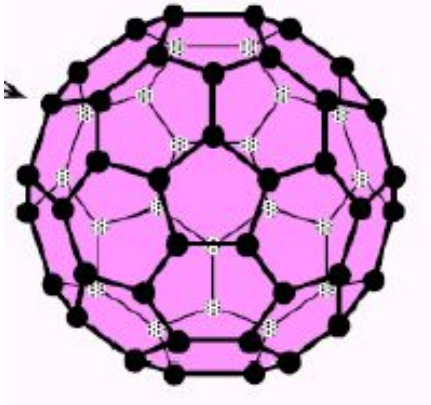


Современные проблемы наук о материалах и процессах



1. Вводная лекция

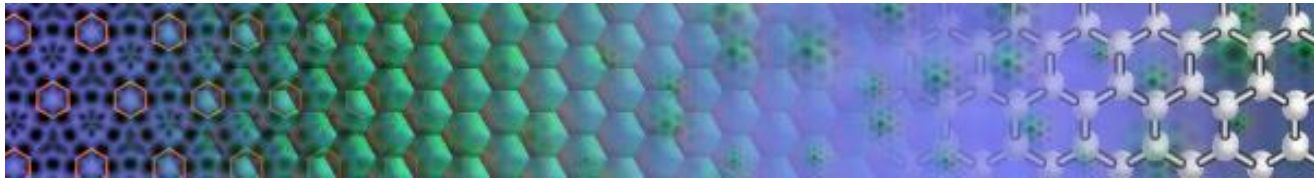
Профессор Б.И.Островский

ostr@cea.ru

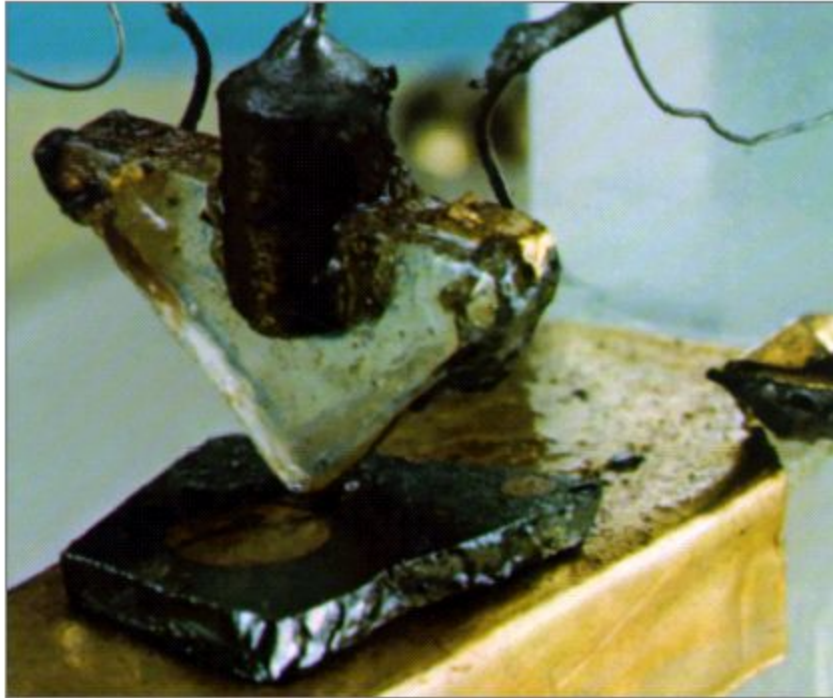
Цель курса

- ознакомление с актуальными вопросами *физики конденсированных сред* и *технической физики*;
- использование *кристаллов, полимеров и упорядоченных тонких пленок* в современной технике;
- принципы *молекулярной самоорганизации* и *молекулярного конструирования*;
- современное состояние и тенденции развития *нанотехнологии*;
- основы современных методов исследования и контроля *наноструктур*.

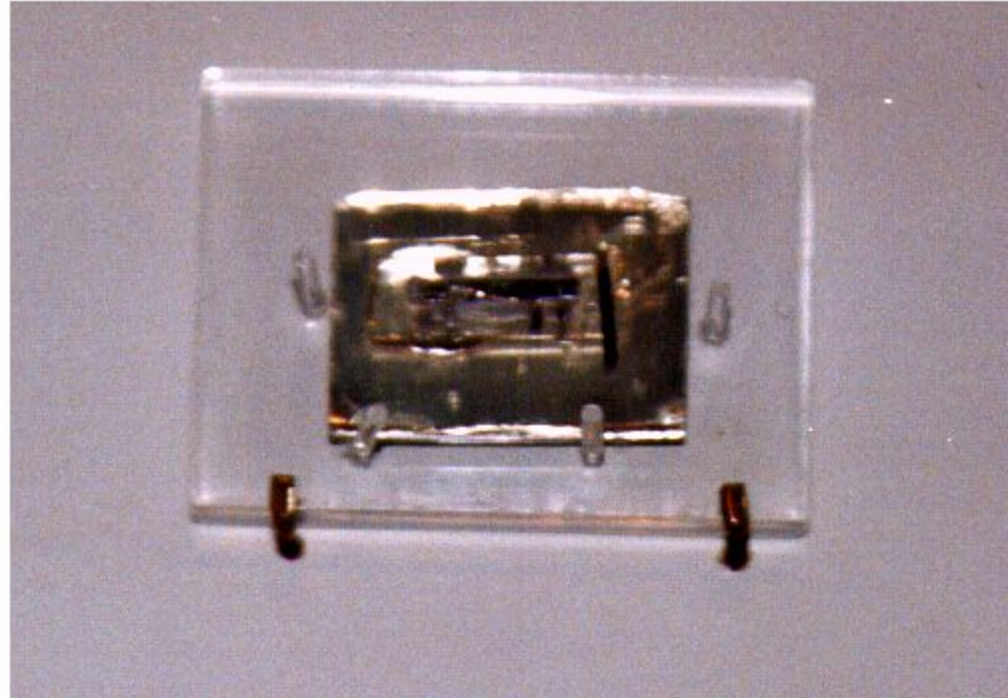
Развитие технологии полупроводников



The first transistor and IC



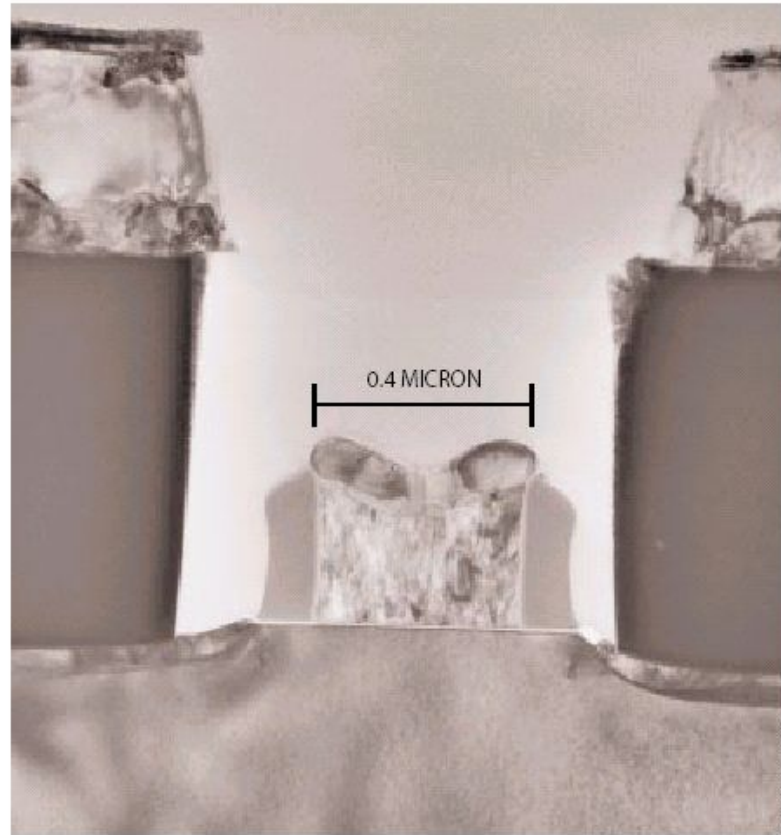
Transistor as invented by Bardeen and Brattain at Bell labs, 1947



Integrated circuit of J. Kilby, 1958

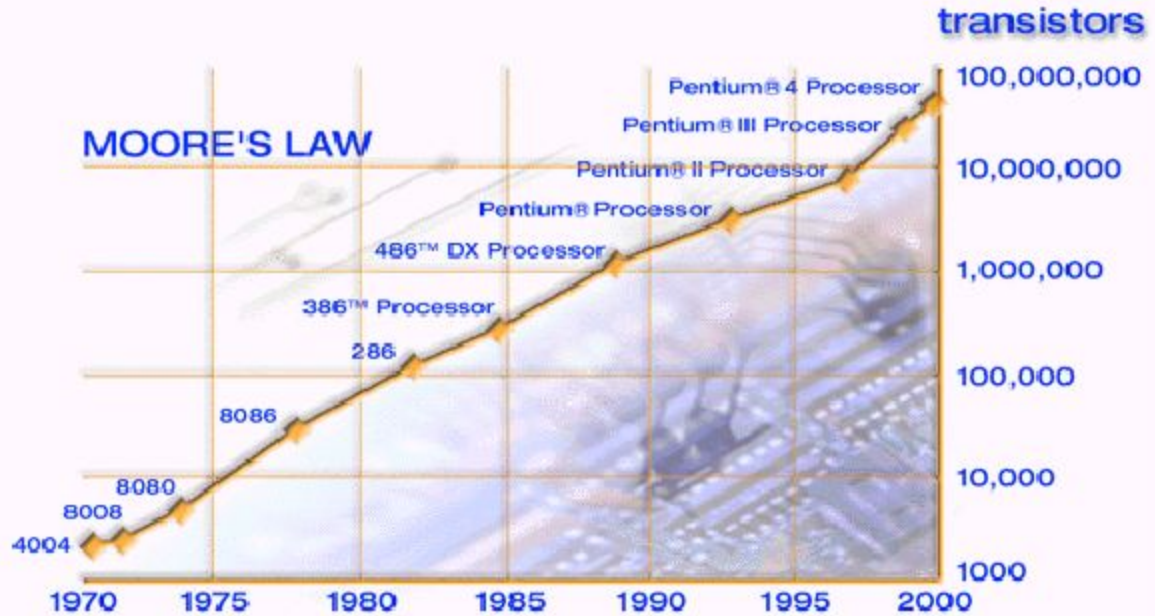
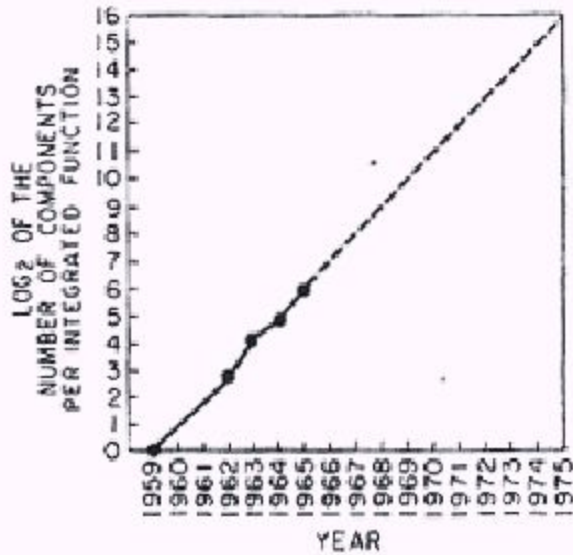
Первые транзисторы и интегральные схемы

Современный транзистор



transistor, shown in profile (*right*), measures about two microns across and has elements as small as 0.4 micron. Still other transistors in a newer generation of commercial chips incorporate 0.25-micron features.

Закон Мура



In 1965 Gordon E. Moore postulated his law: The doubling of transistors per circuit every couple of years. Intel expects that it will continue at least through the end of this decade.



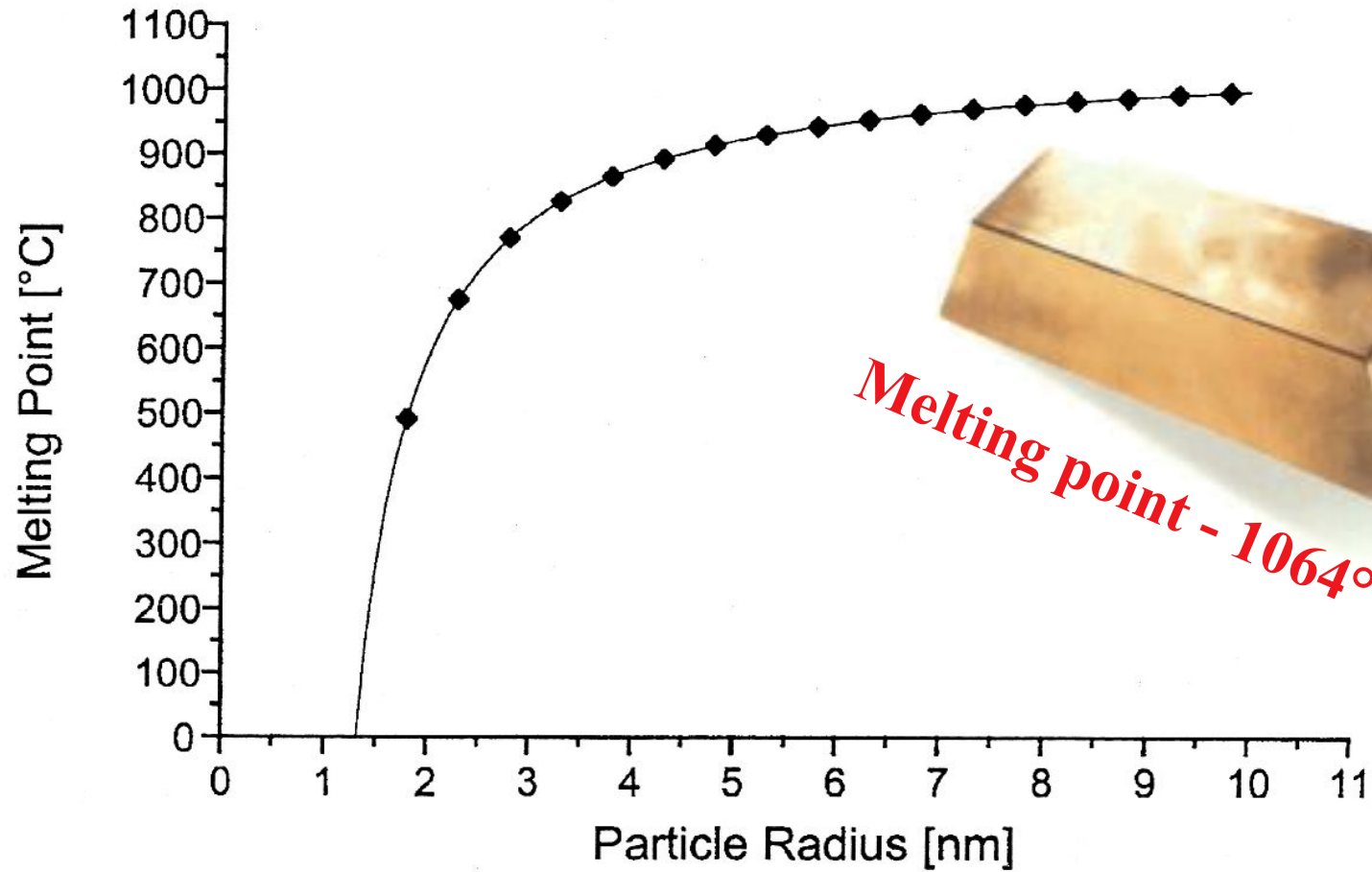
«Дорожная карта» для полупроводников

International Technology Roadmap for Semiconductors*

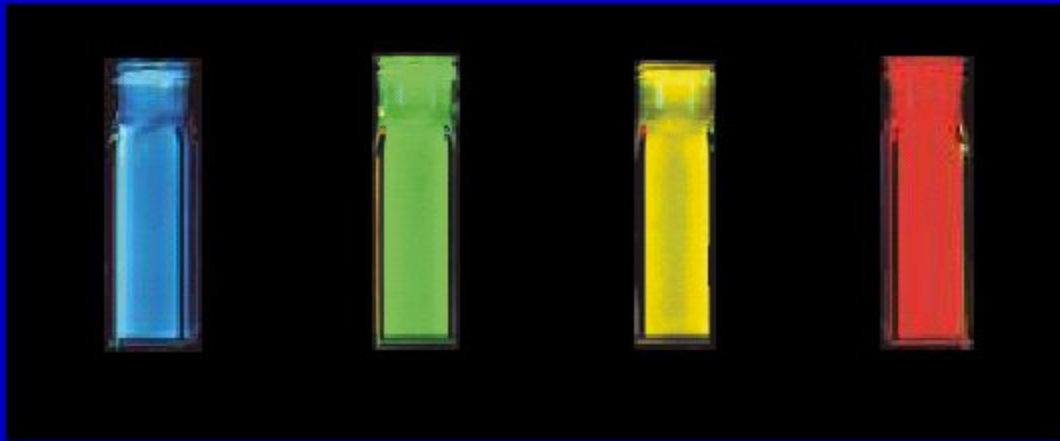
First year of volume production	2001	2003* 2004	2005* 2007	2007* 2010	2009* 2013	2011* 2016
Technology Generation (Dense lines, printed in resist)	130 nm	90 nm	65 nm	45 nm	32 nm	23 nm
Isolated Lines (in resist) [Physical gate, post-etch]	90 nm [65 nm]	53 nm [37 nm]	35 nm [25 nm]	25 nm [18 nm]	18 nm [13 nm]	13 nm [9 nm]
Chip Frequency	1.7 GHz	4.0 GHz	6.8 GHz	12 GHz	19 GHz	29 GHz
Transistors per chip (HV) (3 × for HP ; 5 × for ASICs)	100 M	190 M	390 M	780 M	1.5 B	3.1 B
DRAM Memory (bits)	510 M	1.1 G	4.3 G	8.6 G	34 G	69 G
Gate CD Control (3σ, post-etch)	5 nm	3 nm	2 nm	1.5 nm	1.1 nm	0.7 nm
Field Size (mm × mm)	25 × 32	25 × 32	22 × 26	22 × 26	22 × 26	22 × 26
Chip Size (mm) (2.2 × for HP ; to 4 × for ASIC)	140	140	140	140	140	140
Wafer Size (diameter)	300 mm	300 mm	300 mm	450 mm	450 mm	450 mm

*Semiconductor Industry Association (SIA), December 2001. *Possible 2-year cycle.

Melting Point of Gold



Квантовые эффекты



2.3 nm

4.2 nm

4.8 nm

5.5 nm

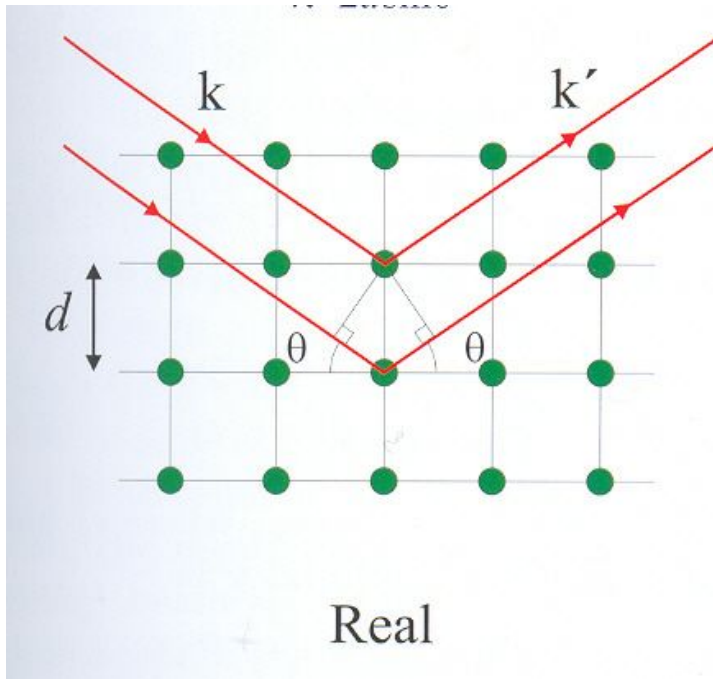
Large bandwidth

Narrow bandwidth

(All bottles contains Nano particles of SeCd)

*Мы, возможно не замечая этого,
находимся на ранней стадии
революции в науке. Суть в том, что
утверждение - все состоит из
атомов, теперь становится
операционным*

*Дифракция рентгеновских лучей
(электронов, нейтронов) на периодических
структурах*



$$2d\sin\theta = n\lambda$$

Закон Вульфа-Брэгга

Дифракция по Лауэ

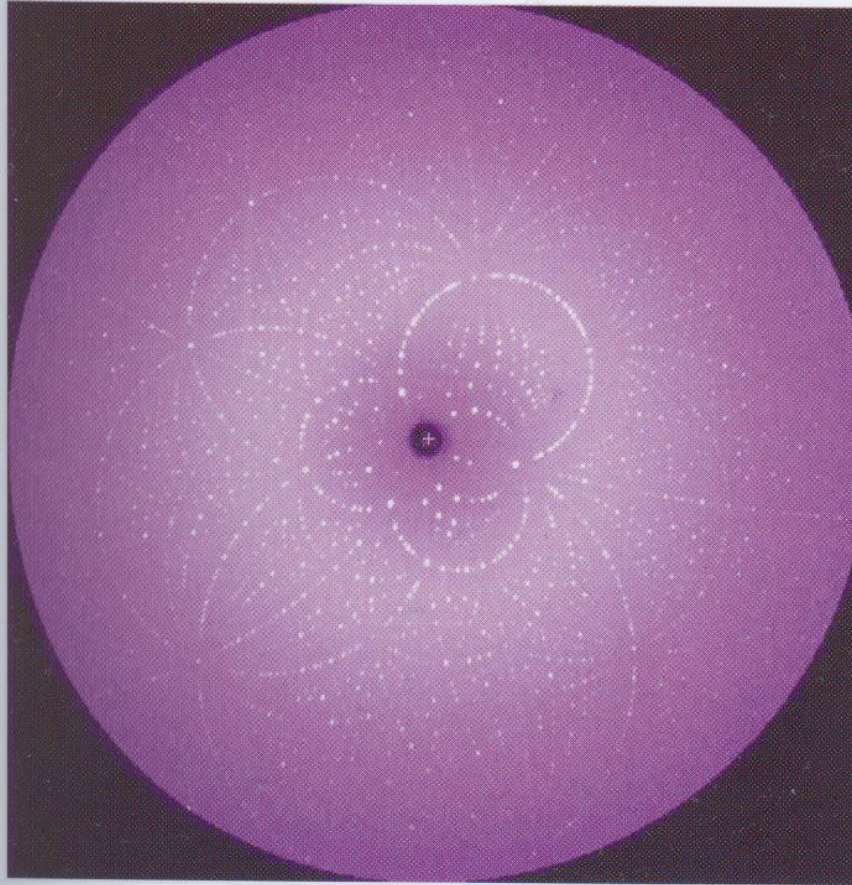
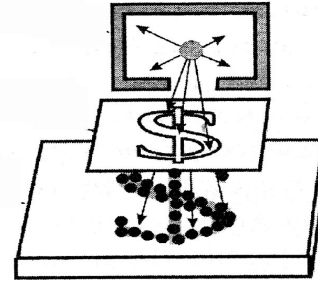
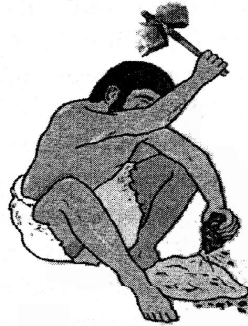
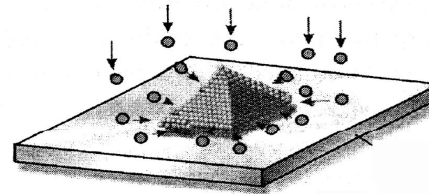
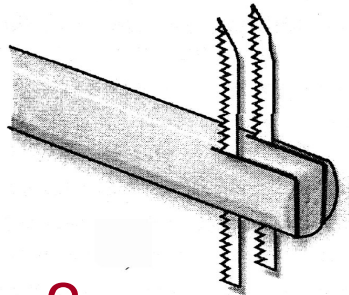


Figure 4.12: Pulsed Laue diffraction pattern from the photo-active yellow protein. The diffraction pattern was collected by averaging over 10 exposures, each of 100 ps duration. This image contains about 3700 usable reflections from which the structure could be obtained. (Data courtesy of Michael Wulff, European Radiation Facility, and Benjamin Perman, University of Chicago.)

Нанотехнология: принципы «сверху-вниз» и «снизу-вверх»

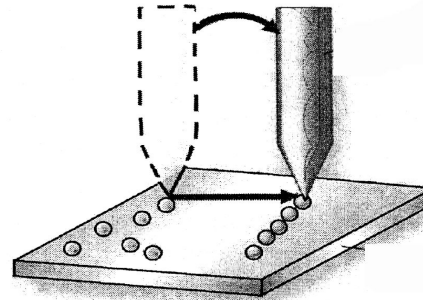
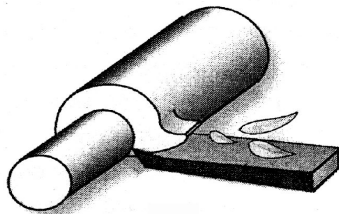


Молекулярно
лучевая эпитаксия



Самосборка
(«пирамидки» со
свойствами
квантовых точек)

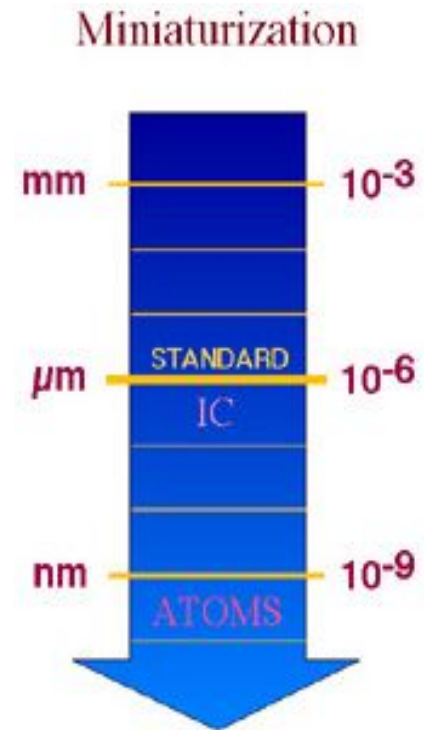
3D принтер?



Перемещение
атомов с помощью
СТМ

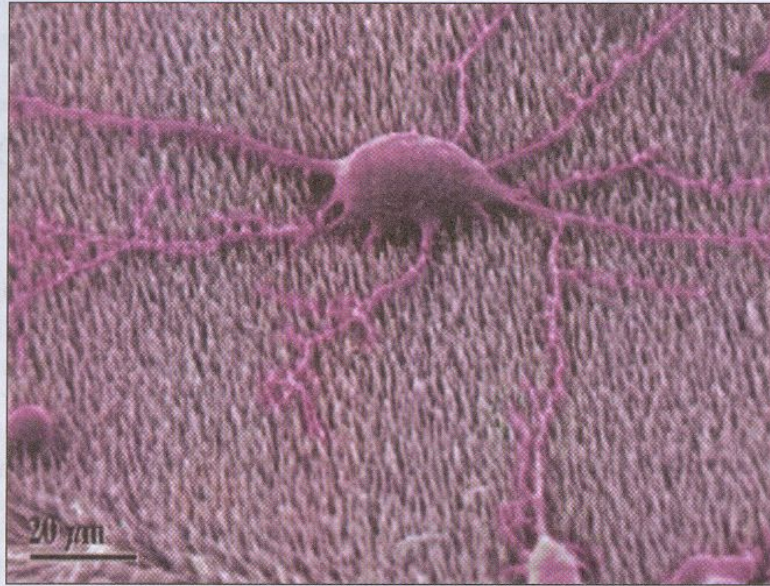
What is nanotechnology?

Nanotechnology involves the manipulation of objects on the atomic level. Products will be built with every atom in the right place, allowing materials to be lighter, stronger, smarter, cheaper, cleaner, and more precise. In order for this science to be realized, positional control must be achieved, and self-replication is necessary to reduce costs.



Нейроинпланты

- биологическая совместимость с подложкой из вертикально ориентированных нановолокон



Нейрон на поверхности из вертикально-ориентированных нановолокон (CNFs)

На полученную поверхность с ворсяной структурой, отдельные «ворсинки» которой являлись углеродными нановолокнами, ученые поместили культуру человеческих нейронов PC 12.

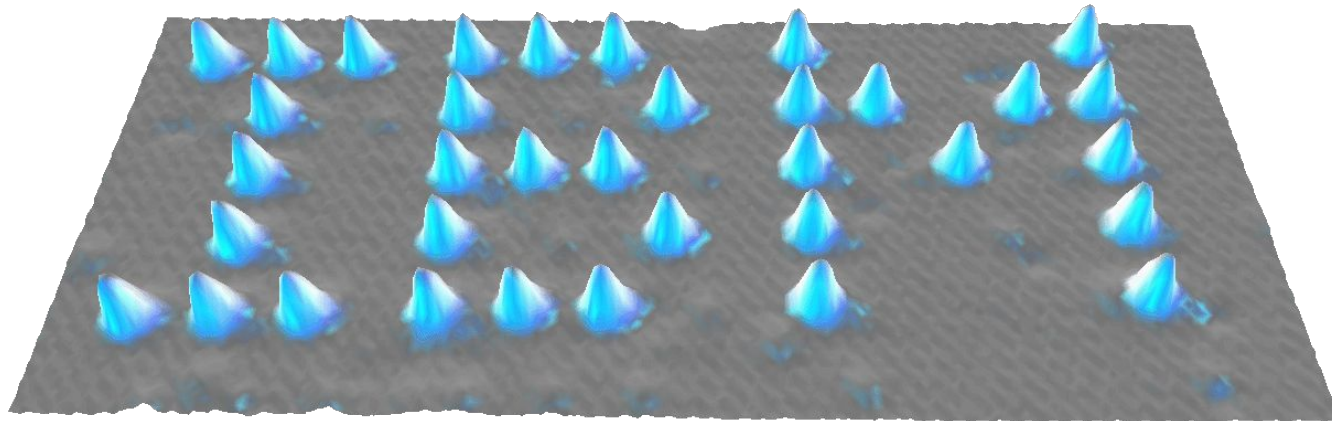
Открытая архитектура поверхности наноматериала позволяет достигать точного контакта для отдельно взятой нервной клетки и определенных волокон. Более того, культура нейронов, которую ученые в эксперименте исследовали на углеродном «ворсе», смогли сформировать нейросеть, что говорит о хорошей биологической совместимости нового материала.

Так как каждый контакт отдельного волокна с нейроном достаточно мал, то ученые надеются разработать мультиплексную систему, которая сможет обмениваться большим числом данных с клеткой. Помимо электрической стимуляции будущий нейрочип сможет записывать электрическое состояние нейрона и вести запись электрохимического процесса образования нейротрансмиттеров.

(!!)

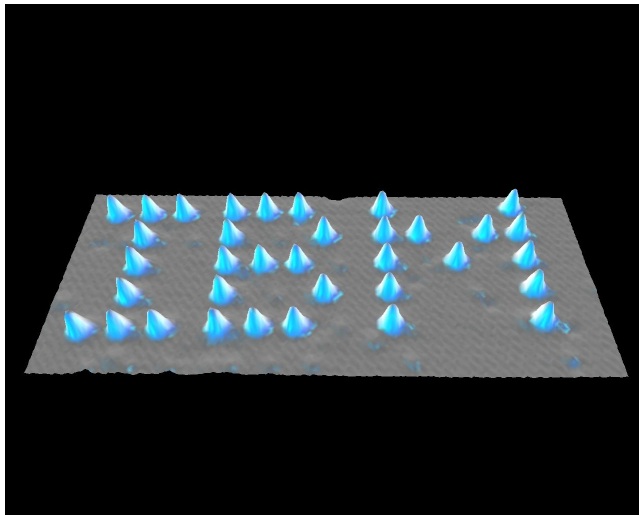
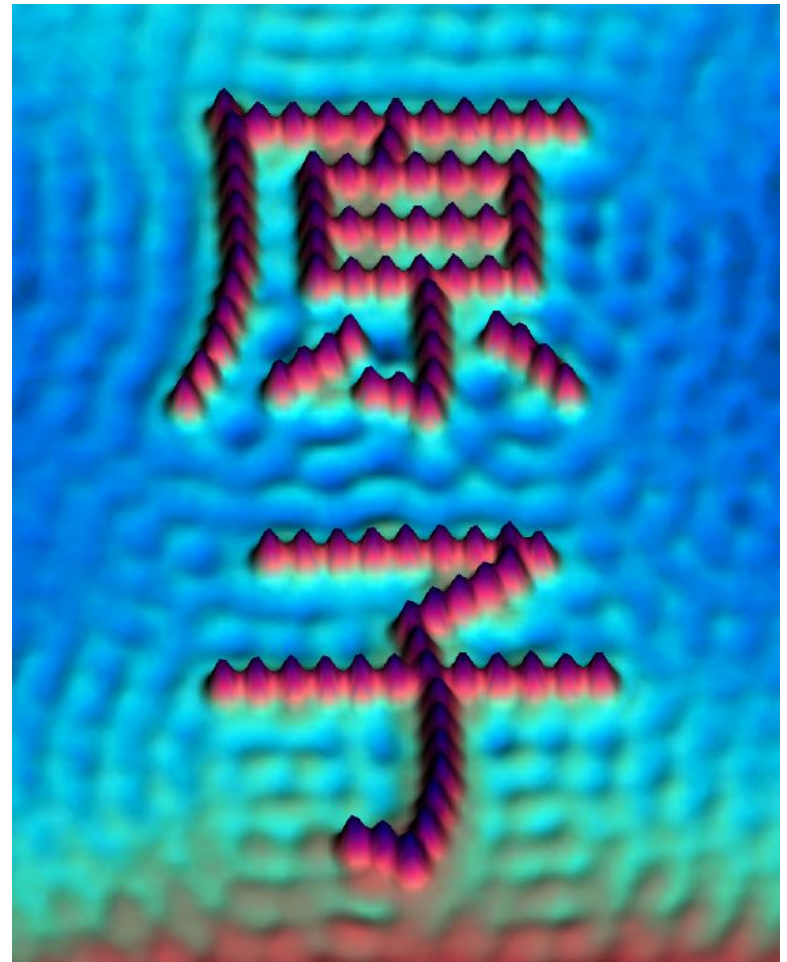
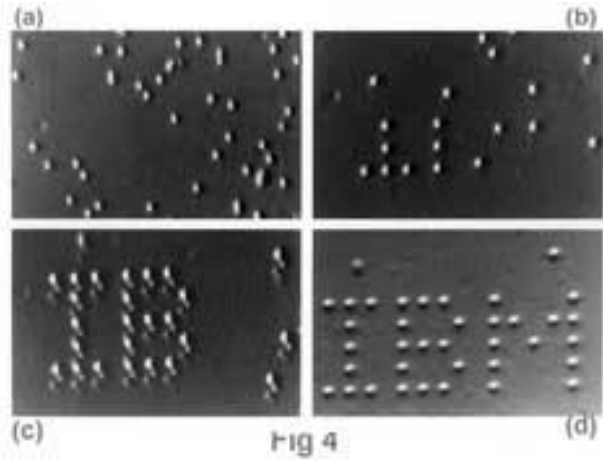
Предсказания *Richard Feynman (1918-1988)*

“But I am not afraid to consider the final question as to whether, ultimately – in the great future – we can arrange the atoms the way we want; the very atoms, all the way down!” – Feynman, 1959



D.M. Eigler, E.K. Schweizer. **Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope.** *Nature* 344, 524-526 (1990).

Moving atoms one at a time...

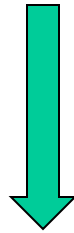


Нанотехнология: сборка на атомном уровне

Основные принципы нанотехнологии

- Предельная миниатюризация,*
- Распределенная структура,*
- Принцип построения системы
«снизу-вверх»,*
- Самоорганизация*

Предельная миниатюризация



*Планарная полупроводниковая
технология*

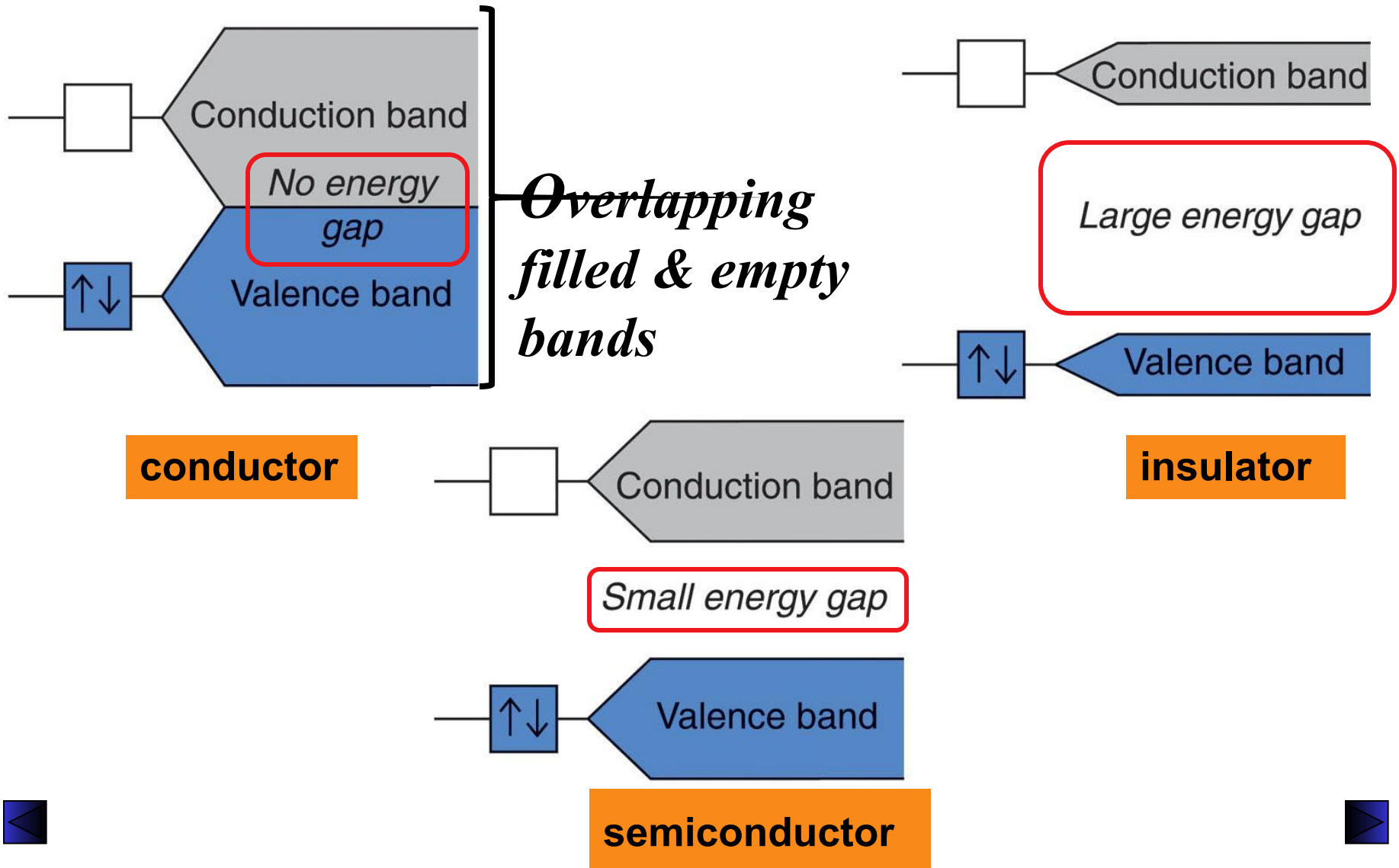
Почему полупроводники?

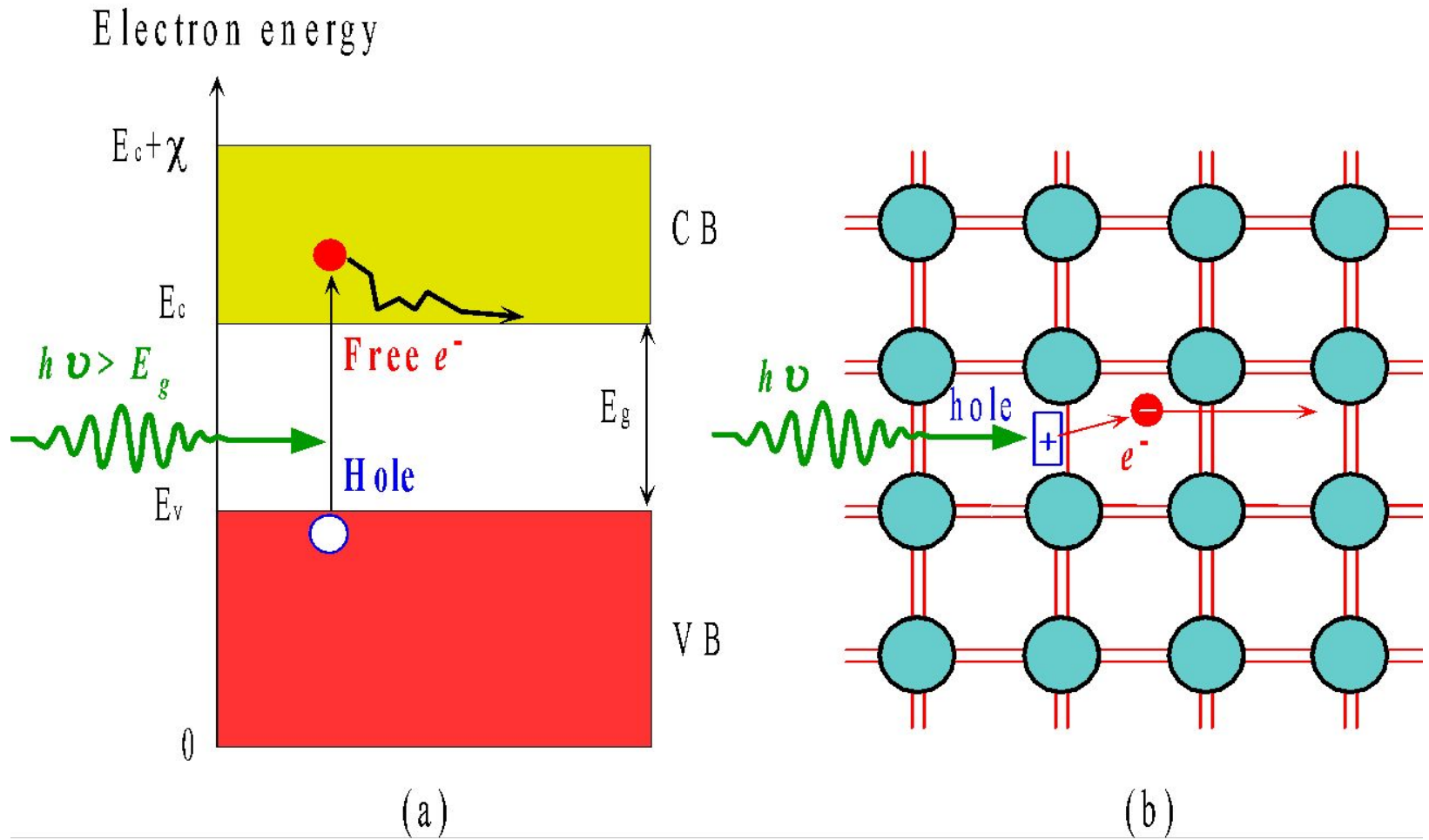
- *Проводники*: ~1 свободный электрон на 1 атом; плотность 10^{22} /см³
- *Полупроводники*: ~1 свободный электрон на 10^3 – 10^{10} атомов; плотность 10^{12} – 10^{19} / см³

Что выделяет полупроводники в особый класс твердых тел, демонстрирующих множество интересных физических явлений, нашедших широкое применение в современной электронной технике?

- Чувствительность к внешним воздействиям: к освещению, к инжекции электронов и дырок, к электрическому и магнитному полю, к деформации и т.д
- Возможность изменений физических свойств в широких пределах за счет легирования примесями.
- “Технологичность”, позволяющая создавать новые материалы, обладающие полезными свойствами. В том числе, возможность создания материалов с принципиально новыми физическими свойствами.

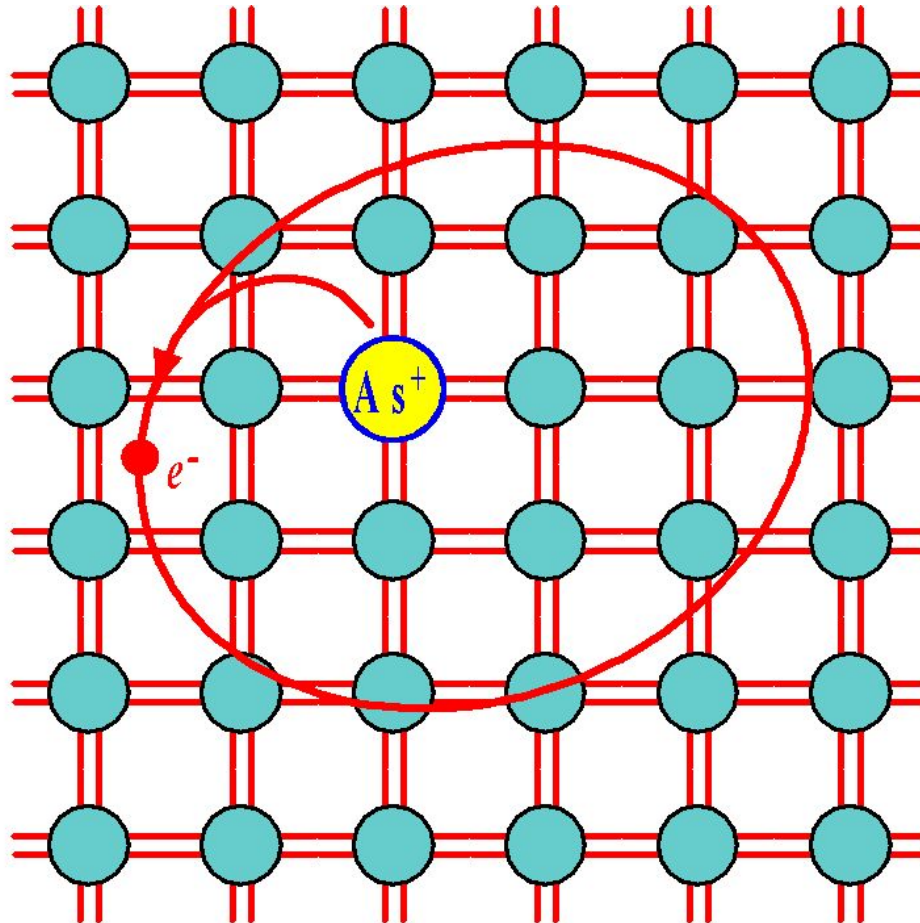
Electrical conductivity in a conductor, semiconductor, and insulator





(a) A photon with an energy greater than E_g can excite an electron from the VB to the CB. (b) When a photon breaks a Si-Si bond, a free electron and a hole in the Si-Si bond is created.

Легирование полупроводников



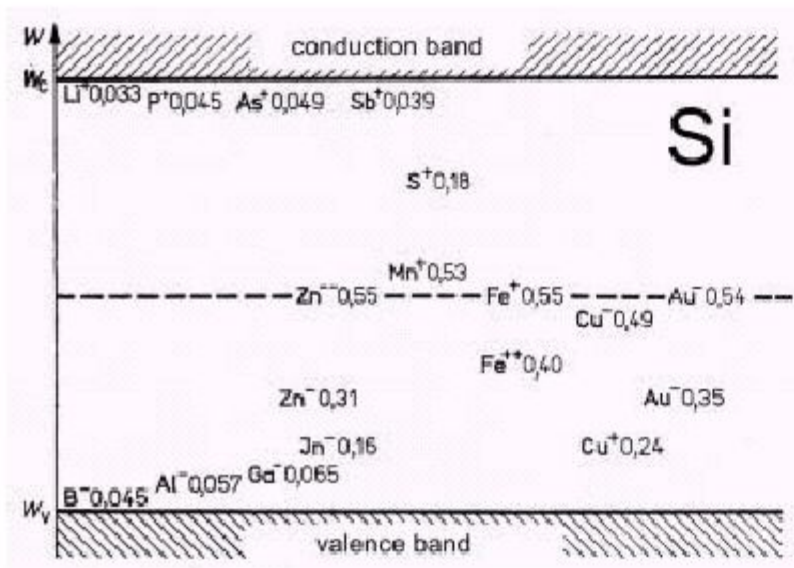
$$E \approx E_b / \epsilon^2$$

$$\epsilon \approx 10$$

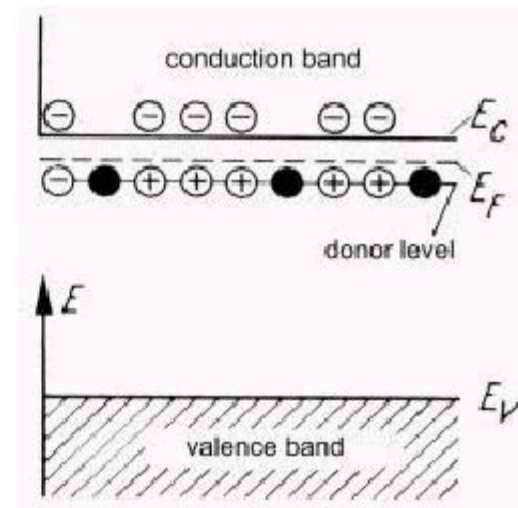
Arsenic doped Si crystal. The four valence electrons of As allow it to bond just like Si but the fifth electron is left orbiting the As site. The energy required to release to free fifth-electron into the CB is very small.

Примесные состояния

- important defect in semiconductors (but also in metals, remember C in Fe)
- intentionally used as dopants for the generation of carriers in high-resistive material (Si, GaAs)
- important acceptors: B in Si; Zn C in GaAs
- important donors: P and As in Si Te, Si in GaAs

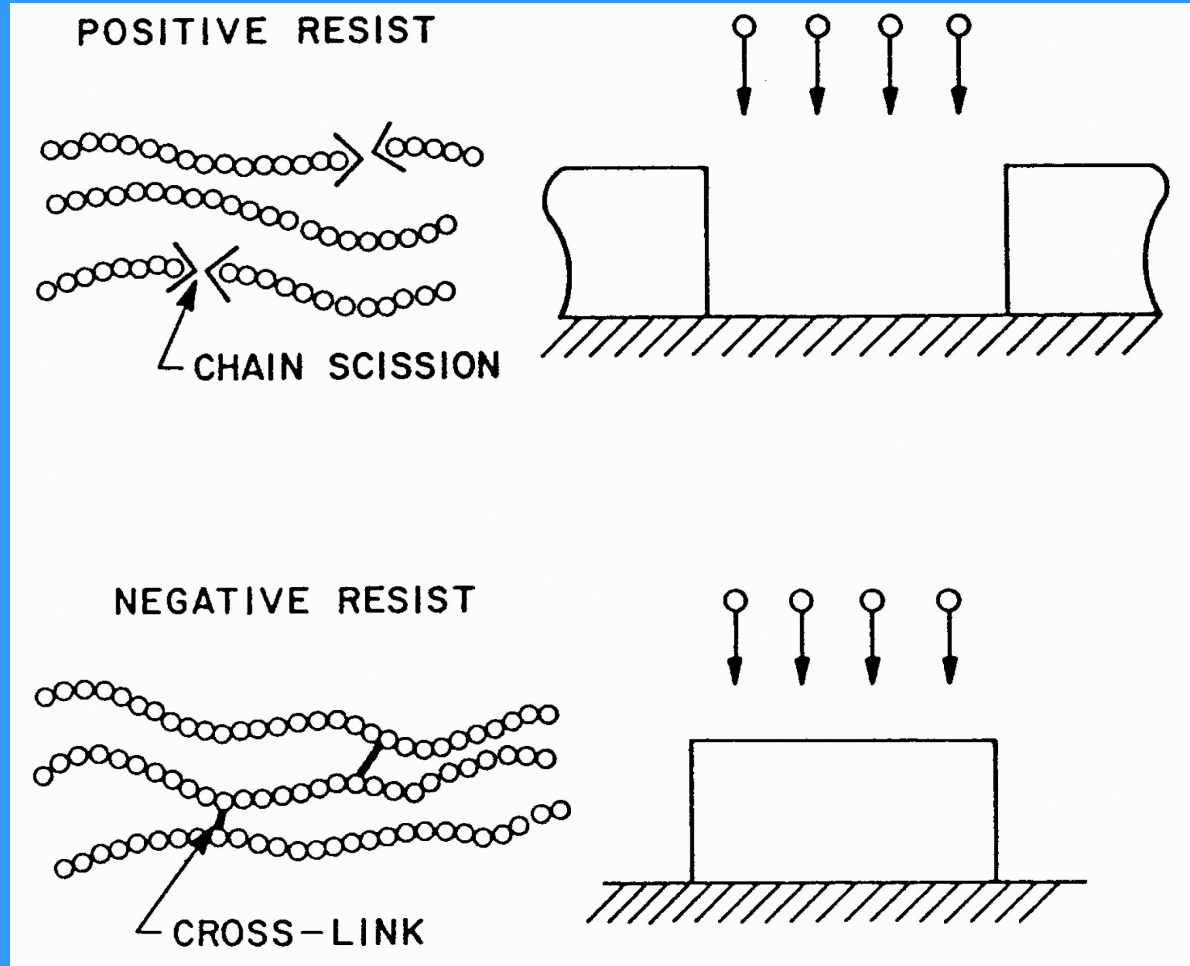


dopant levels in Si



effect of a donor dopant

Фотолитография



Оптическая литография

Exposure: Fighting diffraction

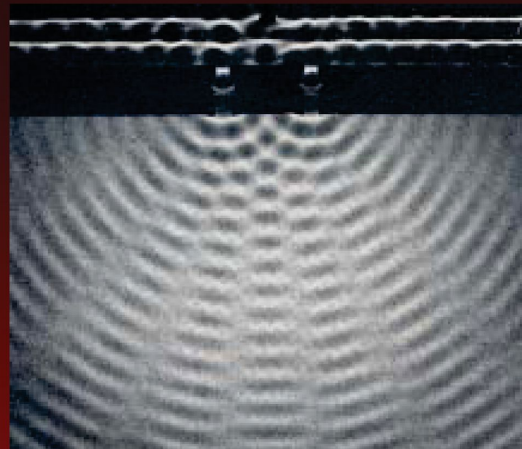
Peter Bøggild, MIC 2003

- Resist
- Exposure
- Development
- Silicon
- Patterning

- Diffraction: deviation from the straight propagation of waves (Huygens principle)

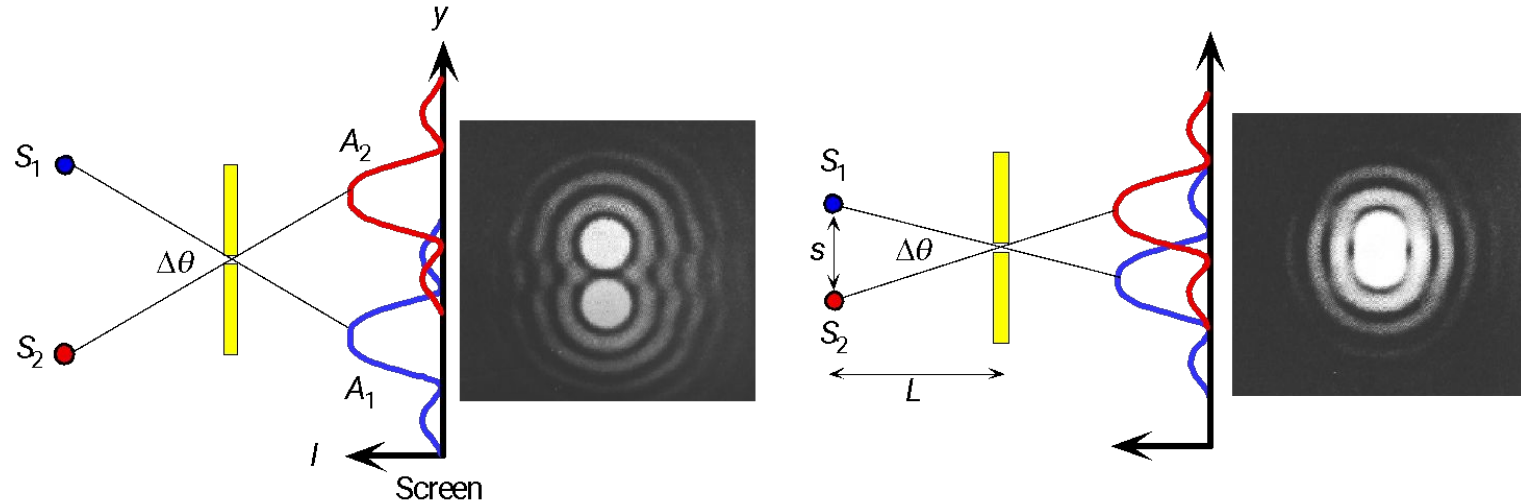


Mask
Resist
Oxide
Silicon



Plane water waves
diffracted by passage
through double slit

Дифракционный предел



Resolution of imaging systems is limited by diffraction effects. As points S_1 and S_2 get closer, eventually the Airy disks overlap so much that the resolution is lost

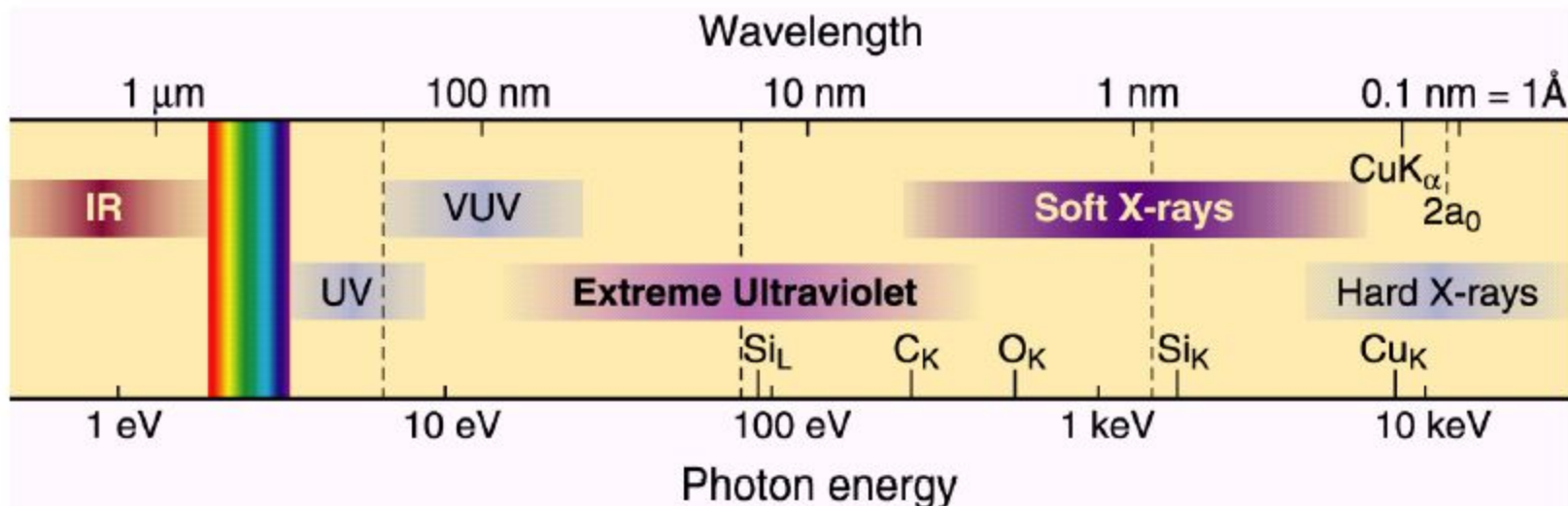
© 1999 S.O. Kasap *Optoelectronics* (Prentice Hall)

$$I(u) \sim J_1(u)/u \quad ; \quad u = (\pi/\lambda)dsin\phi$$

$$\sin \phi_1 = 1.22 \lambda/d$$



The Short Wavelength Region of the Electromagnetic Spectrum



- See smaller features
- Write smaller patterns
- Elemental and chemical sensitivity

$$\hbar\omega \cdot \lambda = hc = 1239.842 \text{ eV nm} \quad (1.1)$$

Электронная литография

Electron vs Photons

Peter Bøggild, MIC 2003

- Photons used in UV-lithography: 150-250 nm
- X-ray: down to 1 nm
- What is the (de Broglie) wavelength of an electron accelerated to an energy of 25 keV ?



Дисперсионные соотношения для частиц

Фотонны: $E = \hbar\omega = h\nu = hc/\lambda; \mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$

$\omega; \lambda \rightarrow E; \mathbf{p}$

Де Бройль (1925): $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}; \mathbf{p} = m\mathbf{v}; k = 2\pi/\lambda$

$E; \mathbf{p} \rightarrow \omega; \mathbf{k}$

$$\lambda = h/mv; \quad \omega = E/\hbar$$

Электронны: $E = E_k = p^2/2m = h^2/2m_e \lambda^{-2}$

$$\lambda = 1\text{А}, \quad E \approx 100 \text{ eV}$$

Электронная литография

Electron Beam Lithography: free standing structures

Peter Boggild, MIC 2003

Nanostructured silicon for studying fundamental aspects of nanomechanics

R H Blick¹, A Erbe, L Pescini, A Kraus, D V Scheible, F W Bell, E Hoehberger, A Hoerner, J Kirschbaum, H Lorenz and J P Kotthaus

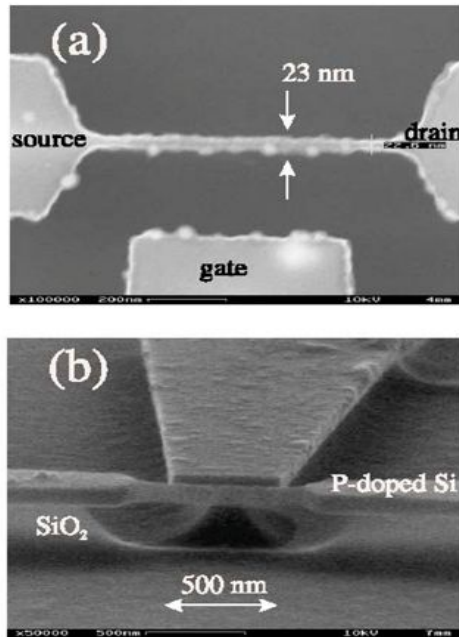
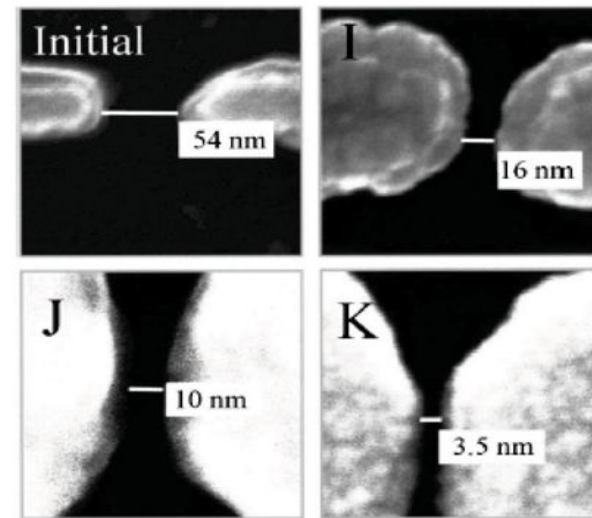


Figure 24. (a) Top view and (b) side view of the smallest suspended silicon nanowire fabricated with a width of 23 nm. The highly doped wire is clearly underetched; the gate allows tuning of the carrier density in the wire.

Nanometer-spaced electrodes with calibrated separation

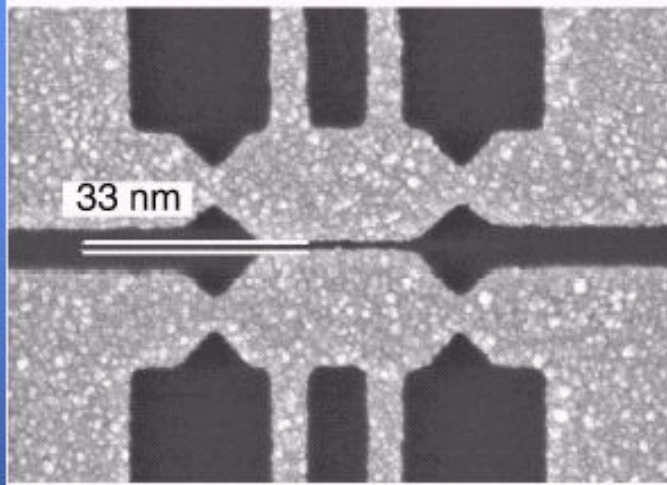
Y. V. Kervennic,^{a)} H. S. J. Van der Zant, A. F. Morpurgo, L. Gurevich, and L. P. Kouwenhoven
Department of Applied Sciences and DIMES, Delft University of Technology Lorentzweg 1, 2628 CJ Delft, The Netherlands



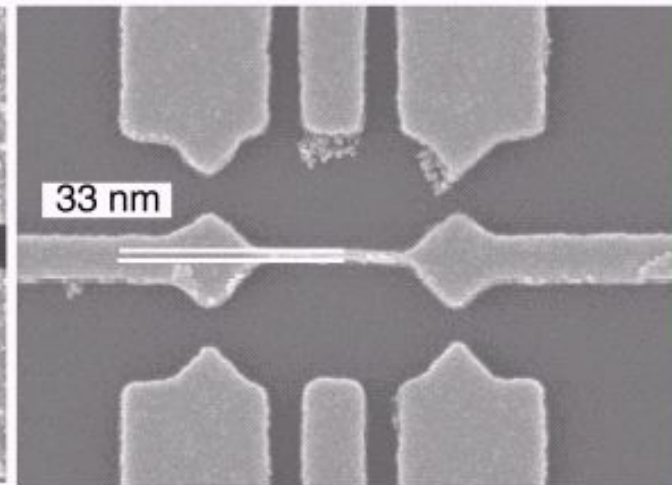
Рентгеновская литография

Structures produced with X-ray litho.

X-ray Mask



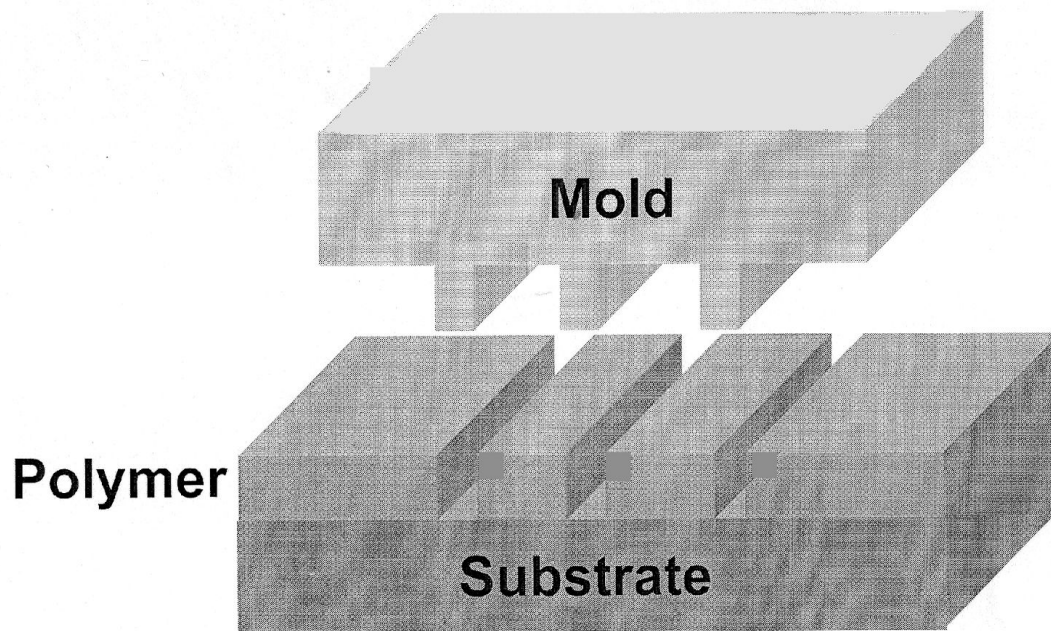
X-ray Replication
& Liftoff (Ti/Au)



Device patterns with feature sizes less than 40 nm achieved by x-ray lithography and by liftoff.

More ? Check out Prof. H. I. Smith, MIT

Imprint Lithography



invent

Intel показала первые 45-нм процессоры
29.11.2006 12:58



*Модификация свойств поверхности
по принципу «снизу-вверх»*

Сканирующие зондовые методы

What is Scanning Tunneling Microscopy?

- Allows for the imaging of the surfaces of metals and semiconductors at the atomic level.
- Developed by Gerd Binnig and Heinrich Rohrer at the IBM Zurich Research Laboratory in 1982.

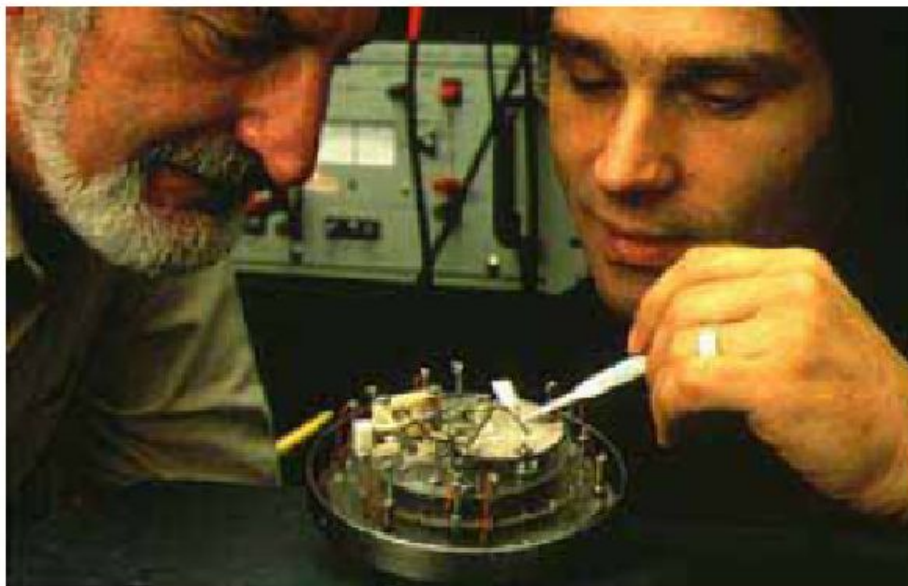
Binnig



Rohrer

- The two shared half of the 1986 Nobel Prize in physics for developing STM.
- STM has fathered a host of new atomic probe techniques: Atomic Force Microscopy, Scanning Tunneling Spectroscopy, Magnetic Force Microscopy, Scanning Acoustic Microscopy, etc.

Рождение сканирующего туннельного микроскопа



Генрих Рорер

Герд Бинниг

1982




The Nobel Prize in Physics 1986

"for his fundamental work in electron optics, and for the design of the first electron microscope"



Ernst Ruska


 1/2 of the prize

Federal Republic of Germany

"for their design of the scanning tunneling microscope"




Gerd Binnig

 1/4 of the prize

Federal Republic of Germany



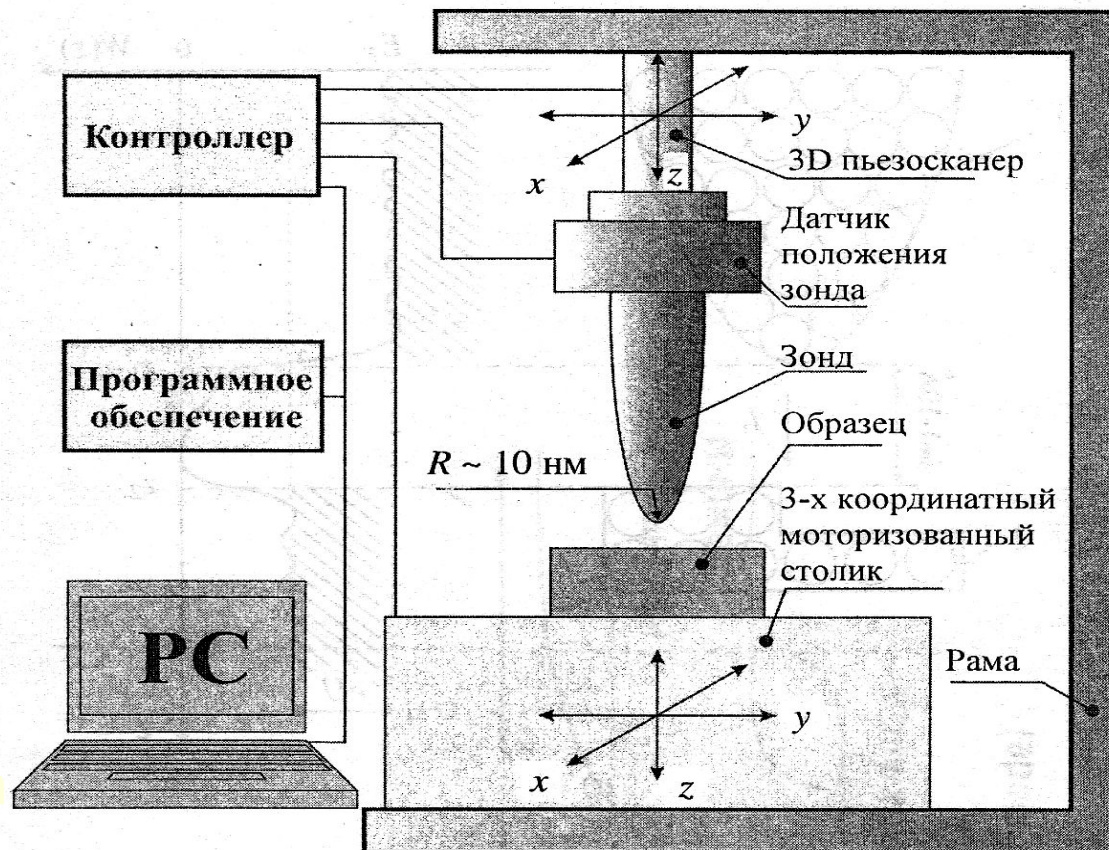
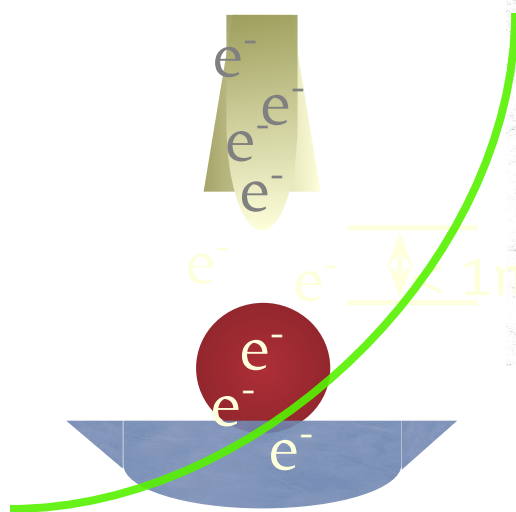
Heinrich Rohrer

 1/4 of the prize

Switzerland

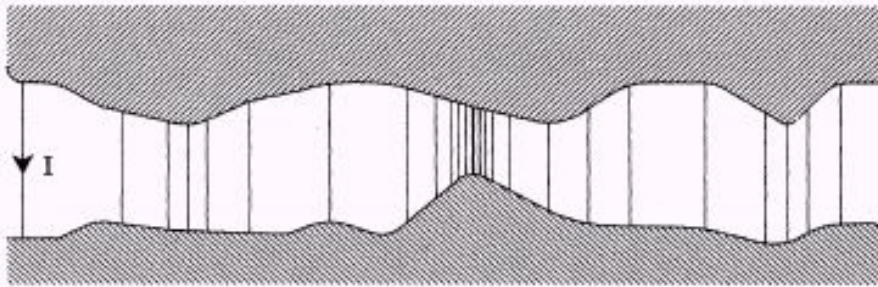
Сканирующий туннельный микроскоп

STM



Принцип туннельного микроскопа

Oxide Junction



Tunnel Tip

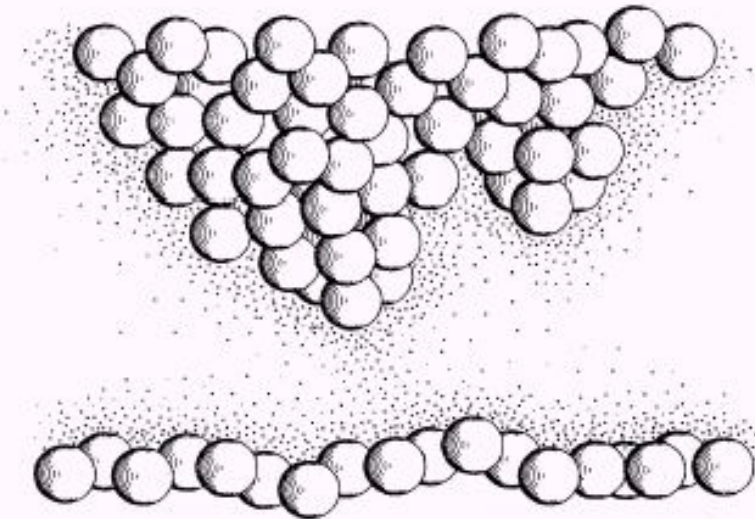
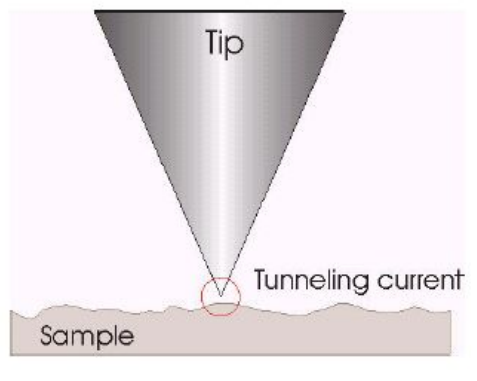


FIG. 2. The principle. The tunneling transmittivity decreases exponentially with the tunneling distance, in vacuum about a factor of 10 for every \AA . In an oxide tunnel junction, most of the current flows through narrow channels of small electrode separation. With one electrode shaped into a tip, the current flows practically only from the front atoms of the tip, in the best case from a specific orbital of the apex atom. This gives a tunnel current filament width and thus a lateral resolution of atomic dimensions. The second tip shown is recessed by about two atoms and carries about a million times less current.

Вероятность туннелирования электрона - коэффициент прохождения:



$$W = \frac{|A_t|^2}{|A_0|^2} \cong e^{-k\Delta Z},$$

где A_0 – амплитуда волновой функции электрона, движущегося к барьеру; A_t – амплитуда волновой функции электрона, прошедшего сквозь барьер; k – константа затухания волновой функции в области, соответствующей потенциальному барьеру; ΔZ – ширина барьера. Для туннельного контакта двух металлов константу затухания можно представить в виде

$$k = \frac{4\pi\sqrt{2m\varphi^*}}{h},$$

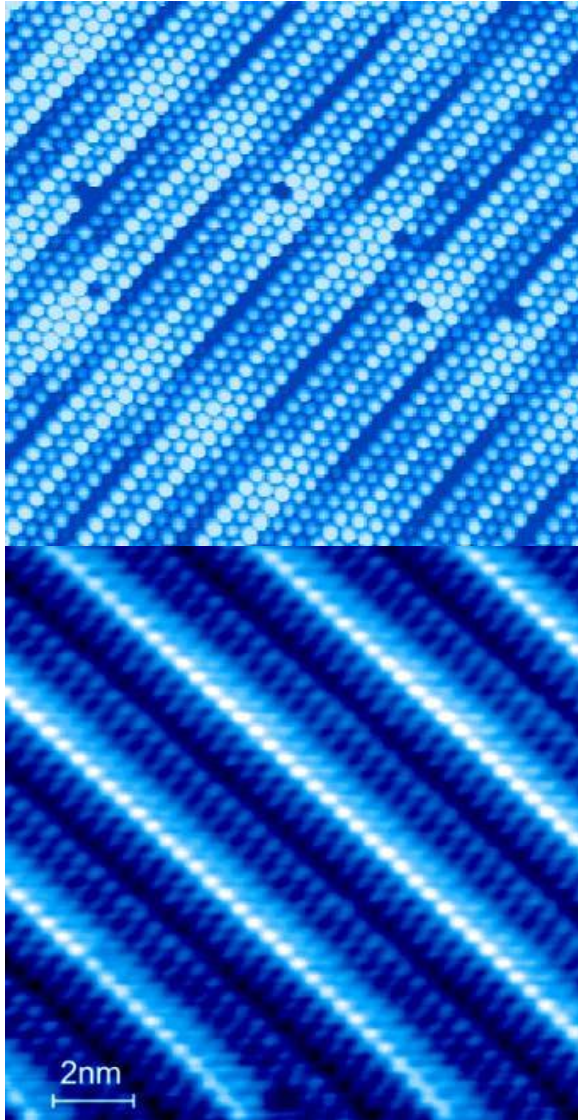
где m – масса электрона, φ^* – средняя работа выхода электрона, h – постоянная Планка. При приложении к туннельному контакту разности потенциалов V между зондом и образцом появляется туннельный ток.

Поскольку экспоненциальная зависимость очень сильная, то для оценок и качественных рассуждений часто пользуются упрощенной формулой

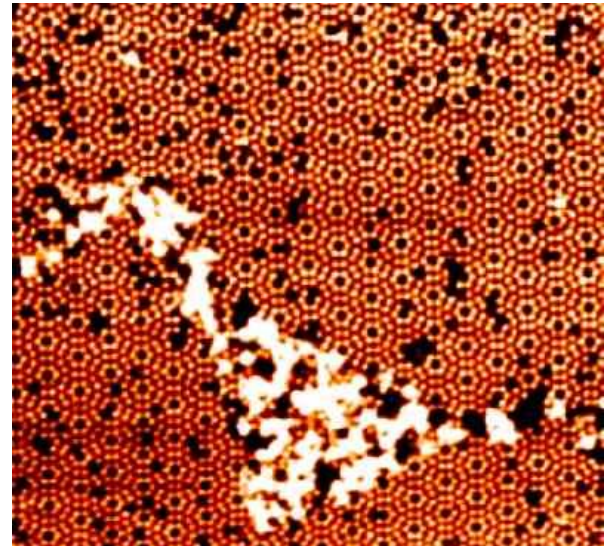
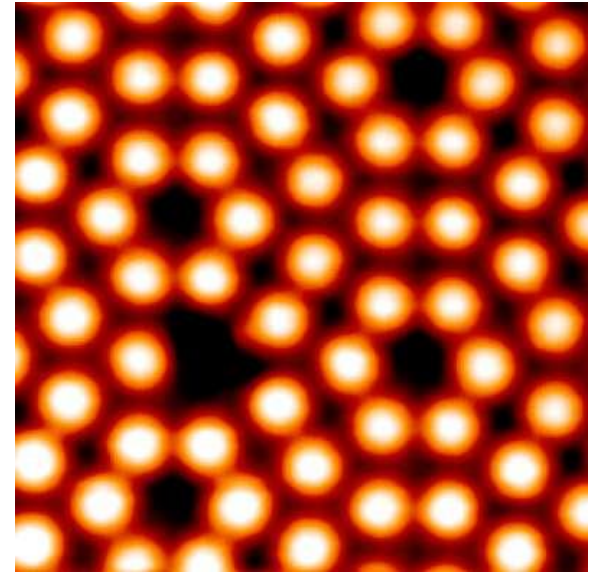
$$j_t = j_0(V) e^{-\frac{4\pi}{h} \sqrt{2m\varphi^*} \Delta Z} \quad (1)$$

в которой величина $j_0(V)$ считается не зависящей от изменения расстояния зонд-образец. Для типичных значений работы выхода ($\varphi \sim 4$ эВ) значение константы затухания $k = 2 \text{ \AA}^{-1}$, так что при изменении ΔZ на $\sim 1 \text{ \AA}$ величина тока меняется на порядок. Реальный туннельный контакт в СТМ не является одномерным и имеет более сложную геометрию, однако основные черты туннелирования, а именно экспоненциальная зависимость тока от расстояния зонд-образец, сохраняются также и в более сложных моделях, что подтверждается экспериментально.

Examples of STM images...

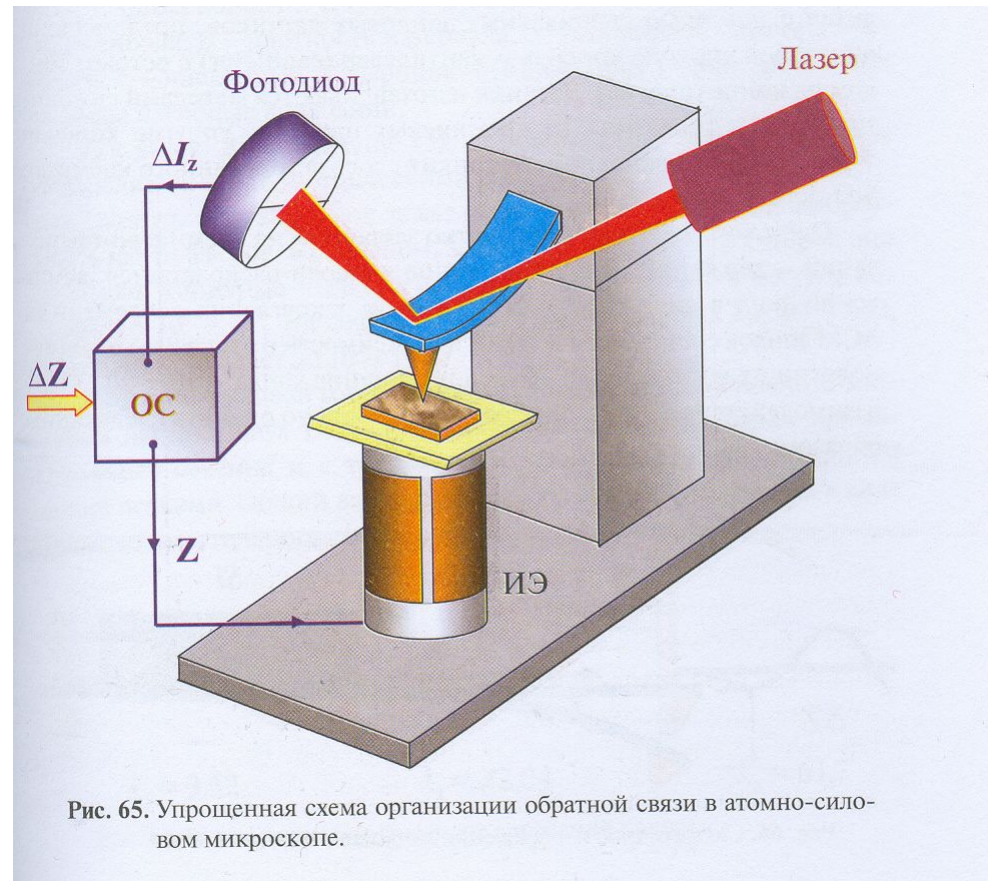


- Pt (100) with vacancies
- Si (111) 7x7 reconstruction
- Annealed decanethiol film on Au(111)
- Si (111) with terraces and vacancies



Атомно-силовая микроскопия

AFM



Атомно-силовой микроскоп (АСМ) был изобретён в 1986 году Гердом Биннигом, Кэлвином Куэйтотом и Кристофером Гербером [31]. В основе работы АСМ лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью, для регистрации которого используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль с острым зондом на конце (рис. 60). Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью.

Качественно работу АСМ можно пояснить на примере сил Ван-дер-Ваальса [32]. Наиболее часто энергию ван-дер-ваальсова взаимодействия двух атомов, находящихся на расстоянии r друг от друга, аппроксимируют степенной функцией – потенциалом Леннарда-Джонса:

$$U_{LD}(r) = U_0 \left\{ -2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 + \left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} \right\}$$

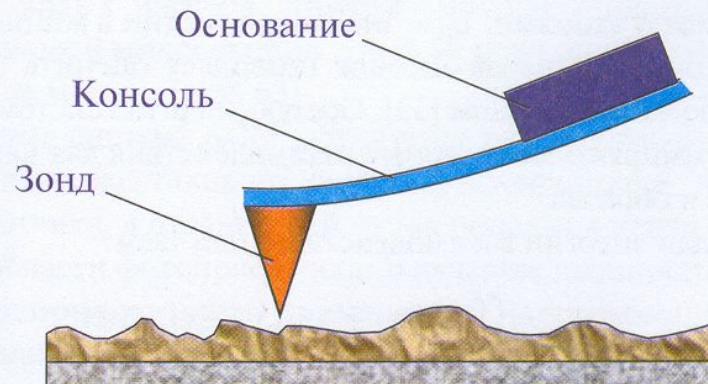


Рис. 60. Схематическое изображение зондового датчика АСМ.

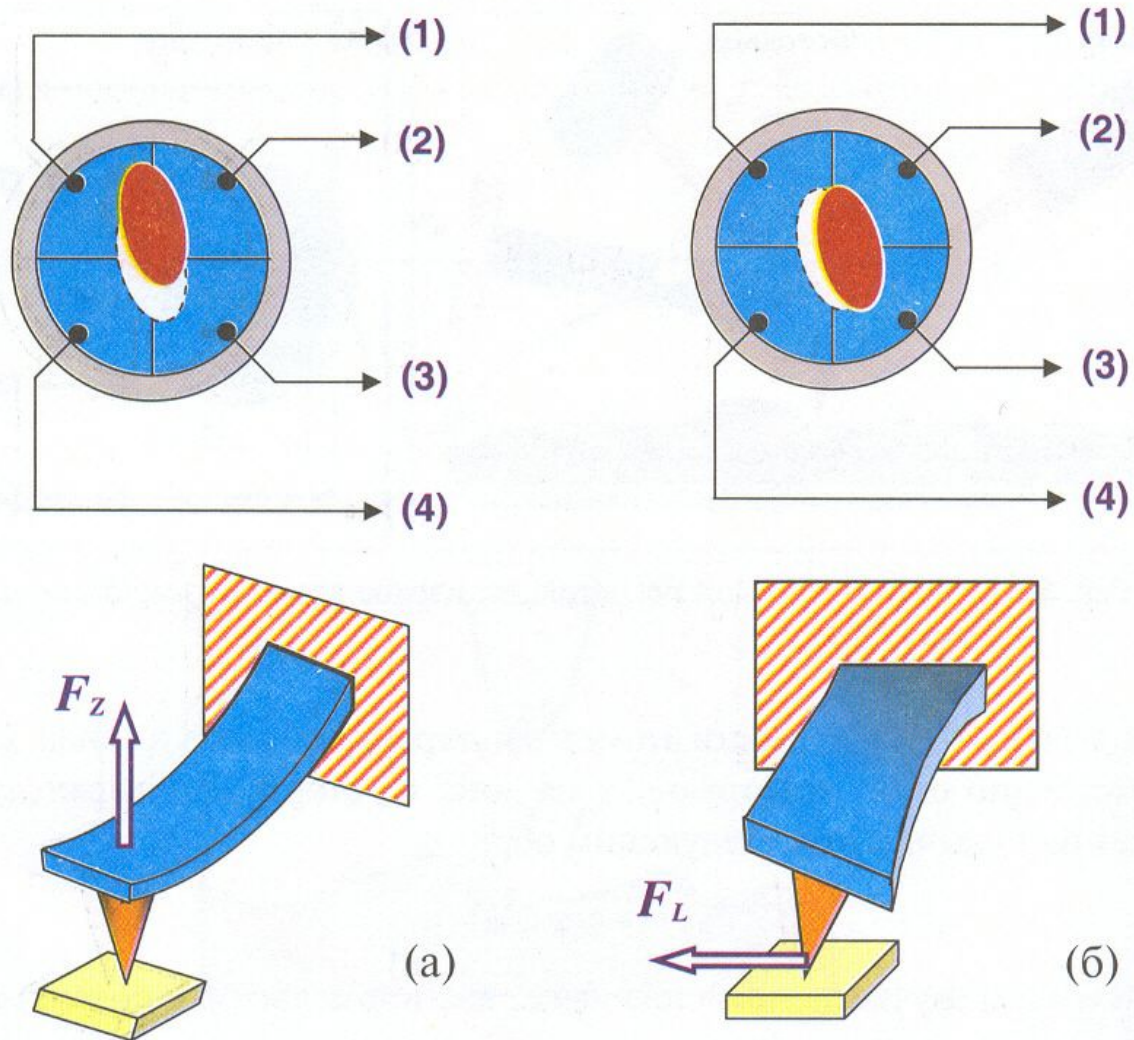
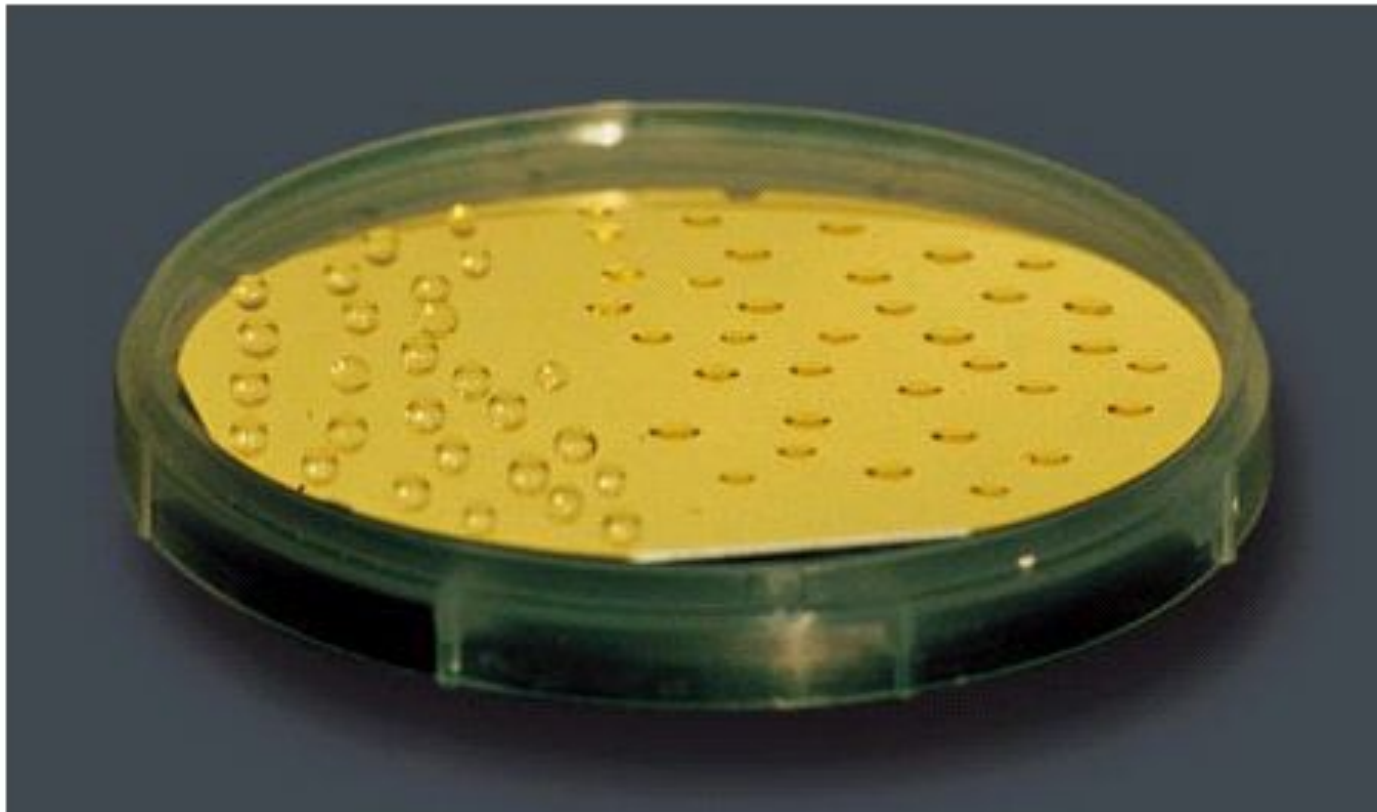


Рис. 64. Соответствие между типом изгибных деформаций консоли зондового датчика и изменением положения пятна засветки на фотодиоде.

Основные принципы нанотехнологии

- Предельная миниатюризация,*
- Распределенная структура,*
- Принцип построения системы
«снизу-вверх»,*
- Самоорганизация*





GEORGE W. WHITESIDES

GOLD-COATED SILICON WAFER is often used in studying self-assembled monolayers. In this experiment the left half was covered with a monolayer having a hydrophobic surface, the right half with one presenting a hydrophilic surface. Drops of water flattened on the hydrophilic side but formed round beads that minimized contact with the surface on the hydrophobic side. The behavior shows that the outermost part of the self-assembled monolayer controls the wettability of the surface. The same strategy can be used to control adhesion, friction and corrosion.

*Дисплеи - неотъемлемая часть
современной информационной
эры*

*Катодные трубки появились более
100 лет назад. Есть ли
альтернатива этому древнему
изобретению?*

*Большой объем
Высокий вакуум
Напряжения порядка десятков киловольт*

Мечта о плоской телевизионной панели



Hanging on the wall – a television based on a plasma display.

Мечта о лэптопе

2. Notebook(10-15”)



Гибкие дисплеи - электронная бумага



Fig. 2 EPD fabricated by Plastic Logic.

Table 2 TFT-LCDs on plastic substrates

Company	Display specification	TFT
Sharp ⁸ (2002)	4" reflective color TFT-LCD 85 ppi, 240 x RGB x 240 pixels Aperture ratio 92% PI substrate	a-Si
Samsung Electronics ⁹ (2005)	5" transmissive color TFT-LCD 100 ppi, 400 x RGB x 300 pixels PES substrate Thickness 1.2 mm, weight 22 g	a-Si
Seiko-Epson ¹⁰ (2001)	0.7" QVGA 428 x 328 pixels SUFLA process	poly-Si
Sony ¹¹ (2003)	3.8" reflective color LCD 320 x RGB x 240 pixels PET substrate	poly-Si
Toshiba ¹² (2002)	8.4" SVGA color TFT-LCD Thickness 0.4 mm, weight 20 g	LTPS

Table 3 Flexible AM-OLEDs

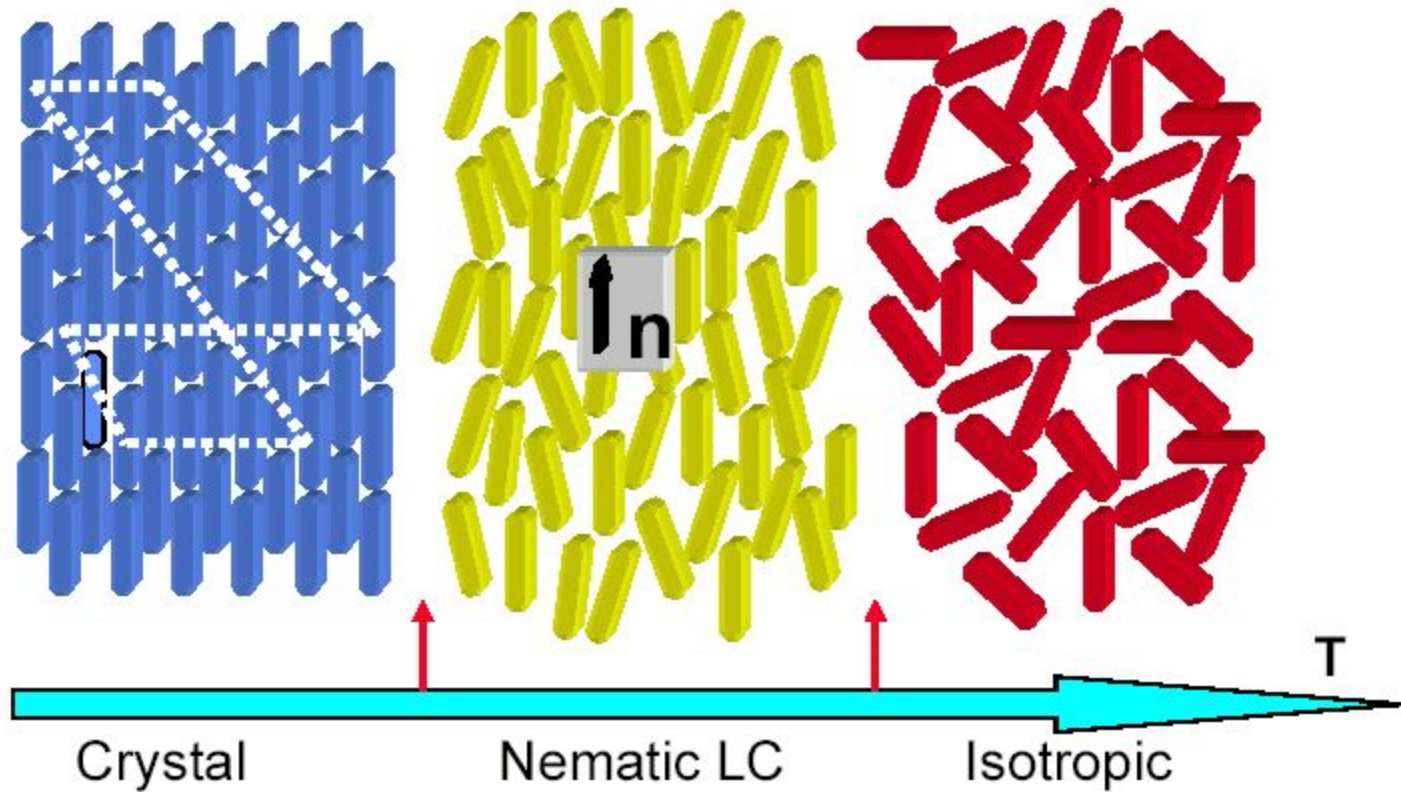
Company	Display specification	TFT
Pioneer ¹³ (2003)	3" color OLED 160 x RGB x 120 pixels 256 gray scale (8 bit)	Passive matrix

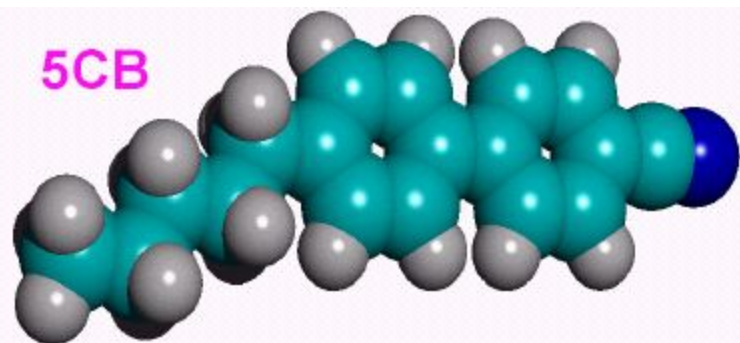
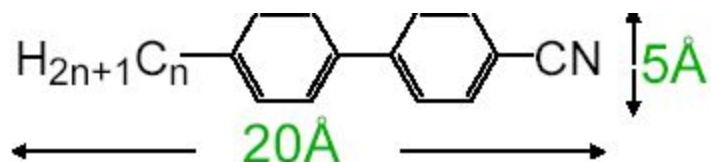
Жидкокристаллические дисплеи

*Плазменные дисплеи
(электролюминисцентные дисплеи)*

Field - emission display

Анизотропные жидкости





ρ :	1.0220 g/cm ³ , T=24.0 °C
Δn :	+0.1565, T=30.2 °C
$\Delta\epsilon$:	+11.76, T=30.2 °C

- **Uniaxial; Simple alignment; Good gray scale; Low voltage; Millisecond response time**
- **Mainstream liquid crystal display material**

Display Applications

1. Handheld(0.5-4")



2. Notebook(10-15")



3. Desktop(15-21")



4. 20-40" LCD-TV



5. 60" HDTV

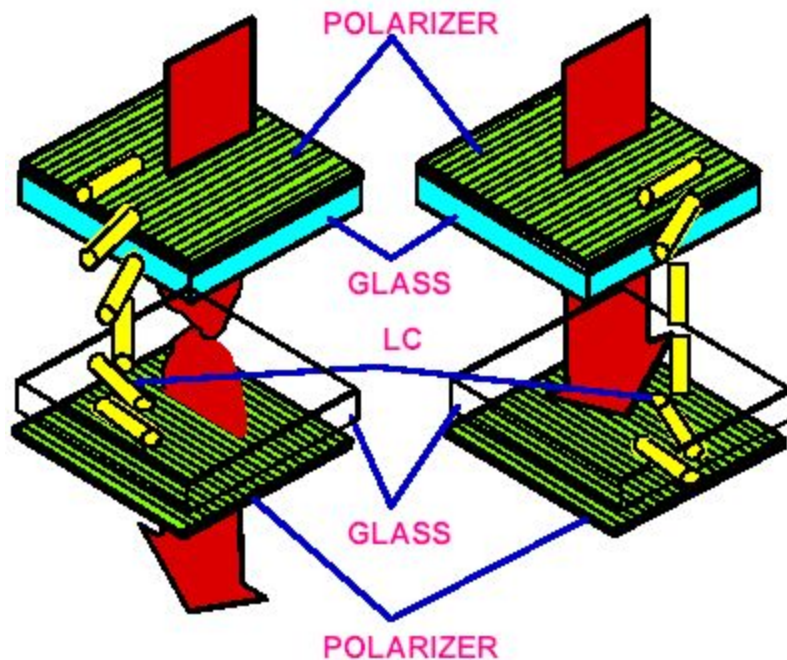


6. Digital Movie (42'x27')



90° Twisted-Nematic Cell

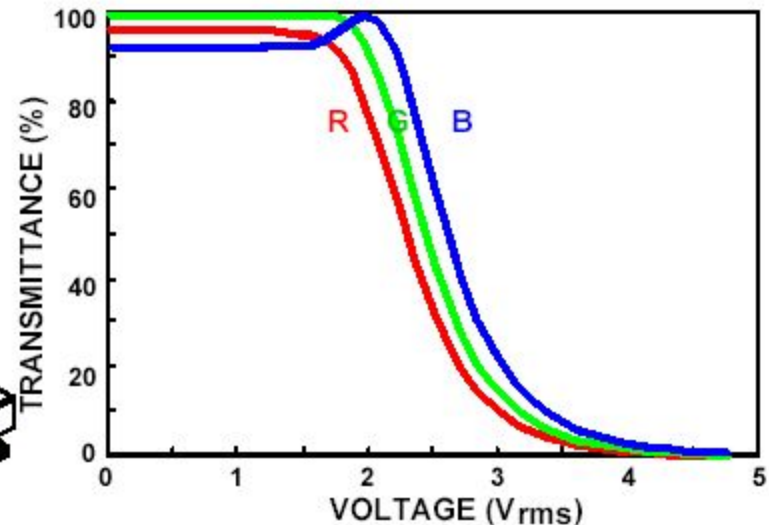
LC Configuration



$V=0$

$V \sim 5V_{rms}$

Electro-Optic Effect



- Broadband $\lambda/2$ plate
- High contrast ratio
- Low operation voltage
- Response: ~ 30 ms
- Narrow view angle

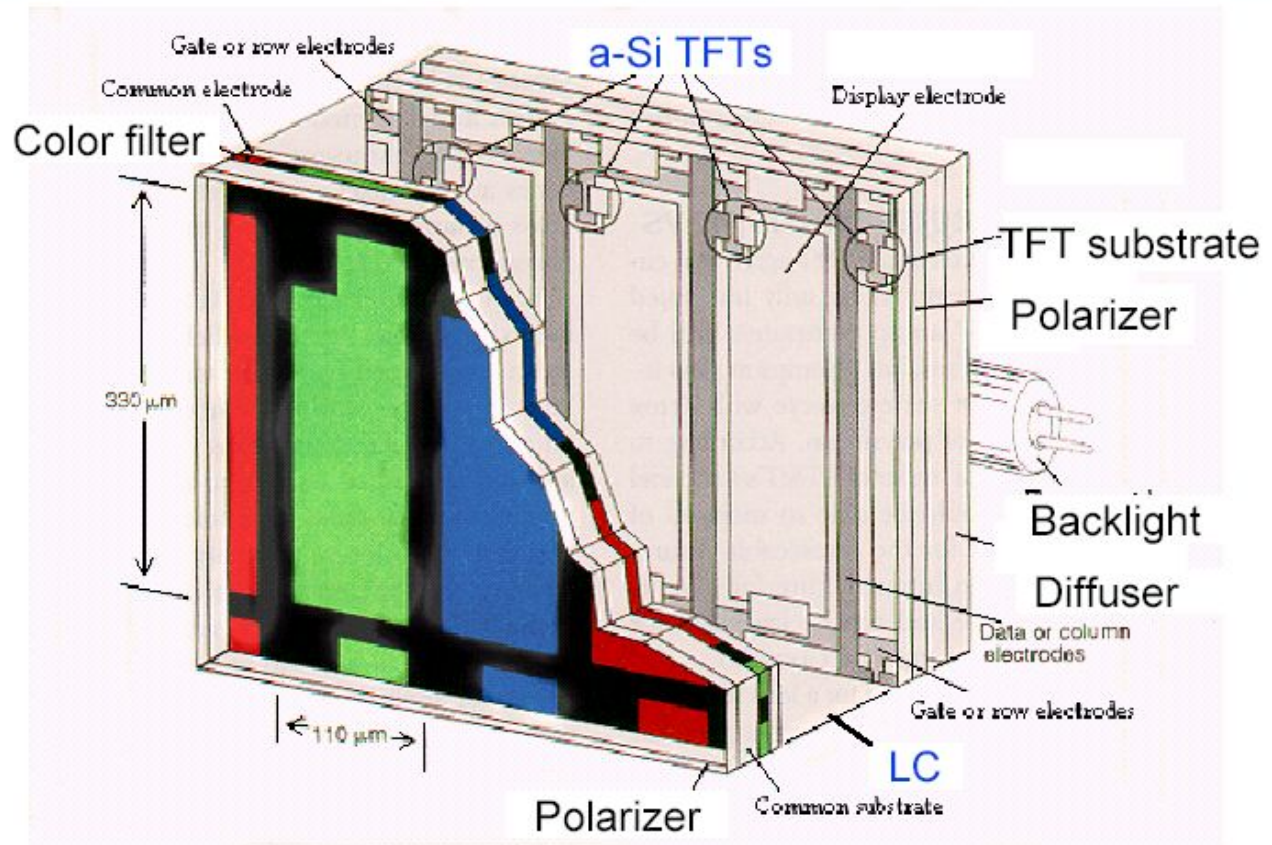
Transmissive TFT-LCD

TFT -
thin film
transistor

Комбинация
ЖК и
активной
матрицы



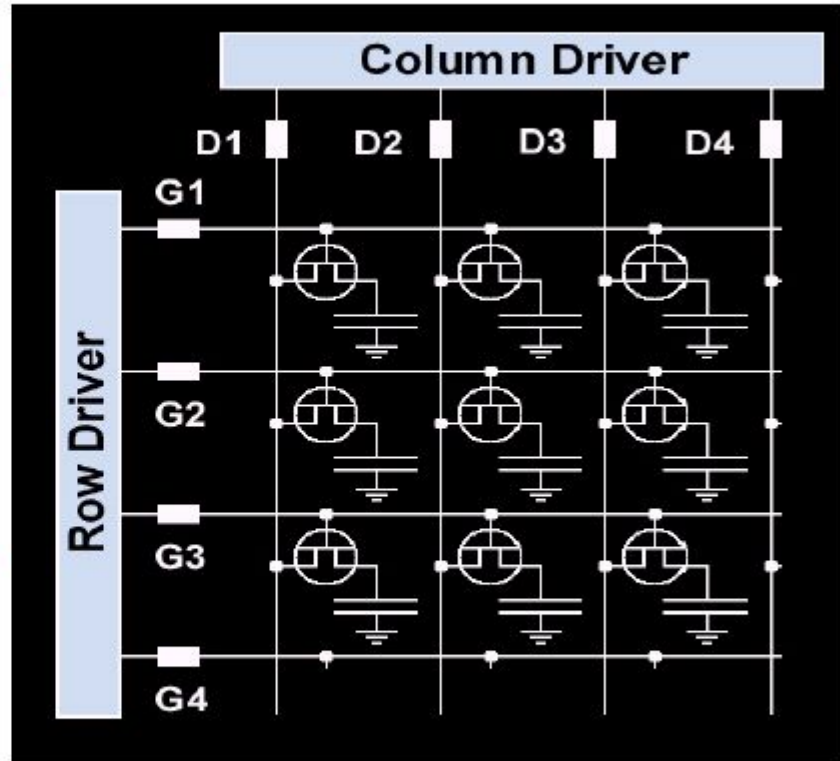
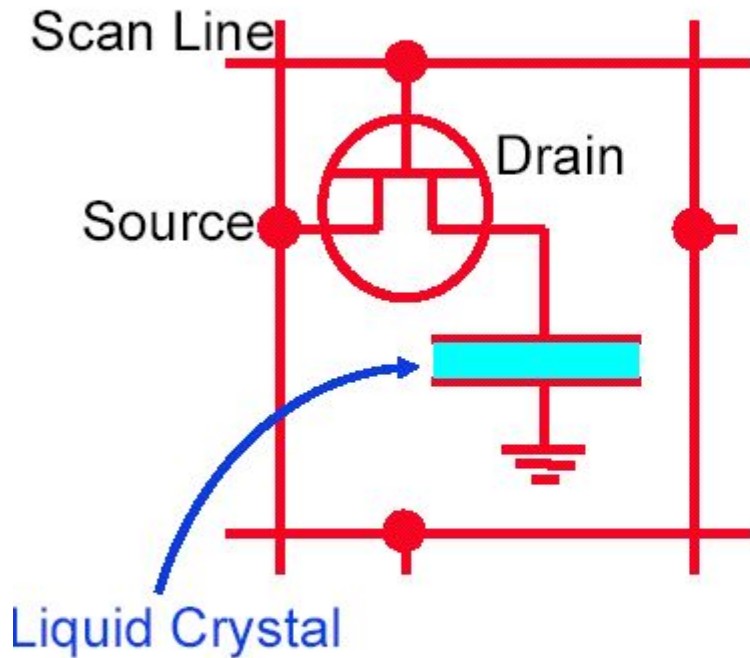
Primary Colors
Red (R) Green (G) Blue (B)
RGB
All together: WHITE



Each pixel is independently driven by a TFT

ЖК дисплей, использующий твист-эффект в нематиках

Активная матрица



Each pixel is independently addressed

Углеродные нанотрубки



Bonds in atoms and molecules

- **Ionic bonds**



Coloumb interaction between oppositely charged ions

- **Covalent bonds**



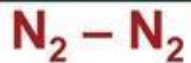
Shared valence electrons
(strength depends on distance)

- **Metallic Bonds**

See HB notes

Delocalised electrons spreading over the entire crystal

- **Van der Waals bond**



Dipole-dipole attraction
(fluctuating dipoles,
1/1000 strength of covalent bonds)

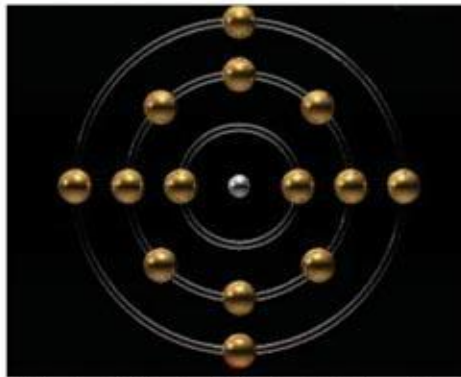


Periodic Table

1 hydrogen 1 H 1.0079	2 helium 2 He 4.0026	3 lithium 3 Li 6.941	4 beryllium 4 Be 9.0122	5 boron 5 B 10.811	6 carbon 6 C 12.011	7 nitrogen 7 N 14.007	8 oxygen 8 O 15.999	9 fluorine 9 F 18.998	10 neon 10 Ne 20.180	11 sodium 11 Na 22.990	12 magnesium 12 Mg 24.305	13 aluminum 13 Al 26.982	14 silicon 14 Si 28.086	15 phosphorus 15 P 30.974	16 sulfur 16 S 32.065	17 chlorine 17 Cl 35.453	18 argon 18 Ar 39.948	
19 potassium 19 K 39.098	20 calcium 20 Ca 40.078	21 scandium 21 Sc 44.956	22 titanium 22 Ti 47.867	23 vanadium 23 V 50.942	24 chromium 24 Cr 51.996	25 manganese 25 Mn 54.938	26 iron 26 Fe 55.845	27 cobalt 27 Co 58.933	28 nickel 28 Ni 58.693	29 copper 29 Cu 63.546	30 zinc 30 Zn 65.39	31 gallium 31 Ga 69.723	32 germanium 32 Ge 72.61	33 arsenic 33 As 74.922	34 selenium 34 Se 78.96	35 bromine 35 Br 79.904	36 krypton 36 Kr 83.80	
37 rubidium 37 Rb 85.468	38 strontium 38 Sr 87.62	39 yttrium 39 Y 88.906	40 zirconium 40 Zr 91.224	41 niobium 41 Nb 92.906	42 molybdenum 42 Mo 95.94	43 technetium 43 Tc [98]	44 ruthenium 44 Ru 101.07	45 rhodium 45 Rh 102.91	46 palladium 46 Pd 106.42	47 silver 47 Ag 107.87	48 cadmium 48 Cd 112.41	49 indium 49 In 114.82	50 tin 50 Sn 118.71	51 antimony 51 Sb 121.76	52 tellurium 52 Te 127.60	53 iodine 53 I 126.90	54 xenon 54 Xe 131.29	
55 caesium 55 Cs 132.91	56 barium 56 Ba 137.33	57-70 lanthanoids *	71 lutetium 71 Lu 174.97	72 hafnium 72 Hf 178.49	73 tantalum 73 Ta 180.95	74 tungsten 74 W 183.84	75 rhenium 75 Re 186.21	76 osmium 76 Os 190.23	77 iridium 77 Ir 192.22	78 platinum 78 Pt 195.08	79 gold 79 Au 196.97	80 mercury 80 Hg 200.59	81 thallium 81 Tl 204.38	82 lead 82 Pb 207.2	83 bismuth 83 Bi 208.98	84 polonium 84 Po [209]	85 astatine 85 At [210]	86 radon 86 Rn [222]
87 francium 87 Fr [223]	88 radium 88 Ra [226]	89-102 actinoids **	103 lawrencium 103 Lr [262]	104 rutherfordium 104 Rf [261]	105 dubnium 105 Db [262]	106 seaborgium 106 Sg [266]	107 bohrium 107 Bh [264]	108 hassium 108 Hs [269]	109 meitnerium 109 Mt [268]	110 unnilium 110 Uun [271]	111 ununium 111 Uuu [272]	112 unbium 112 Uub [277]	113 ununium 113 Uuq [289]	114 flerovium 114 Fl [289]	115 moscovium 115 Mc [288]	116 livermorium 116 Lv [286]	117 tennessine 117 Ts [284]	118 oganeson 118 Og [284]

Key:

element name
atomic number
symbol
atomic weight (mean relative mass)



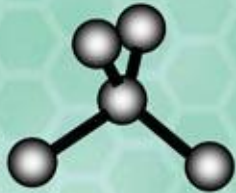
*lanthanoids

**actinoids

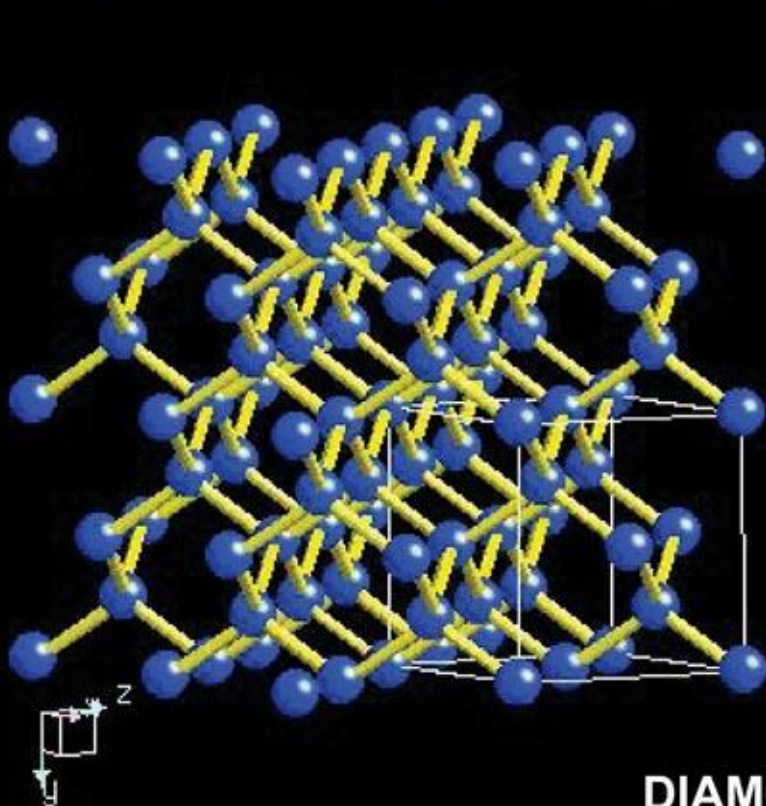
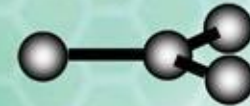
lanthanum 57 La 138.91	cerium 58 Ce 140.12	praseodymium 59 Pr 140.91	neodymium 60 Nd 144.24	promethium 61 Pm [145]	samarium 62 Sm 150.36	europium 63 Eu 151.96	gadolinium 64 Gd 157.25	terbium 65 Tb 158.93	dysprosium 66 Dy 162.50	holmium 67 Ho 164.93	erbium 68 Er 167.26	thulium 69 Tm 168.93	ytterbium 70 Yb 173.04
actinium 89 Ac [227]	thorium 90 Th 232.04	protactinium 91 Pa 231.04	uranium 92 U 238.03	neptunium 93 Np [237]	plutonium 94 Pu [244]	americium 95 Am [243]	curium 96 Cm [247]	berkelium 97 Bk [247]	californium 98 Cf [251]	einsteinium 99 Es [252]	fermium 100 Fm [257]	mendeleevium 101 Md [258]	nobelium 102 No [259]



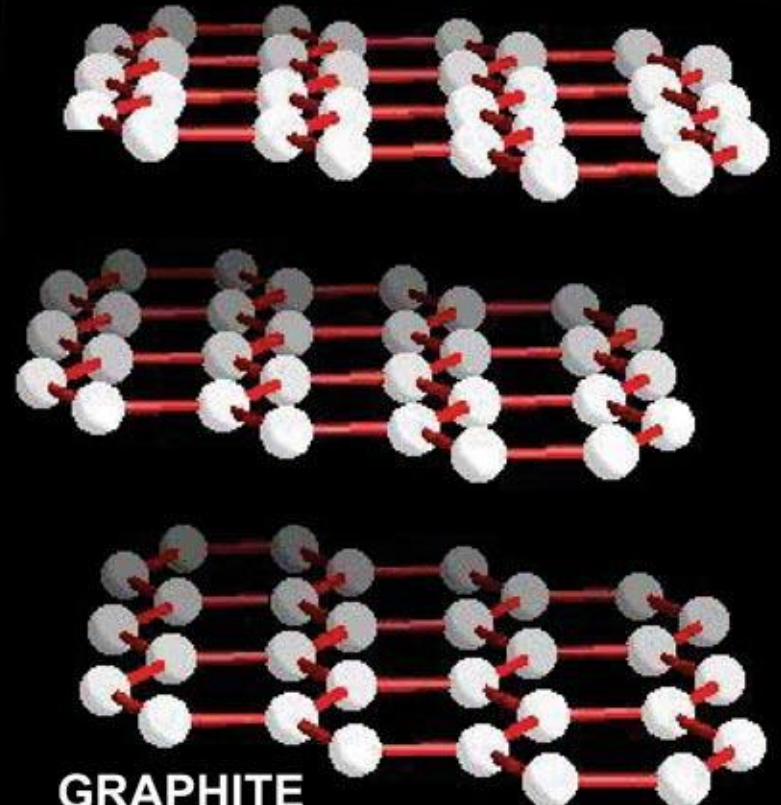
Diamond and graphite



Bond length 1.4 nm
Stacking distance 3.4 nm



DIAMOND



GRAPHITE

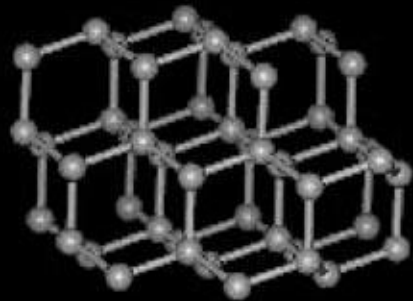


Carbon sooth...?

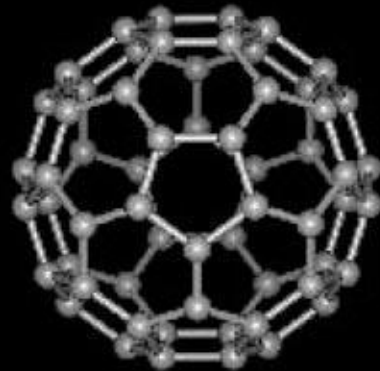




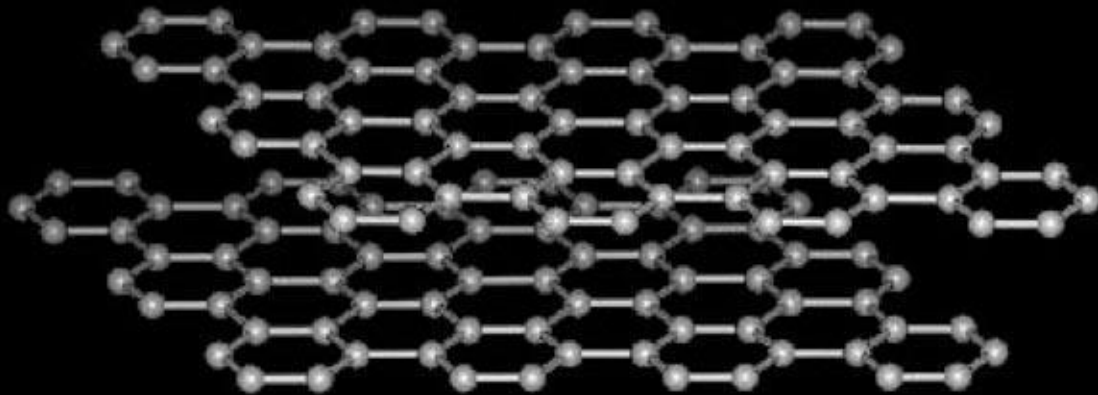
Carbon's allotropic forms



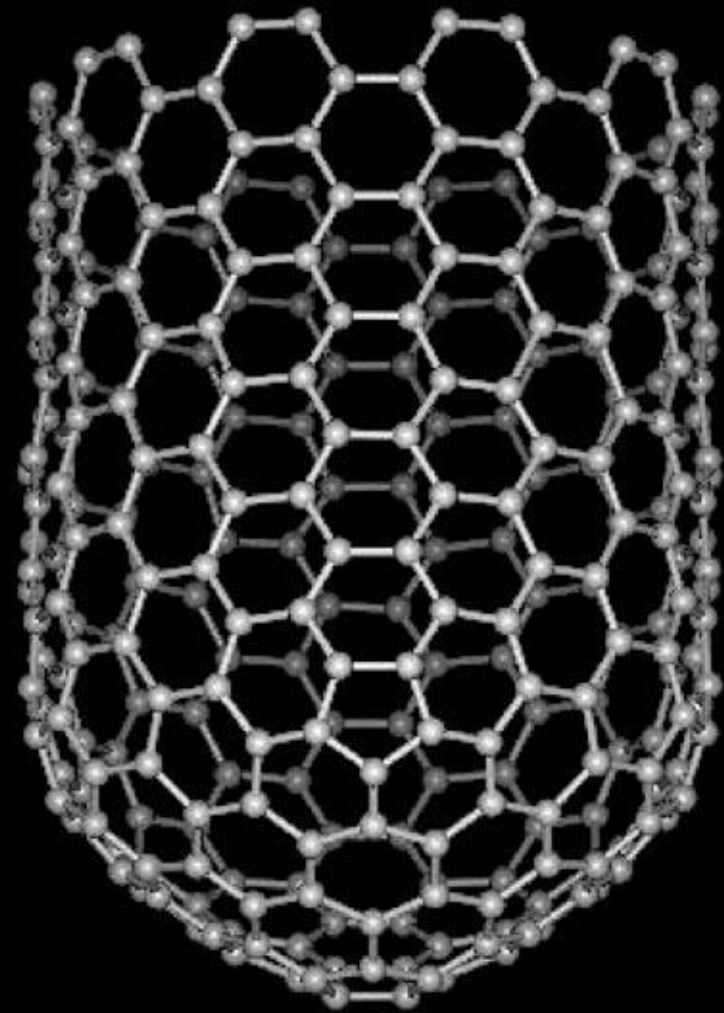
diamond



C_{60}
"buckminsterfullerene"



graphite

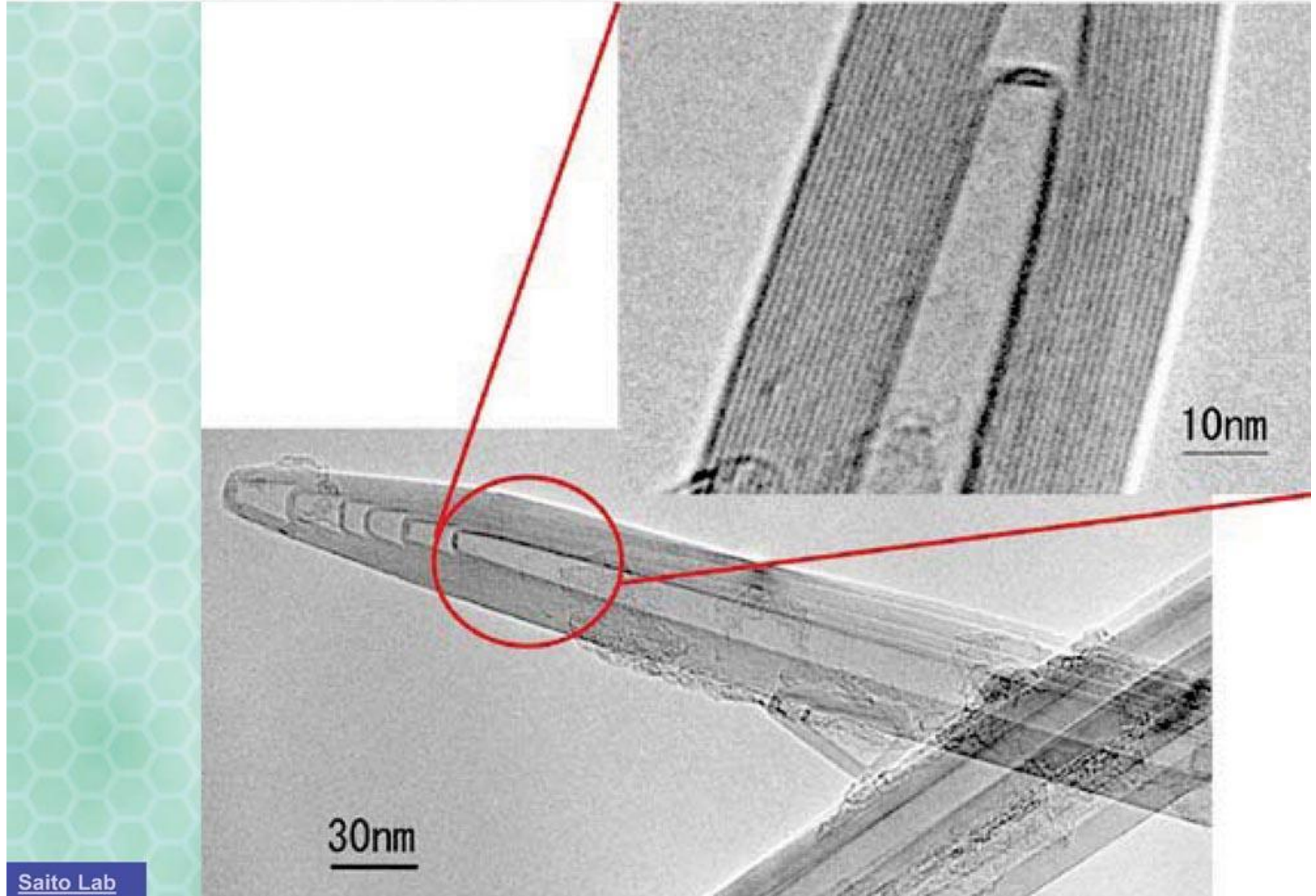


(10,10) tube



Multiwalled nanotubes

Peter Bøggild, MIC 2003

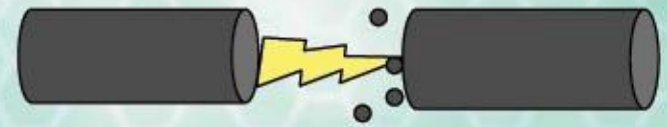




Methods for fabrication of nanotubes

- **Arc discharge**

- Carbon is evaporated by a plasma of Helium . This is ignited by a high current passing through a graphite anode and cathode



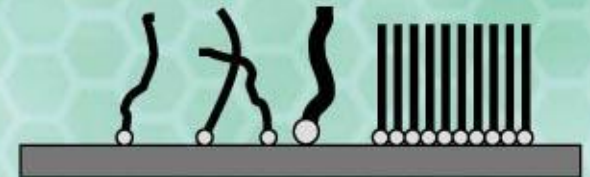
- **Laser evaporation**

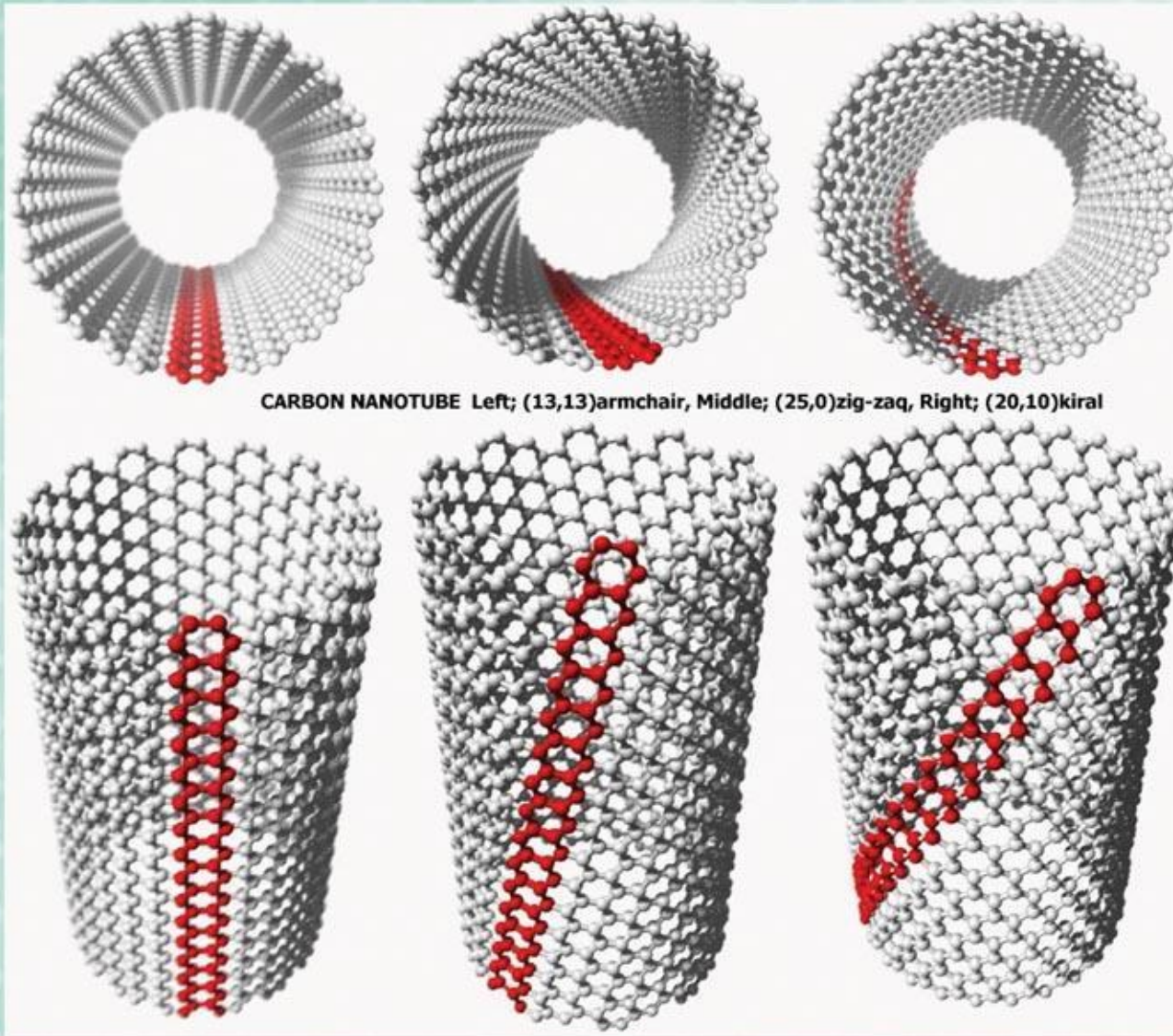
- Direct laser vaporization of transitional metal (e.g. Co-Ni,1%) graphite composite electrode targets is done in helium atmosphere at high temperatures (1200°C).



- **Chemical vapor deposition**

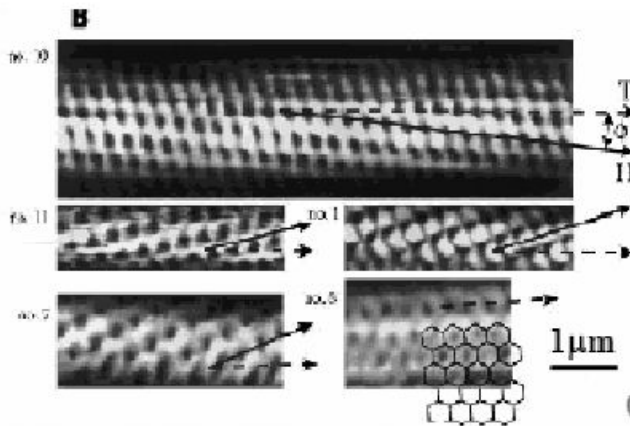
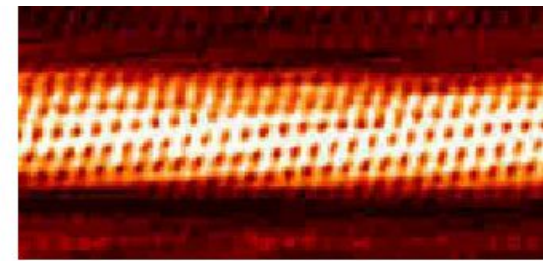
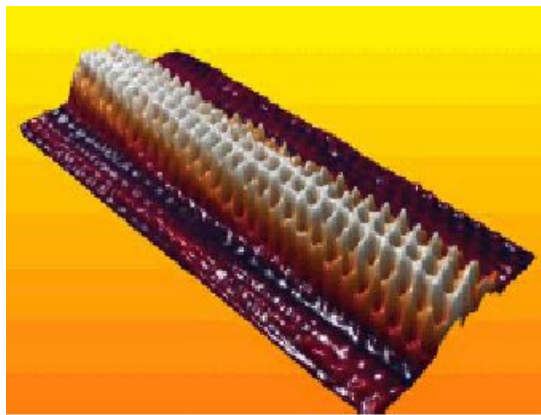
- Organic gas is decomposed (e.g. Methane) in an oven containing catalyst particles, at 600-800C. The diameter and type of catalyst particles determine the nanotube diameter and properties.



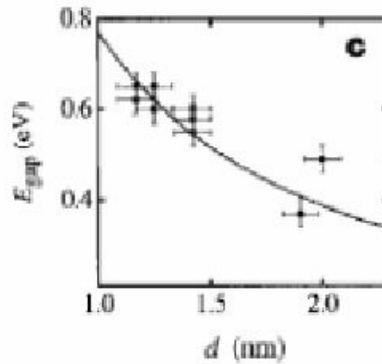
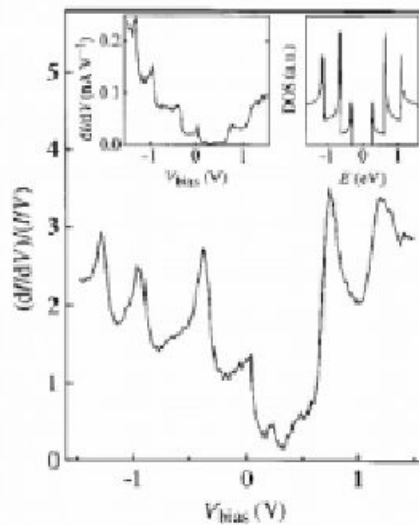


STM/STS

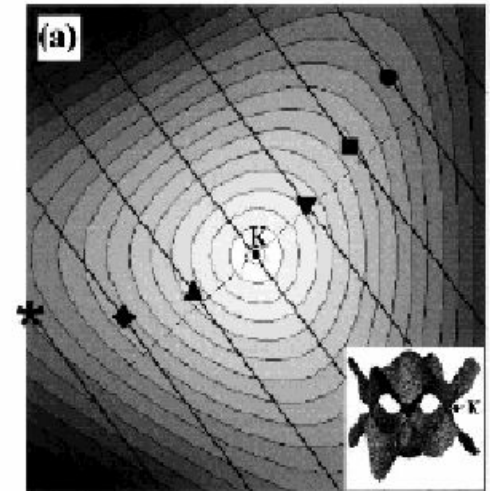
Geometric structure (STM)
and electronic density of
states (STS)



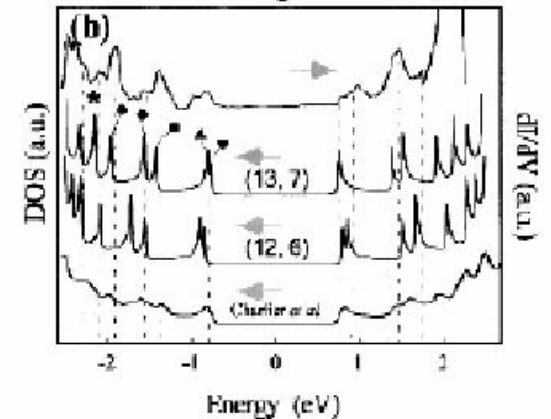
P. Kim et al.,
Phys. Rev. Lett.
82, 1225 (1999)



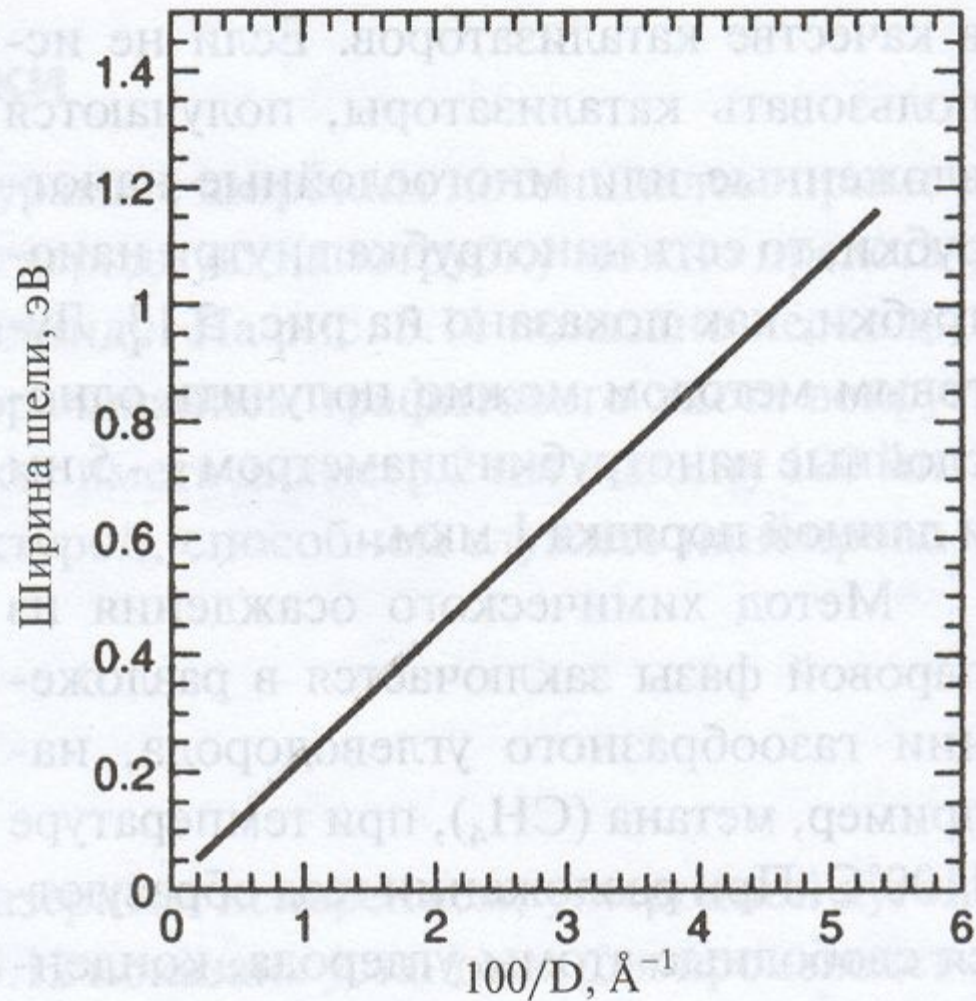
J. W. G. Wildoer et al.,
Nature 391, 59 (1998)



Cutting lines



(13,7) nanotube



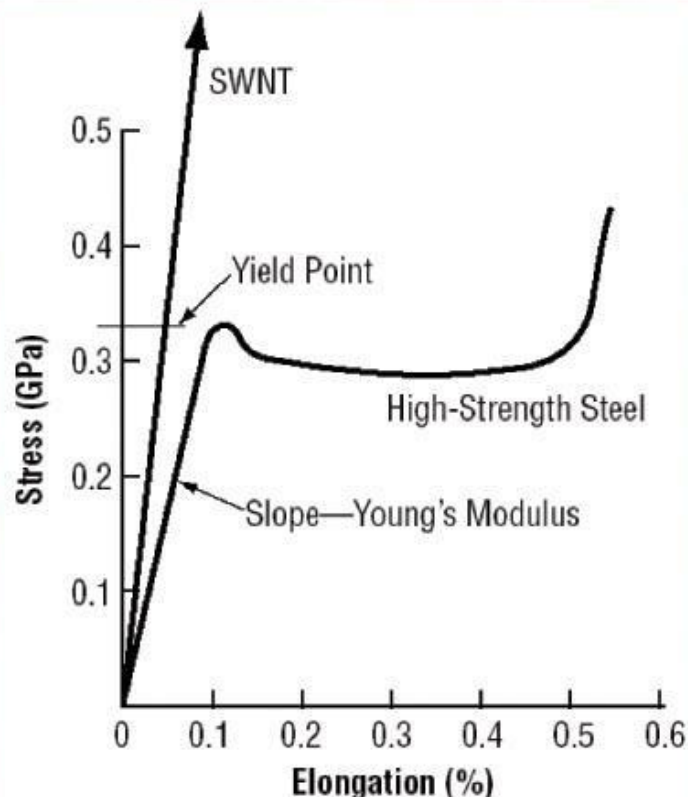
Зависимость ширины запрещенной зоны полупроводящей хиральной нанотрубки от обратного диаметра трубки ($10 \text{ \AA} = 1 \text{ нм}$).

В металлическом состоянии проводимость нанотрубок очень высока. Оценочно они могут пропускать миллиард ампер на квадратный сантиметр. Медный провод выходит из строя при миллионе ампер на квадратный сантиметр из-за того, что джоулев нагрев приводит к плавлению провода. Одной из причин высокой проводимости углеродных трубок является очень малое количество дефектов, вызывающих рассеяние электронов, а следовательно и очень низкое сопротивление. Поэтому большой ток не нагревает трубку так, как он разогревает медный провод. Этому также способствует высокая теплопроводность нанотрубок. Она почти вдвое превышает теплопроводность алмаза, что означает — трубки являются очень хорошими проводниками тепла.



Material	Youngs modulus (Gpa)	Tensile Strength (Gpa)	Density (g/cm ³)
Silicon	47	1 (brittle!)	2.3
Steel	208	0.4 (ductile)	7.8
Carbon Nanotubes	1000 (MWNT), 1300 (SWNT)	30-60* Theory: 150-200	1.3

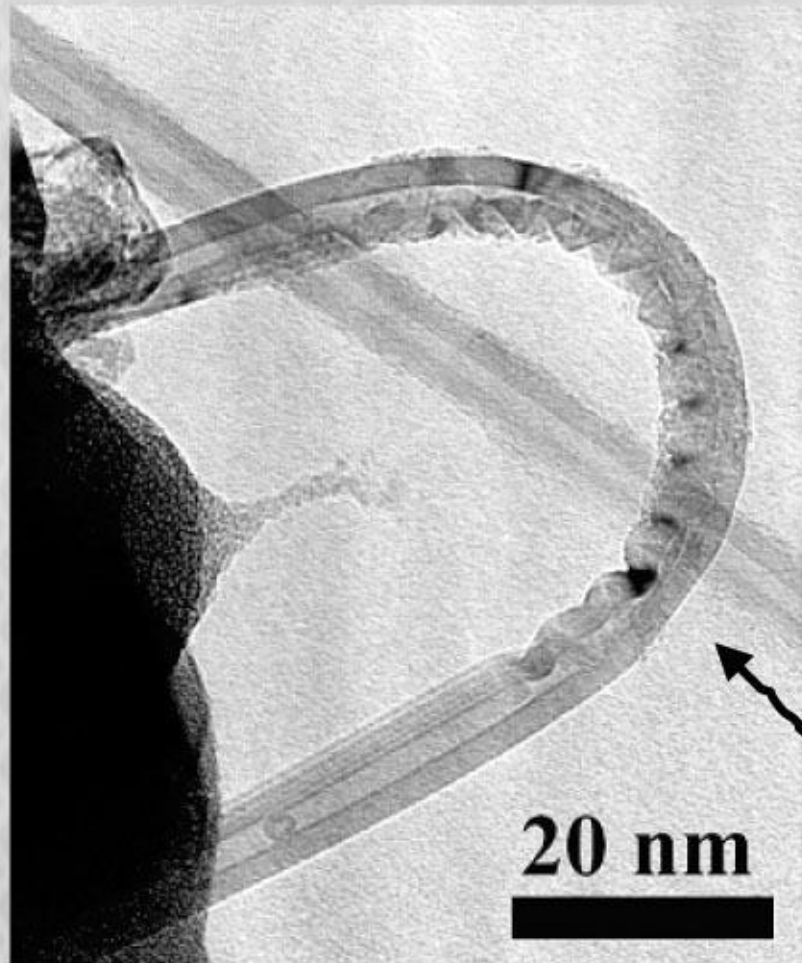
*(brittle at low temp, ductile at high, depend on chirality)



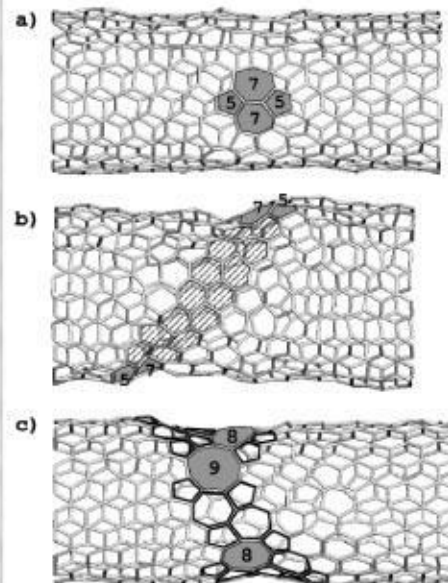
- **Nanotubes 100 times stronger than steel and 6 times lighter**
- **Nanotubes can sustain a large tensile strain:**
 - **5% (SWNT)**
 - **10% (MWNT)**

Brittle and ductile behavior of nanotubes (Nardelli, PRL, 1998)

Deformation of nanotubes

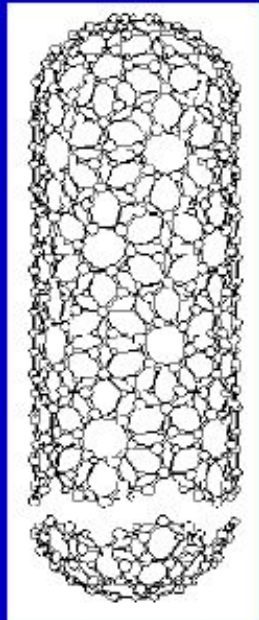


- **Nanotubes can be deform plastically - reversibly**
 - Do not break by bending
 - Deform with little fracturing: stress is compensated by rearrangement of carbon atoms
 - Full recovery upon release



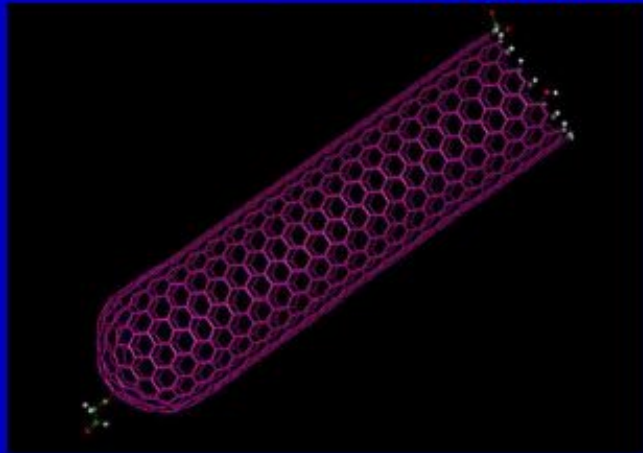
By the way: what happens to the electrical transport???

Области применения



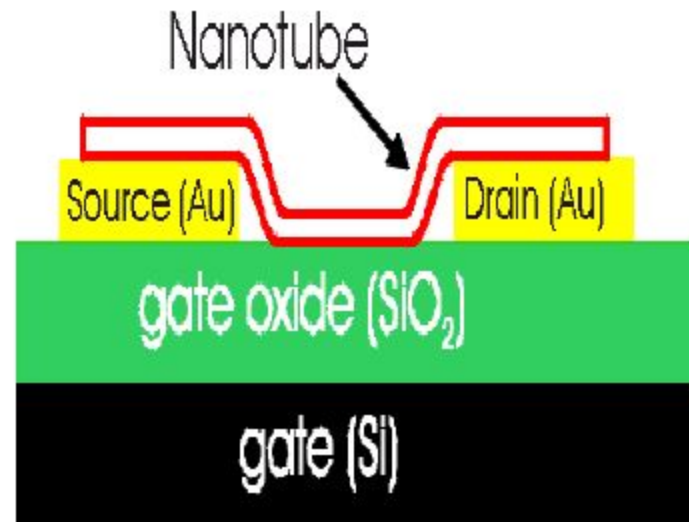
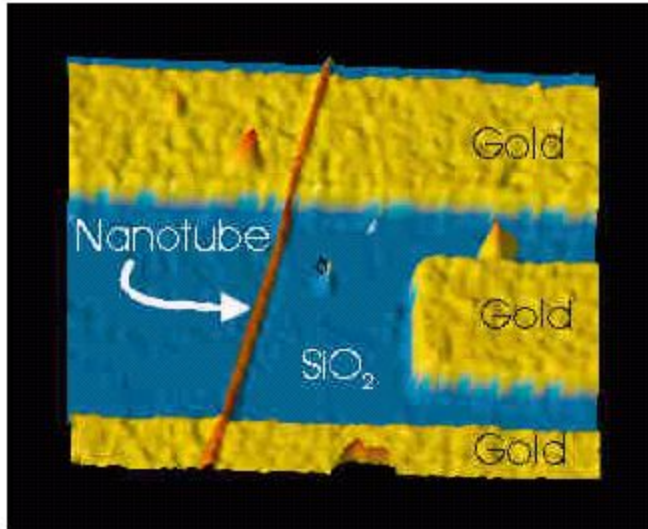
Carbon Nano-tubes are extremely thin (their diameter is about 10,000 times smaller than a human hair), hollow cylinders made of carbon atoms

Nano-tubes, depending on their structure, can be metals or semiconductors. They are also extremely strong materials and have good thermal conductivity. The above **characteristics** have generated strong interest in their possible use in nano-electronic and nano-mechanical devices. For example, they can be used as **nano-wires** or as **active components in electronic devices** such as the field-effect transistor



**Strongest material possible;
only small quantities produced**

Транзистор на базе углеродной нанотрубки



Самые последние достижения

Наноматериал графен – пленка толщиной в атом¹

Профессор Эндрю Гейм и его коллеги из Университета Манчестера (США) совместно с командой доктора К. Новоселова из Черногловки (Россия) впервые в мире сумели получить ткань толщиной в один атом. Новый наноматериал представляет собой «развернутую» нанотрубку. Это пленка из атомов углерода, составляющая собой одну молекулу. Журналисты окрестили новый наноматериал «двумерным», так как он толщиной в один атом углерода.

Новый материал назвали графеном (graphene). Профессору Гейму впервые удалось отделить атомарный слой от кристалла графита. При этом отделённые атомы сохранили связь друг с другом, образовав «заплатку» из ткани толщиной в один атом. Исследователи назвали новый материал двумерным фуллереном. Графен стабилен, очень гибок, прочен и проводит электричество (рис. 1.1).

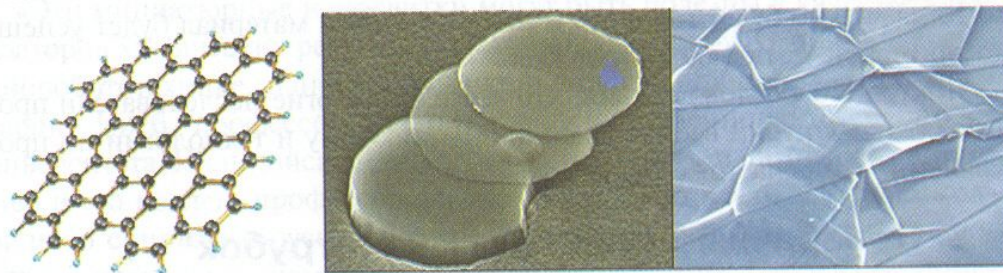


Рис. 1.1. Графеновая пленка – симуляция и микрофотография

При такой толщине поперечник кусочка «ткани» в десять микрон выглядит огромным, но учёные говорят, что нет никаких принципиальных ограничений для создания таких тканей размером в сантиметры.

Исследователи сосредоточились на исследовании электрических свойств нового материала. С помощью графена ученые создали полевой транзистор, который работал при комнатной температуре в обыч-

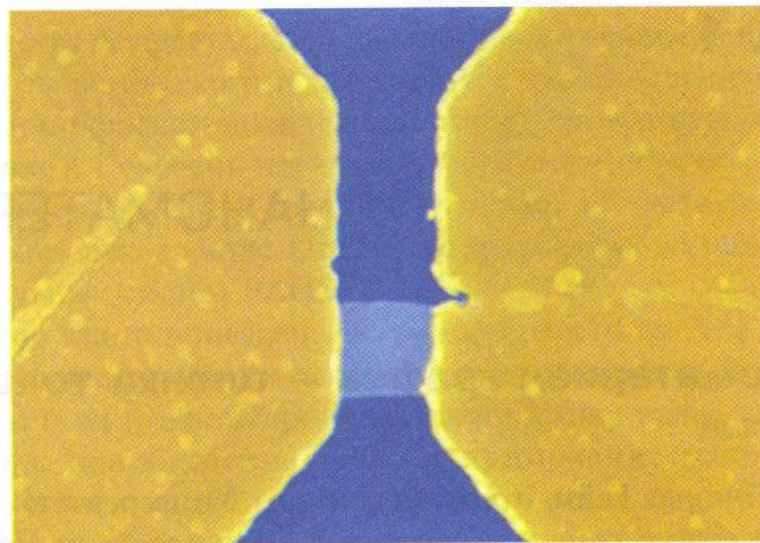


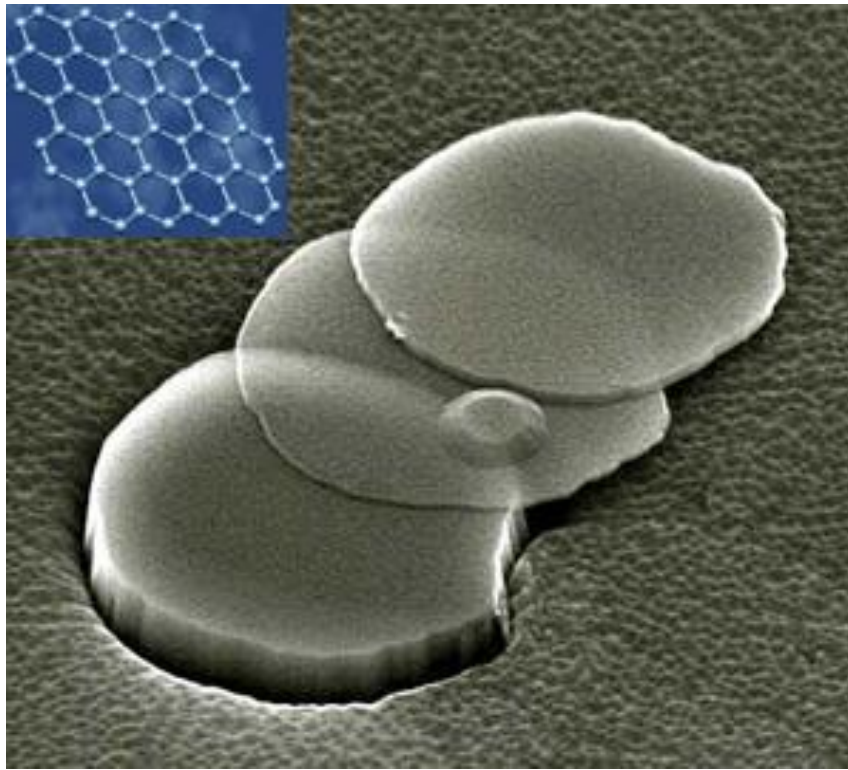
Рис. 1.2. Графеновый транзистор

ных условиях (рис. 1.2). Было также установлено, что электроны в транзисторе могут перемещаться на субмикронные дистанции без рассеивания, что очень важно для применения графена в микроэлектронных устройствах.

Авторы работы прочат графену большое будущее в новых материалах, а также — суперкомпьютерах будущего, где размеры логических схем будут уменьшены в миллионы раз.

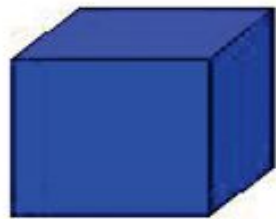
Однако на сегодняшний день ученые могут производить графен кусочками размерами 10×10 мкм. Как сказал Гейм, «когда мы научимся синтезировать графеновую пленку размерами в 10×10 дюймов, то только тогда можно будет говорить о том, что новый материал будет успешно применен в микроэлектронике».

Доктор Новоселов добавил, что «сегодня многие исследователи производят нанотрубки все большей длины, поэтому и технологии по производству графена тоже будут развиваться».

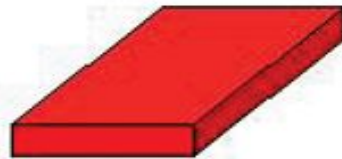


Графен обладает уникальными физическими свойствами. Из-за того, что графен представляет собой двумерную структуру, электроны в нём ведут себя как релятивистские частицы с нулевой массой покоя и движутся со скоростью 10^6 м/с. Несмотря на то, что это значение в 300 раз меньше скорости света в вакууме, оно значительно превышает скорость электронов в обычном проводнике.

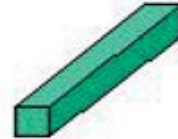
Квантовые ямы, проволоки и точки



3D
(bulk)



2D
(Quantum Well)



1D
(Quantum Wire)



0D
(Quantum Dot)

1. Роль поверхности: $E_{\text{surf}} \sim R^2$; $E_{\text{bulk}} \sim R^3$; $E_{\text{surf}} / E_{\text{bulk}} \sim 1/R$

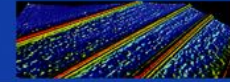
2. Квантовые эффекты (electrons confinement)

Примеры:

*Углеродные нанотрубки -квантовые нити
Парамагнитные примеси (центры окраски) -
- квантовые точки*

Квантовые нити

One-Dimensional Nanostructures - Nanowires



Introduction

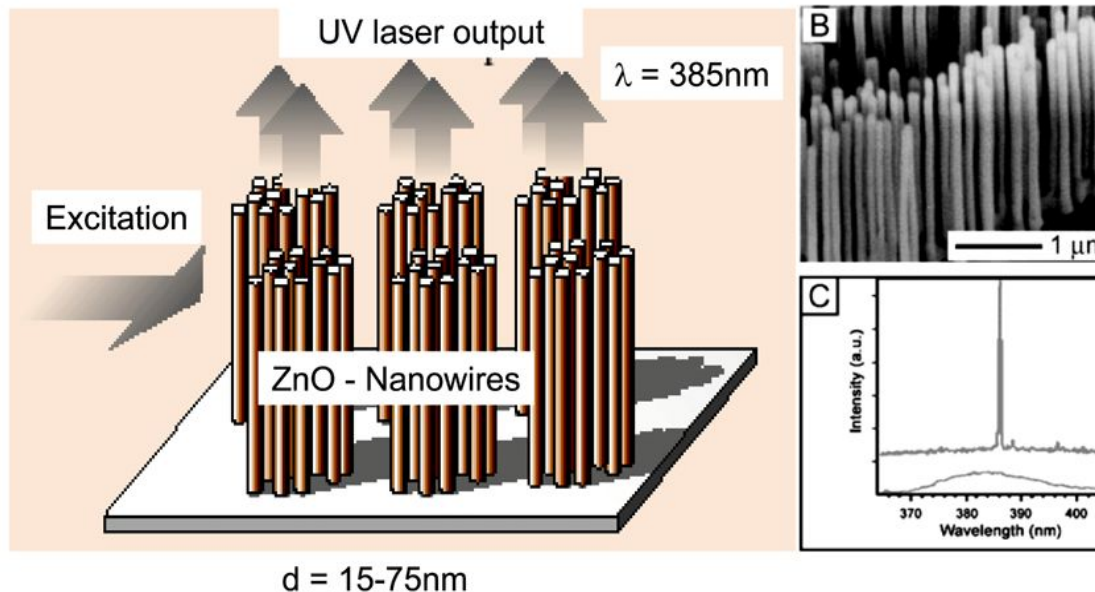
Synthesis

Properties & Applications

Transport Properties

Optical Properties

Quantum confinement effects (Nanolaser):



Квантовые ямы (1)

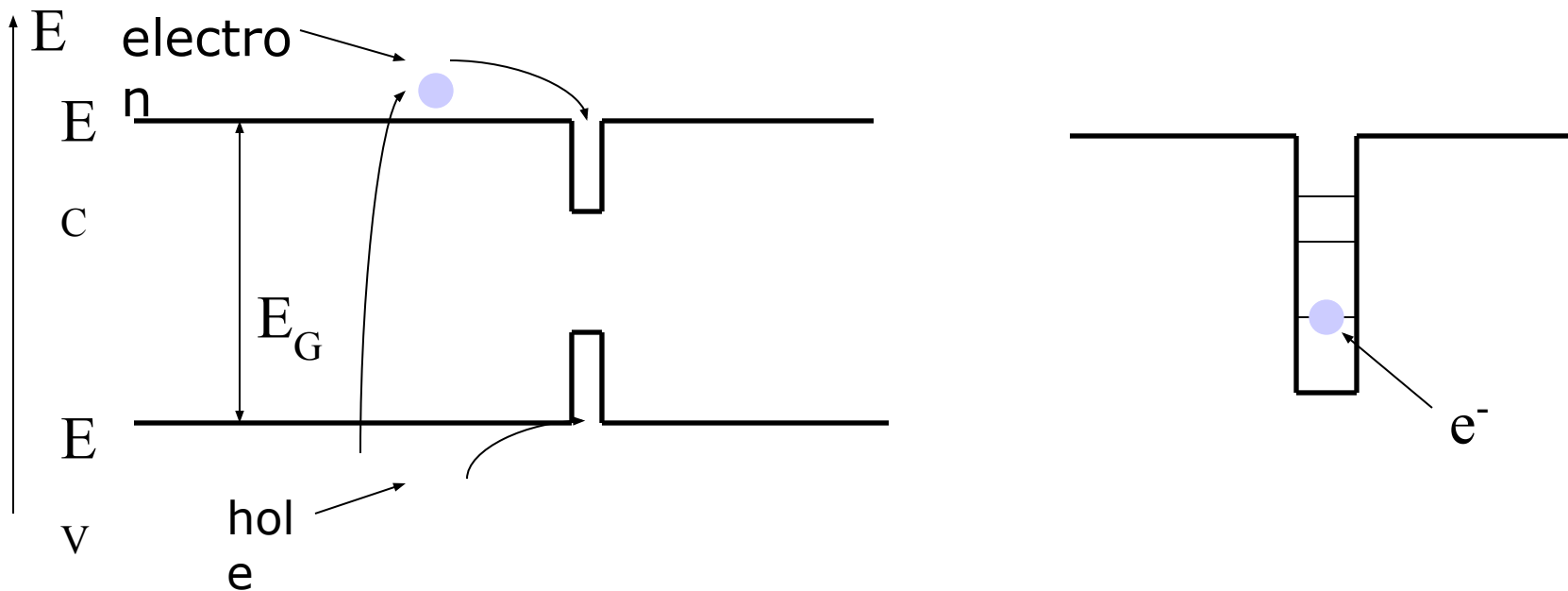
- Квантовые ямы – миниатюрные устройства, которые содержат немного свободных электронов
- Типичные размеры лежат в области от нанометров до нескольких микрометров
- В квантовой яме могут быть от одного до нескольких тысяч электронов
- Размеры и форма ямы и число электронов можно точно контролировать

Квантовые ямы (2)

- Так же, как и в атоме, энергетические уровни в квантовых ямах дискретны
- Структура уровней сходна с уровнями 3D потенциальной ямы
- В квантовой яме свойства могут существенно измениться если удалить даже один электрон
- В отличие от атомов квантовые ямы легко присоединять к электродам и создавать на их основе различные устройства

The Energy Levels of Quantum Dots

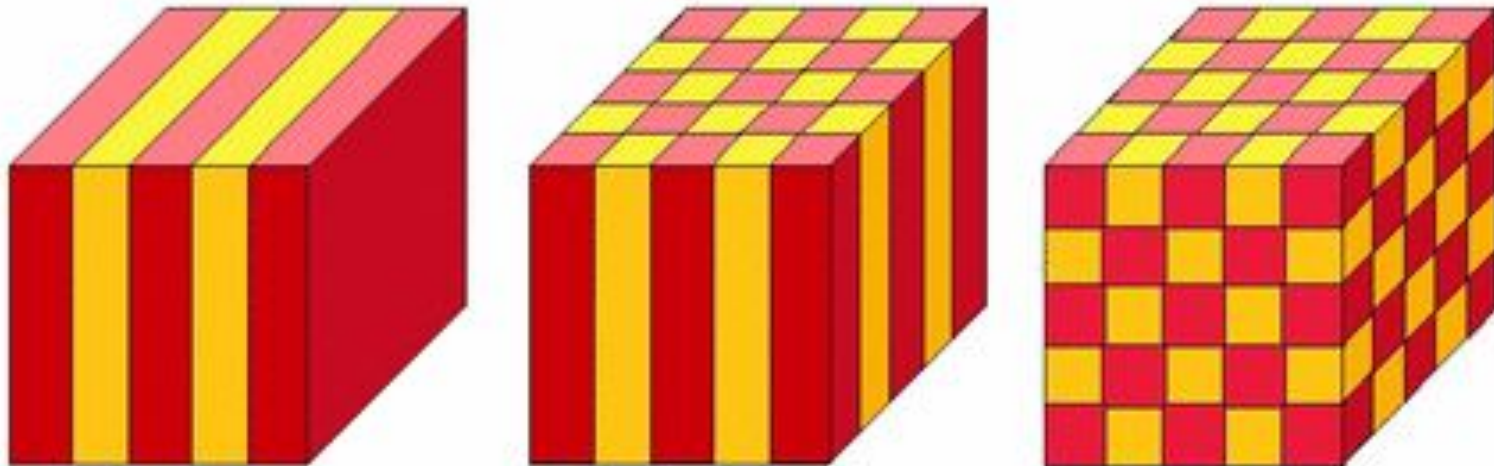
- The Quantum Dot band gap is smaller than the surrounding material, so electrons will tend to “fall” into the dot to reach a lower-energy configuration
- Because the Quantum Dots are so small (20-30 nm), quantum mechanics govern how an electron will behave in the dot



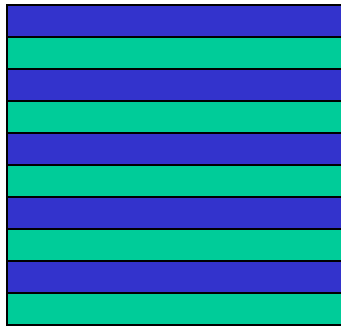
Фотонные кристаллы

Definition:

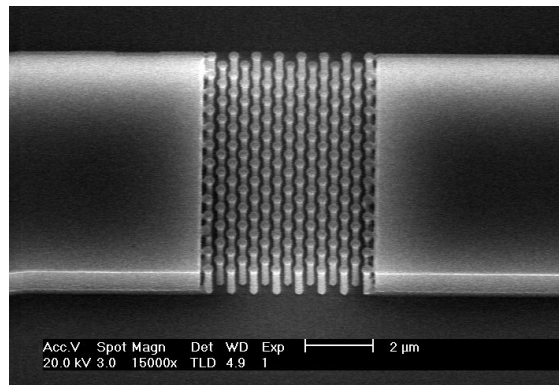
A photonic crystal is a **periodic arrangement** of a **dielectric material** that exhibits **strong interaction** with light



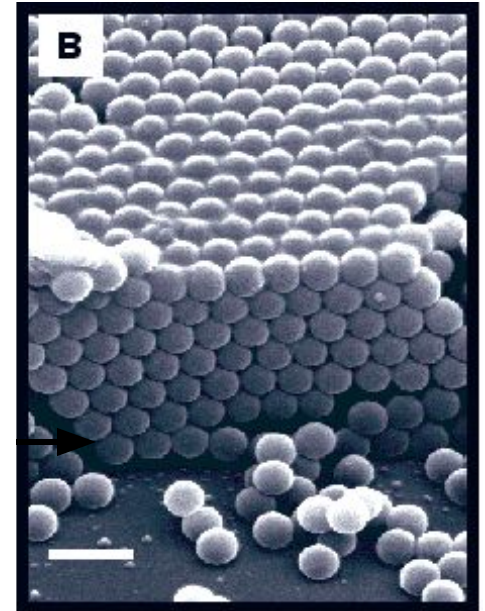
Examples:



1D: Bragg Reflector



2D: Si pillar crystal



3D: colloidal crystal

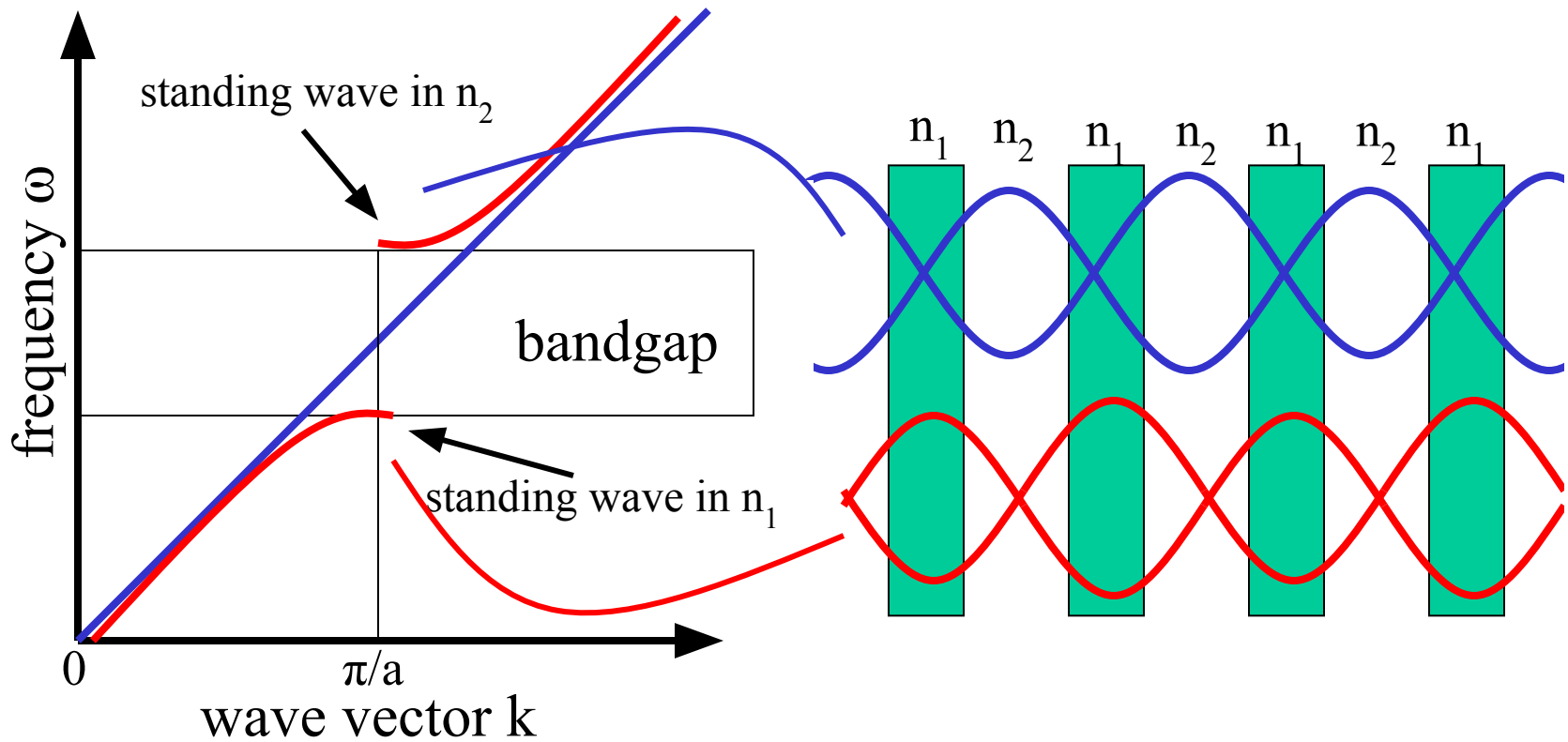
Morpho butterfly



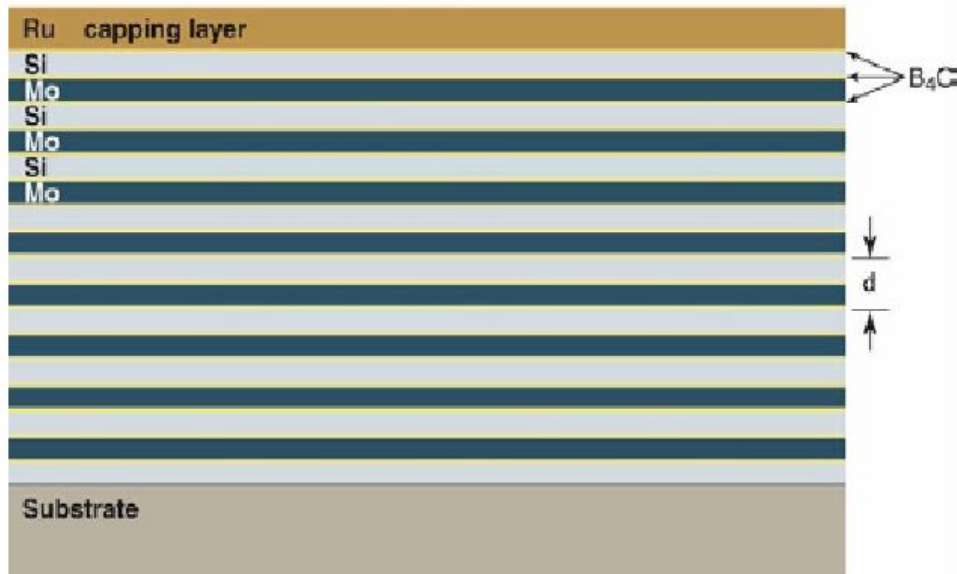
Dispersion relation

n_1 : high index material

n_2 : low index material



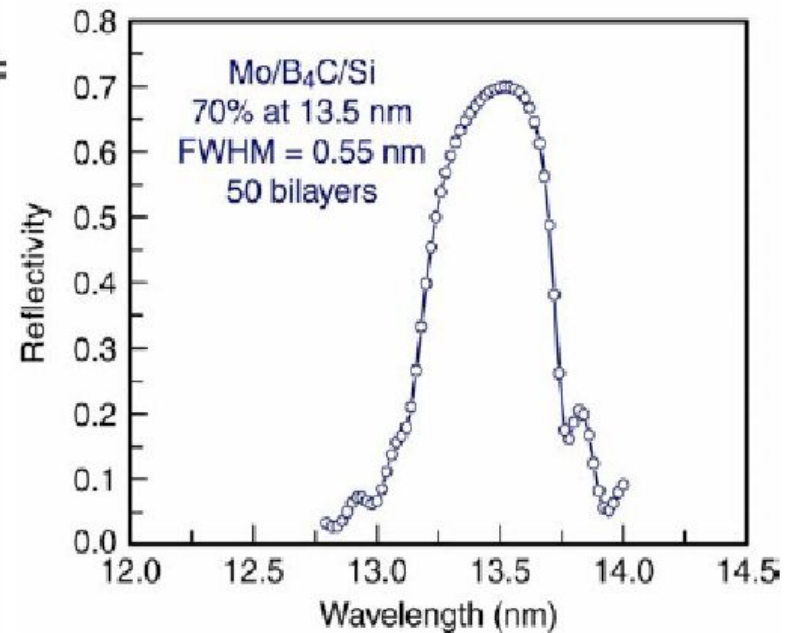
High Reflectivity, Thermally and Environmentally Robust Multilayers Coatings for High Throughput EUV Lithography

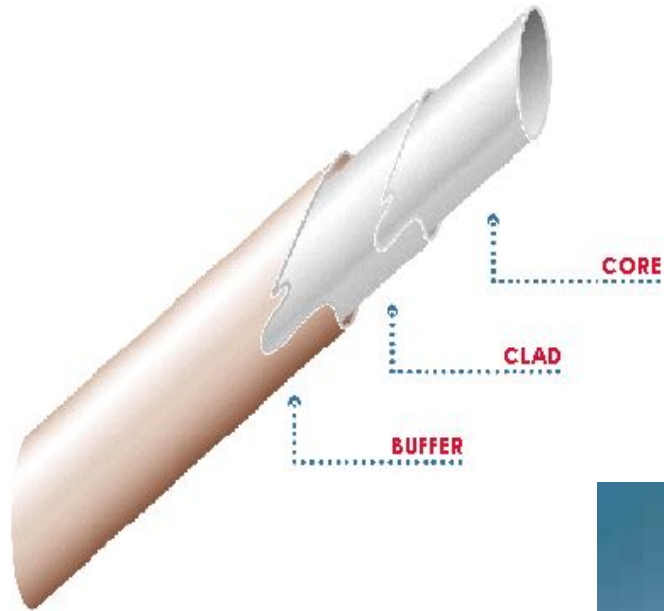


$\lambda = 13.4 \text{ nm}$

Ru (1.70 nm)	} $d = 6.88 \text{ nm}$
Si (4.14 nm)	
B ₄ C (0.25 nm)	
Mo (2.09 nm)	
B ₄ C (0.40 nm)	

$\Gamma = 0.34$



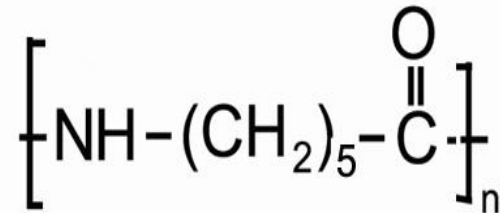


Optical fiber:
long distance communication



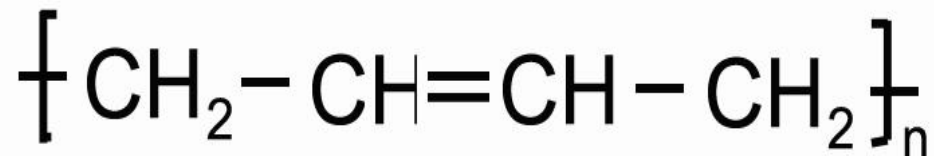
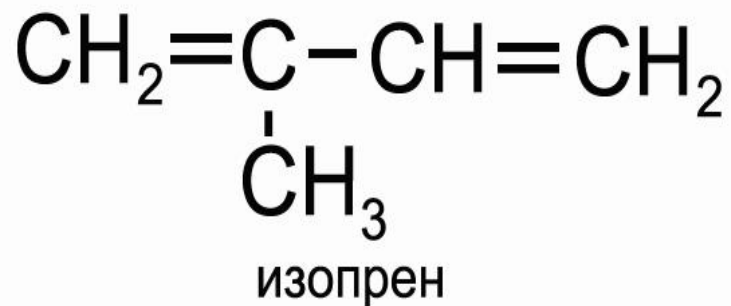
Полимеры и их применение

Синтетическое волокно

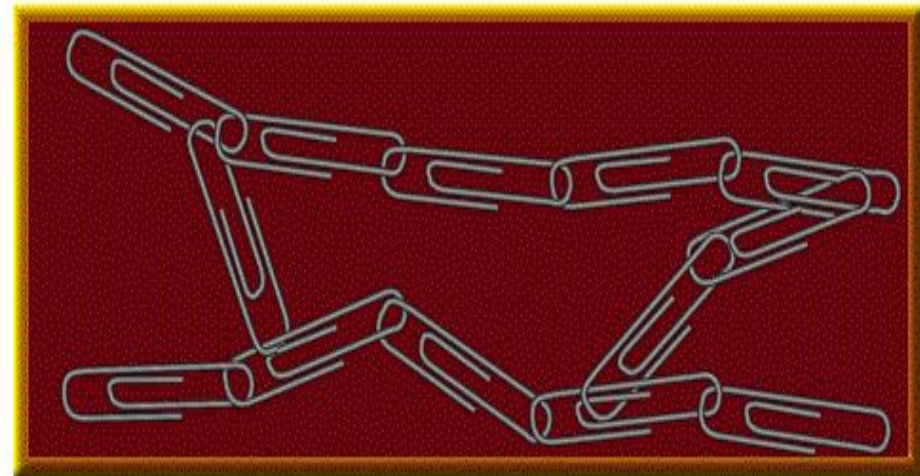
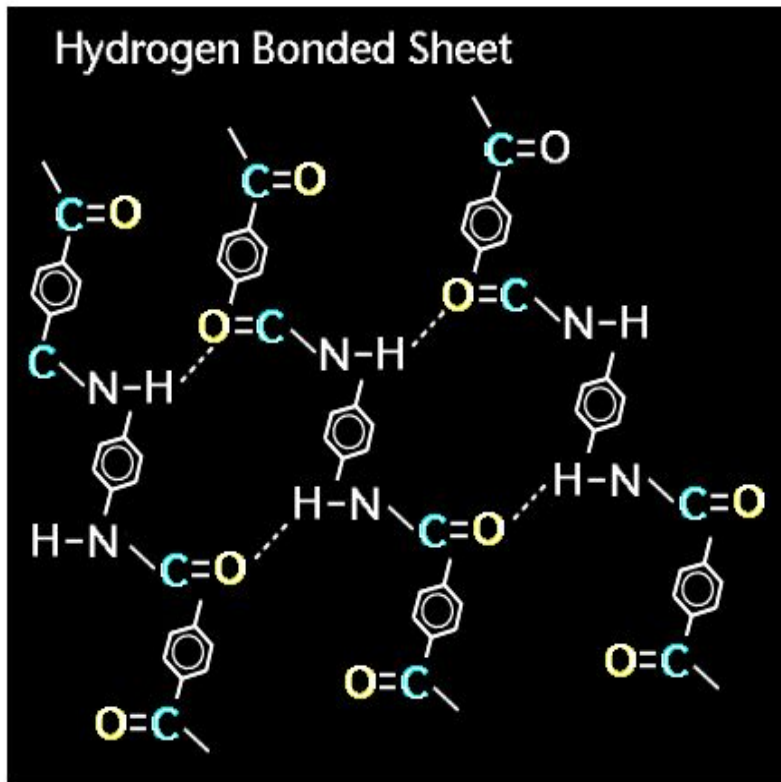


наylon - 6

Синтетические каучуки



Кевлар

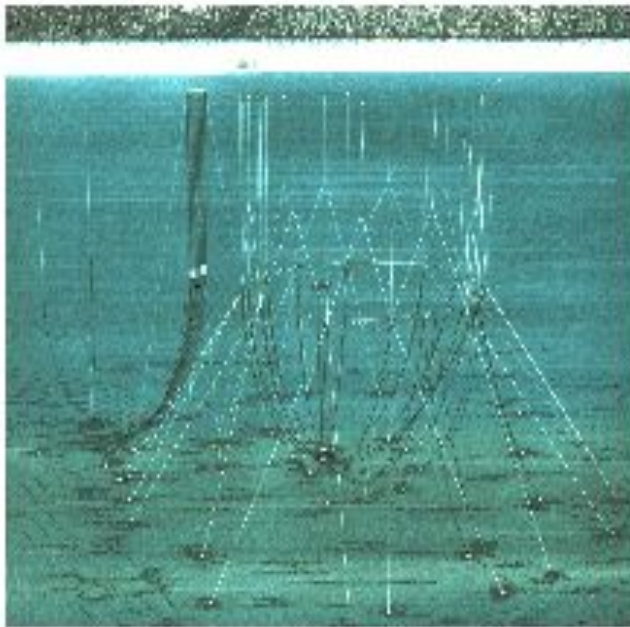


Кевлар



Police wear bulletproof vests made of Kevlar.

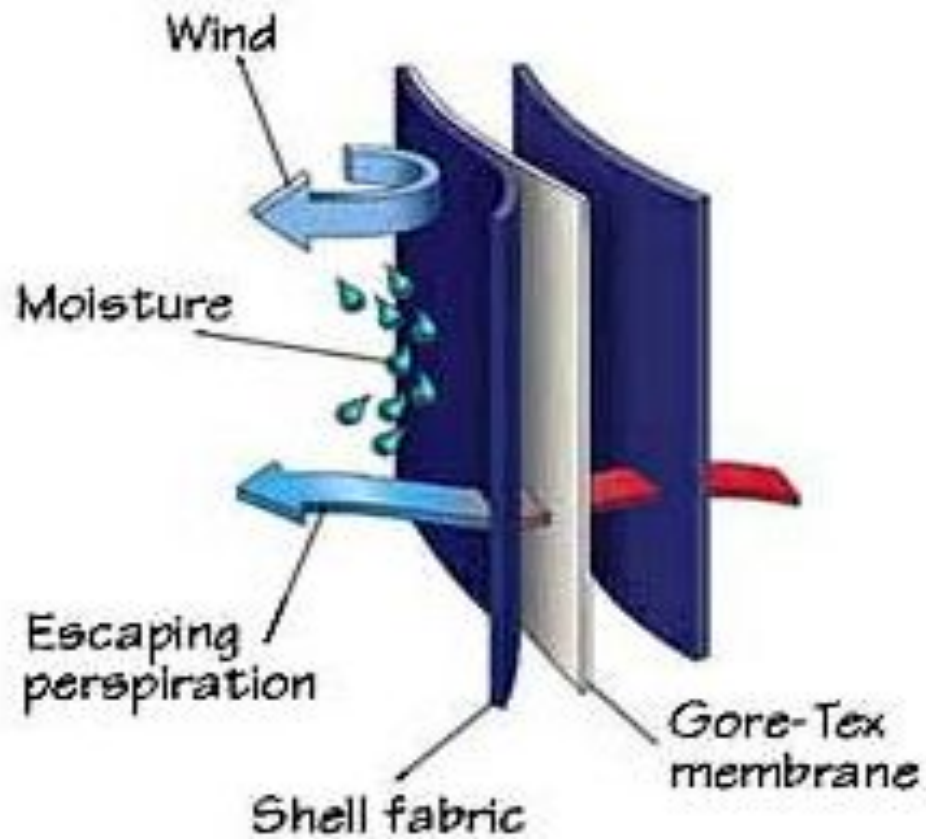
Кевлар



Under water, Kevlar is 20 times stronger than steel.

These Kevlar cables are supporting a sonar facility that the U.S. Navy uses to find out how much noise submarines make.

Одежда для жизни



Рекомендуемая литература

1. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П.- Основы кристаллофизики, М: Наука, 1976.
2. Современная кристаллография, под ред. Б.К.Вайнштейна, т.1-4, М.: Наука, 1979.
3. Блистанов А.А. - Кристаллы квантовой и нелинейной оптики, М: Из-во МИСИС, 2000.
4. Ч. Киттель - Введение в физику твердого тела, - М.: Наука, 1978.
5. П. де Жен - Физика жидких кристаллов, М.: Мир, 1977.
6. М.Борн, Э.Вольф - Основы оптики, М.: Наука, 1973.
7. Блинов Л.М. - Жидкие кристаллы, структура и свойства, М: URSS, 2012.
8. М. Клеман, О.Д. Лаврентович - Основы физики частично упорядоченных сред, М.: Физматлит, 2007.
9. Л.В. Тарасов - Основы квантовой механики, М: Высшая школа, 1978.
10. Ч. Пул, Ф.Оуэнс - Нанотехнологии, М.: Техносфера, 2005.
11. В.Миронов - Основы сканирующей зондовой микроскопии, М.: Техносфера, 2005.
12. Мир материалов и технологий: наноматериалы, нанотехнологии, мировые достижения - 2005 год, под ред. П.П. Мальцева, М.: Техносфера, 2006.
13. Мир материалов и технологий: нанотехнологии, наноматериалы, наносистемная техника, мировые достижения – 2008 год, под ред. П.П. Мальцева, М.: Техносфера, 2008.