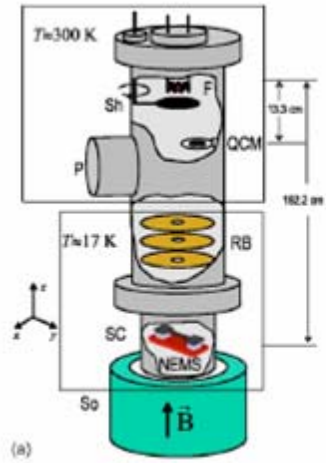
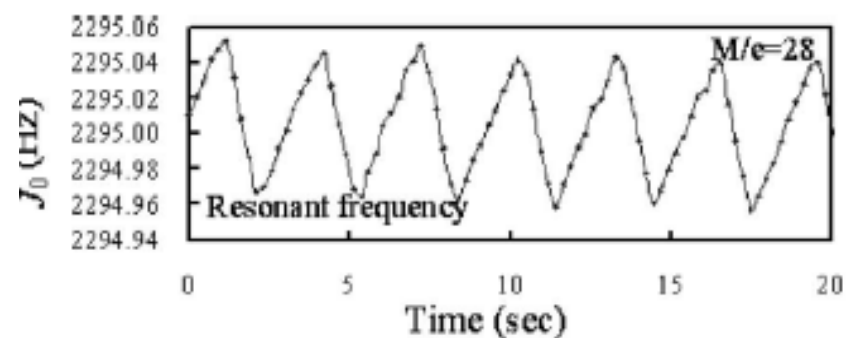
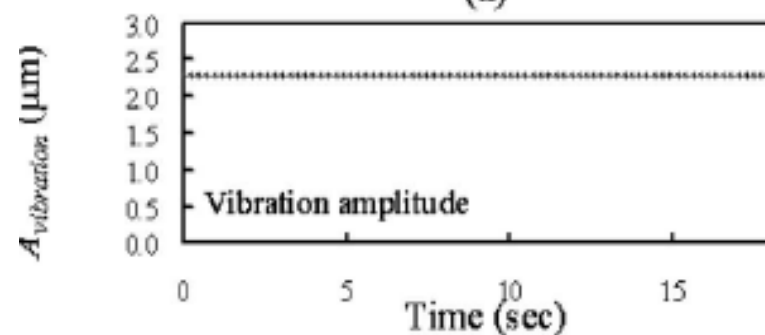


FIG. 3. Limits to mass sensitivity, δM , imposed by thermomechanical fluctuations, in units of Daltons (Da), as a function of the measurement band

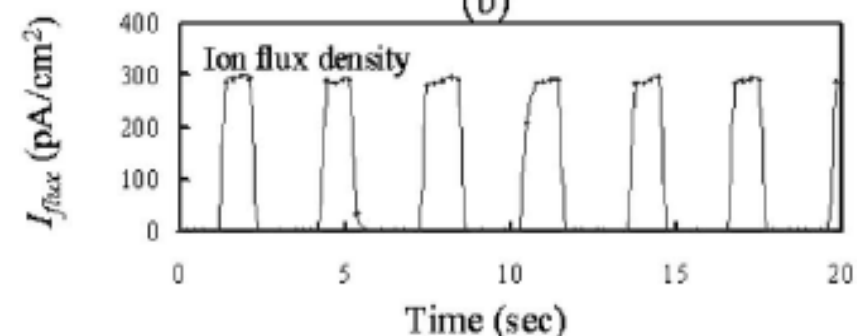




(a)



(b)



(c)

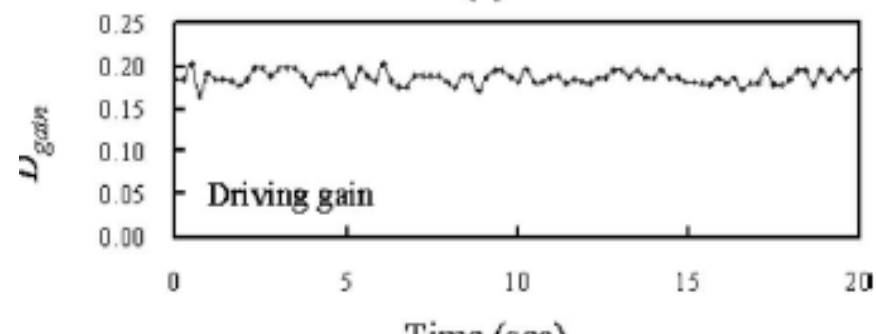
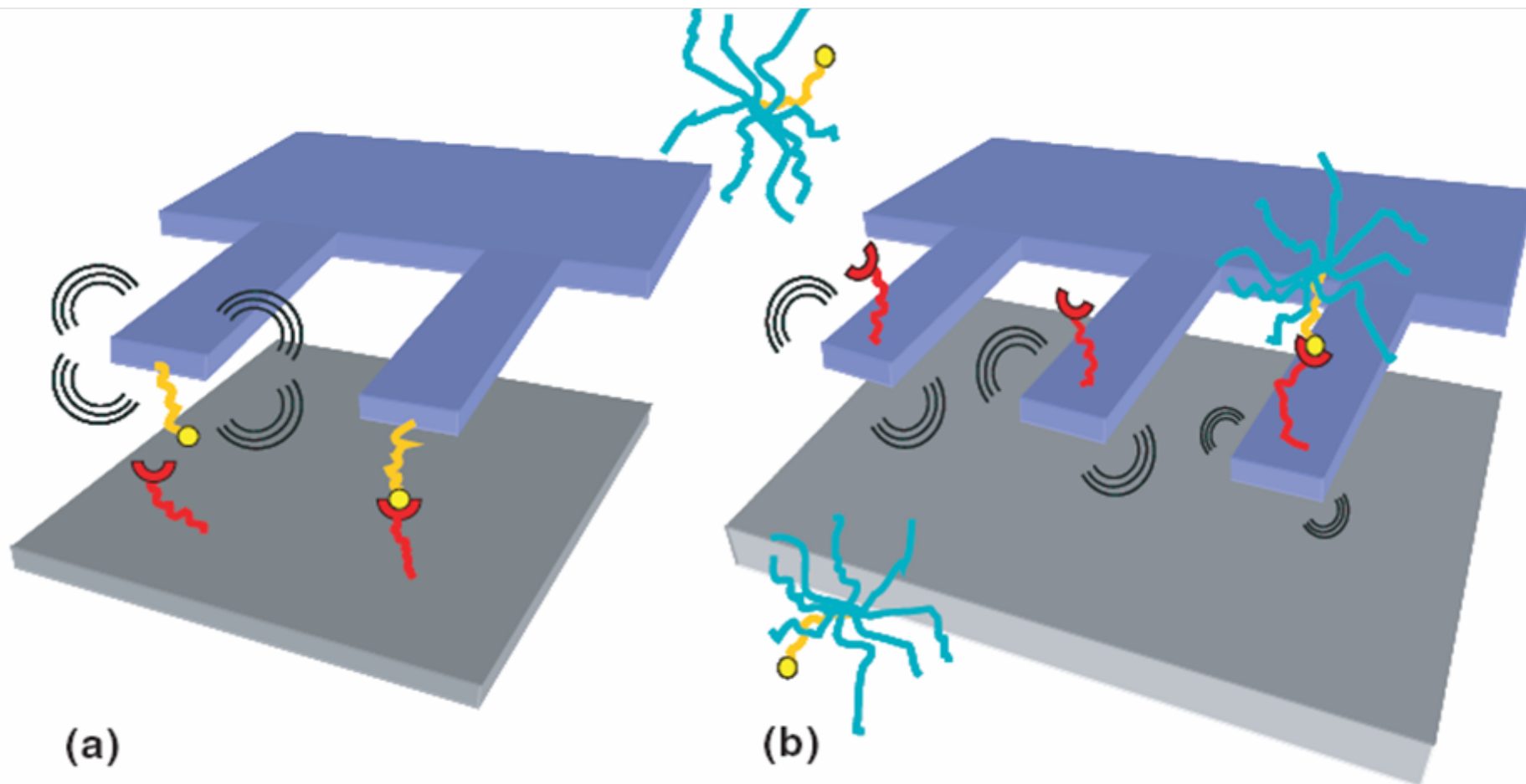


FIG. 2. Mechanical response to irradiation of N_2 ion pulses on the 500-nm-thick cantilever. (a) Frequency response. (b) Vibration amplitude during the measurement. (c) Irradiated ion pulses. (d) Driving gain of electrostatic actuation for keeping the amplitude a constant.

The ability to tailor the surface properties with specific biomolecules can be used to create chemically functionalized NEMS oscillators for study of physical chemistry, biocompatibility, DNA hybridization, and biomolecular interactions.



about 3×10^{-13} g. With these devices, we can detect the mass of single-virus particles bound to the cantilever. Resonant frequency shift resulting from the adsorbed mass of the virus particles distinguished solutions of virus concentrations varying between 10^5 and 10^7 pfu/ml. Control experiments using buffer solutions without baculovirus showed small amounts (<50 attograms) of nonspecific adsorption to the antibody layer. © 2004 American Institute of Physics.

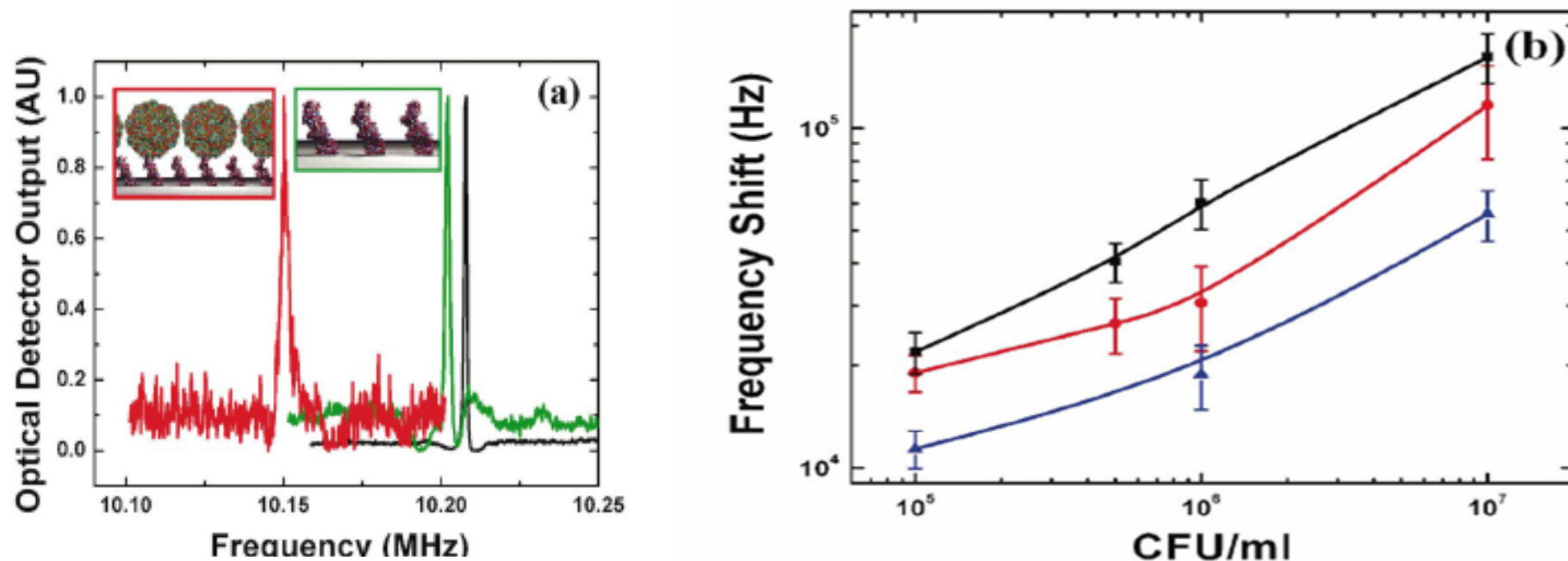
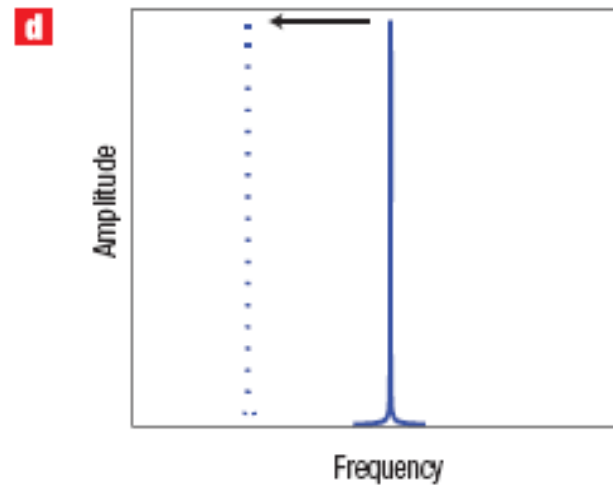
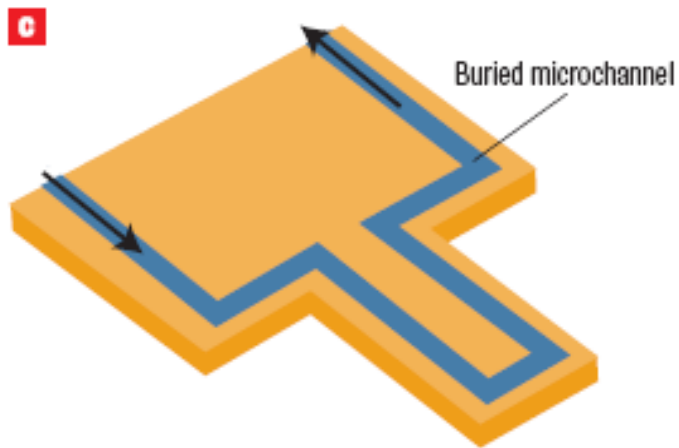
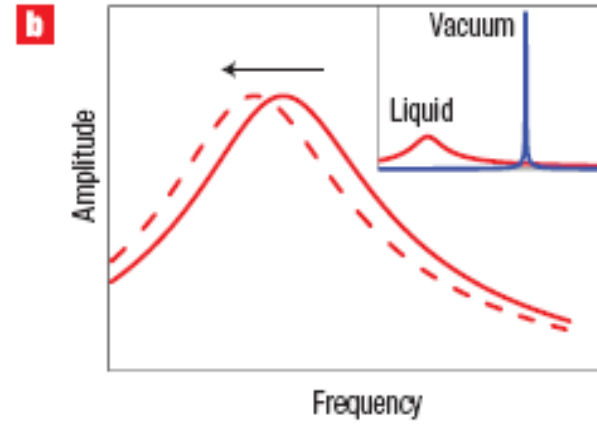
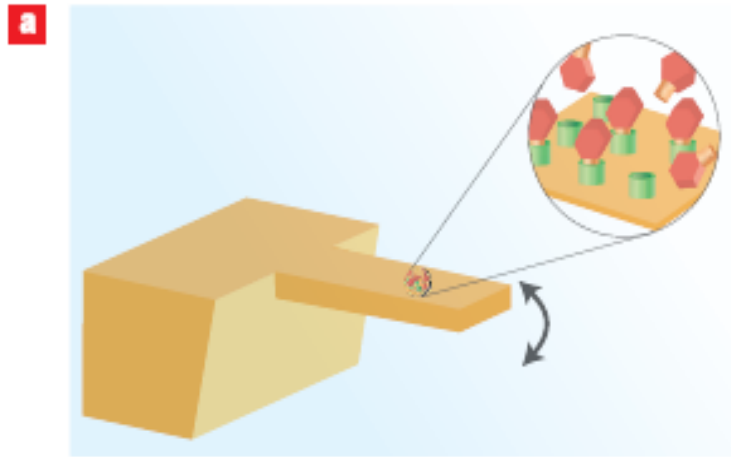


FIG. 2. (Color) Frequency spectra and sensitivity of the nanoelectromechanical cantilevers. (a) Measured frequency spectra of as fabricated $l = 6 \mu\text{m}$ oscillator (black), with additional antibody (green) and baculovirus (red) mass loading. Insets schematically depicts binding of AcV1 to the substrate (left) and immobilization of baculovirus (right) (b) Frequency shift as a function of the baculovirus concentration for 6- μm (black)-, 8- μm (red)-, and 10- μm (blue)-long cantilevers. (c) Frequency spectra of control measurements with $l = 8 \mu\text{m}$ cantilevers (black), with antibodies (green), buffer solution without baculovirus (blue) and a buffer solution containing baculovirus of 10^8 pfu/ml concentration (red).



Strain-Induced Coupling of Spin Current to Nanomechanical Oscillations

A. G. Mal'shukov,¹ C. S. Tang,² C. S. Chu,³ and K. A. Chao⁴

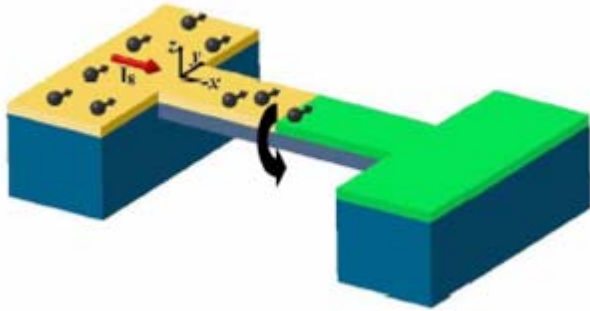


FIG. 1 (color online). Schematic illustration of electromechanical spin-current detector, containing a suspended semiconductor-metal (S-M) rectangular rod atop an insulating substrate (blue). A spin current is injected from the left semiconductor reservoir (yellow) and then diffuses toward the metallic film (green). While passing through the semiconductor film, the spin current induces torque shown by the black arrow.

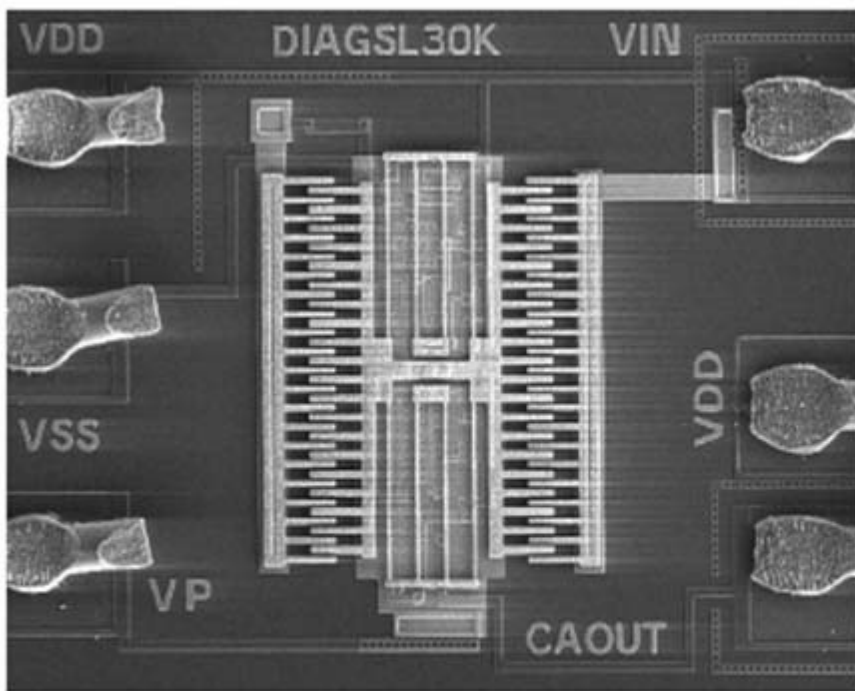


Fig. 9. *P+ poly-Si_{0.35}Ge_{0.65} resonator fabricated on top of a CMOS amplifier with Al-Si(2%) metallization. Wires are bonded to the exposed Al-Si(2%) bond pads (from [43]).*

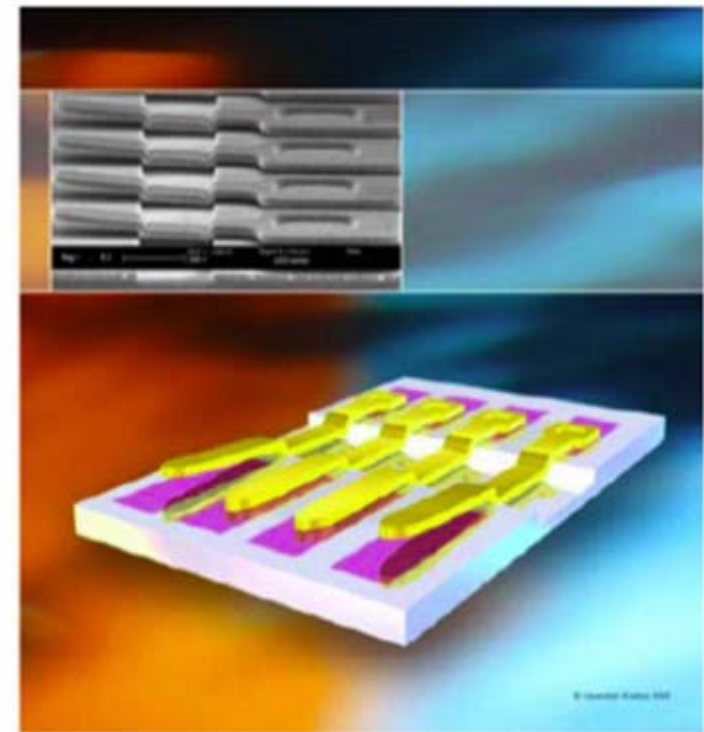


Fig. 8. *Cantilever device (microphotograph and schematic representation) for integrated nonvolatile memory (from [30]).*

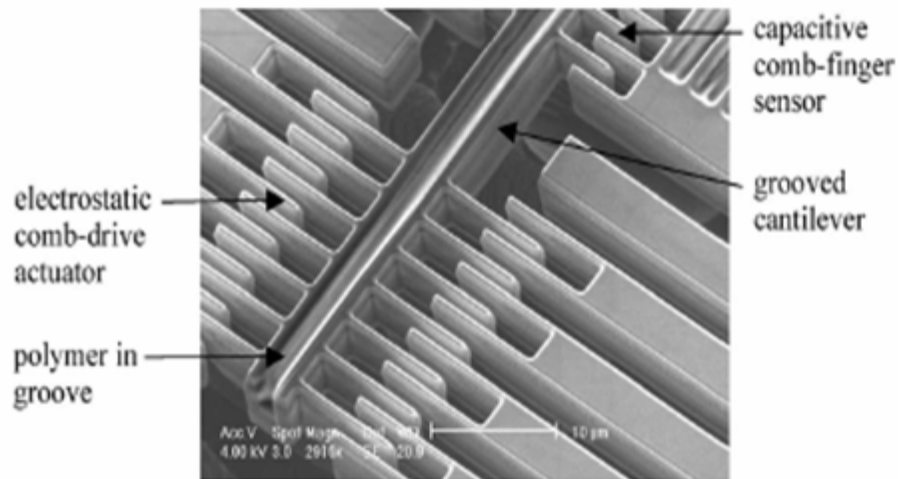
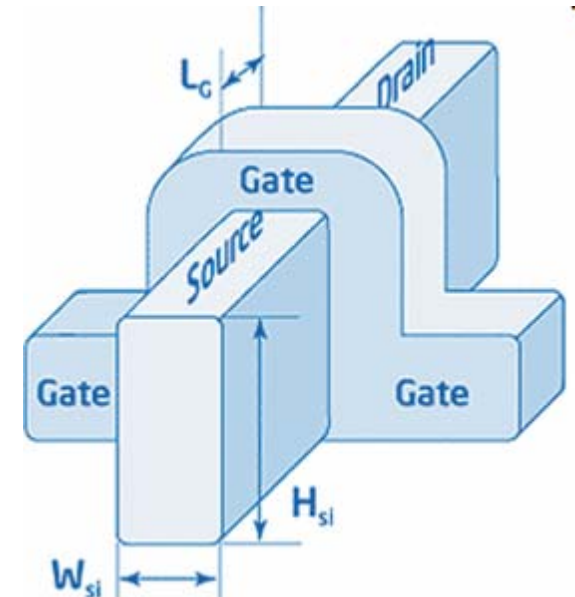
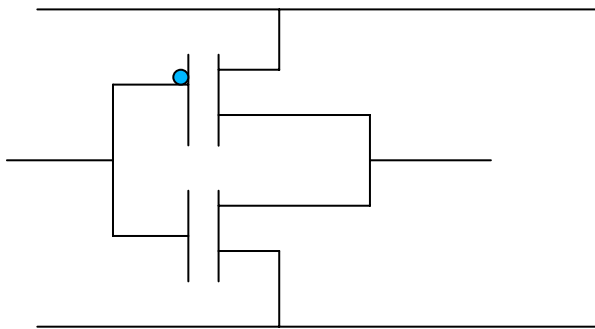


Fig. 8. *Cantilever device (microphotograph and schematic representation) for integrated nonvolatile memory (from [30]).*

CMOS- транзисторы

КМОП (К-МОП; комплементарная логика на транзисторах металл-оксид-полупроводник. *CMOS, Complementary-symmetry/metal-oxide semiconductor*) — технология построения электронных схем. В технологии КМОП используются полевые транзисторы с изолированным затвором с каналами разной проводимости. Отличительной особенностью схем КМОП по сравнению с биполярными технологиями (ТТЛ, ЭСЛ и др.) является очень малое энергопотребление в статическом режиме (в большинстве случаев можно считать, что энергия потребляется только во время переключения состояний). Отличительной особенностью структуры КМОП по сравнению с другими МОП-структурами (N-МОП, P-МОП) является наличие как n-, так и p-канальных полевых транзисторов; как следствие, КМОП-схемы обладают более высоким быстродействием и меньшим энергопотреблением, однако при этом характеризуются более сложным технологическим процессом изготовления и меньшей плотностью упаковки.

Подавляющее большинство современных логических микросхем, в том числе, процессоров, используют схемотехнику КМОП.



Холодное демпфирование

$$S_x(\omega) = \frac{4k(T_1\eta_1 + T_2\eta_2)}{m^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2(\eta_1 + \eta_2)^2} = \frac{4kT_1(\eta_1 + \eta_2) \left(\frac{\eta_1 + \eta_2 T_2 / T_1}{\eta_1 + \eta_2} \right)}{m^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2(\eta_1 + \eta_2)^2}$$

$$\overline{x^2} = \frac{k_B T_1}{m\omega_0^2} \frac{(\eta_1 + \eta_2 T_2 / T_1)}{\eta_1 + \eta_2} \quad \bullet \quad \eta_2 \gg \eta_1, \quad T_2 \geq \hbar\omega / 2k_B$$

$$\overline{x^2} = \overline{x_1^2} \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} + \frac{T_2}{T_1} \right) \geq \overline{x_1^2} \frac{\eta_1}{\eta_2} + \frac{\hbar}{2m\omega}$$

