Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Научно-образовательный центр по нанотехнологиям

межфакультетский курс лекций

«Фундаментальные основы нанотехнологий»

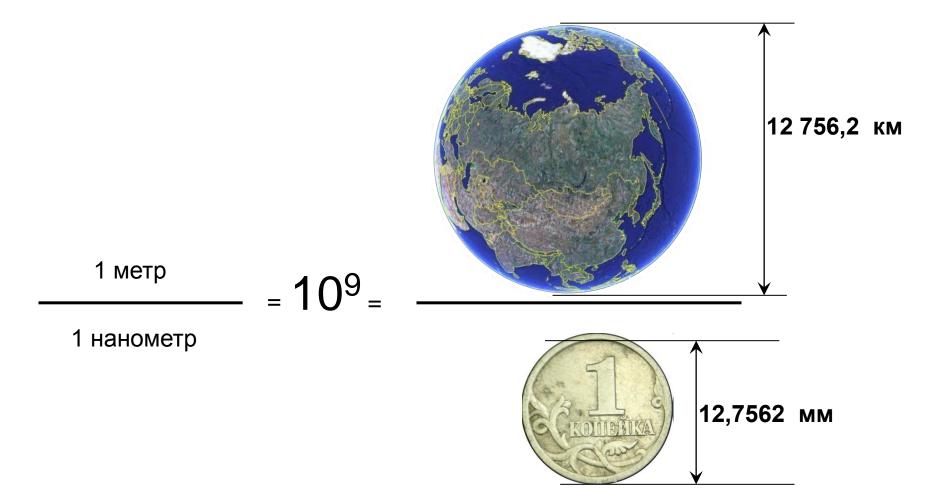
Лекция 1: Особенности физических взаимодействий на наномасштабах.

Образцов Александр Николаевич

профессор, Физический факультет МГУ

«Если при уменьшении объема какого-либо вещества по одной, двум или трем координатам до размеров нанометрового масштаба возникает новое качество, или это качество возникает в композиции из таких объектов, то эти образования следует отнести к наноматериалам, а технологии их получения и дальнейшую работу с ними - к нанотехнологиям.»

Ж.И. Алферов. «Микросистемная техника» №8, 2003, стр. 3 – 13



«Если при уменьшении объема какого-либо вещества по одной, двум или трем координатам до размеров нанометрового масштаба возникает новое качество, или это качество возникает в композиции из таких объектов, то эти образования следует отнести к наноматериалам, а технологии их получения и дальнейшую работу с ними - к нанотехнологиям.»

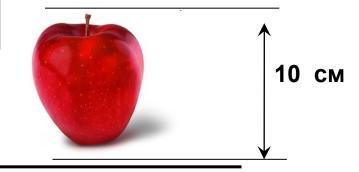
Ж.И. Алферов. «Микросистемная техника» №8, 2003, стр. 3 – 13

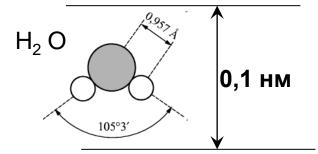
Линейный размер структурных единиц наноматериалов изменяется в пределах примерно от 1 до 1000 атомных (молекулярных) слоев.

Объем – от 10 до 10^6 атомов (молекул).

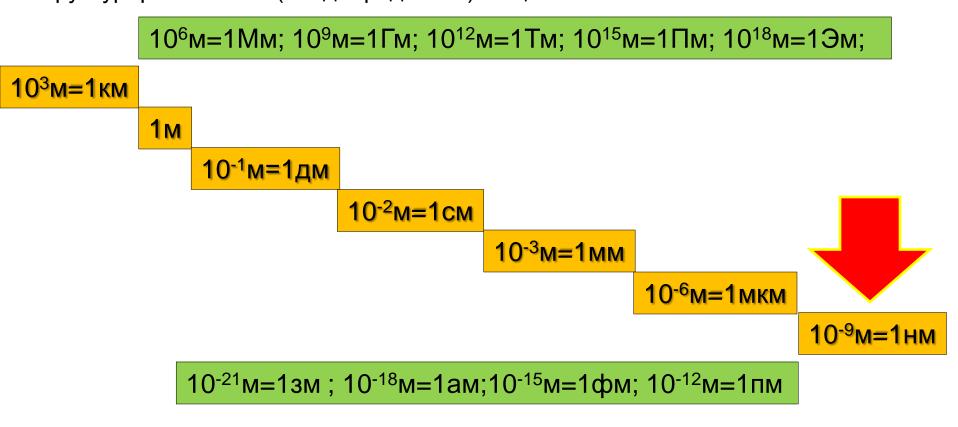
<u> 1 метр</u> = 10⁹ =

1 нанометр

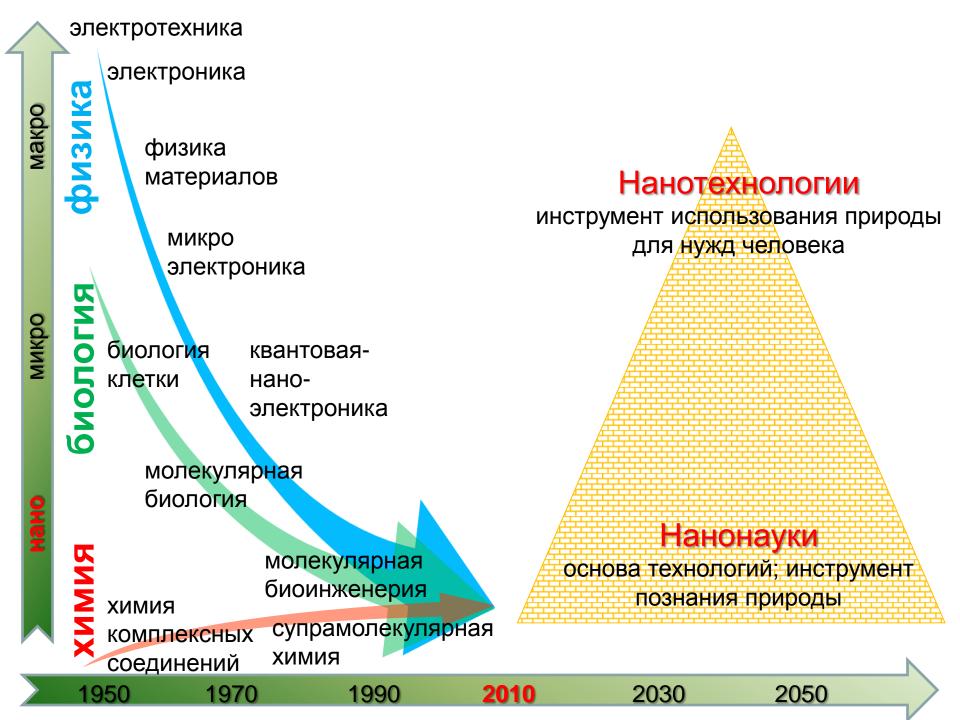




Отнесение к нанотехнологиям (наноматериалам, нанонаукам) отражает пространственный масштаб рассматриваемых явлений, процессов, структурированности (неоднородности) вещества.



Отнесение к нанотехнологиям (наноматериалам, нанонаукам) подразумевает наличие качественных особенностей в закономерностях, определяющих протекание явлений и процессов и отсутствующих при других характерных масштабах.



Особенности физических взаимодействий на наномасштабах



Особенности физических взаимодействий на наномасштабах



Особенности физических взаимодействий на наномасштабах





ЭЛЕКТРОСТАТИКА

ГРАВИТАЦИЯ

$$F = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{R^2}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon}$$

$$\varepsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12} \frac{K \pi^2}{H \cdot M^2}$$

$$F_E = q_2 E$$

$$E = k \cdot \frac{q_1}{R^2}$$

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{R^2}$$

$$G = -6.673 \times 10^{-11} \frac{M^3}{\kappa c \cdot c^2}$$

$$F_T = mg$$

$$g = G \frac{M_3}{R_3^2} = 9.8 \frac{M}{c^2}$$

Роль объема и поверхности в физических свойствах наноразмерных объектов.

$$F_T=mg$$
 $=mg$ $=10\,\mathrm{hm}=10^{-8}\,\mathrm{m}$ $V=a^3=10^{-24}\,\mathrm{m}^3$ $m=\rho V=7874\,\mathrm{kr/m}^3$ $=7,874\times10^{-21}\,\mathrm{kr}$

$$F_T \approx 8 \times 10^{-20} H$$

$$F_E = q_2 E$$

$$F_F = q_2 E$$
 $q_2 = e = 1,602217646 \times 10^{-19} Kn$

$$E \approx \frac{8 \times 10^{-20}}{1,6 \times 10^{-19}} = 0,5 \frac{B}{M}$$

В большинстве случаев гравитационное взаимодействие пренебрежимо мало по сравнению с электромагнитным.



$$E \approx \frac{1.5}{0.05} = 30 \frac{B}{M}$$



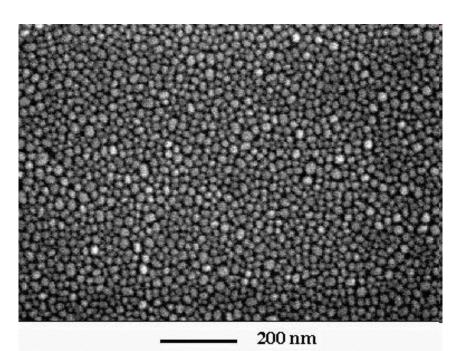
$$\Gamma = \frac{\Gamma paвитация}{\Pi oв. натяжениe} = \frac{\rho g (4\pi r^3/3)}{\sigma (2\pi r)} = \frac{2\rho g r^2}{3\sigma}$$

$$\rho = 10^{3} \text{kg/m}^{3}, \sigma = 78 \times 10^{-3} \frac{H}{M}$$

$$r = 1M \Longrightarrow \Gamma \approx 8,5 \times 10^{4}$$

$$r = 1MM \Longrightarrow \Gamma \approx 8,5 \times 10^{-2}$$

$$r = 1HM \Longrightarrow \Gamma \approx 8,5 \times 10^{-14}$$

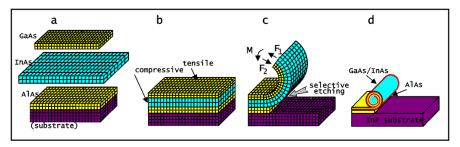


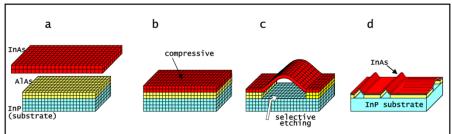
Общее свойство тонких пленок – гранулярная структура.

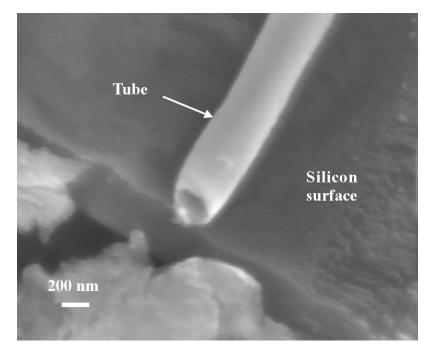
Тонкие однородные пленки могут быть получены за счет взаимодействия материала пленки с подложкой -эпитаксиальный рост.

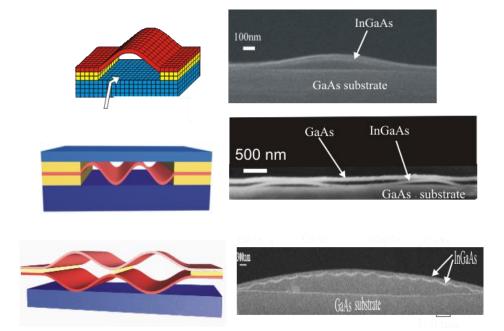
Метод Принца (Виктор Яковлевич Принц, Институт физики полупроводников СО РАН)

Схема создания наноструктур из многослойных пленок путем химического травления «жертвенного» слоя.

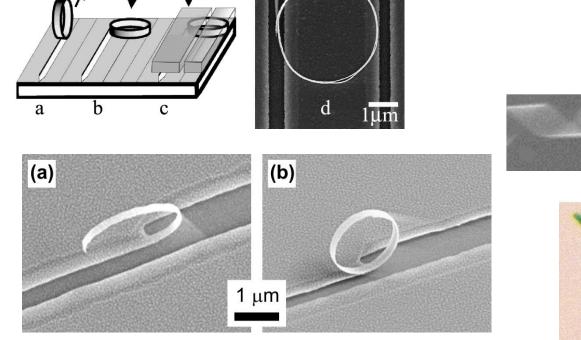








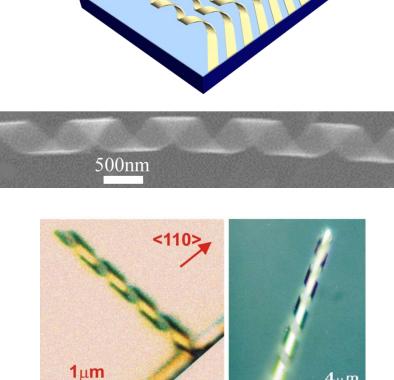
Формирование кольцевых и спиральных структур



b) кольцо после удаления Cr

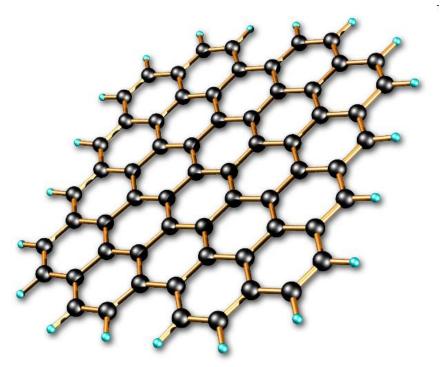
PMMA resist

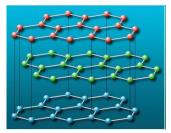
а) гибридное SiGe/Si/Cr кольцо,

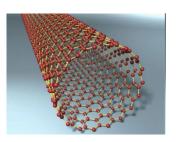


Спираль диаметром 7 нм

Графен (graphene) – моноатомный слой углерода







Графит – пакет из расположенных параллельно друг другу плоских слоев графена

Углеродные нанотрубки – слои графена в виде цилиндров.

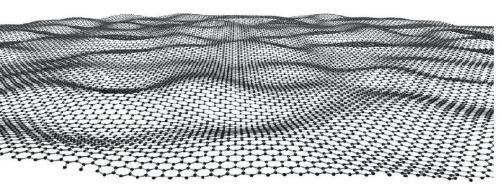


Углеродные наноконусы – слои графена конической формы.

Большая поверхностная энергия должна препятствовать существованию графена в виде изолированного моноатомного слоя.



Фуллерены – сферические образования из графена.



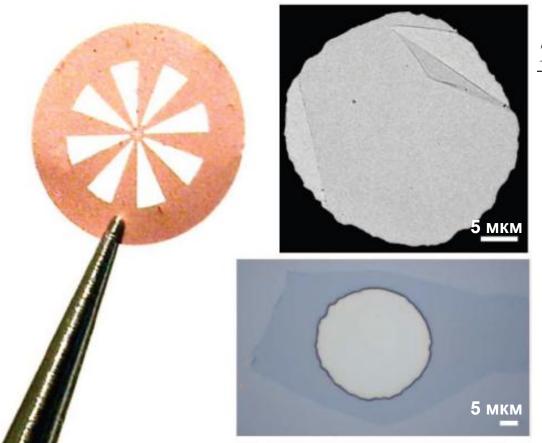
Nature, 2007, v. 446(1), p. 60.

Nano Lett., 2008, v. 8 (8), p. 2442.

Термодинамическая стабильность моноатомного слоя графена обеспечивается гофрировкой поверхности, вызванной тепловыми флуктуациями.

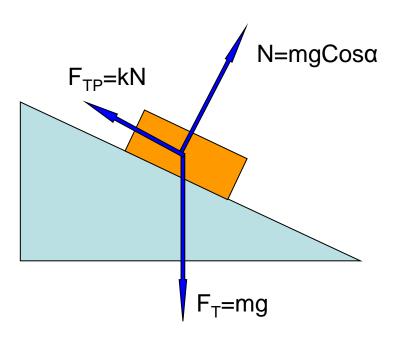
Толщина плоского слоя = 0,35 нм.

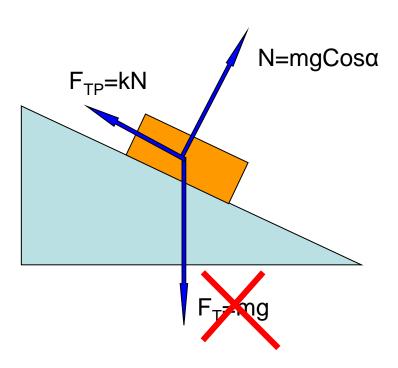
Толщина гофрированного слоя ~ 1 нм.

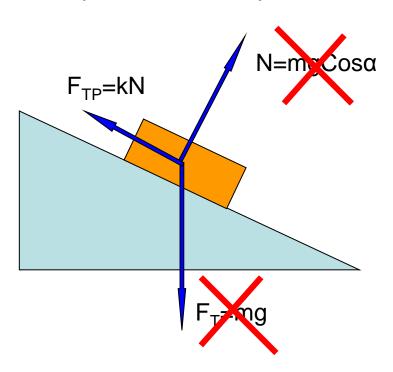


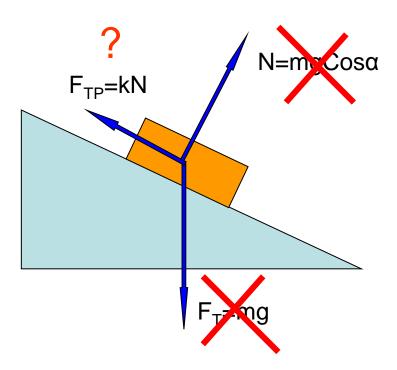
$$\frac{Tолщина}{Длина} = \frac{0,35нм}{35мкм} = 10^{-5} = \frac{1мм}{100м}$$

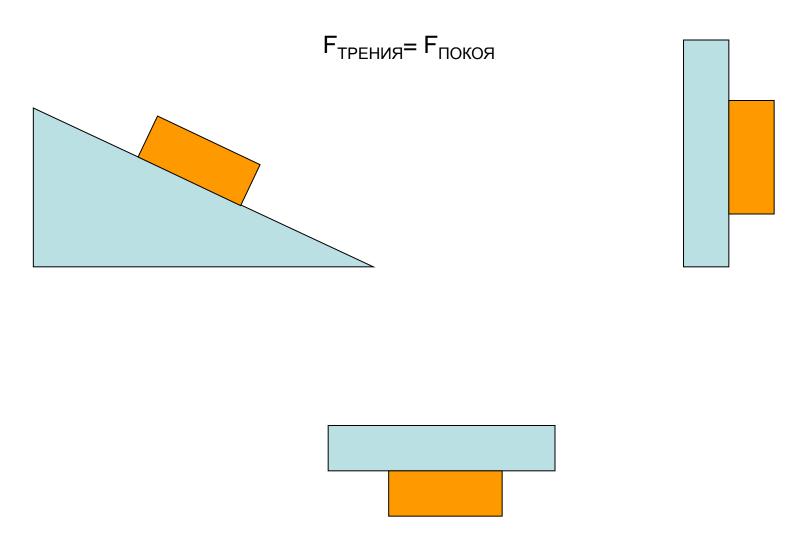
При отношении поперечных размеров к толщине $10^5 ... 10^7$ моноатомный слой графена способен выдержать без необратимых разрушений воздействие, измеряемое силой, многократно превышающей его собственный вес.





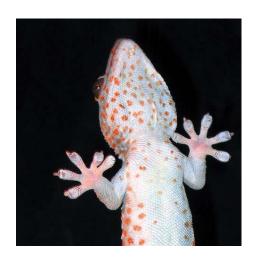




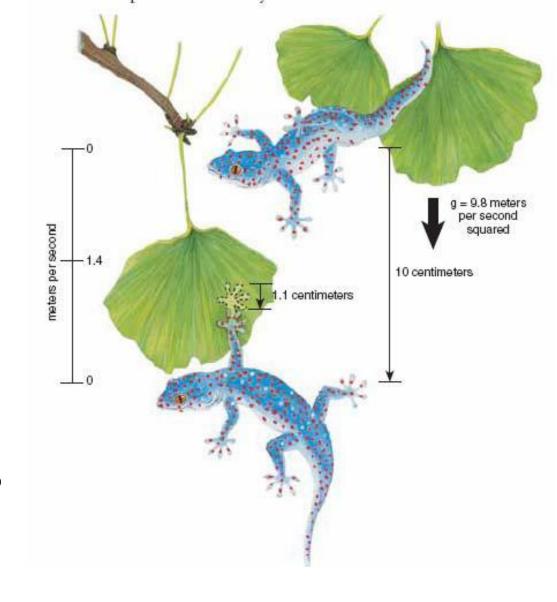


Площадь соприкасающихся поверхностей определяет величину их взаимодействия (силы трения).

Эффект геккона.

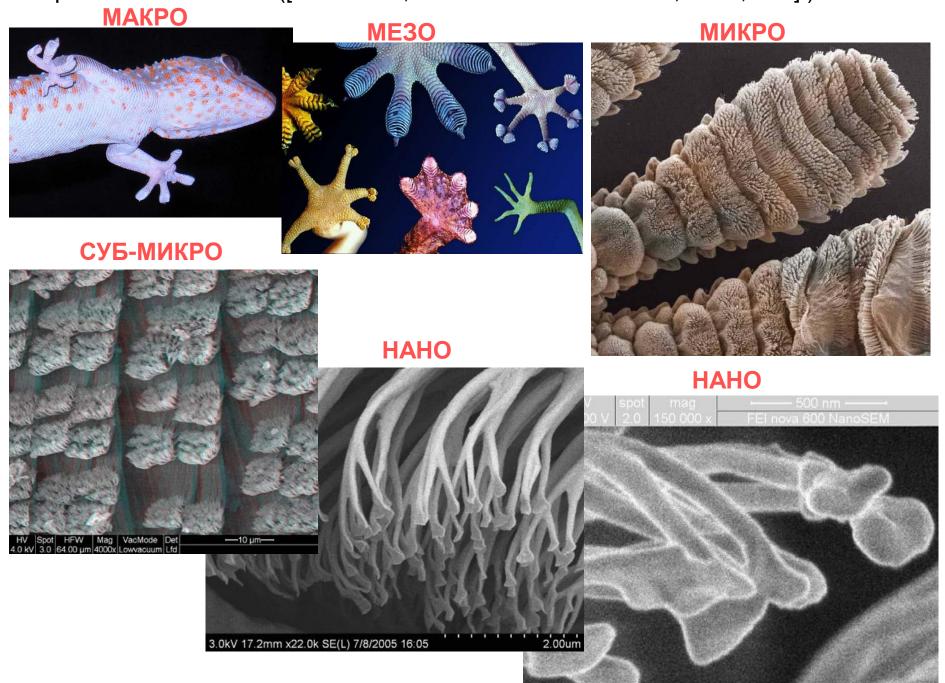


- прикрепляется и открепляется пальцами за время в несколько миллисекунд к почти любой поверхности (исключенние тефлон);
- перемещается по шероховатым и гладким поверхностям с любой пространственной ориентацией;
- -способность к зацеплению не изменяется со временем и под действием загрязняющих материалов;
- пальцы не склеиваются друг с другом и обладают способностью к самоочистке;
- -лапа отсоединяется от поверхности без приложения видимых усилий;
- -двумя передними лапами ящерица геккон, имея собственный вес около 50 г, может удерживать вес более 2 кг.



[K. Autumn, et al. American Scientist, 2006, 124]

Строение лап геккона ([K. Autumn, et al. American Scientist, 2006, 124])



Измерения, проведенные для отдельной щетинки на пальце ящерицы показали, что для преодоления ее адгезии к поверхности необходимо приложить усилие в 200 мкН.

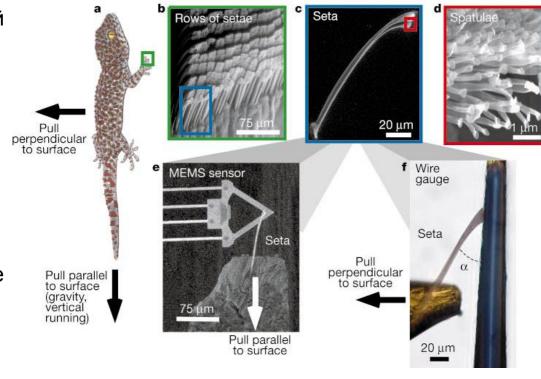
Общее количество щетинок составляет около 6,5 10⁶ на каждой лапе, что эквивалентно усилию по ее отрыву в 1300 Н.

Для удержания на поверхности ящерице достаточно использовать 2000 щетинки на каждой лапе, т.е. менее 0,04% от их общего количества.

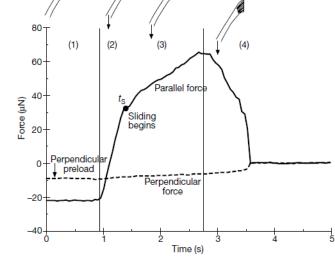
Изменение угла соприкосновения щетинок с поверхностью приводит к уменьшению силы взаимодействия и обеспечению возможности к перемещению.

Механический захват, вакуумная присоска, наличие клейкого состава, капилярные силы были признаны не способными вызвать наблюдаемый эффект.

Единственное объяснение – короткодействующее взаимодействие Ван-дер-Ваальса.



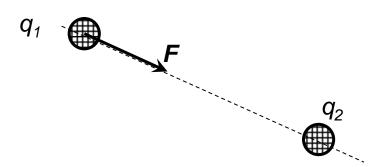
(1) Perpendicular (2) Begin pulling (3) Seta



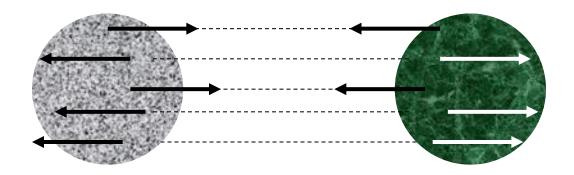
[Nature, 2000, v. 405, p. 681]

Взаимодействие точечных зарядов - Закон Кулона

$$F = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{R^2}$$

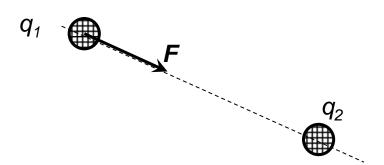


Взаимодействие незаряженных объектов (атомов, молекул, наночастиц)

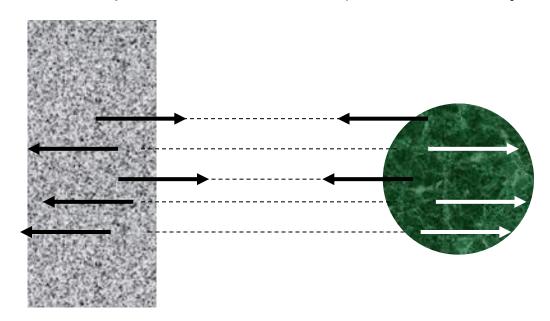


Взаимодействие точечных зарядов - Закон Кулона

$$F = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{R^2}$$



Взаимодействие незаряженных объектов (атомов, молекул, наночастиц)



Потенциал взаимодействия:

$$U(r) = U_{\text{притяжение}}(r) + U_{\text{отталкиван ие}}(r) = \frac{-A}{r^m} + \frac{B}{r^n} = -\int F(r)dr$$

 $U_{\it притяжение}(r)$ Взаимодействие Ван-дер-Ваальса

r = paccmoяниe

 $U_{\mathit{ommankue}}(r)$ Взаимодействие Паули

A, B, m, n – константы

Сила взаимодействия:

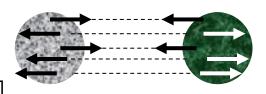
$$F(r) = \frac{-dU(r)}{dr} = \int k(r)dr$$

Коэффициент упругости (жесткость):

$$k(r) = \frac{-d^2U(r)}{dr^2} = \frac{dF(r)}{dr}$$

Потенциал Леннарда-Джонса

$$U_{JJJ}(m=6, n=12) = \frac{-A}{r^6} + \frac{B}{r^{12}} = 4E_B \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^{6} \right]$$



Сила взаимодействия:

$$F_{JIJ}(m=6, n=12) = \frac{-6A}{r^7} + \frac{12B}{r^{13}}$$

r = paccmoяниe

 $A, B, m, n - \kappa$ онстанты

$$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \, \text{Дж} / K$$

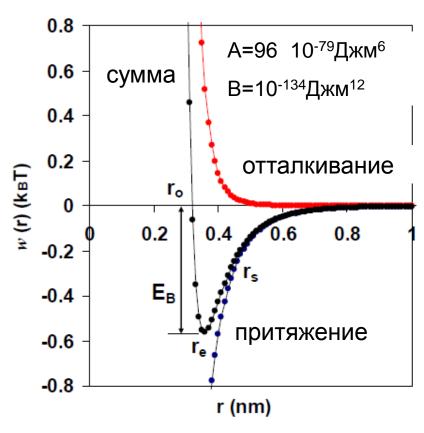
T – температур a(K)

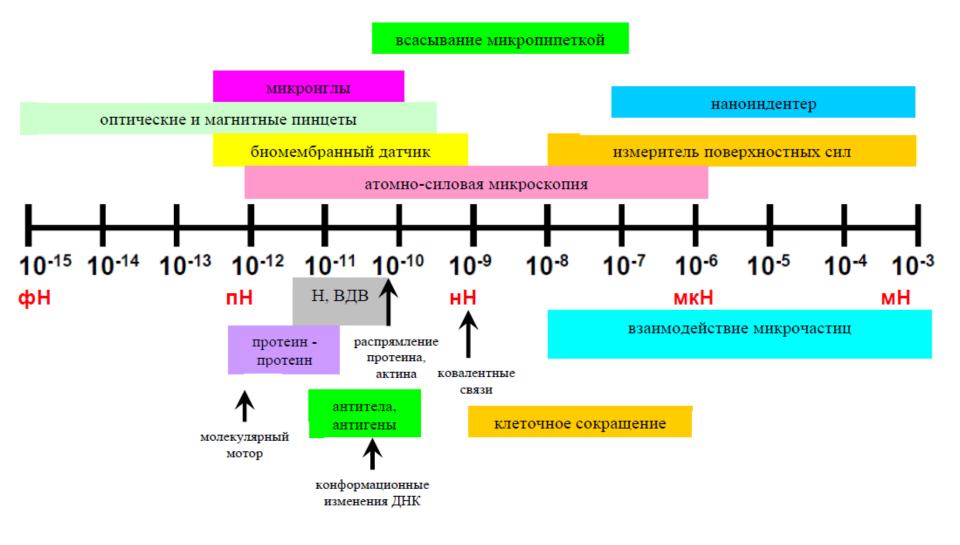
 $E_{\rm {\it R}}$ — связывающа я $_$ энергия

 r_s – точка _ перегиба _ $F(r_s)$ = min

 r_e — равновесное _ расстояние _ $F(r_e)$ = 0, $U(r_e)$ = min

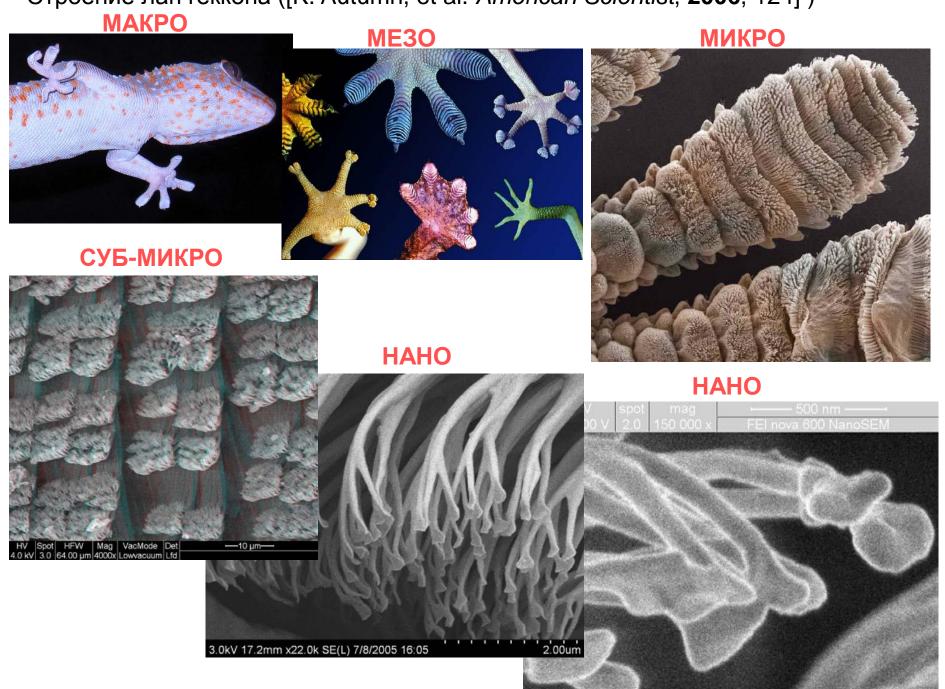
$$r_0 = \sigma U(r_0) = 0, F(r_0) = \infty$$



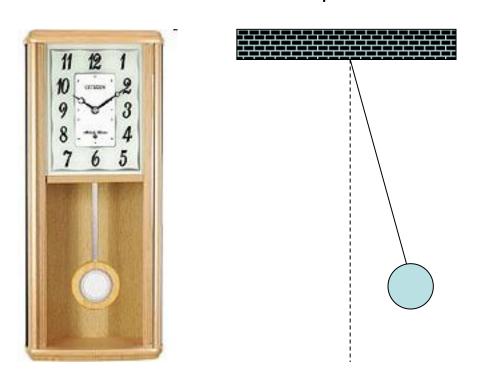


Характерные величины сил в различных наномеханических устройствах.

Строение лап геккона ([K. Autumn, et al. American Scientist, 2006, 124])



Механические колебания и резонансы в наноразмерных системах



$$\omega = (g/l)^{1/2}$$

$$T = 2\pi/\omega$$

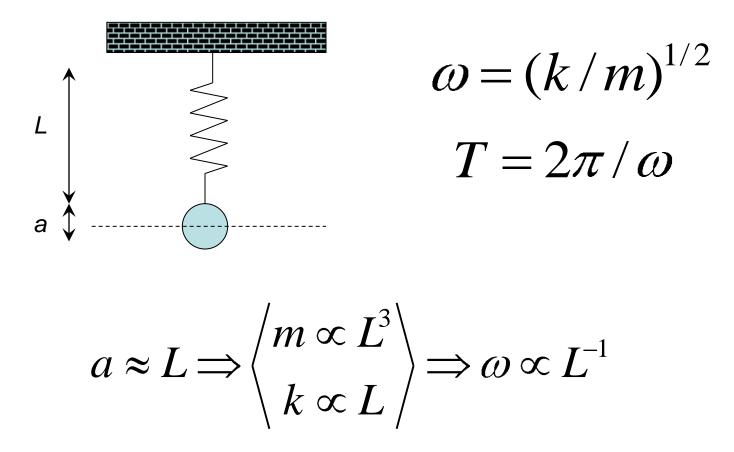
$$g = 9.8 \frac{M}{c^2}$$

$$\omega \propto \sqrt{l}$$

$$l=0.5 M \Rightarrow T \approx 1 ce\kappa; f=1/T \approx 1 \Gamma y$$

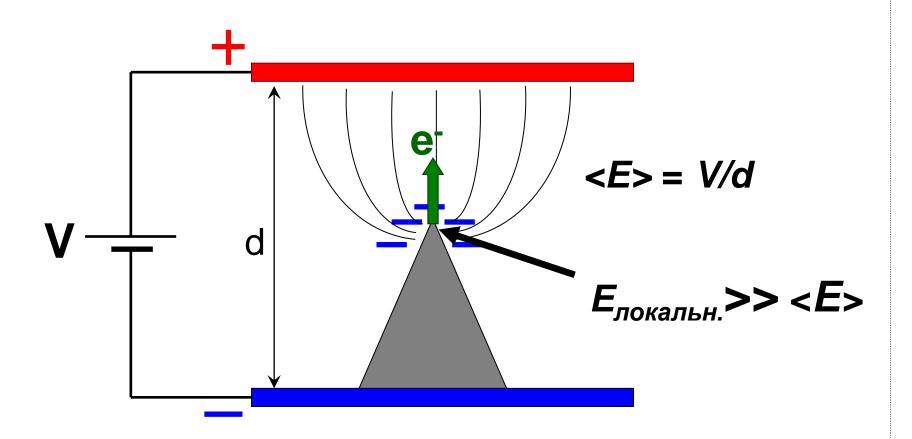
 $l=0.5 M \kappa M=500 H M \Rightarrow T \approx 10^{-3} ce\kappa; f=1000 \Gamma y$

Механические колебания и резонансы в наноразмерных системах



Как правило амплитуда колебаний в наноразмерных системах сопоставима с их линейными размерами. Поэтому приближение гармонического осциллятора оказывается неверным, и для анализа колебательных процессов необходим учет изменения параметров системы.

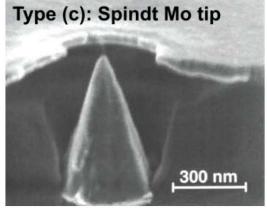
Автоэлектронные эмиттеры

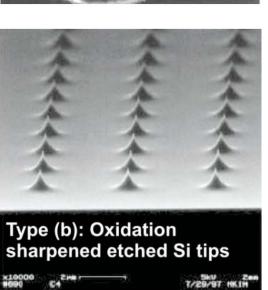


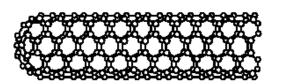
Автоэлектронные эмиттеры

Полупроводниковые и металлические эмиттеры

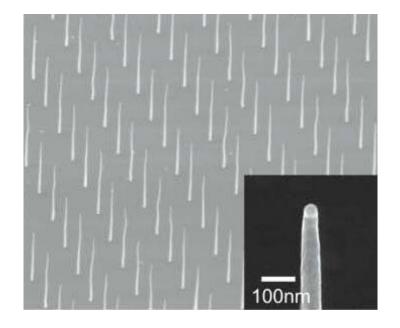
Наноразмерные эмиттеры (нанотрубки, нановолокна и пр.)





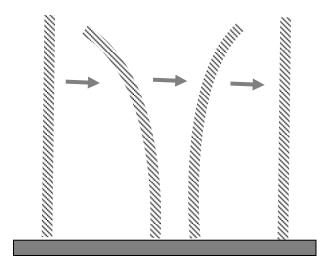




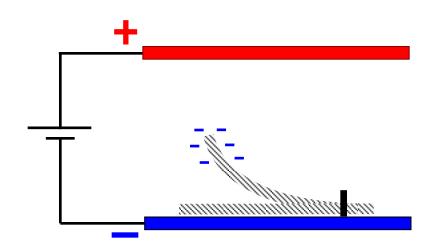


Электромеханические свойства гибких эмиттеров

Механическая гибкость

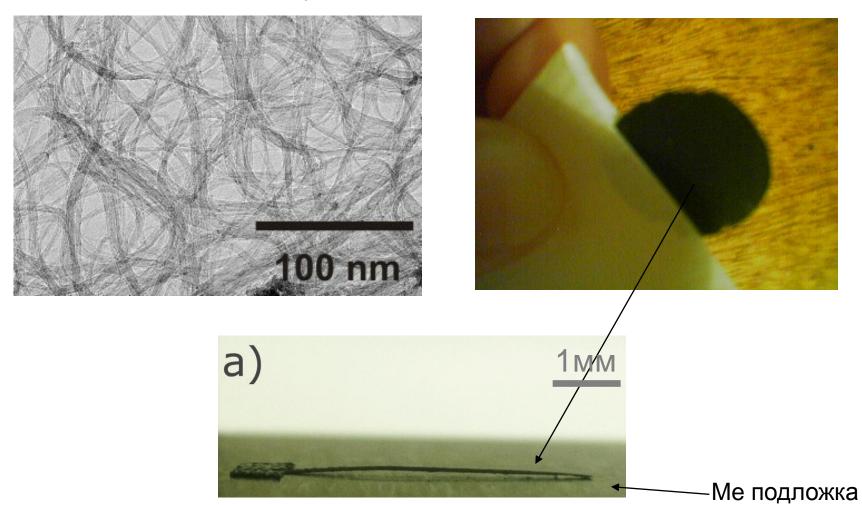


Изгиб в электрическом поле



Упругие деформации

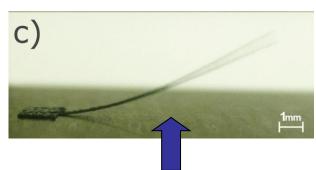
Пленки из одностенных углеродных **нанотрубок (УНТ)** Одностенные УНТ (электродуговой метод) Осажденная УНТ пленка



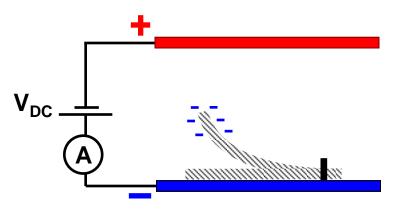
Автоколебания полевого эмиттера в постоянном поле



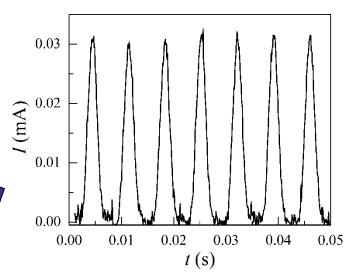




Электромеханические автоколебания

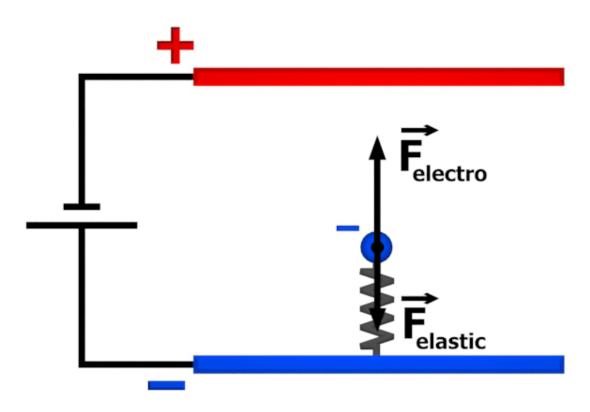


Эмиссионный ток от времени

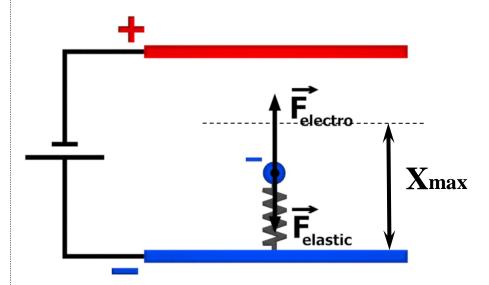


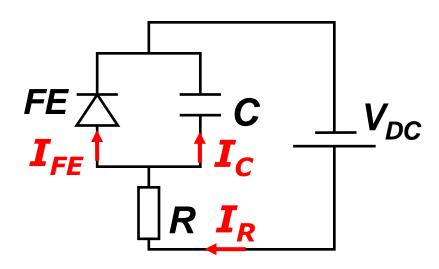
Частота колебаний 100-300Гц

Колебания гибкого эмиттера



Колебания гибкого эмиттера





Амплитуда колебаний:

Хтах=Х (Іэмисс)

Эмиссионный ток:

Iэмиcc=I(V)=I(q/c)

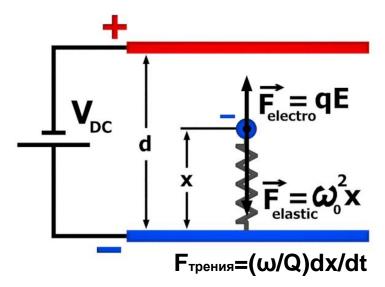
q-заряд на эмиттере c- емкость V=q/c – напряжение на эмиттере

Заряд на эмиттере: $q(t)\sim exp(t/Rc)$

Незатухающие колебания:

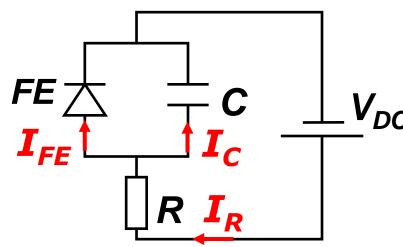
Rc > Тмех.колеб.

Модель автоколебательной системы



$$m\ddot{X} = F_{elastic} + F_{friction} + F_{electric}$$

$$\ddot{X} + (\omega_0/Q)\dot{X} + \omega_0^2 X - c(X)E(X,V)Vm^{-1} = 0$$
 F трения = (ω /Q)dx/dt $c(X)\dot{V} + V\dot{c}(X) + I_{FN}(E(X,V)) + (V-V_0)R^{-1} = 0$





$$V_0 = I_R R + V$$

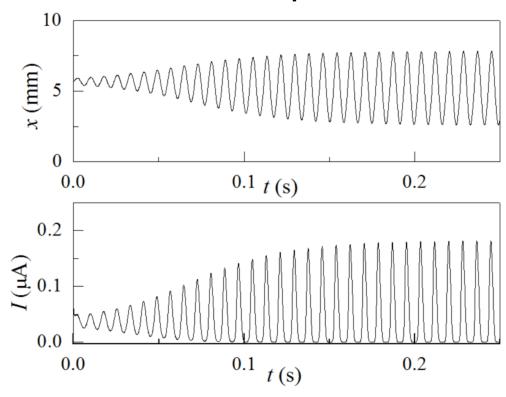
$$I_R = I_{FN} + I_c$$

Модель автоколебательной системы

$$\ddot{X} + (\omega_0 / Q)\dot{X} + \omega_0^2 X - c(X)E(X, V)Vm^{-1} = 0$$

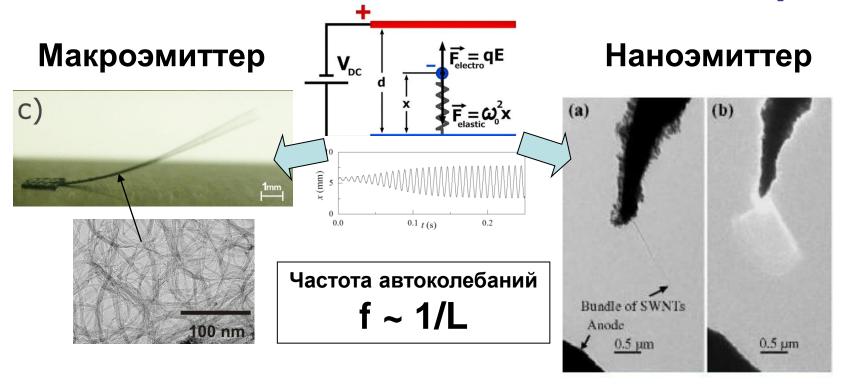
$$c(X)\dot{V} + V\dot{c}(X) + I_{FN}(E(X, V)) + (V - V_0)R^{-1} = 0$$

Численное решение



[Клещ В.И. и др., ПЖЭТФ, 90 (2009)]

Частота автоколебаний нано-эмиттера



f ~ 100Гц

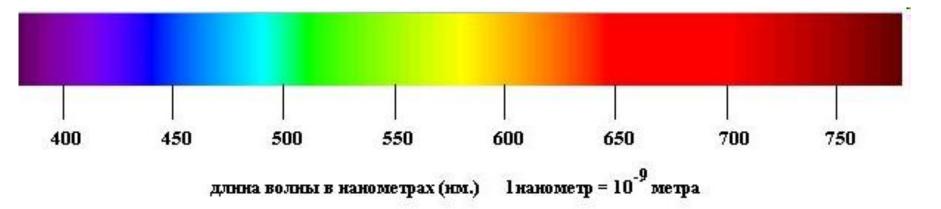
f ~ mm/nm 100Hz ~ 10⁸Гц

Преобразование DC/AC

Генерация Э-М волн

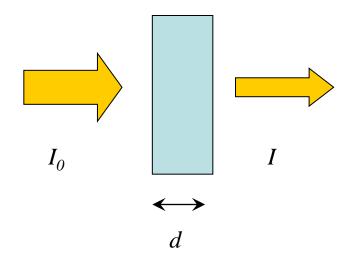
Создание новых устройств на наноуровне

Особенности оптических свойств наноматериалов



Для наноматериалов приближение однородной среды оказывается неадекватным.

Поглощение света



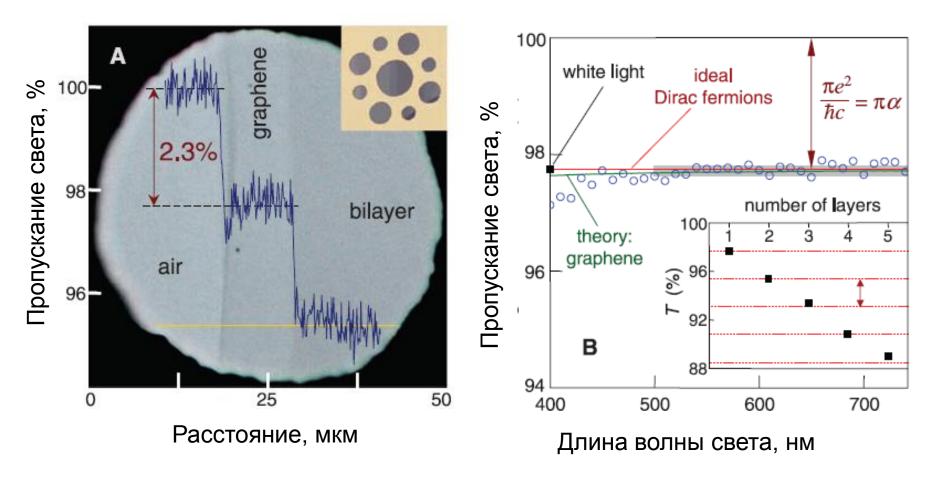
Закон Бугера-Ламберта

$$d \rightarrow 0; I \rightarrow I_0$$
 $I = I_0 e^{-kd}$

$$I = I_0 e^{-kd}$$

k – показатель поглощения

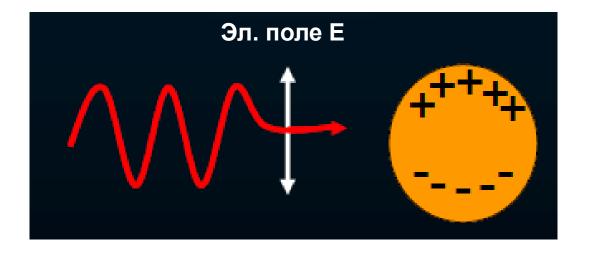
Поглощение света в моно-атомном графене



[Science, 2008, v. 320, p. 1308]

Благодаря уникальным электронным свойствам моноатомного слоя графена, поглощение света составляет около 2,3% на один слой.

Взаимодействие света с наночастицами



Поглощение увеличивается, для длин волн соразмерных с величиной наночастиц.

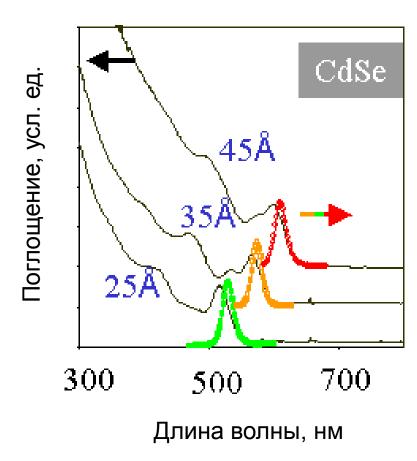






Окраска стекла обусловлена поглощением света в коротковолновом диапазоне наноразмерными частицами металла: красный цвет определяется присутствием наноразмерных частиц золота, желтый — серебра.

Оптические свойства наночастиц

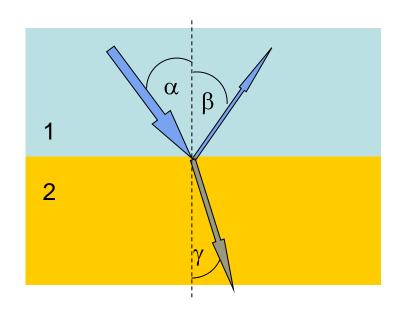


Интенсивность люминесценции, усл. ед.



Спектры поглощения наноразмерных металлов и полупроводников сильно изменяются с размером частиц.

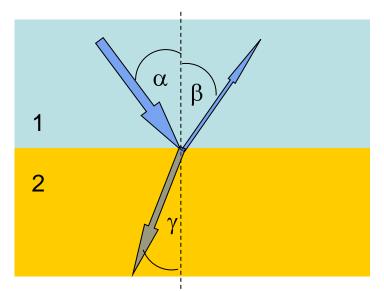
Отрицательный показатель преломления



$$\angle \alpha = \angle \beta$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{12} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \mu_2}{\varepsilon_1 \mu_1}} \rangle 0$$

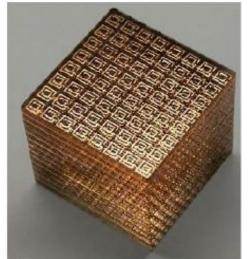
$$n^2 = \varepsilon \mu$$



$$n = \pm \sqrt{\varepsilon \mu}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{12} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \mu_2}{\varepsilon_1 \mu_1}} \langle 0$$

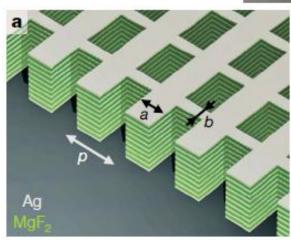


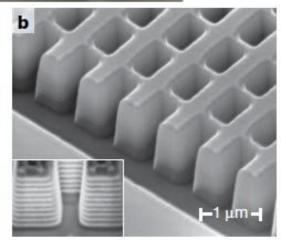


Метаматериалы с отрицательным показателем преломления в диапазоне СВЧ радиоволн.

[Science, 2001, v. 292, p. 77;

PRL, 2000; Physics Today, 2003]



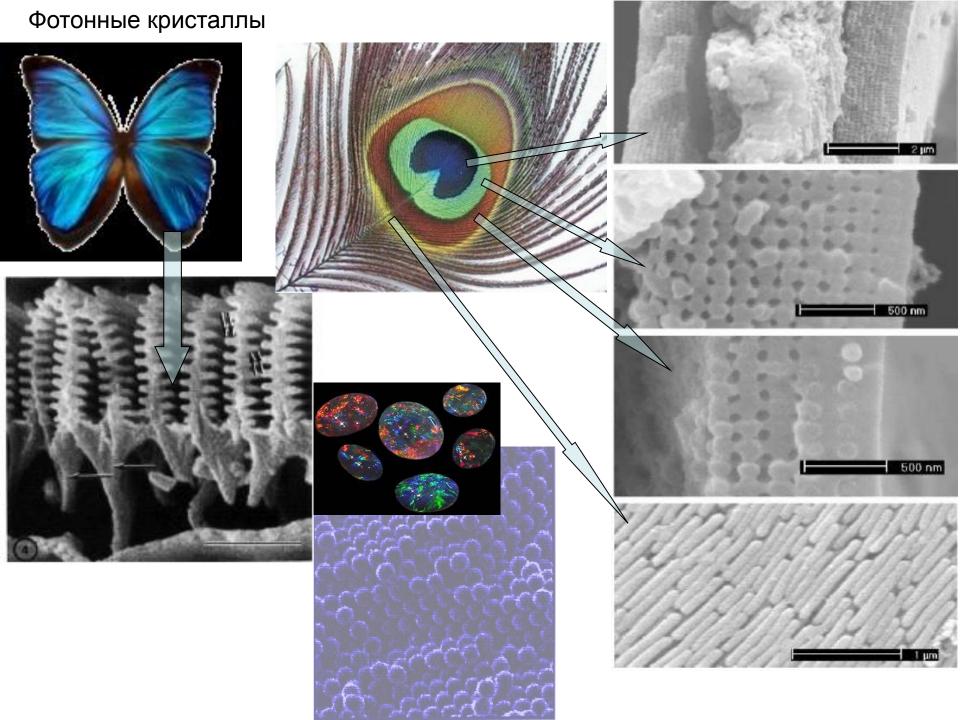


«Среда» с отрицательным показателем преломления в оптическом диапазоне.

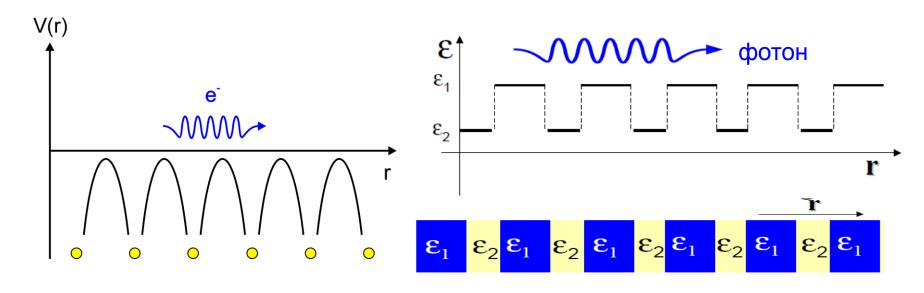
[Nature, 2008, v.455, p. 376]

Схема и электронно-микроскопическое изображение среды с отрицательным показателем преломления в ИК диапазоне в виде ячеистого материала, состоящего из 21 слоя переменного состава (30 нм Ag и 50 нм MgF₂). Размер ячеек а=565 нм; b=265 нм.

Показатель преломления такой среды изменяется от n=0,63 0,05 нм для λ =1200 нм до n=-1,23±0,34 нм для λ =1775 нм.



Механизм формирования фотонной зонной структуры



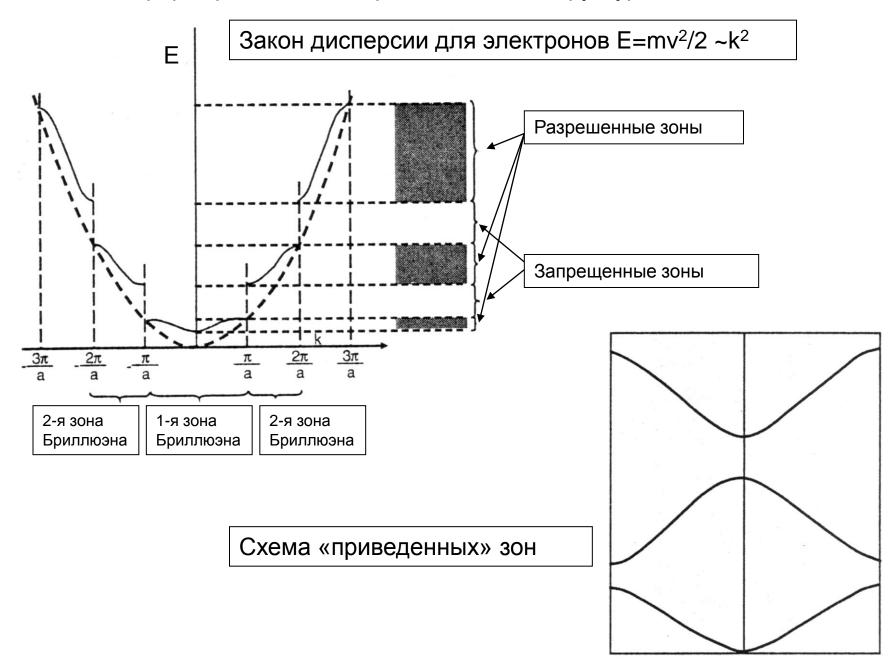
$$\nabla^2 \Psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V(r)) \Psi = 0$$

$$\nabla^2 \vec{E} + \varepsilon(\vec{r}) \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E} = 0$$

Уравнение Шредингера

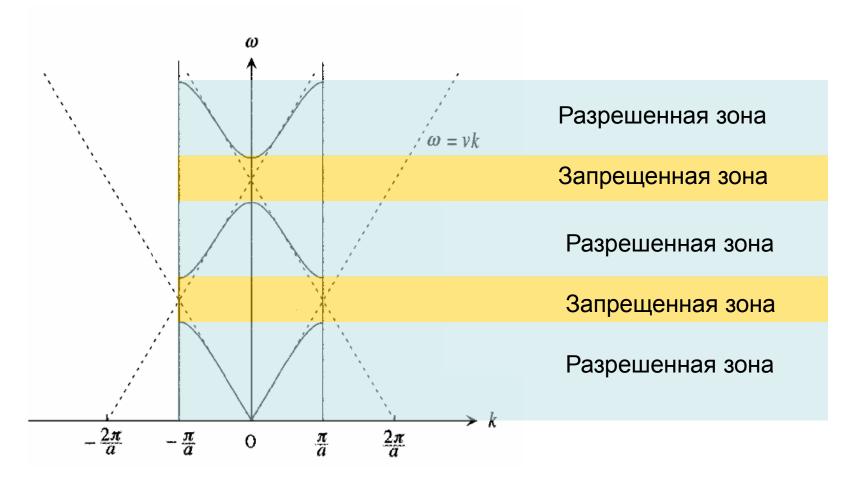
Волновое уравнение

Механизм формирования электронной зонной структуры

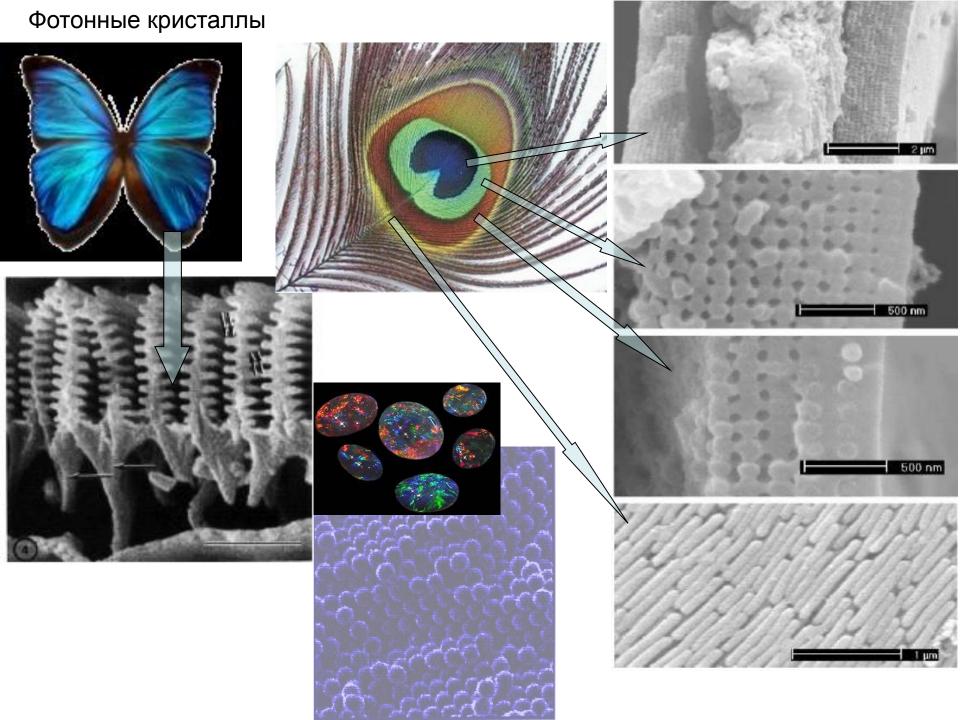


Механизм формирования фотонной зонной структуры

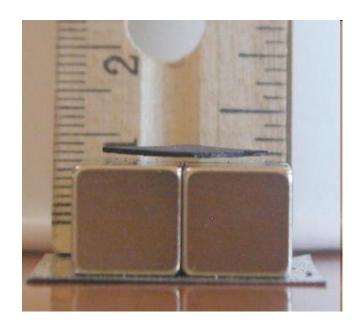
Закон дисперсии для фотонов E=hω~k

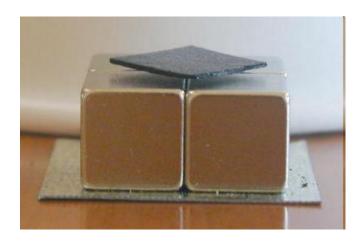


Фотоны с длиной волны, соответствующей запрещенной зоне не могут распространяться в материале фотонного кристалла, который выглядит в результате этого окрашенным при освещении белым светом.



Магнитные свойства

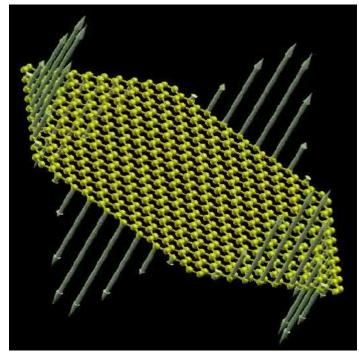


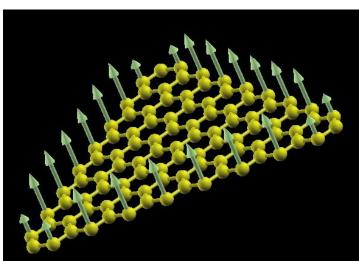


Пиролитический графит имеет ярко выраженные диамагнитные свойства.

В частности это проявляется в эффекте левитации, наблюдаемом при комнатной температуре в достаточно сильных магнитных полях.

Диамагнитные свойства присущи всем веществам в отличие от ферромагнетизма, обусловленного наличием магнитного момента у атомов, составляющих вещество.





Обрыв электронных связей атомов, расположенных на границах фрагмента графена определенной формы (треугольники шестигранники и т.п.) с зигзагообразной формой приводит к появлению магнитного момента из-за нескомпенсированного спина электронов.

Благодаря этому такие наноразмерные фрагменты треугольной формы имеют отличный от нуля магнитный момент. Фрагменты гексагональной формы имеют нулевой момент со спинами, направленными в противоположные стороны на противоположных сторонах гексагона.

[PRL **99**, 177204 (2007)]

[www.ua.es/personal/jfrossier/]

- 1. В окружающем нас мире находится достаточно большое количество объектов природного происхождения, соответствующих принятым определениям для наноматериалов, наносистем, наноустройств и нанотехнологий. В практическом использовании имеются также объекты, созданные искусственным способом с использованием традиционных технологий, которые могут быть отнесены к наноматериалам, наносистемам и наноустройствам.
- 2. Физическое взаимодействие между материальными объектами, относящимися к наноматериалам, наносистемам и наноустройствам, в большинстве случаев имеет электромагнитную (электростатическую) природу.
- 3. Механика нанообъектов определяется близкодействующим взаимодействием Ван-дер-Ваальса.
- 4. Наряду с гармоническими колебательными возмущениями в наномире существенную роль имеют различные негармонические колебательные процессы.
- 5. Распространение электромагнитных волн (света) и взаимодействие с магнитным полем имеет в наноструктурированных материалах существенные отличия по сравнению с аналогичными характеристиками макроскопически однородных материальных сред.