

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Научно-образовательный центр по нанотехнологиям

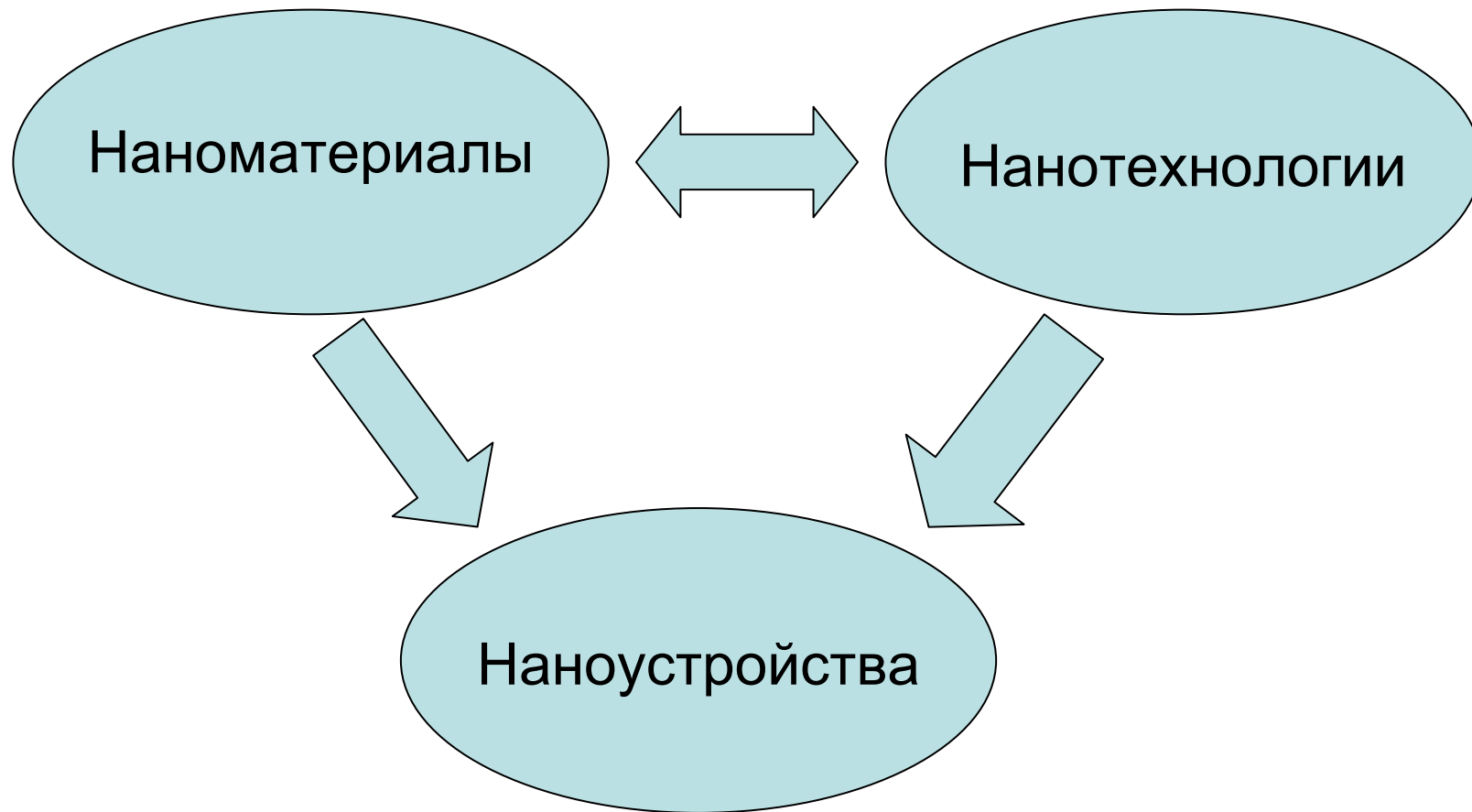
межфакультетский курс лекций

«Фундаментальные основы нанотехнологий»

Лекция 11: Физика nano-устройств. Литографические методы создания микро- nano-устройств. Микро- и nano-транзисторы. Закон Мура. Механические и электромеханические микро- и nano-устройства. Nano-устройства на основе углеродных нанотрубок.

Образцов Александр Николаевич

профессор, Физический факультет МГУ



Целью создания наноматериалов и нанотехнологий является изготовление устройств, обладающих улучшенными или новыми функциональными возможностями.

Толковый словарь русского языка Ожегова:

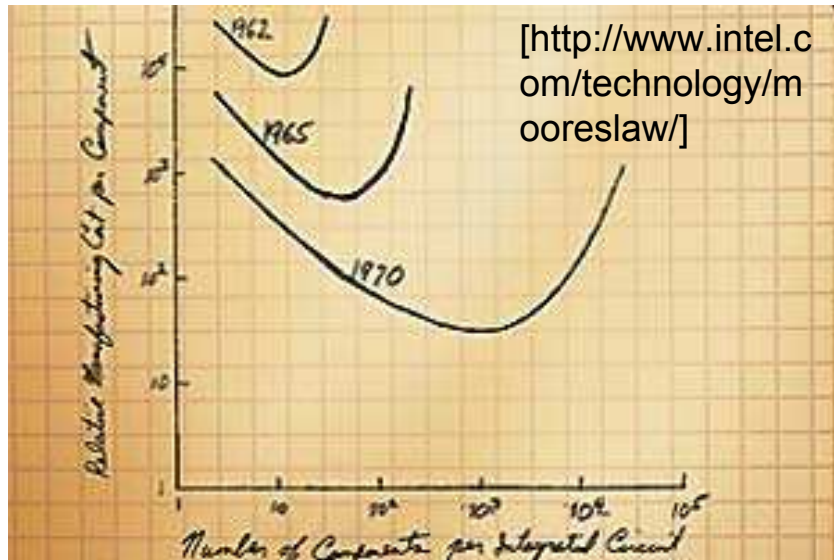
УСТРОЙСТВО: Техническое сооружение, механизм, машина, прибор.

СИСТЕМА: Форма организации чего-либо. Нечто целое, представляющее собой единство закономерно расположенных и находящихся во взаимной связи частей. Техническое устройство, конструкция.

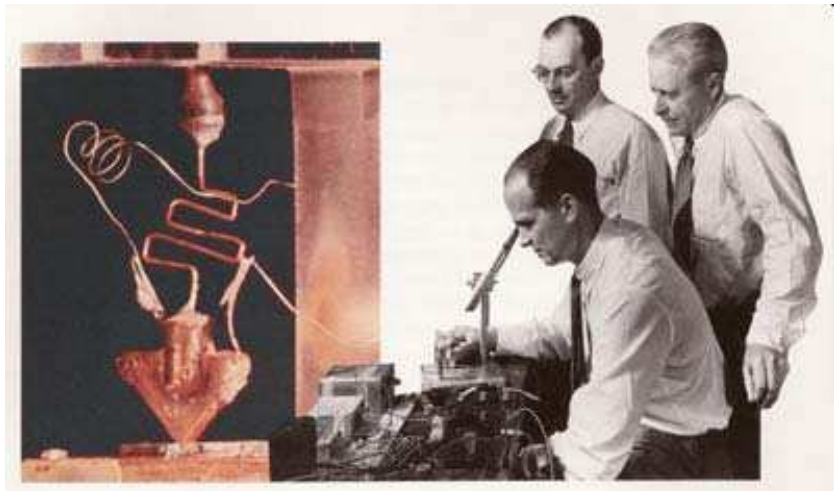
НАНОУСТРОЙСТВА и **НАНОСИСТЕМЫ** представляют собой механизмы, приборы, машины, функционирование которых обусловлено тем, что они выполнены с использованием наноматериалов и/или нанотехнологий, включая возможность перемещения их частей и/или наличие размеров составляющих их частей в нанометровом диапазоне.

Целями создания наноустройств и наносистем являются использование новых физических принципов в их функционировании, а также миниатюризация размеров.

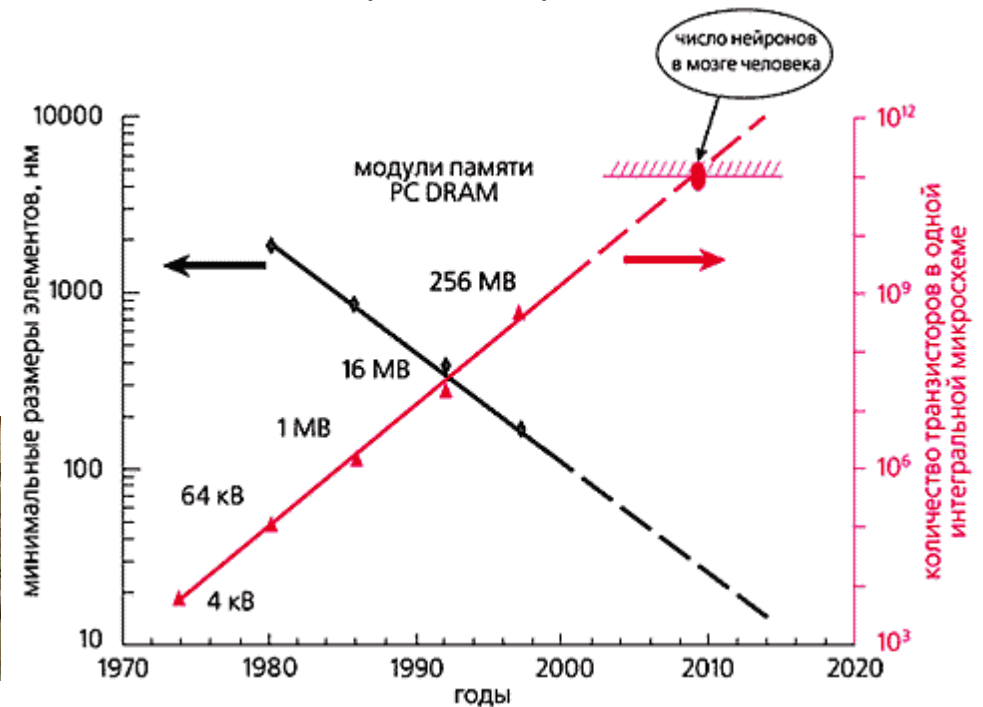
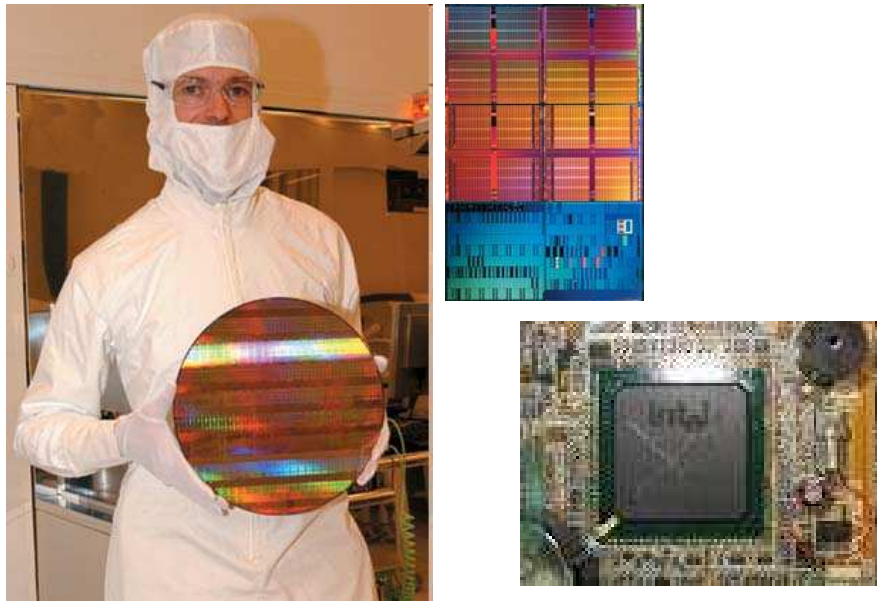
Закон Мура (Gordon Moore, 1965): наиболее выгодное число транзисторов на одном кристалле удваивается каждый год.



Современные микросхемы содержат миллионы транзисторов.



1947 г. – изобретение первого транзистора У. Шокли, Дж. Бардин, У. Браттейн.



Микроэлектронная технология



1-2: изготовление пластин из монокристаллического кремния;

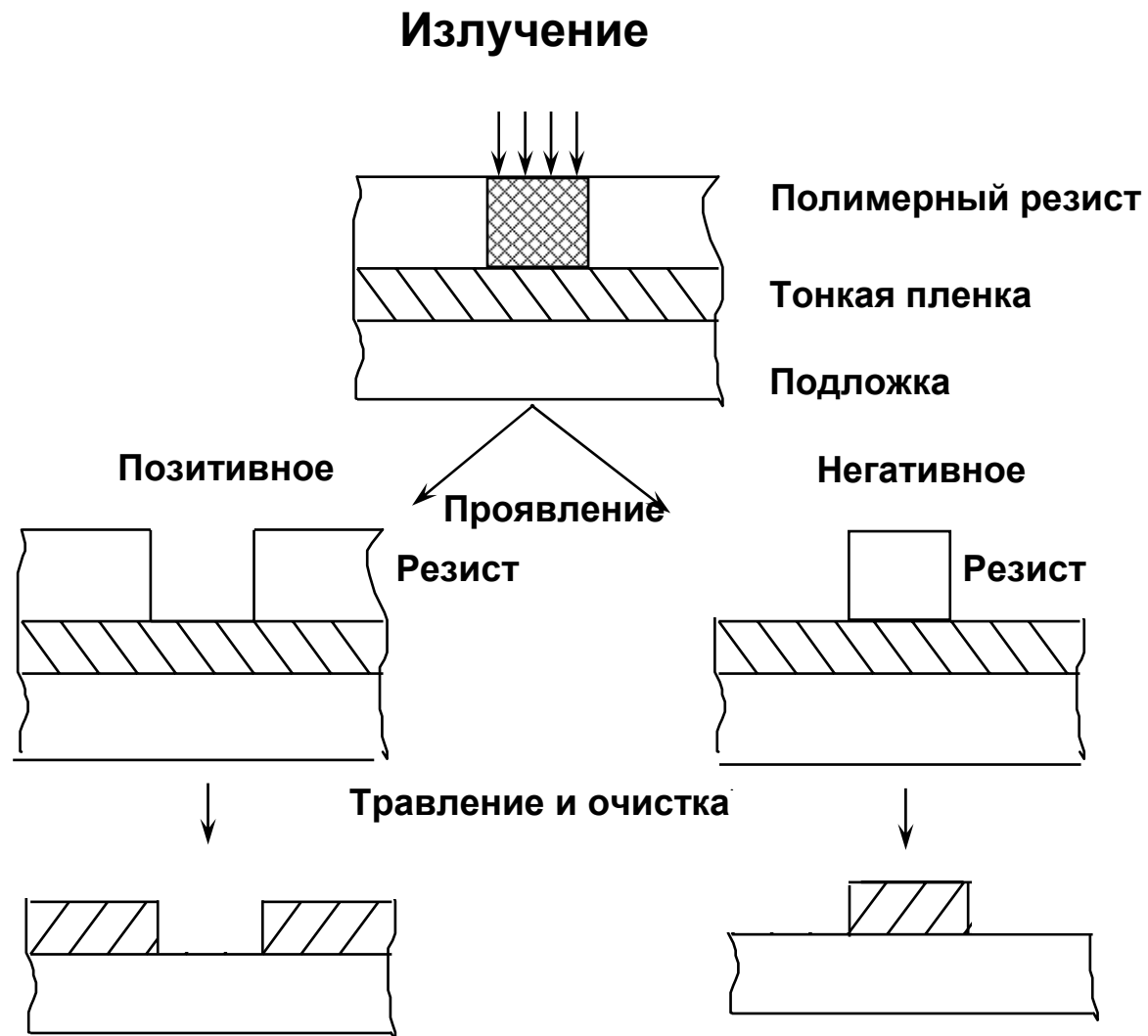
3: нанесение фоторезиста;

4: фотолитография;

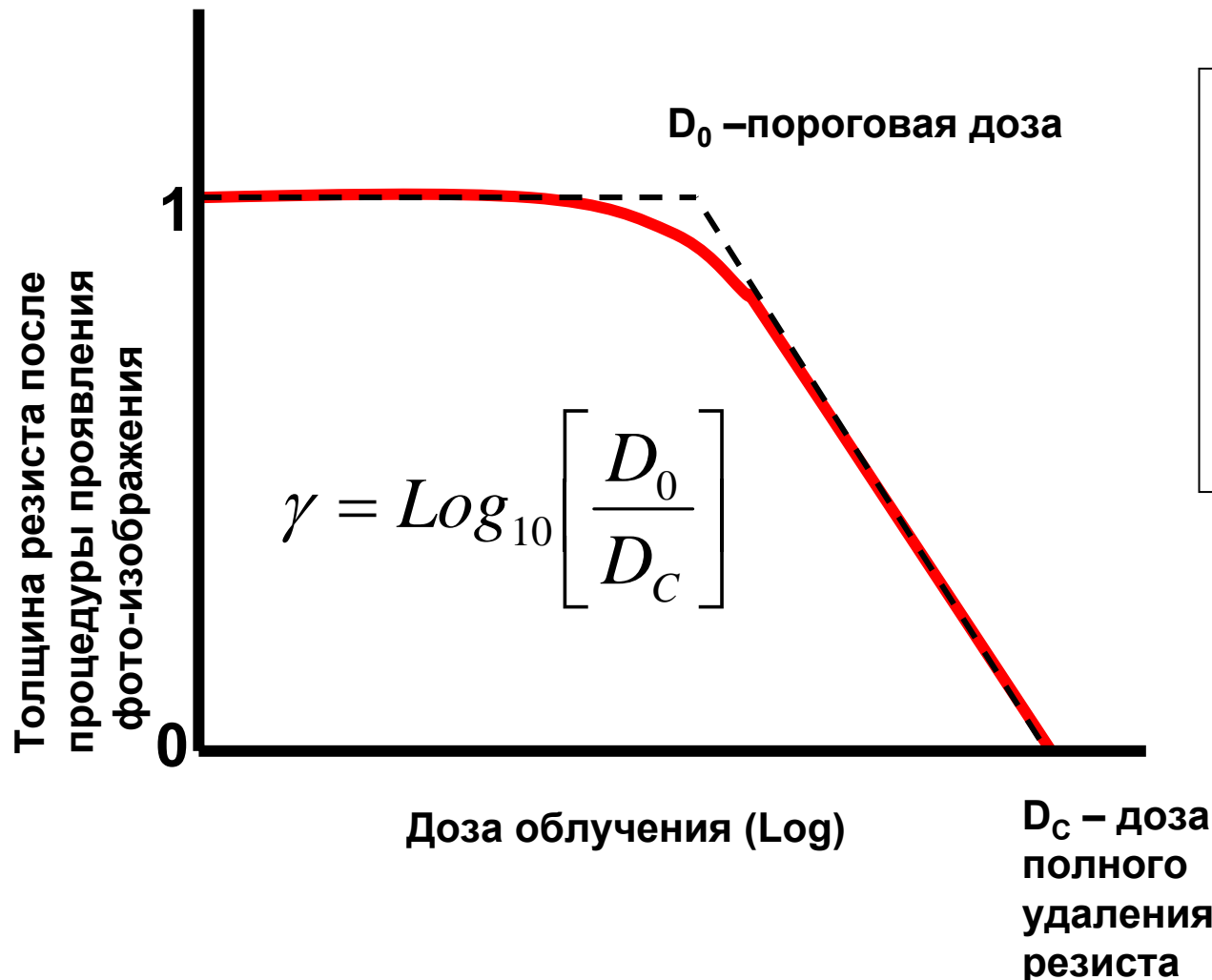
5-8: легирование, окисление, металлизация;

9: тестирование, разрезание пластины на отдельные элементы.

Литографические методы формирования планарных структур



Критически важным параметром литографического процесса является контраст изображения, обеспечиваемый свойствами резиста. Для увеличения контраста чувствительность резиста к воздействию используемого излучения должна быть сильно нелинейной - слабая чувствительность к малым дозам и сильная к большим.



Типичные значения контраста варьируются от $\gamma=2$ для PMMA (полиметилметакрилат) до $\gamma=15$ для современных УФ фоторезистов UV-6 (Shibley UV series).

Схема фотолитографического процесса.

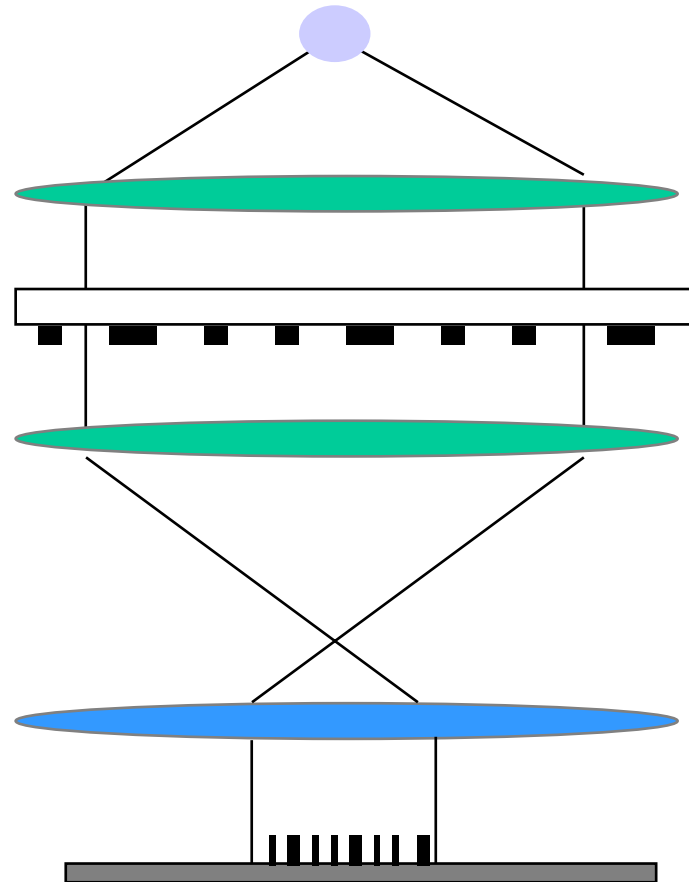
Источник света

Конденсор

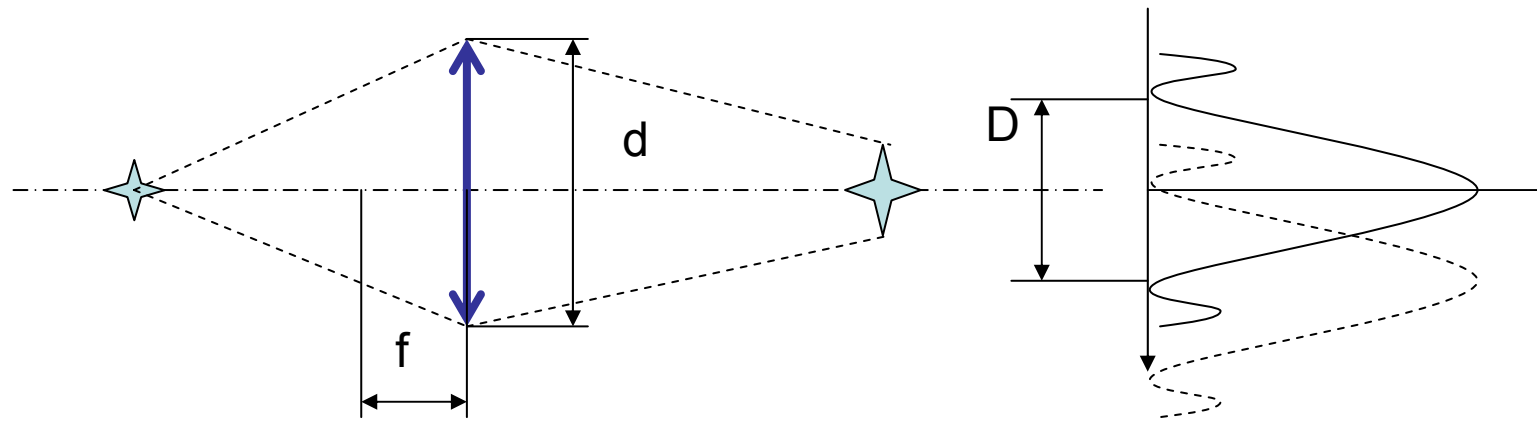
Фото-шаблон Cr (или MoSi_2) на стекле

Оптическая система, создающая уменьшенное изображение

Изображение на поверхности резиста, нанесенного на п.п. пластину.



Предел разрешения оптической литографии



Дифракционное размытие ограничивает разрешение проекционной литографии.

$D = 1,22\lambda \frac{f}{d}$ – критерий разрешения Рэля (λ - длина волны света)

Разрешение оптической системы

$$R \equiv D = 1,22\lambda \frac{f}{d} = 1,22\lambda \frac{f}{2f \sin \alpha} = 0,61 \frac{\lambda}{NA}, \text{ где}$$

α - угол сходимости лучей ($\sin \alpha = d/2f$); $NA = \sin \alpha$ – числовая апертура линзы

Коэффициент 1,22 в критерии Рэля является следствием восприятия (чувствительности) зрения человека. Поскольку чувствительность фоторезиста отличается от чувствительности глаза, то вместо 1,22 должен использоваться другой коэффициент – $R = k_1 \lambda / NA$. Обычно $k_1 \sim 0,8$.

Т.о. разрешение (или минимальный размер на фотошаблоне) $\sim \lambda$.

Для увеличения разрешения (т.е. уменьшения величины R) можно использовать:

- Уменьшение длины волны света (λ)
- Увеличение апертуры (размера) оптических элементов (NA)
- Изменение характеристик фоторезиста (k_1)

Традиционная литография использует:

- ртутные лампы: $\lambda_1 = 435$ нм (G-линия) и $\lambda_2 = 365$ нм (I-линия);
- эксимерные лазеры: KrF – 248 нм; ArF – 193 нм; F2 – 157 нм.

Материалы для изготовления оптических элементов:

- обычный кварц (SiO_2) используется только для длин волн более 248 нм;
- для 193 нм – плавленый кварц и CaF_2 ; 157 нм - CaF_2 или MgF.

Кроме разрешения в плоскости важное значение имеет также разрешение «по глубине», которое определяется глубиной фокуса.

Уменьшение длины волны и увеличение апертуры ведет к уменьшению глубины фокуса оптической системы (DOF):

$$DOF = \pm 0,5 \frac{\lambda}{(NA)^2} = \pm k_2 \frac{\lambda}{(NA)^2}$$

Технология уровня 1997 г.: $\lambda=248$ нм; $NA=0,6 \Rightarrow DOF \sim 300$ нм

Т.о. планарность (плоскостность) п.п. пластин должна быть лучше 300 нм на размере, облучаемом через фотошаблон ($\sim 25 \times 25$ мм). Это очень трудная задача.

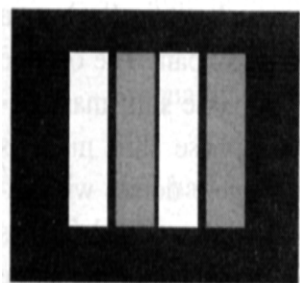
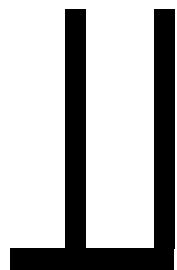
Некоторое улучшение разрешения возможно за счет оптимизации свойств материала фоторезиста, т.е. параметров k_1 и k_2 .

Также улучшение разрешения достигается за счет использования шаблонов, обеспечивающих амплитудную и фазовую коррекцию изображения.

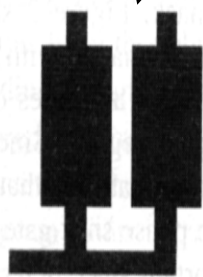
Одним из методов, позволяющих достичь существенного улучшения разрешения, является совместное использование 2-х и более шаблонов, изготовленных для работы на разных физических принципах.

Схема использования двух шаблонов для создания изображений с высоким разрешением.

Исходное изображение формируемой структуры



Шаблон с фазовым сдвигом

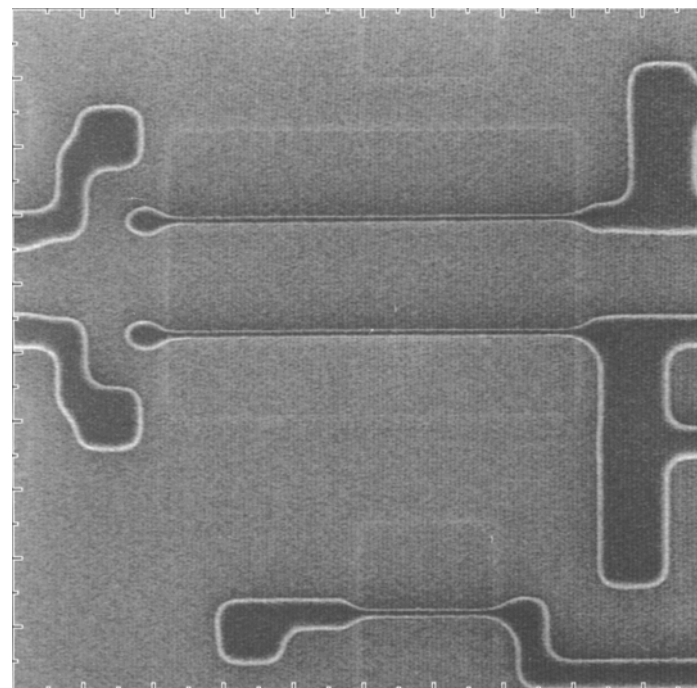


Обычный фото-шаблон (амплитудный)



Результирующее изображение

РЭМ изображение структур, сформированных с помощью фотолитографии на основе 248 нм УФ излучения и имеющих минимальные поперечные размеры элементов 140 нм.



Экстремальная УФ литография (ЭУФЛ)

Коротковолновое излучение позволяет существенно улучшить разрешение даже при использовании оптических элементов с маленькой апертурой:

$$\lambda = 14 \text{ нм}; NA = 0,1 \Rightarrow R = 100$$

Одновременно увеличивается глубина фокуса

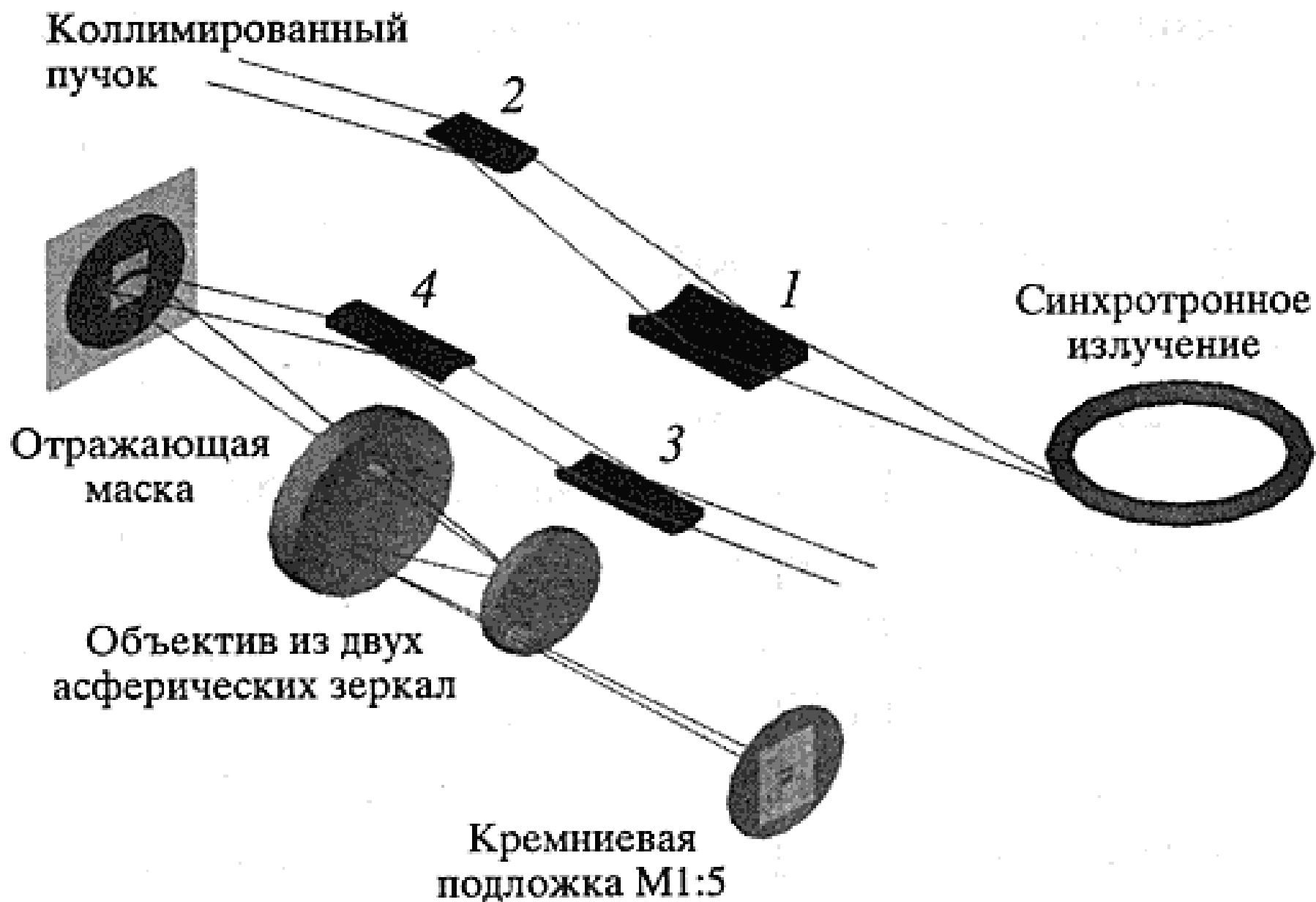
$$DOF = 1 \text{ мкм (для } k_1 = 0,7)$$

Однако: оптические элементы должны быть изготовлены из подходящих материалов; например, чередующиеся слои кремния и молибдена с периодом 6,5 нм.

Прогноз развития технологии фотолитографии

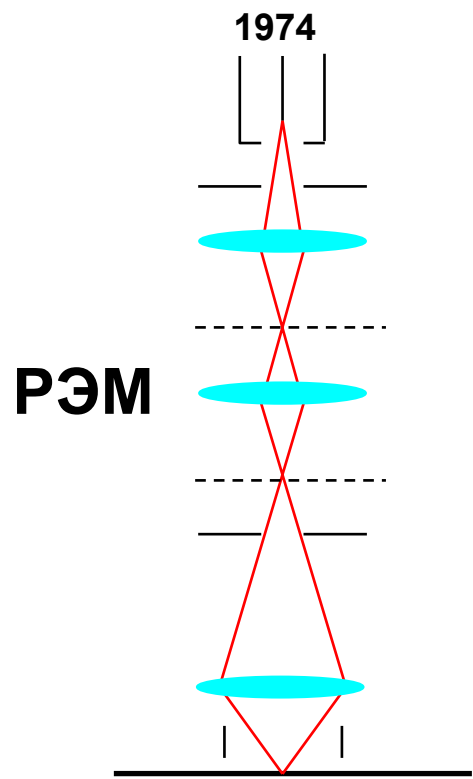
Годы	Источник излучения	Длина волны	Размеры элементов	Емкость памяти, Гбит
2001-2002	Лазер KrF	248	180-130	1
	Лазер ArF	193		
2004	Лазер ArF; ЭУФЛ (плазма, синхротрон)	193	130-100	4
2007	Лазер F ₂	13	100	16
	ЭУФЛ	157		
2010	ЭУФЛ	13	70	64
2013	ЭУФЛ	13	30-40	256
2015-2020	ЭУФЛ	13	10	

ЭУФ литограф на основе синхротрона

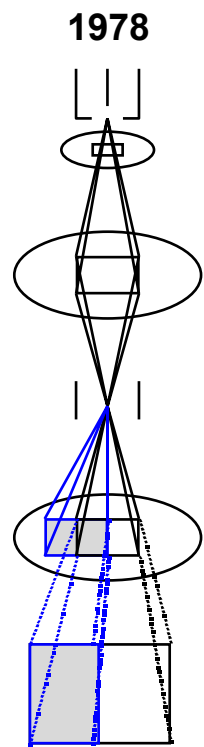


Электронно-лучевая литография (прямое рисование – direct writing)

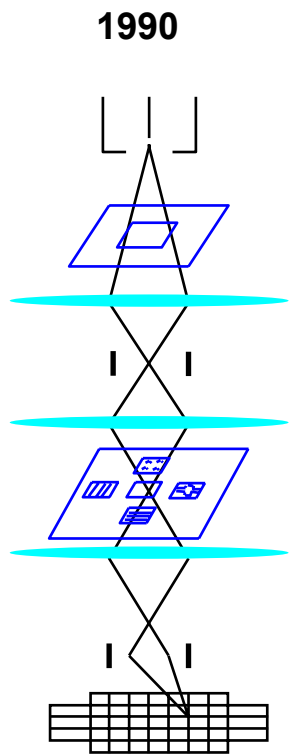
Ограниченный размер области, в которой отсутствуют aberrации и др. искажения ведет к необходимости совместного использования смещения пучка и мех. смещения подложки



Гауссова форма пучка



Прямоугольный пучок



Сегментное облучение

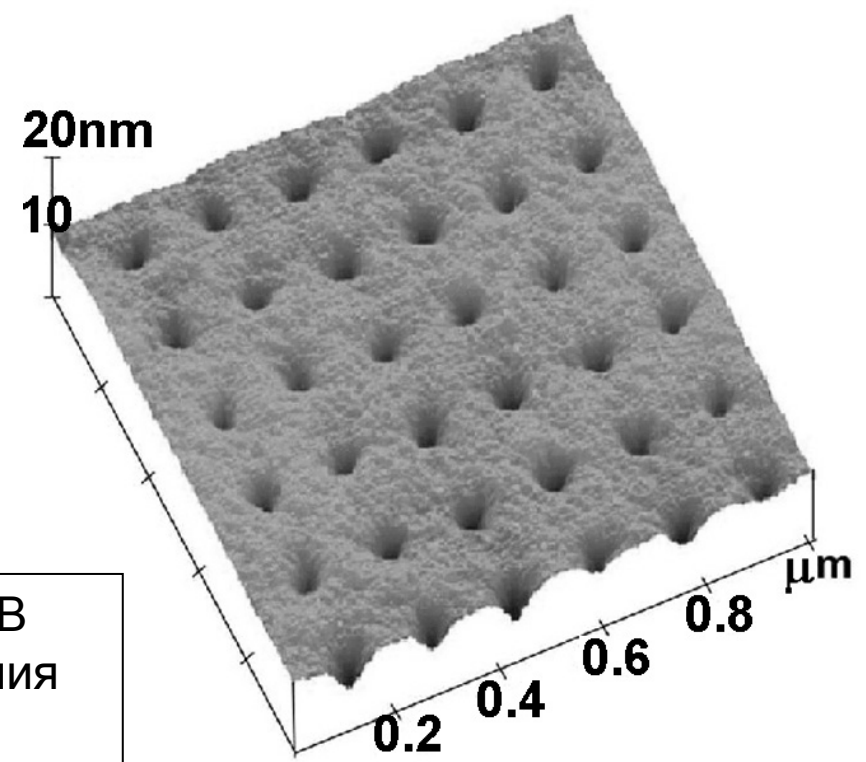
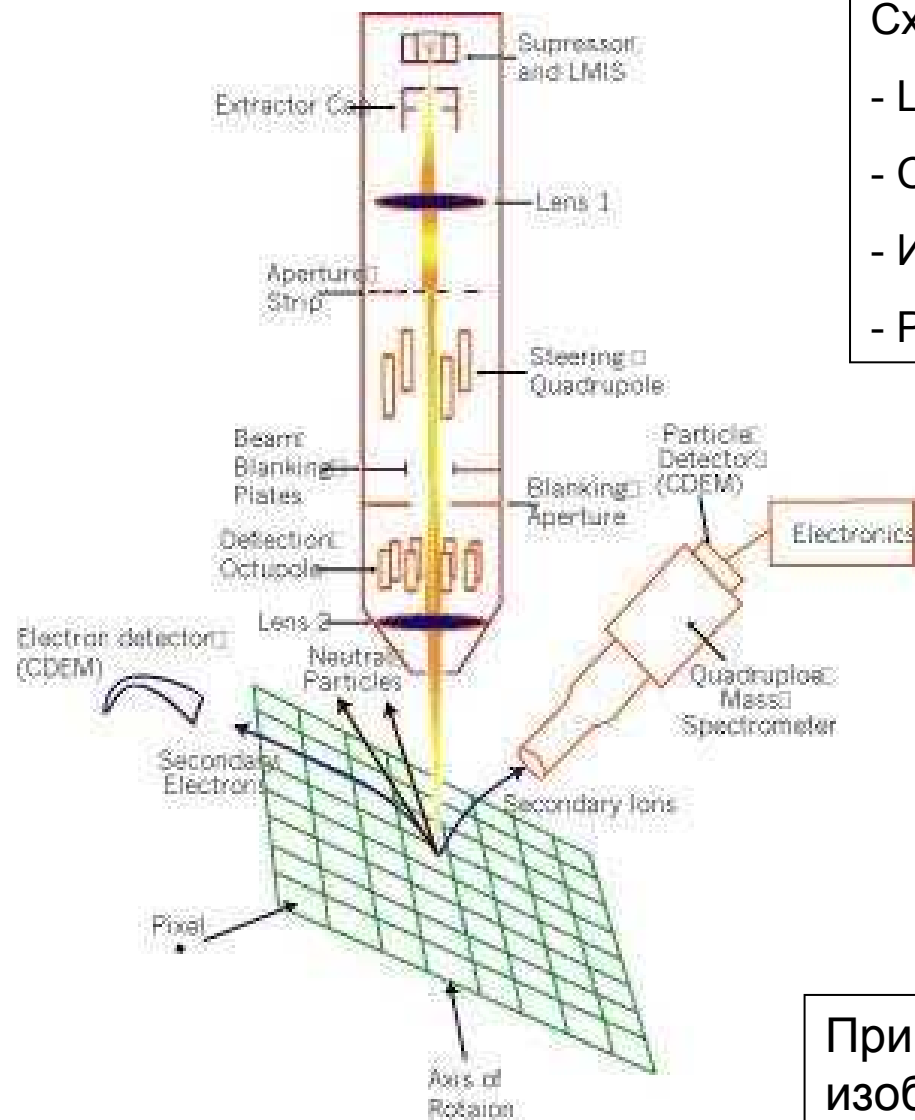
Увеличение производительности



Литография с помощью сфокусированного пучка ионов (FIB)

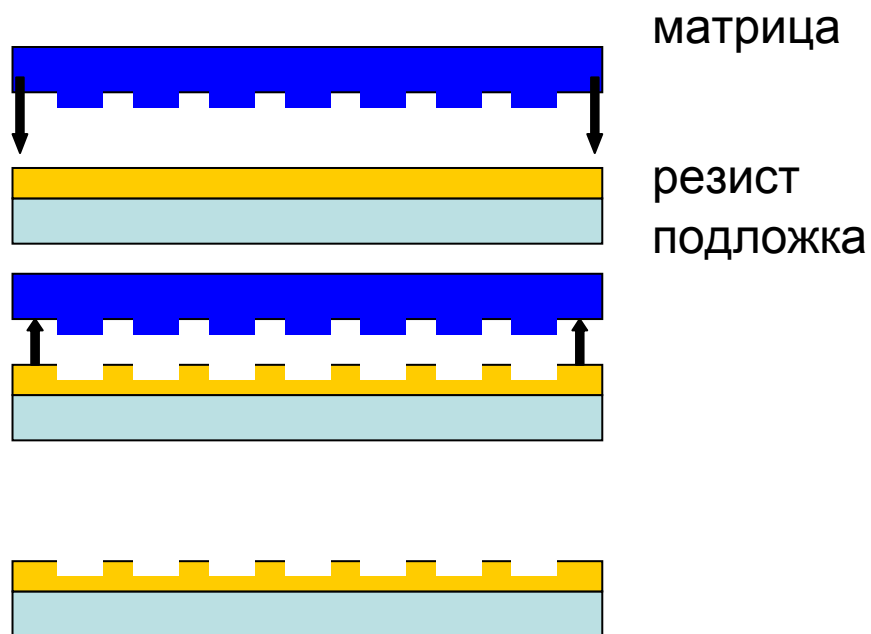
Схема FIB установки:

- LMIS – источник жидкого металла (Ga)
- Скорость ионов 10^6 м/с
- Ионный ток 10 А/см²
- Размер пучка 5-10 нм



Пример FIB изображения на PMMA

Технология нанопечати



(1) Матрица изготавливается например с помощью электронной литографии

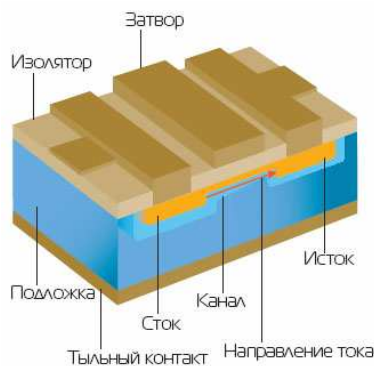
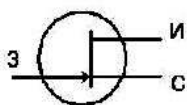
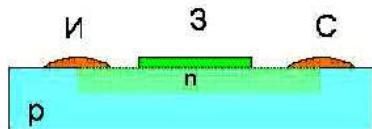
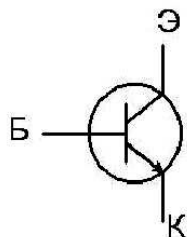
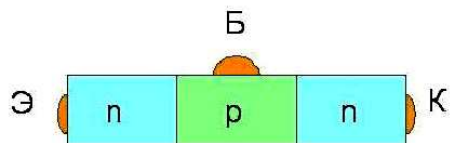
(2) Слой полимера деформируется с помощью матрицы

(3) Затвердевание полимера происходит при охлаждении ниже температуры стеклования или под действием УФ

(4) С помощью анизотропного травления деформированная часть полимера удаляется

Разрешение – до 10 нм!

Транзистор – основное устройство электронной техники



Биполярный транзистор n-p-n состоит из трех разнотипно легированных полупроводников и металлических контактов к ним (n — область полупроводника n-типа, p — область полупроводника p-типа, Б - база, Э - эмиттер, К – коллектор).

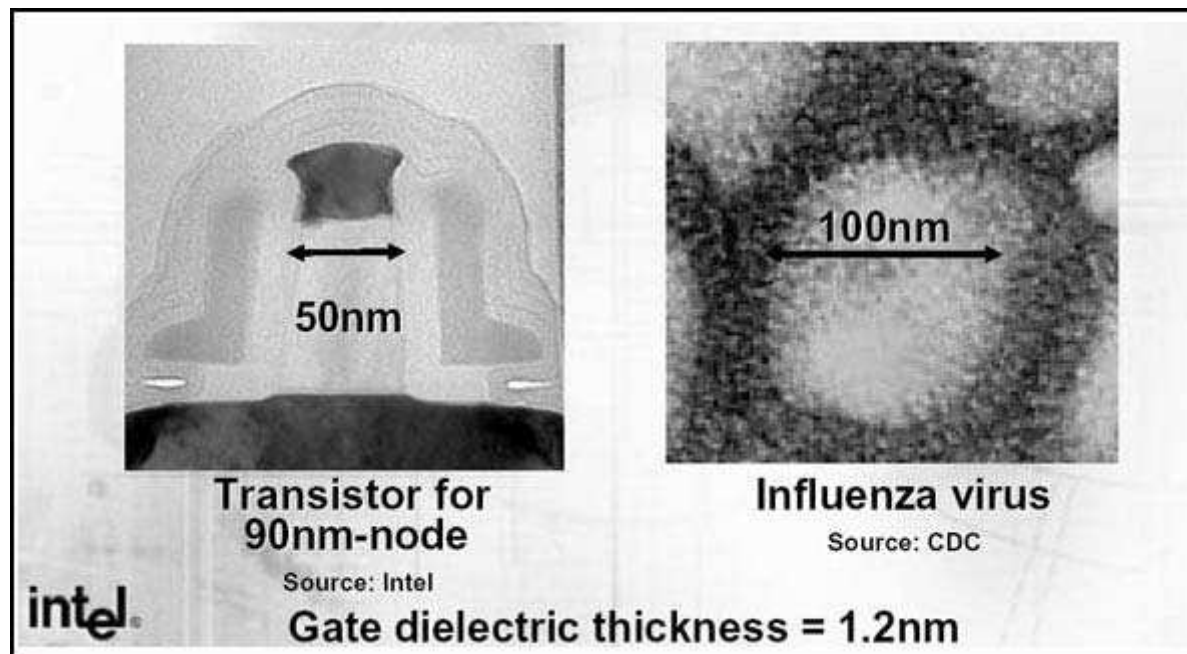
Принцип действия: ток Эмиттер-Коллектор зависит от тока Коллектор-База. Увеличение тока Базы приводит к росту тока Э-К.

Полевой транзистор с каналом n-типа состоит из двух разнотипно легированных полупроводников и металлических контактов к ним (n — канал n-типа, p — область полупроводника p-типа, И - исток, С - сток, З – затвор).

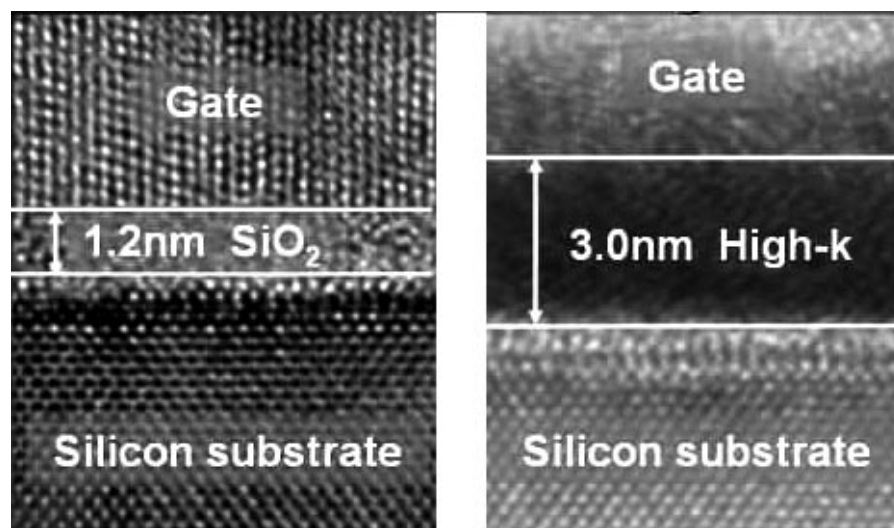
Принцип действия: подача разности потенциалов между Затвором и Стоком приводит к изменению размера области пространственного заряда перехода Затвор-канал. При этом изменяется сечение проводящего канала для носителей заряда, соответственно, изменяется проводимость канала.

Полевой транзистор с изолированным затвором выполнен в виде структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП).

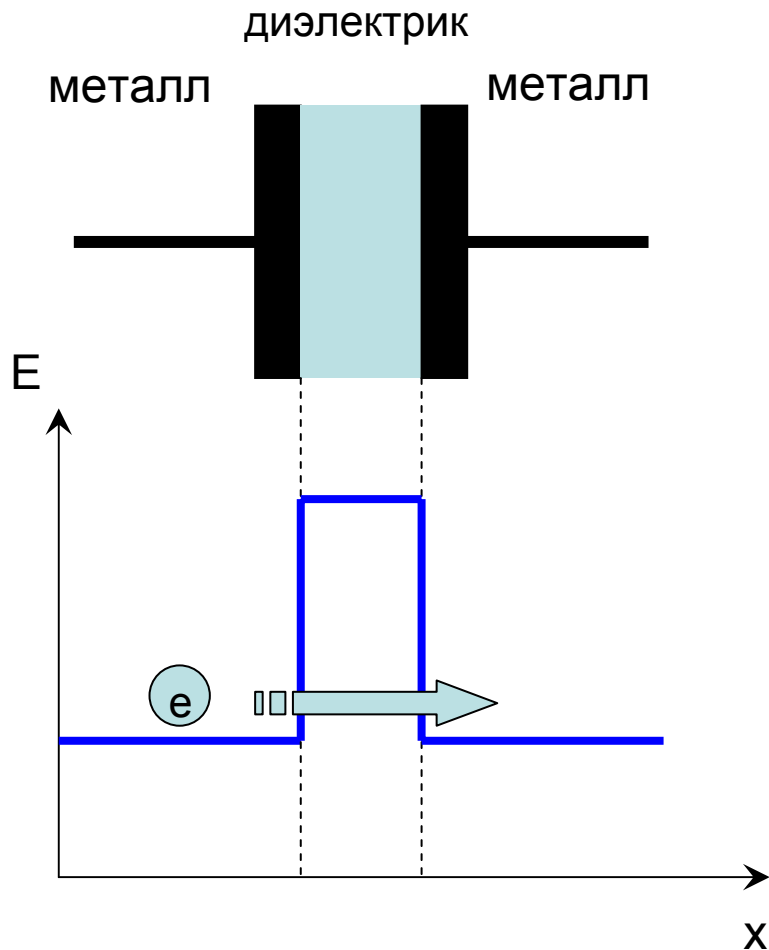
Эффективность работы увеличивается с уменьшением толщины диэлектрического слоя.



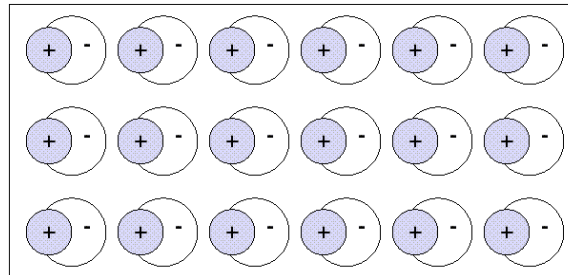
Электронно-микроскопические изображения поперечного сечения полевого транзистора (слева), выполненного по 90 нм технологии (2004 г.), и вируса гриппа (справа).



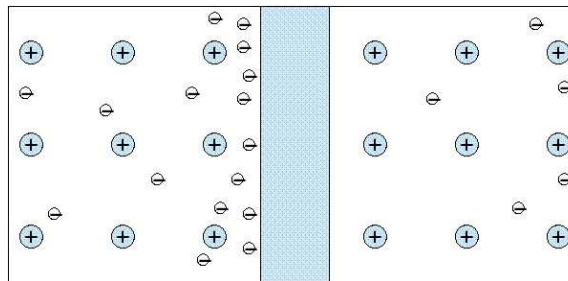
Электронно-микроскопические изображения на границе раздела затвор-диэлектрик-полупроводник.



Под действием внешнего электрического поля (приложенного напряжения) электрон может туннелировать через тонкий слой диэлектрика.



В проводнике смещение заряда под действием внешнего поля непрерывно.



Туннелирование электронов происходит дискретно при постоянном приложенном напряжении.

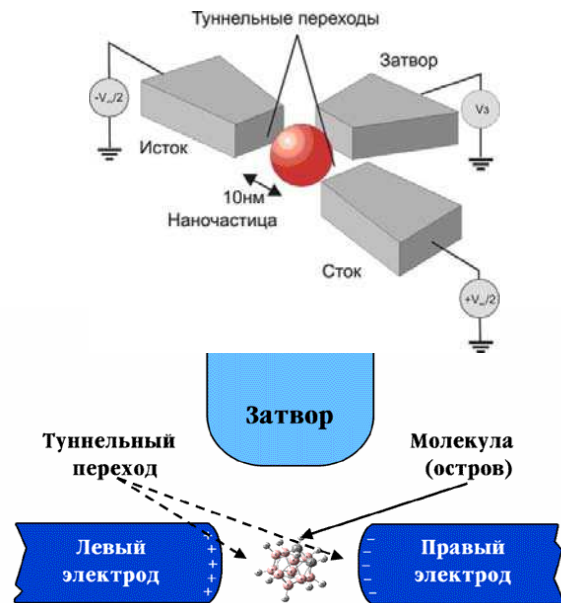


Энергия конденсатора – $E=Q^2/2C$

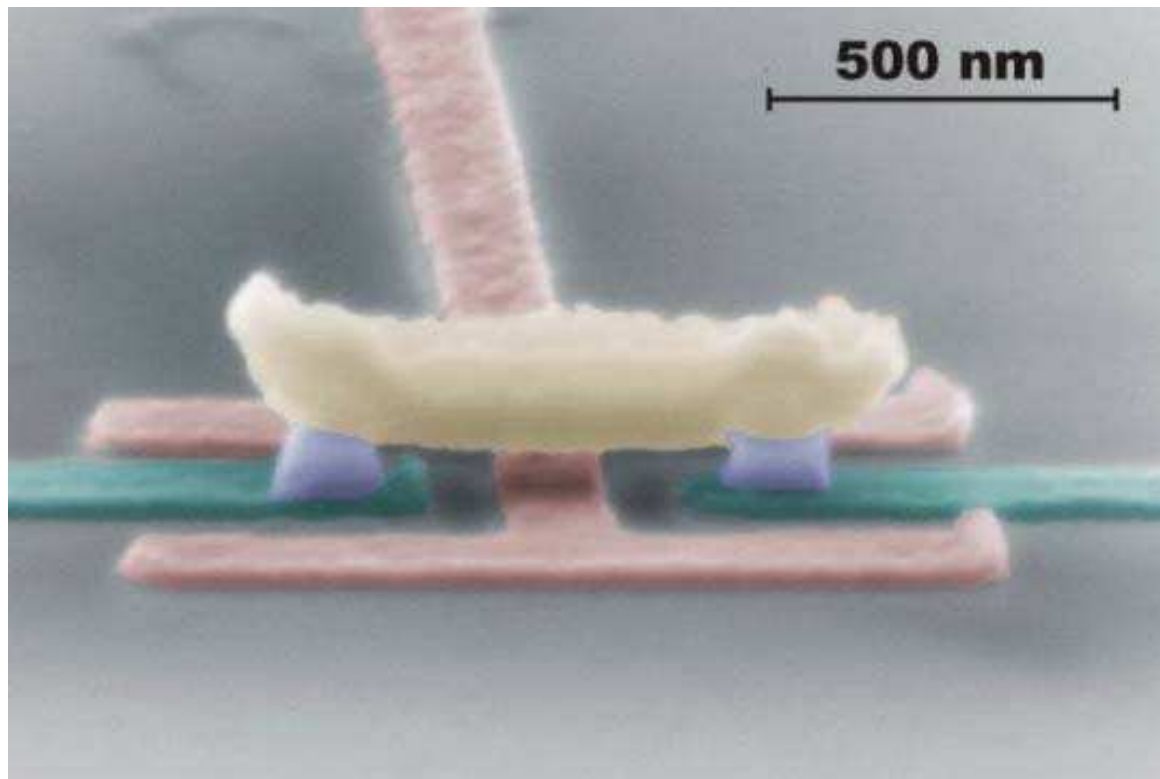
Минимальное изменение - $\Delta E=e^2/2C$

Для регистрации осцилляций заряда (тока) необходимо, чтобы $\Delta E \gg kT$ или $C \ll e^2/2kT \approx 2 \times 10^{-16} \text{Ф}$ ($T=4,2\text{K}$); $\approx 10^{-17} \text{Ф}$ ($T=77\text{K}$); $\approx 3 \times 10^{-18} \text{Ф}$ ($T=300\text{K}$).

$C \sim S/d$ - Достижение требуемых значений емкости возможно при размерах $\sim 1\text{нм}$ при $T=300\text{K}$.



[Лаборатория Криоэлектроники, 2008г (с)]



Одноэлектронный транзистор состоит из квантовой точки (в виде молекулы или кластера проводящего материала) и трех электродов, имеющих нанометровые размеры.

Принцип действия: уменьшение потенциала управляющего электрода (затвора) приводит к появлению проводимости между двумя другими электродами.

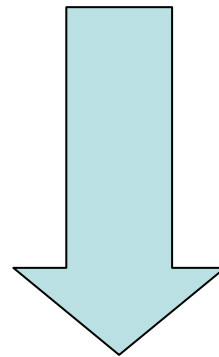
Одноэлектронный транзистор, изготовленный с использованием литографической техники.

Для наглядности различные функциональные элементы окрашены разными цветами.

Электромеханические системы – преобразование энергии электрического тока в механическое движение

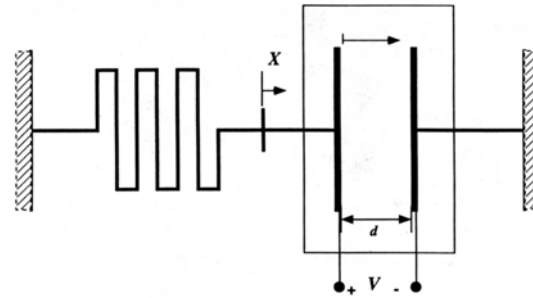
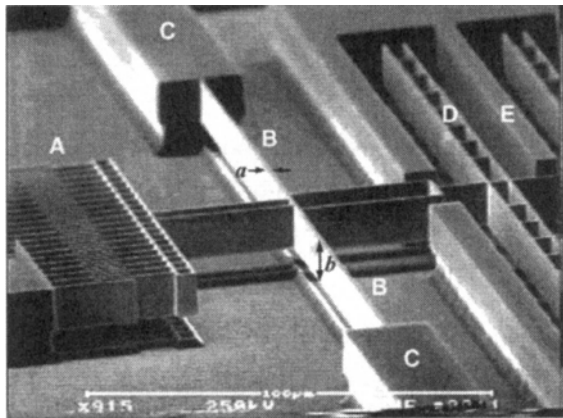
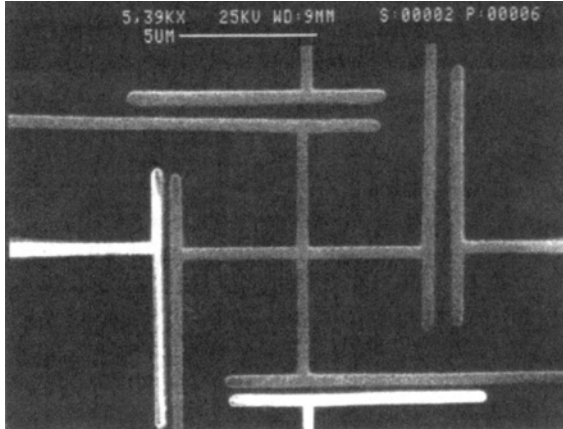


Макро и Мега



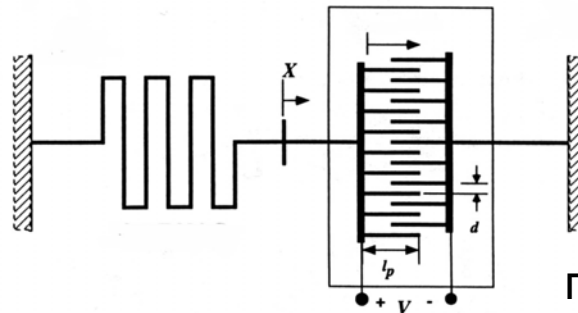
Микро и Нано

Емкостные системы линейного сдвига (МЭМС – микроэлектромеханические системы)



Изображение и схема элементов МЭМС, работающих на емкостном принципе.

Сила притяжения между параллельными пластинами конденсатора:

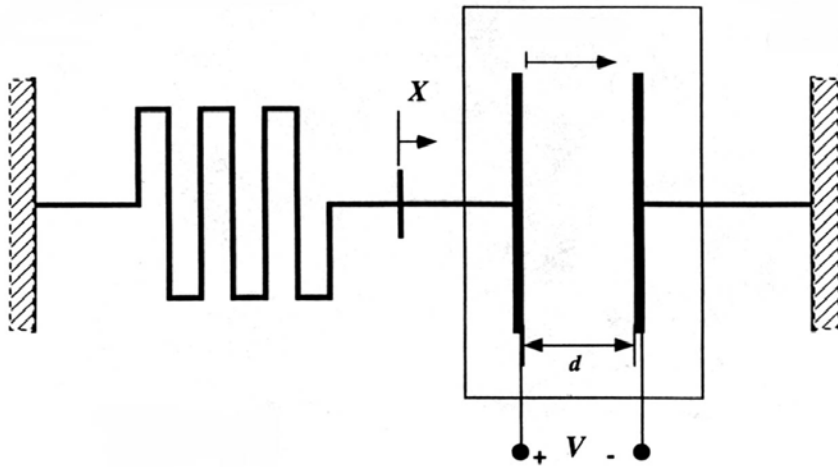


$$F_p(x) = -\frac{\partial U}{\partial x}$$

где U – энергия, запасенная в конденсаторе.

$$U = \int_V u dv, \text{ где } u \text{ – плотность энергии: } u = \frac{1}{2} \epsilon_r \epsilon_0 E^2, \text{ где } \epsilon_0 \text{ – диэлектрическая}$$

проницаемость вакуума, ϵ_r – диэлектрическая проницаемость среды и E – эл. поле.



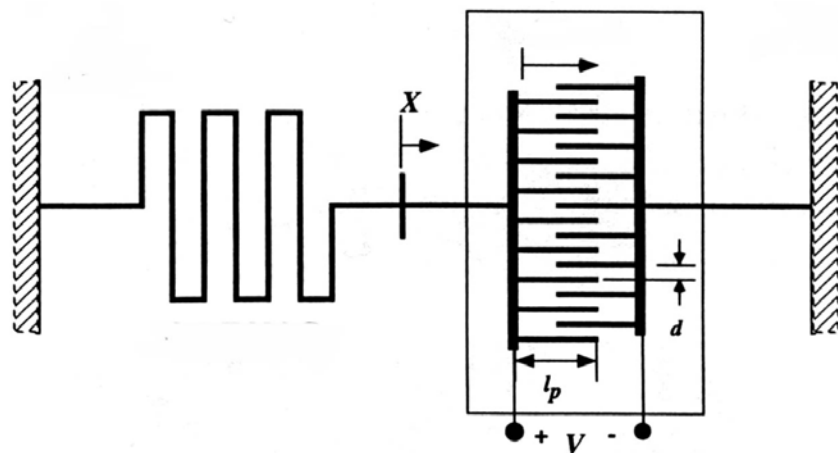
Площадь пластин – A_p , тогда $dv = A_p dx$.

$A_p = bl_p$; $E = V/(d - x)$; x – смещение; $\epsilon_r = 1$

$$F_p(x) = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left[\frac{V^2}{(d - x)^2} \right] bl_p$$

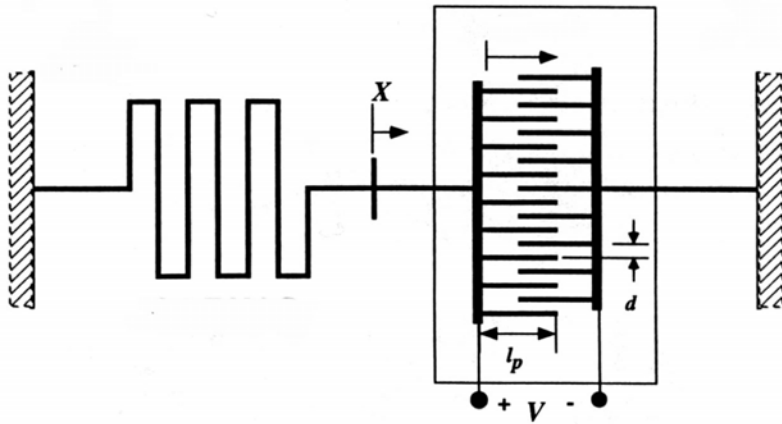
Усилие на единицу площади:

$$\sigma_p(x) = \frac{F_p(x)}{bl_p} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left[\frac{V^2}{(d - x)^2} \right]$$



$A_s = L_s^2$ – общая площадь, занятая конденсаторами площадью $A_p = bl_p$.

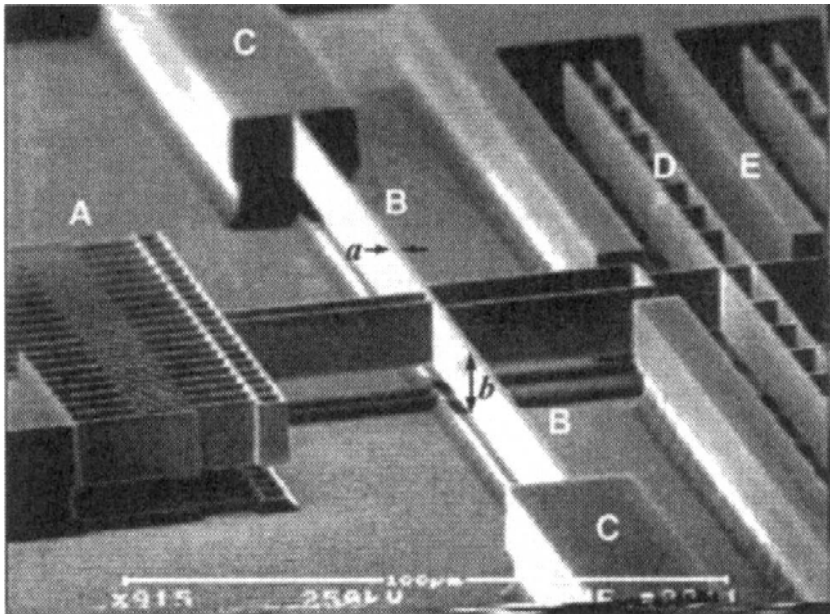
Количество конденсаторов на этой площади: $N = L_s^2 / [(l_p + 2a)(a + 2d)]$, где a – ширина пластины, $2a$ – расстояние между пластинами на обкладке, $a + 2d$ – зазор между пластинами обкладок.



$$F_{Total}(x) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \left[\frac{V^2}{(d-x)^2} \right] \times \left[\frac{L_S^2 (bl_p)}{(l_p + 2a)(a + 2d)} \right]$$

Для $l_p \gg (2a)$ и $d=a$:

$$F_{Total}(x) = \frac{1}{6} \varepsilon_0 \left[\frac{V^2}{(1-x/a)^2} \right] \times \left[\frac{L_S^2 b}{a^3} \right]$$



$F_{Total}(x) \sim ba^{-3}$: a – определяется используемой технологией литографии; b – технологией травления.

Для достижения больших сил при сохранении достаточной жесткости необходимо обеспечить высокое соотношение размеров b/a (аспектное отношение).

Увеличение силы возможно за счет использования покрытий с $\varepsilon_r \gg 1$ (например Si_3N_4 – нитрид кремния)

Емкостные системы поворота

Вращение происходит за счет сил емкостного происхождения $F_p(z)$.

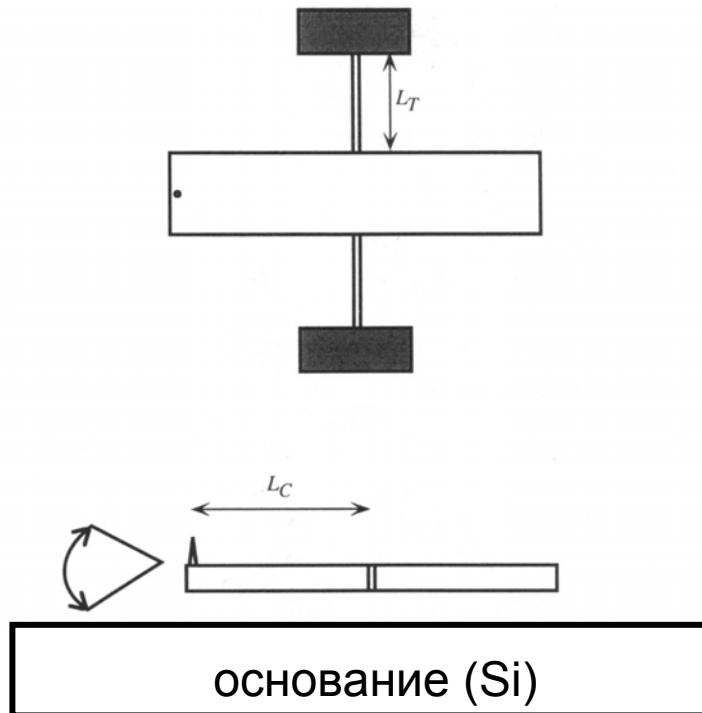
Угол поворота – ϕ (рад) $\sim [F_p(z)/k_\phi]L_C$,

а смещение - $z = \phi L_C \sim [F_p(z)/k_\phi]L_C^2$.

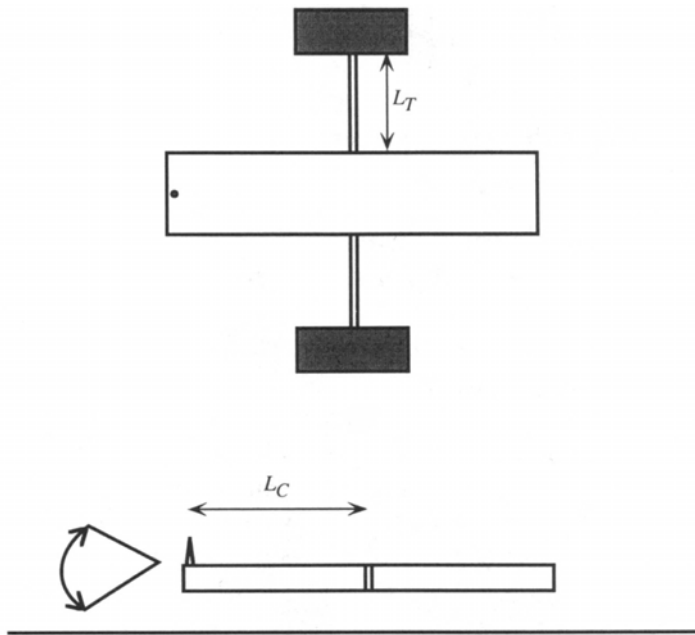
Коэффициент деформации для изгибов (Н/рад):

$$K_\phi = \beta G [(a^3 b) / L_T],$$

где G – модуль сдвиговой жесткости (модуль Юнга) (~ 80 ГПа для монокристаллического кремния); b – высота; a – ширина балки; L_T – длина поворотной оси; β – константа, зависящая от отношения b/a (для $b/a > 10$ $\beta = 1/3$).



Емкостные системы поворота



$$z = \phi L_C \sim [F_p(z) / k\phi] L_C^2$$

$$L_T = 58 \text{ мкм}$$

$$a = 1 \text{ мкм}$$

$$b = 6 \text{ мкм}$$

$$L_C = 50 \text{ мкм}$$

$$I_p = 20 \text{ мкм}$$

$$d = 2 \text{ мкм}$$

$$\beta = 1/3$$

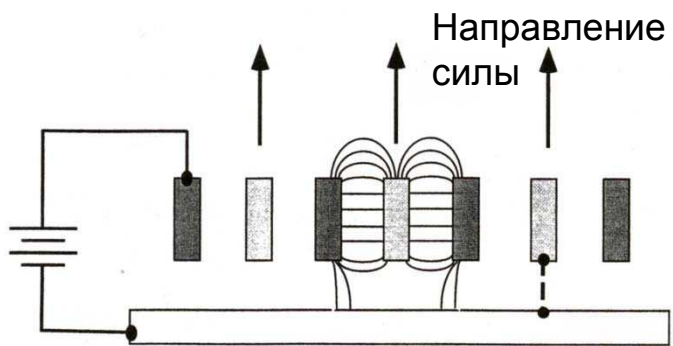
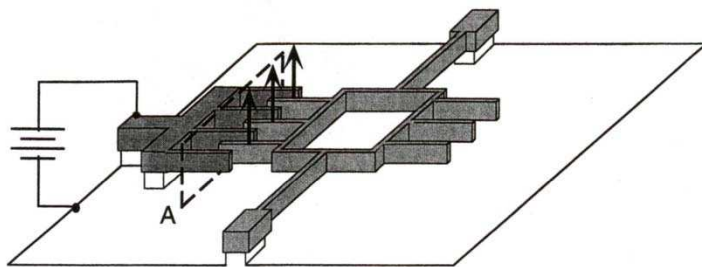
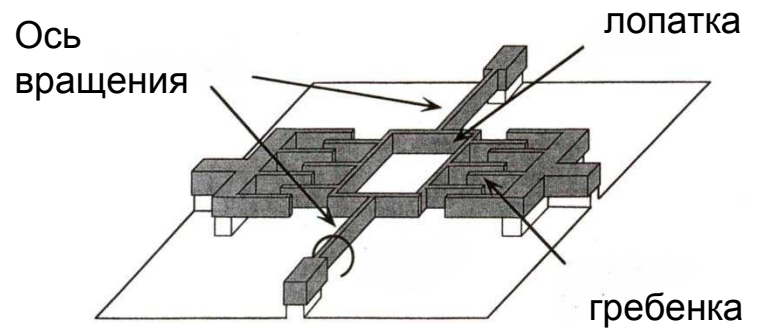
$$K_\phi = 5.5 \times 10^{-9} \text{ Н/рад}$$

$$z = [V^2/33] \text{ нм/В}^2$$

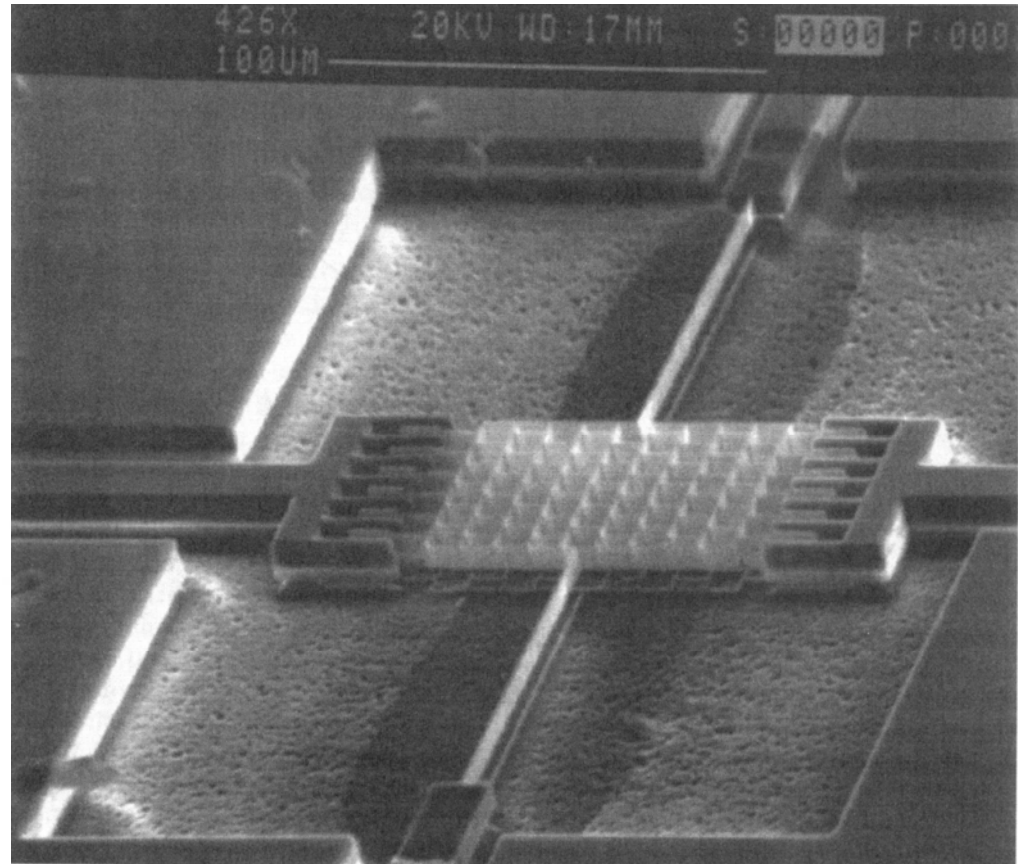
$$\text{Для } V = 40 \text{ В и } L_s^2 = 100 \times 100 \text{ мкм}$$

$$z = 48 \text{ нм}$$

Емкостные системы поворота

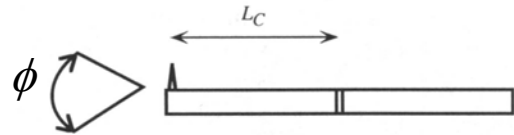
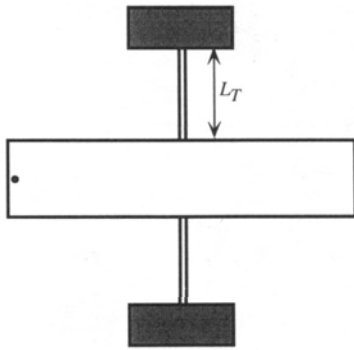


Изображение в сечении А-А



РЭМ изображение и схема системы поворота.

$$F_p(x) = -\frac{\partial U}{\partial x}$$



$$U = \int_v u dv \quad u = \frac{1}{2} \varepsilon_r \varepsilon_0 E^2$$

$$\partial v \approx \partial [2d(l_p b - (b^2 \phi / 4) - l_p^2 \phi)]$$

$$U = \int_v \left(\frac{\varepsilon_0 V^2}{2d^2} \right) \partial [2d(l_p b - (b^2 \phi / 4) - l_p^2 \phi)]$$

Момент сил вращения T :

$$T = -\frac{\partial U}{\partial \phi} \approx \frac{1}{2} \varepsilon_0 \left(\frac{V^2}{a} \right) [(b^2 / 4) + l_p^2] N_p$$

Количество модулей в области L_S^2

$$N_p = \left(\frac{L_S^2}{(l_p + 2a)(2a + 2d)} \right)$$

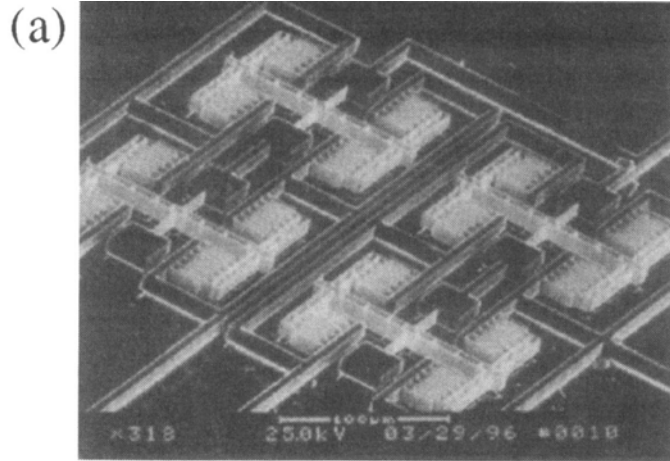
$$T = -\frac{\partial U}{\partial \phi} \approx \frac{1}{2} \varepsilon_0 \left(\frac{V^2}{a} \right) \left[(b^2 / 4) + l_p^2 \right] N_p = K_\phi \phi = \left\{ \beta G \frac{a^3 b}{L_T} \right\} \phi$$

$$\phi(\text{rad}) = \left(\frac{\varepsilon_0 V^2}{8 \beta G} \right) \left(\frac{l_p^* L_S^2 L_r}{a^5 b} \right)$$

$$d = a; l_p \gg a; l_p^* = l_p \left[1 + (b / 2l_p)^2 \right]; \phi \ll 1$$

$$\phi \propto a^{-5}$$

Уменьшение размеров элементов позволяет увеличить угол поворота при одновременном уменьшении габаритов устройства.



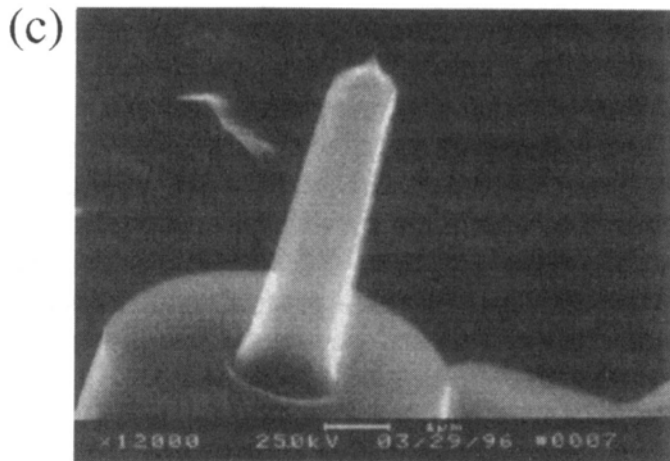
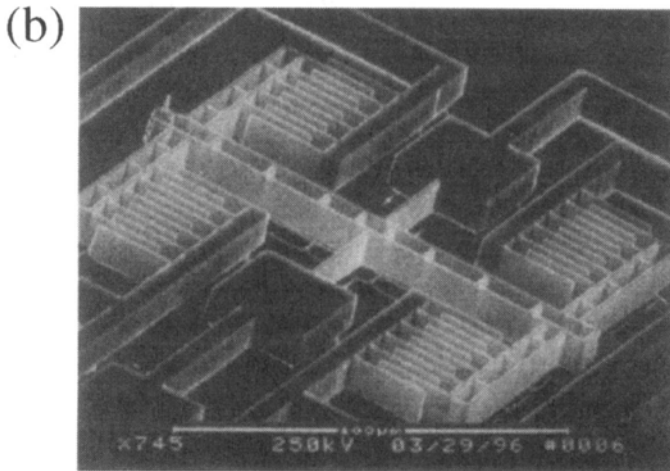
Изображение системы из 4-х зондов на вращающихся подвесках.

$L_T=20$ мкм; $L_C=l_p=23$ мкм; $L_S=50$ мкм; $a=1$ мкм; $b=46$ мкм; $\beta = 1/3$; $K_\phi = 1,2 \times 10^{-7}$ Н/рад; $z/L_C \ll 1$; $\phi \ll 1$:

$$z \approx \pm \phi L_C = \pm \left(\frac{\epsilon_0 V^2}{8 \beta G} \right) \left(\frac{l_p^* L_S^2 L_T L_C}{a^5 b} \right) = \left(\frac{V^2}{35} \right)$$

$$[z] = [\text{нм}/\text{В}^2]$$

Предположим, что $l_p^* = l_p$; $L_C = L_T = l_p$; $L_S = 2l_p$; $z/L_C \ll 1$, тогда:



$$z \approx \pm \phi L_C = \pm \left(\frac{\epsilon_0 V^2}{32 \beta G} \right) \left(\frac{L_S^4 L_C}{a^5 b} \right) = (10^{-14} \text{В}^2) \left(\frac{L_S^4 L_C}{a^5 b} \right)$$

$$z \propto \left(\frac{L_S^4 L_C}{a^5} \right)$$

Резонансные частоты

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k}{m} \right)^{1/2} \propto \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2} \left(\frac{b}{l^2} \right)$$

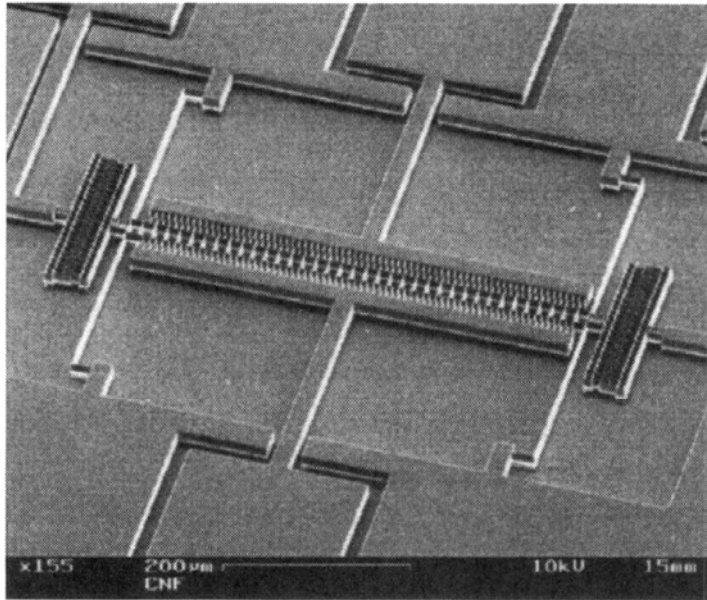
E – модуль упругости; ρ – плотность материала; b и l – высота и длина балки, соответственно

$$k_x = 200 \text{ Н/м}; x = l_p = 25 \text{ мкм}; F = kx = 5 \text{ мН}$$

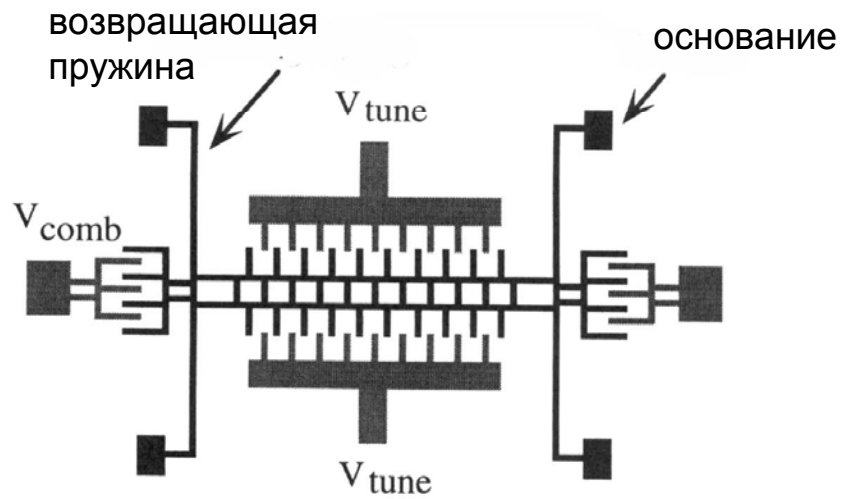
$$F_{Total}(x) = \frac{1}{6} \varepsilon_0 \left[\frac{V^2}{(1 - x/a)^2} \right] \times \left[\frac{L_s^2 b}{a^3} \right]$$

При $a = 1 \text{ мкм}$; $b = 50 \text{ мкм}$; $V = 40 \text{ В}$: для получения такой же силы в 5 мН требуется использовать систему размером $L_s^2 = 1,25 \times 10^{-6} \text{ м}^2$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k}{m} \right)^{1/2} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{200}{2300 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \cdot 1,25 \cdot 10^{-6}} \right)^{1/2} = 37 \text{ кГц}$$



Изображение и схема
микромеханического
устройства с перестраиваемой
резонансной частотой (V_{tune})



Нано-манипуляторы и микророботы

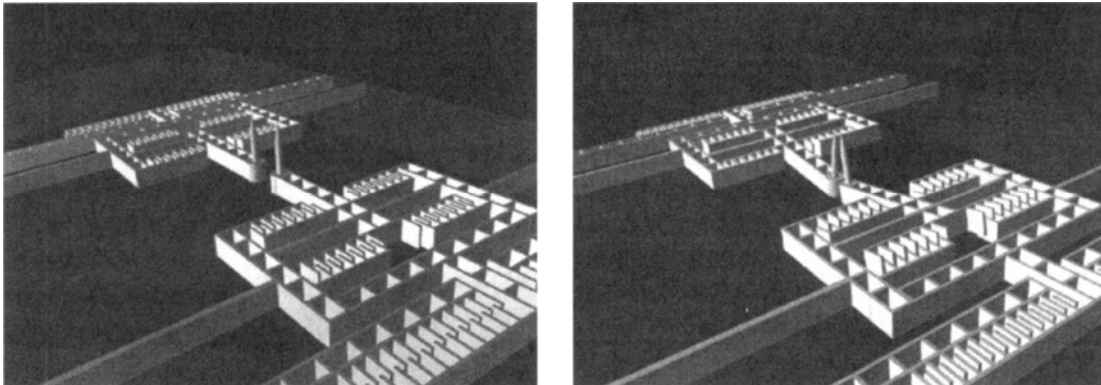
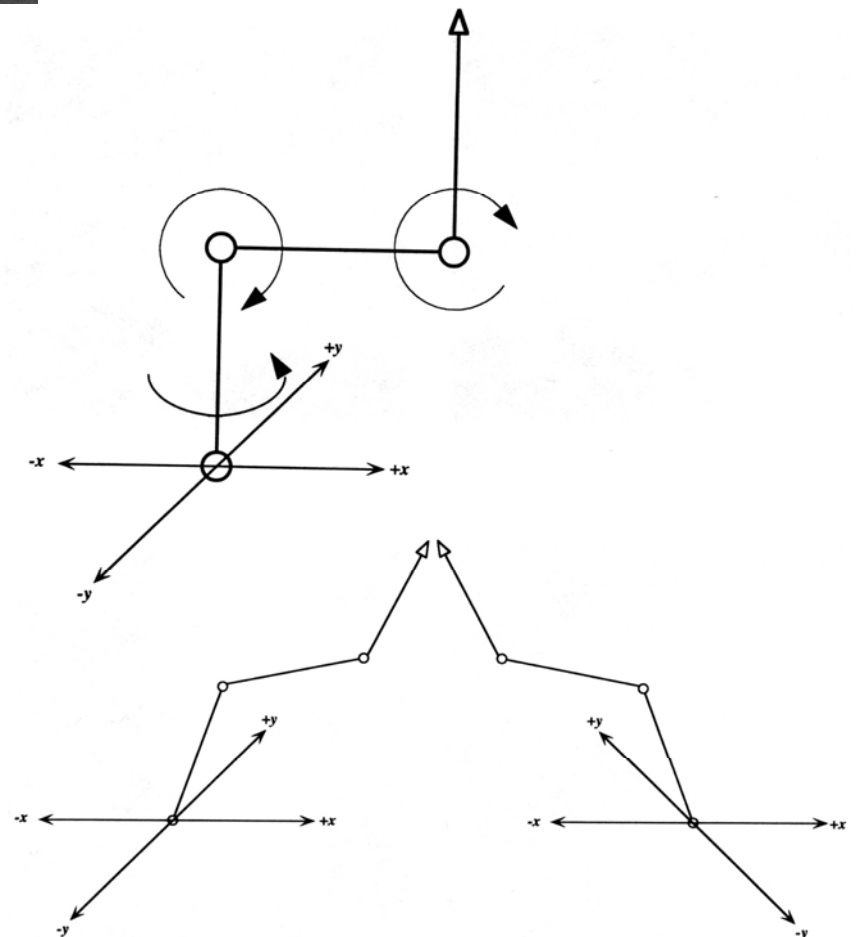
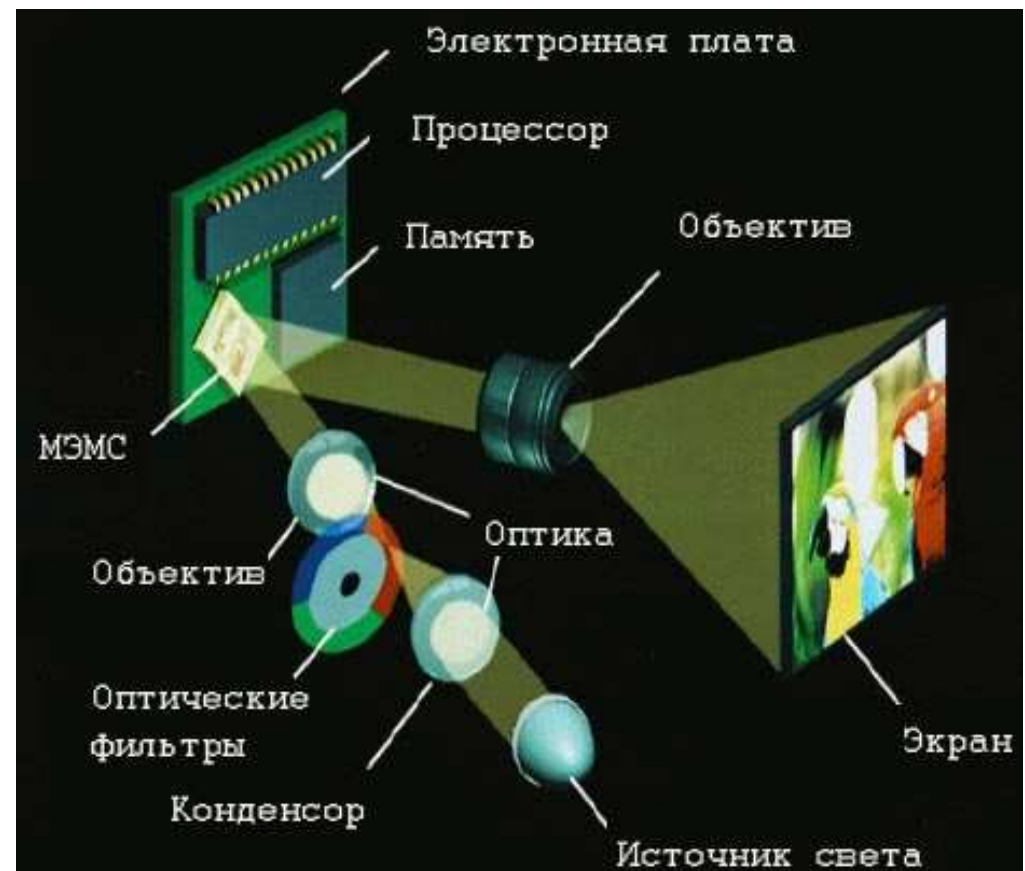
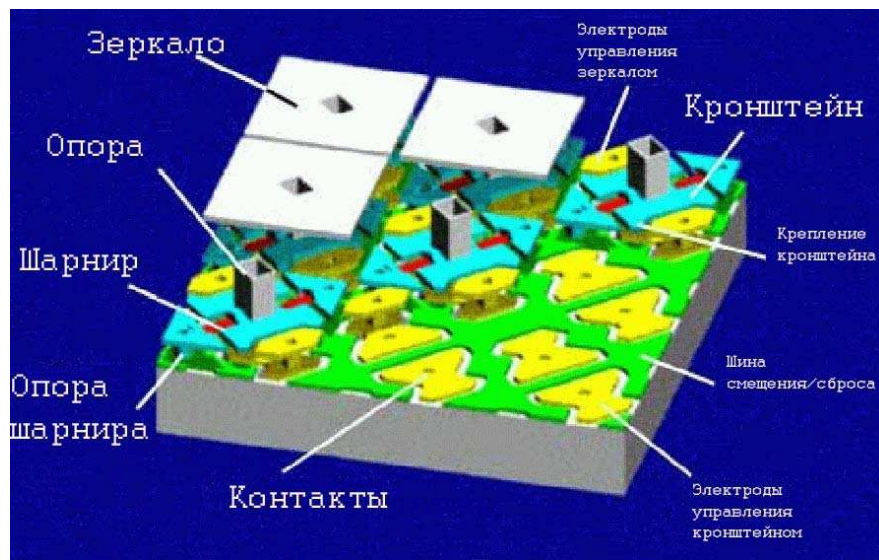
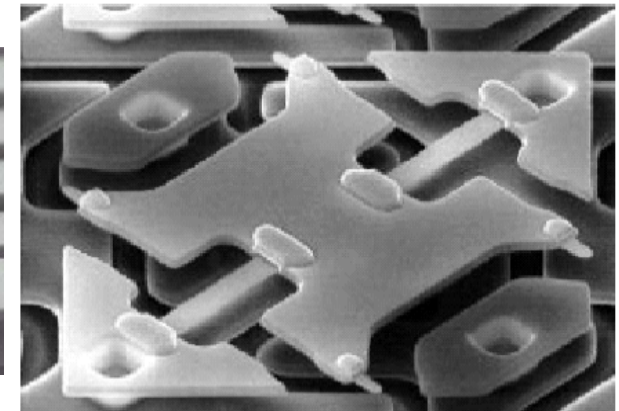
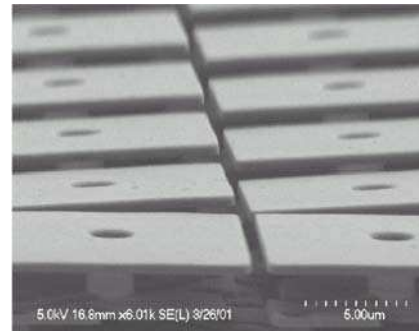
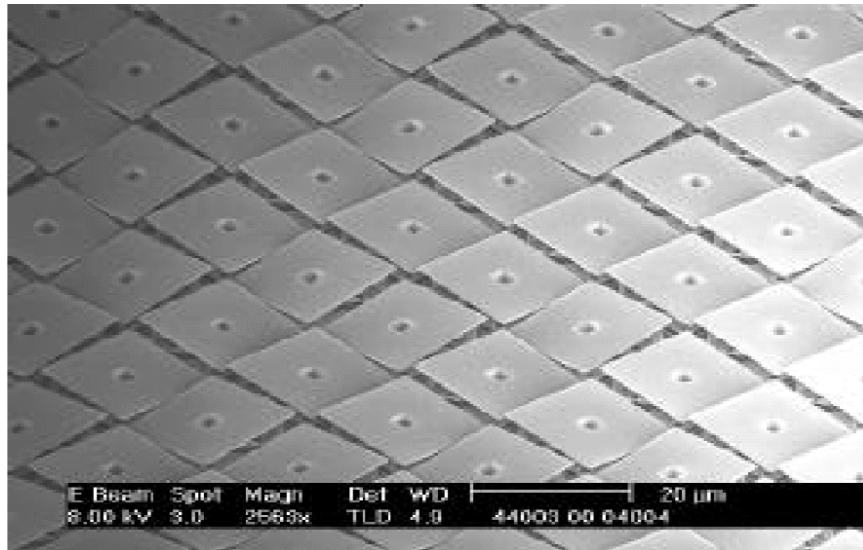


Схема манипулятора, состоящего из двух вращающихся элементов каждый: слева исходное положение – управляющее напряжение 0; справа – подано напряжение, изменяющее положение зондов.

Схематическое изображение манипулятора с указанием имеющих степеней свободы



Мультимедийные проекторы на основе МЭМС



Применения МЭМС

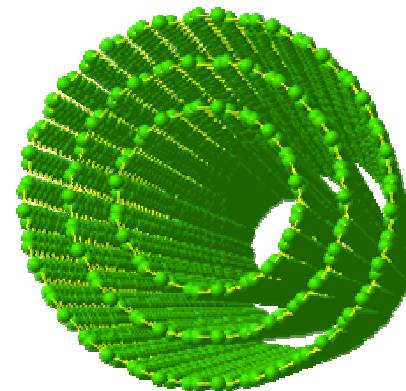
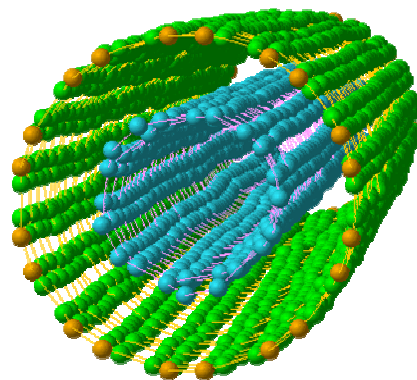
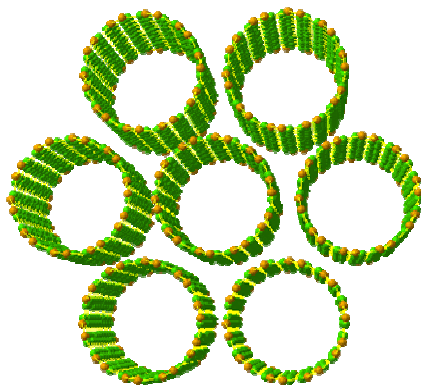
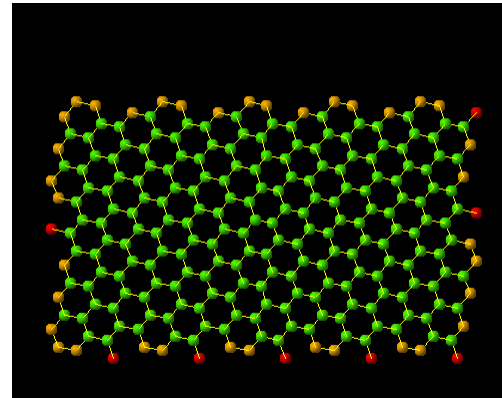
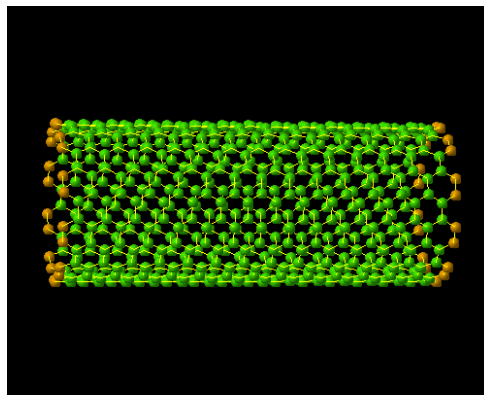
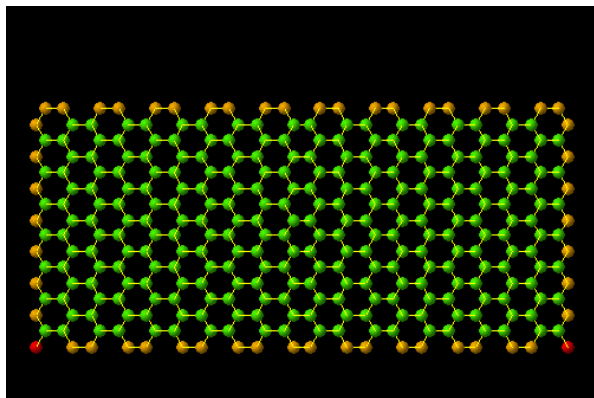
- Инерционные измерители: акселометры, гироскопы, измерители частоты вращения, датчики вибраций
- Измерители давления: датчики давления в шинах; измерители давления крови и др.
- Дисплеи: оптические элементы в проекторах
- Телекоммуникации: настраиваемые фильтры, переключатели, регуляторы фаз, пассивные элементы (емкости, индуктивности);
- Химические и биологические измерения: измерители микропотоков, манипуляции с ДНК, микронасосы, детекторы



В 1950 Р. Фейман объявил о премии в 1000\$ тому, кто первый сделает электромотор размером менее 1/64 дюйма (~0,5 мм). Такой мотор был сделан (и премия была выплачена) У. Макклиланом вручную с использованием пинцетов и оптического микроскопа.

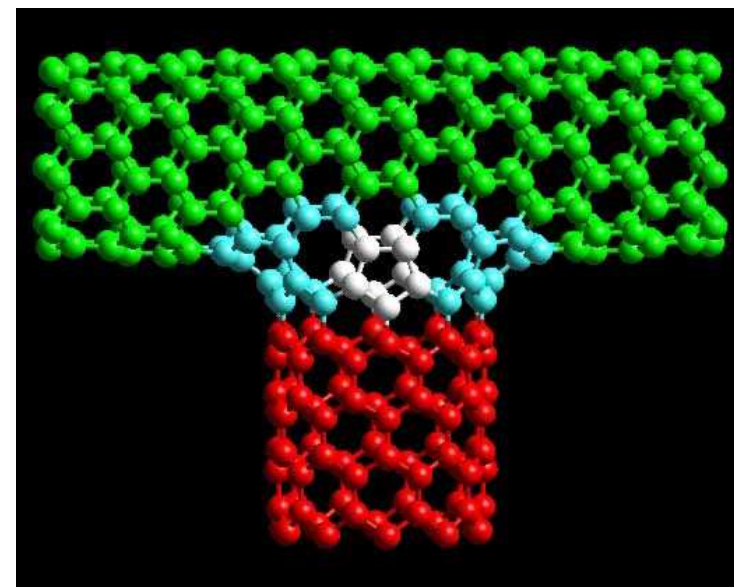
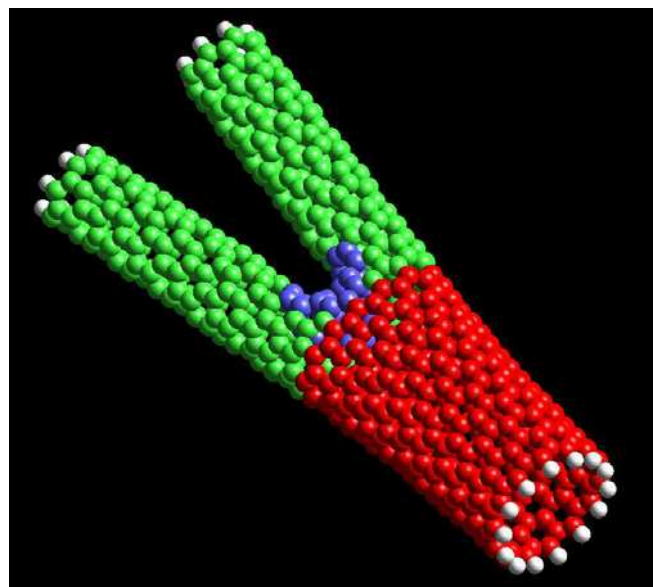
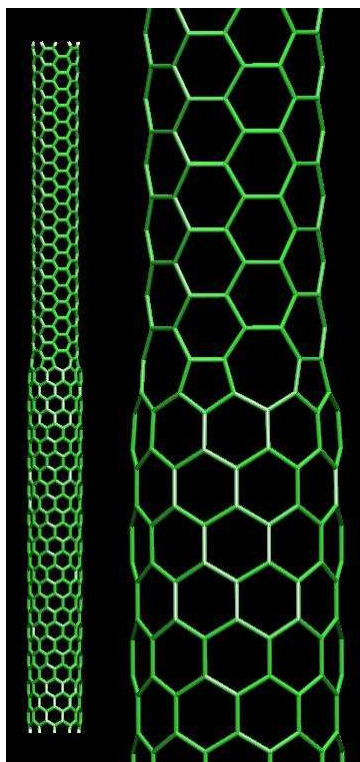
В 1980 была разработана технология массового производства электромоторов (МЭМС) размером 1/100 от мотора Макклилана.

Углеродные нанотрубки для наноустройств



<http://www.photon.t.u-tokyo.ac.jp/~maruyama/nanotube/nanotube.html>

Гетеропереходы в нанотрубках



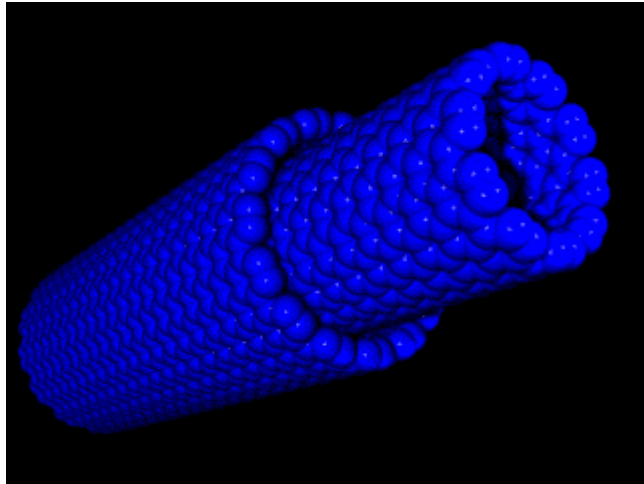
<http://www.csc.com>

Phys. Rev. Lett. 79, 4453 (1997).

<http://www.me.vt.edu/nrylander/home/home.html>

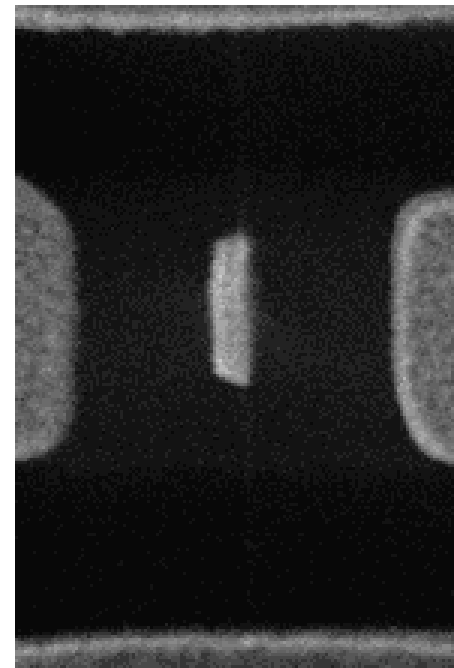
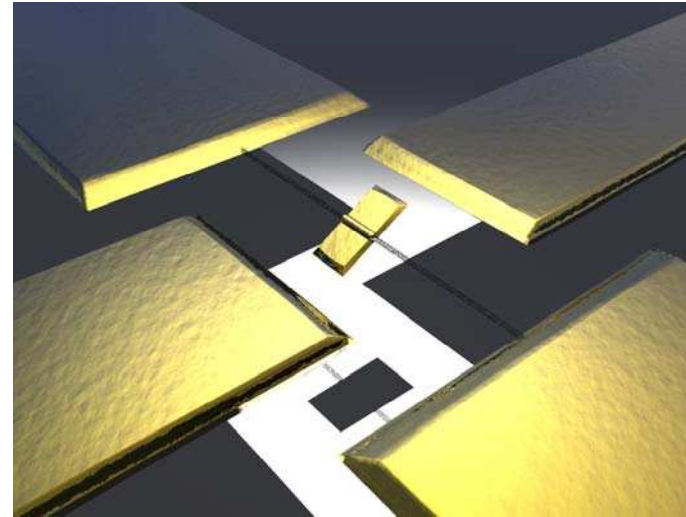
При контакте нанотрубок с различным типом проводимости возникают р-п переходы, на основе которых возможно построение диодных и триодных структур.

Электромеханические устройства на основе углеродных нанотрубок

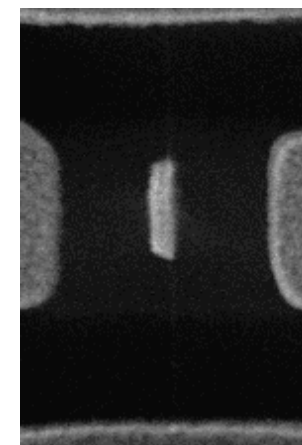
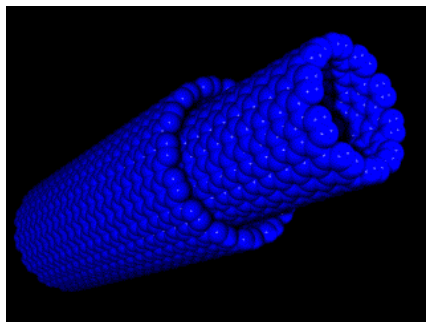


<http://www.physics.berkeley.edu/research/zettl/projects/NEMS.html>

Взаимодействие атомных слоев, составляющих углеродные нанотрубки, очень слабое. Это означает также, что трение при их взаимном движении тоже слабое. Это обстоятельство может быть использовано для создания механических устройств.



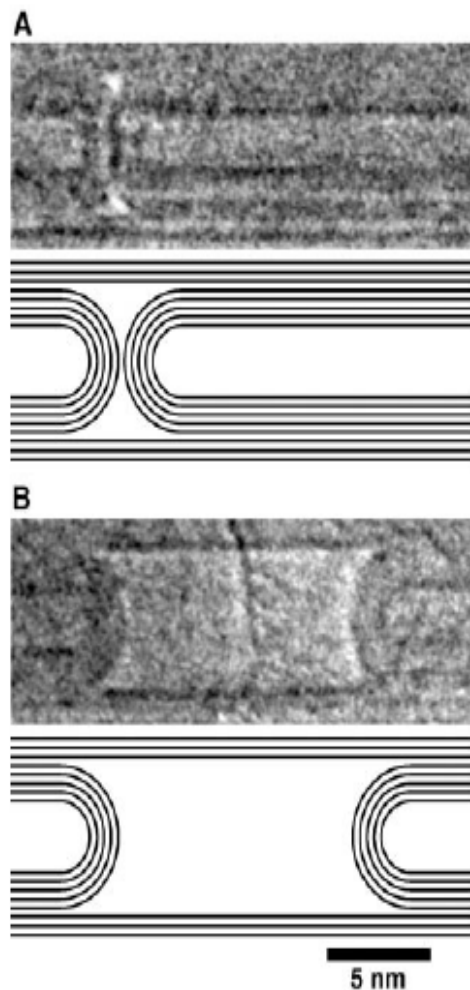
Электромеханические устройства на основе углеродных нанотрубок



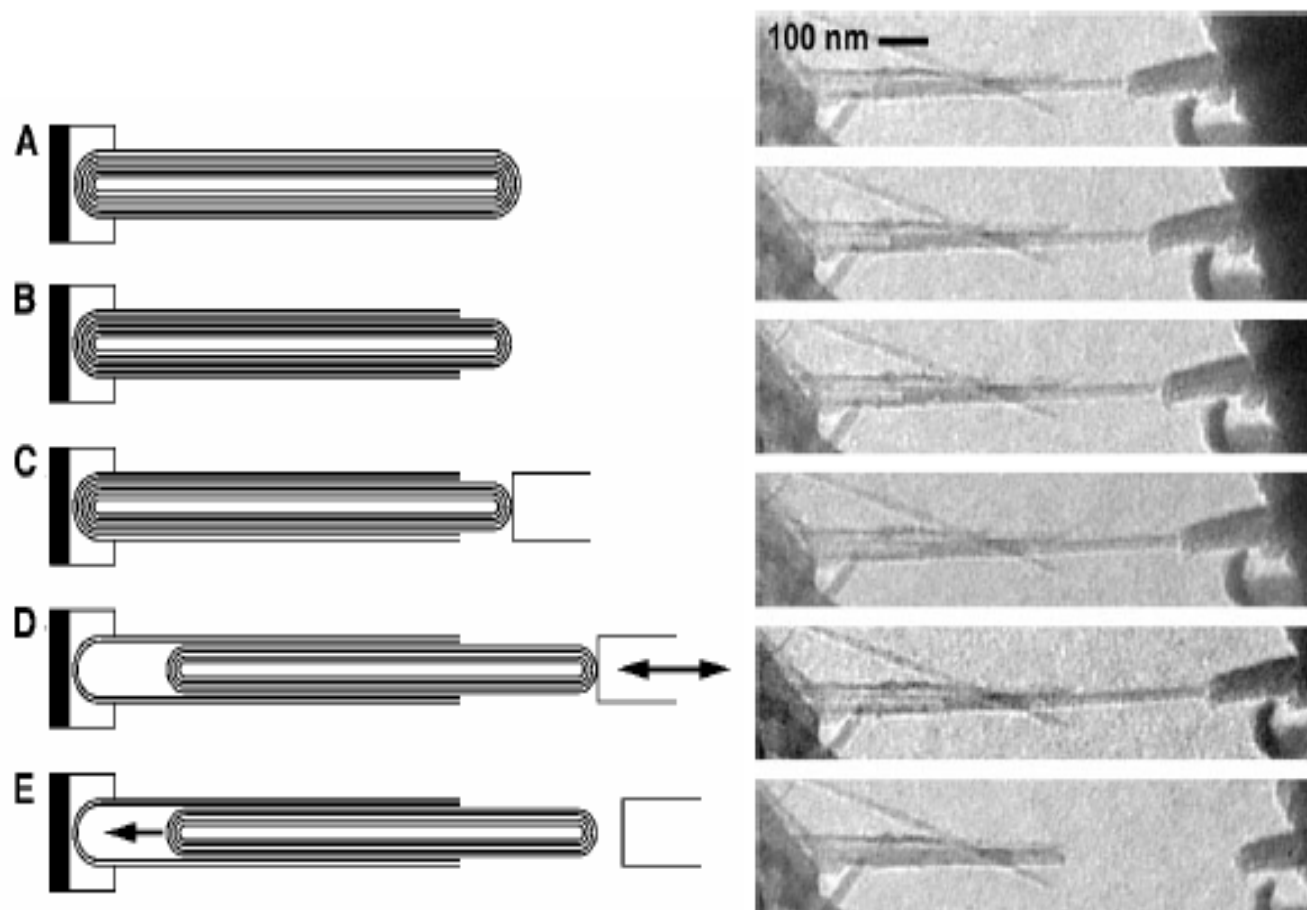
<http://www.physics.berkeley.edu/research/zettl/projects/NEMS.html>

Линейное перемещение нанотрубок

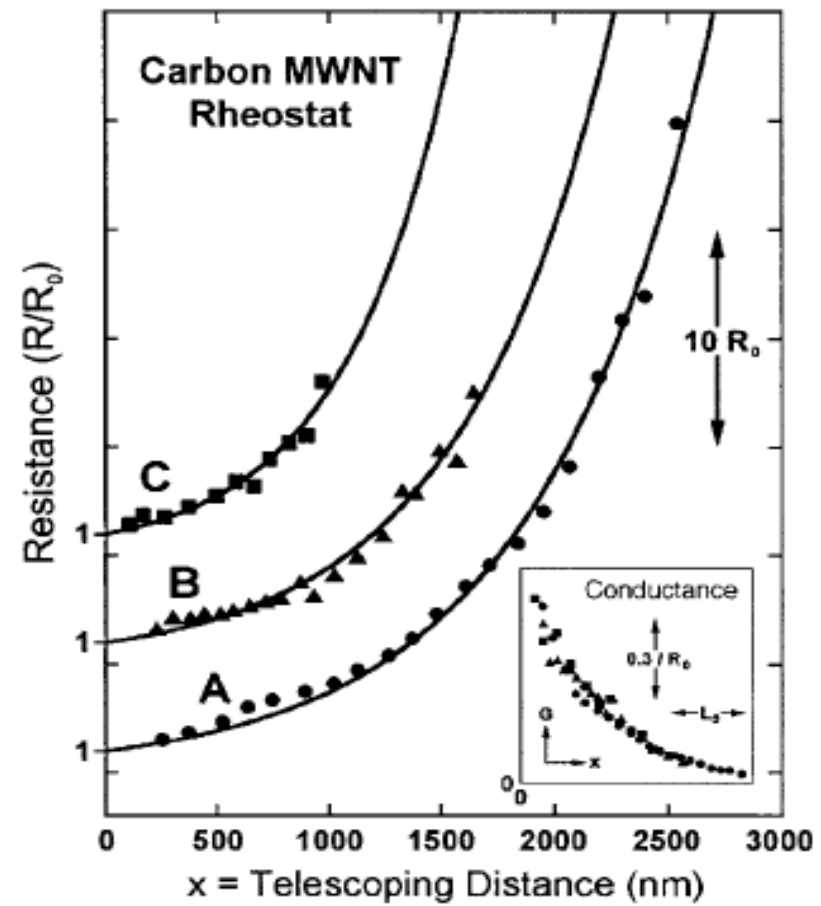
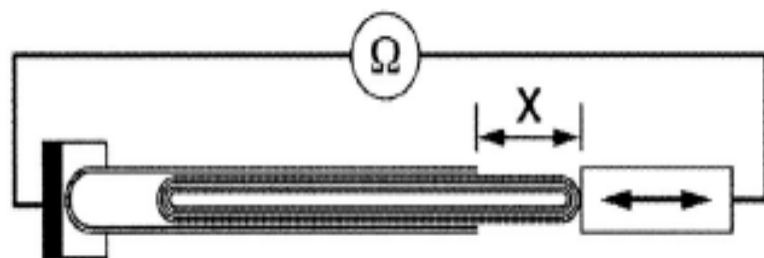
Схематическое представление и электронно-микроскопическое изображение движения внутренних частей нанотрубок.



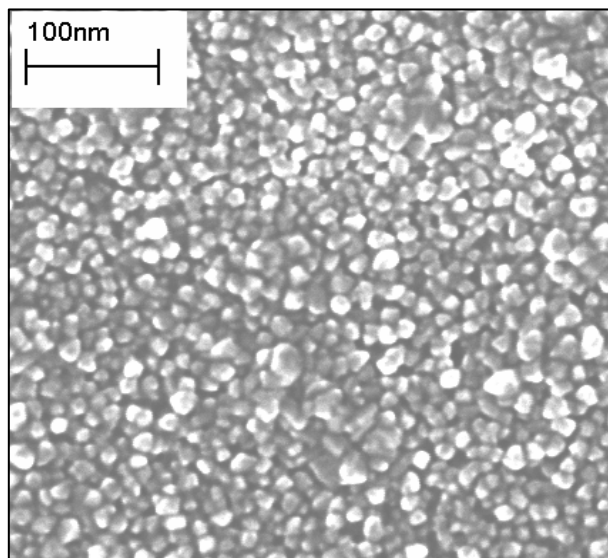
Схематическое представление и электронно-микроскопическое наблюдение за «телескопическим» поведением нанотрубок.



Реостат на основе многостенной углеродной нанотрубки

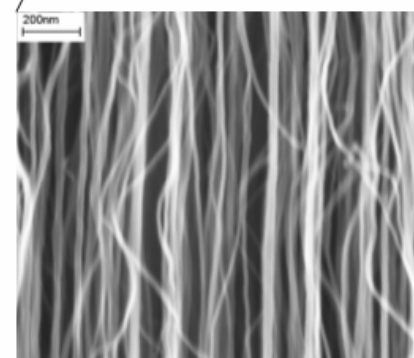
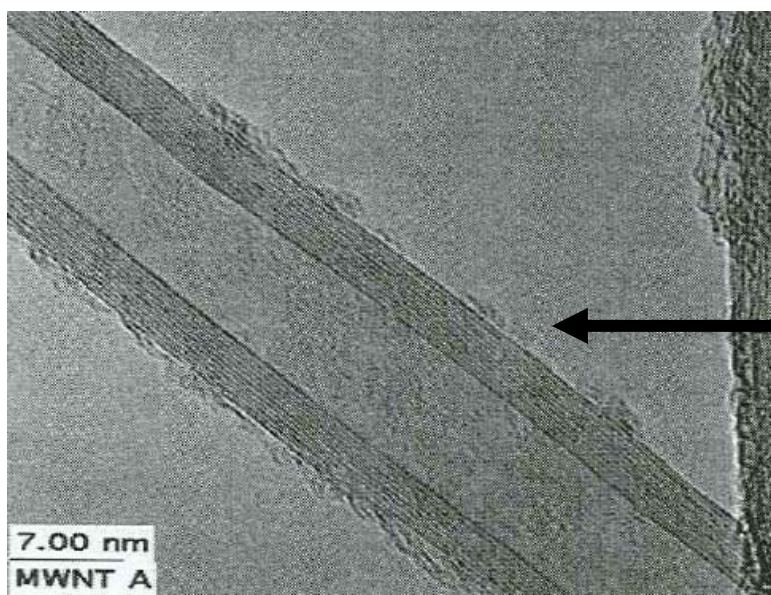
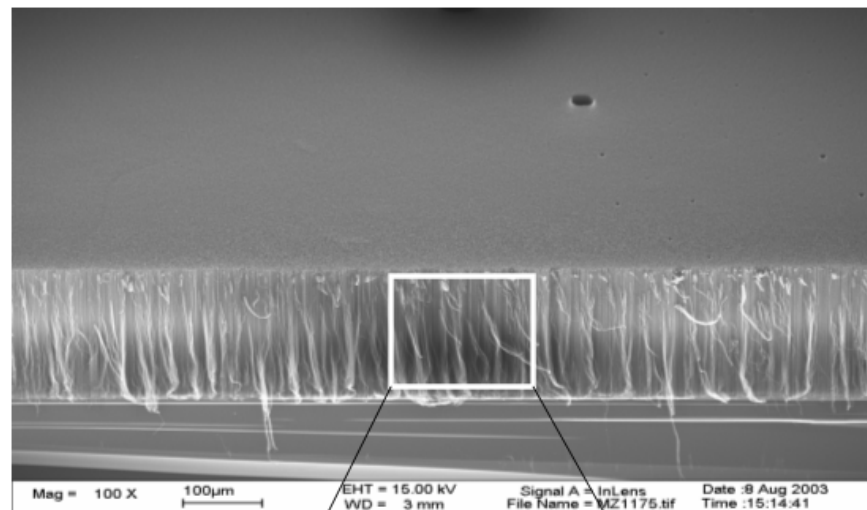


Массивы многослойных углеродных нанотрубок

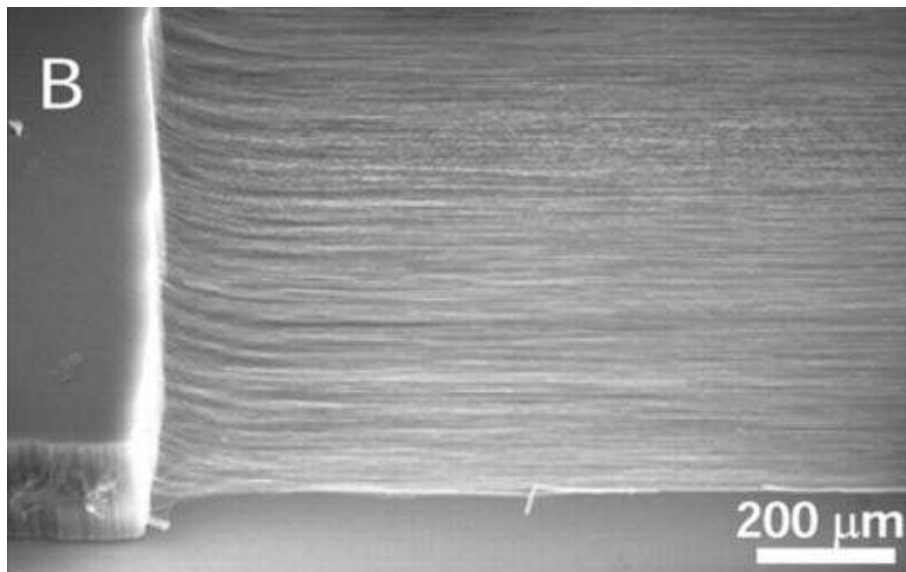


ГФХО

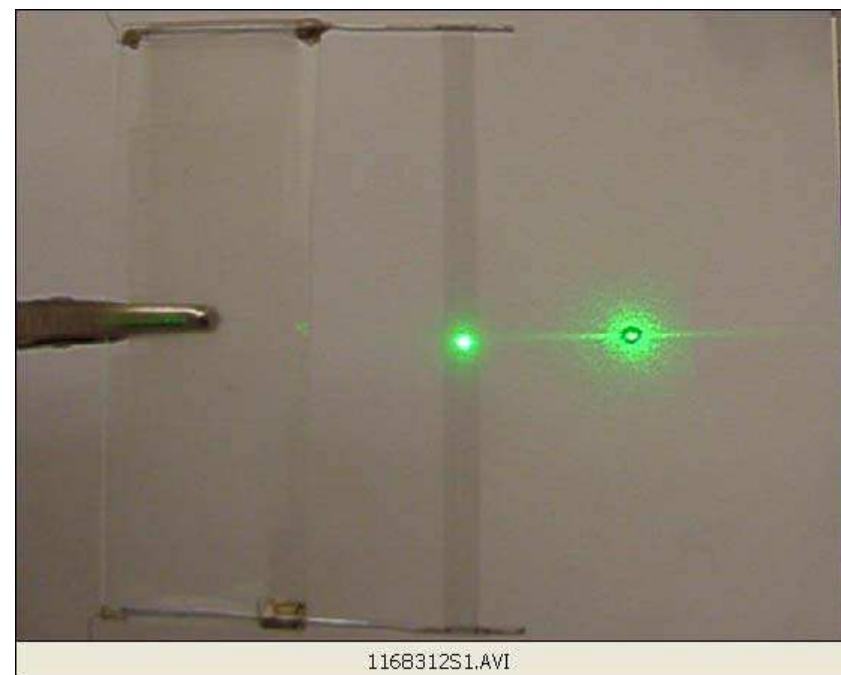
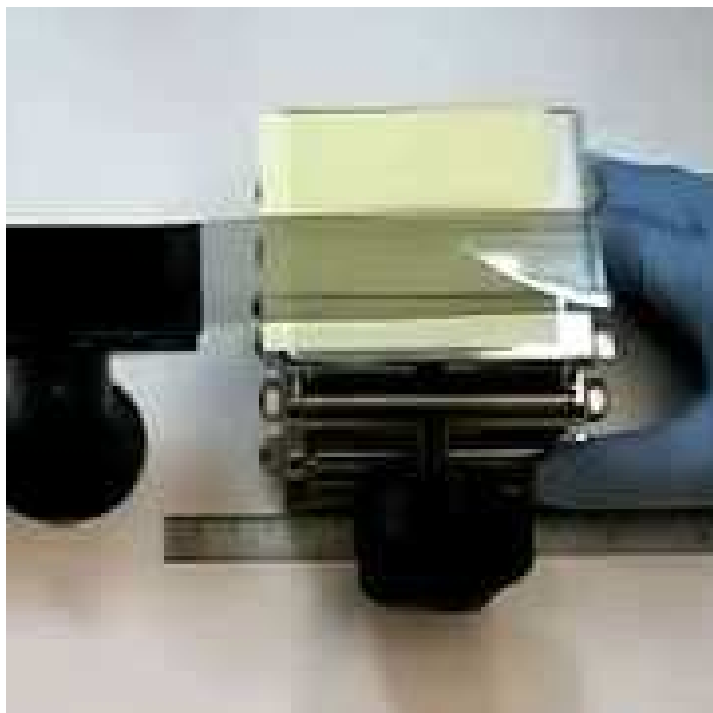
→



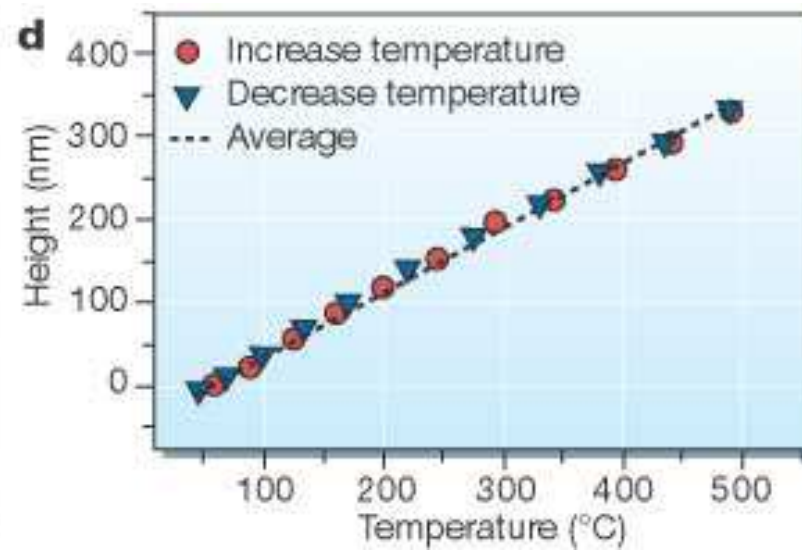
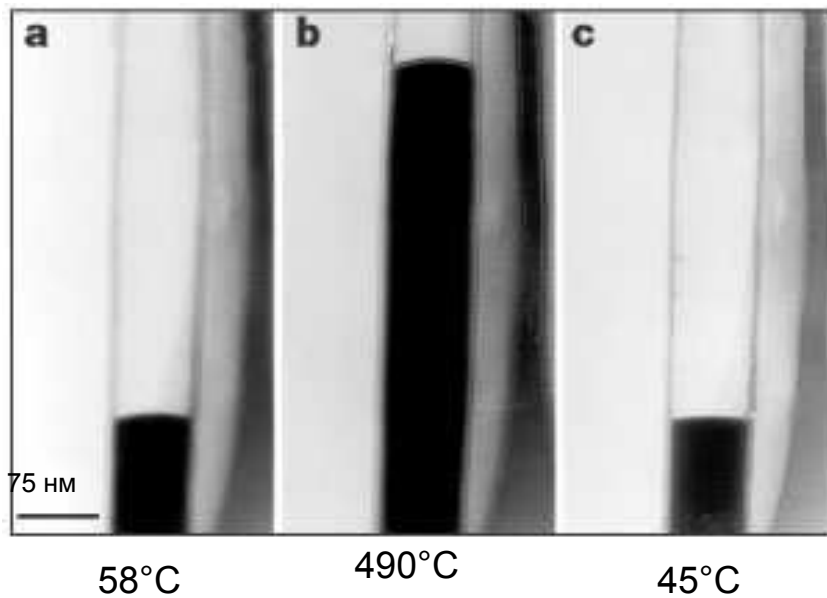
Искусственные мускулы из нанотрубок



[*Science* 20 March 2009:
Vol. 323. no. 5921, pp. 1575 – 1578]



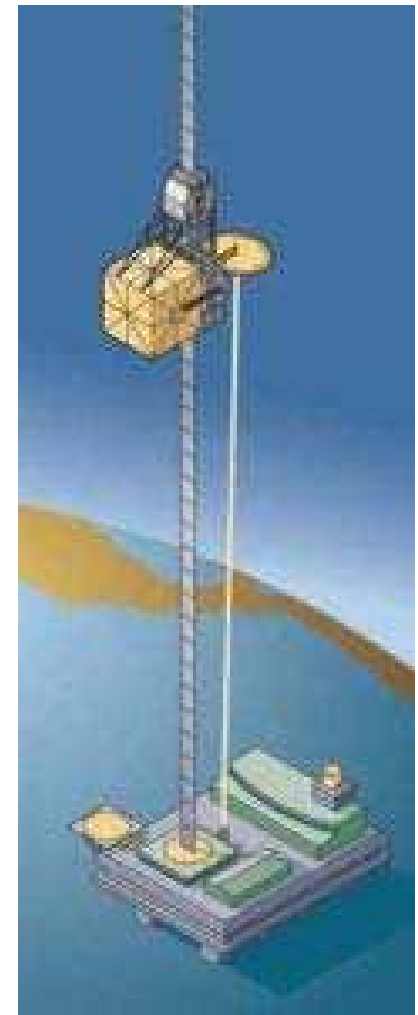
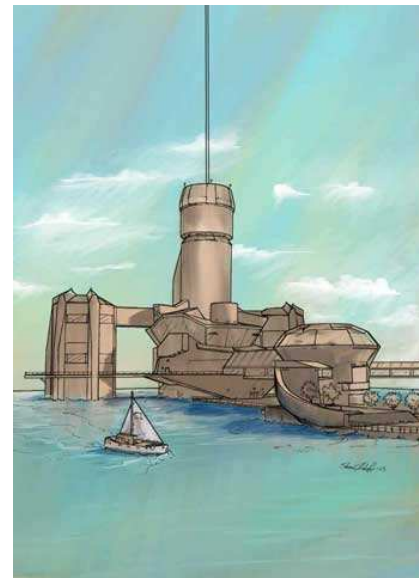
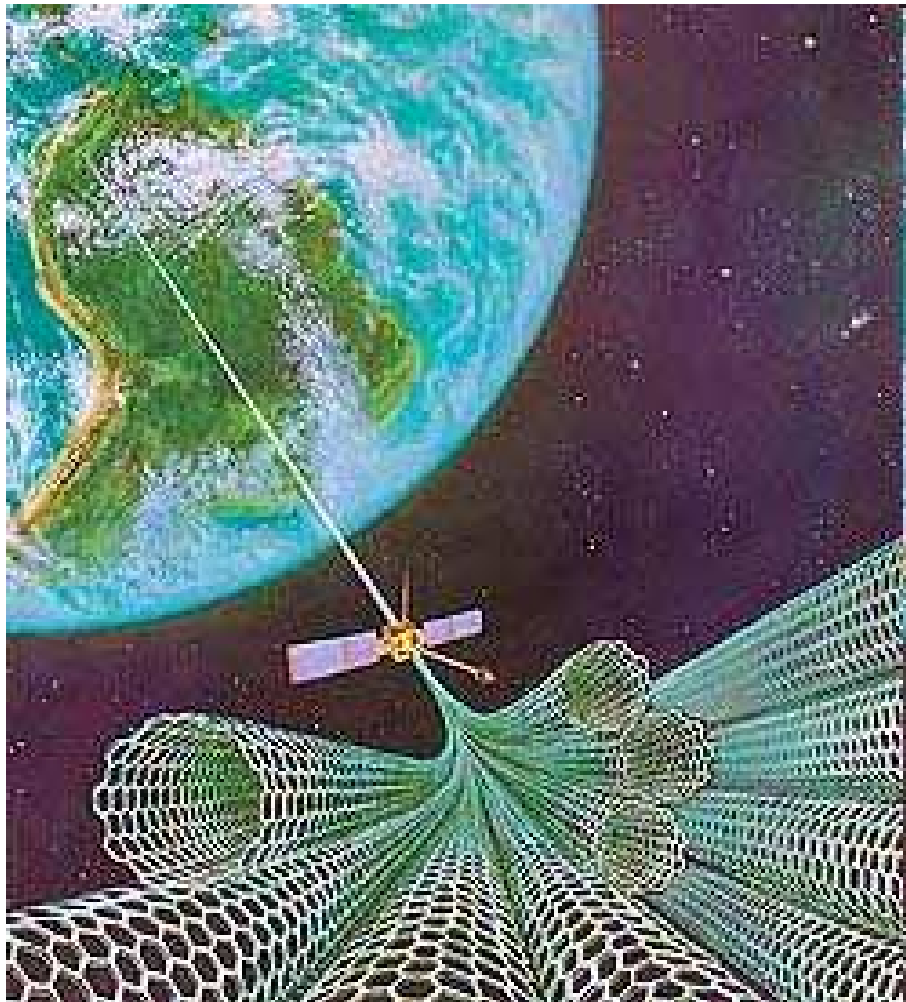
Нанотермометр из нанотрубок



Nature **415**, 599 (2002)



Мега-устройство на основе нано-трубок: космический лифт



В результате эволюционного развития литографической техники современная промышленность способна к массовому производству электронных и электромеханических устройств нанометрового размера, физические принципы работы которых аналогичны принципам работы приборов и механизмов на микро-, макро- и мега-масштабах.

Функционирование наноустройств и наносистем, использующих особенности физических взаимодействий в нанометровом масштабе, требует создания особых условий.

Многочисленные примеры научных демонстраций возможностей создания наноустройств и наносистем все еще далеки от реализации в виде промышленных технологий.