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



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

 $F = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{R^2}$ $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon}$ $\varepsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12} \frac{K\pi^2}{H \cdot M^2}$

$$F_E = q_2 E$$

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

ГРАВИТАЦИЯ

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

$$G = -6,673 \times 10^{-11} \frac{M^3}{\kappa_2 \cdot c^2}$$

$$F_T = mg$$

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

Роль объема и поверхности в физических свойствах наноразмерных объектов.



а=10 нм=10⁻⁸ м V=a³=10⁻²⁴ м³ m=pV= 7874 кг/м³ 10⁻²⁴ м³ =7,874×10⁻²¹ кг

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

 $F_E = q_2 E$ $q_2 = e = 1,602217646 \times 10^{-19} K \pi$

$$E \approx \frac{8 \times 10^{-20}}{1,6 \times 10^{-19}} = 0.5 \frac{B}{M}$$

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



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







Общее свойство тонких пленок – гранулярная структура.

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

200 nm

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



а) гибридное SiGe/Si/Cr кольцо, b) кольцо после удаления Cr





Спираль диаметром 7 нм

Графен (graphene) – моноатомный слой углерода









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



Графит – пакет из расположенных параллельно друг другу плоских слоев графена

Углеродные нанотрубки – слои графена в виде цилиндров.

Углеродные наноконусы – слои графена конической формы.

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.

 $\frac{T_{OJUUHA}}{D_{JUHA}} = \frac{0,35_{HM}}{35_{MKM}} = 10^{-5} = \frac{1_{MM}}{100_{M}}$

При отношении поперечных размеров к толщине 10⁵ ...10⁷ 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]) МАКРО МЕЗО МИКРО



СУБ-МИКРО





НАНО



HAHO

HV Spot HFW Mag VacMode Det 4.0 kV 3.0 64.00 µm 4000x Lowvacuum Lfd 3.0kV 17.2mm x22.0k SE(L) 7/8/2005 16:05

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

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.

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



Time (s)

Взаимодействие точечных зарядов - Закон Кулона



Взаимодействие незаряженных объектов (атомов, молекул, наночастиц)



Взаимодействие точечных зарядов - Закон Кулона



Взаимодействие незаряженных объектов (атомов, молекул, наночастиц)



Потенциал взаимодействия:



$$U(r) = U_{npum я жение}(r) + U_{ommaлкиван иe}(r) = \frac{-A}{r^m} + \frac{B}{r^n} = -\int F(r)dr$$

*U*_{притяжение} (*r*) Взаимодействие Ван-дер-Ваальса

r = *расстояние*

А, В, т, п – константы

Сила взаимодействия:

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

 $U_{ommankusaue}(r)$ Взаимодействие Паули

Коэффициент упругости (жесткость):

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



Потенциал Леннарда-Джонса



Характерные величины сил в различных наномеханических устройствах.

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



СУБ-МИКРО





НАНО



HAHO

HV Spot HFW Mag VacMode Det 4.0 kV 3.0 64.00 µm 4000x Lowvacuum Lfd 3.0kV 17.2mm x22.0k SE(L) 7/8/2005 16:05

Механические колебания и резонансы в наноразмерных системах



$$l = 0,5M \Longrightarrow T \approx 1$$
сек; $f = 1/T \approx 1\Gamma \mu$
 $l = 0,5$ мкм = 500нм $\Longrightarrow T \approx 10^{-3}$ сек; $f = 1000\Gamma \mu$

Механические колебания и резонансы в наноразмерных системах



$$\omega = (k/m)^{1/2}$$

 $T = 2\pi / \omega$

$$a \approx L \Longrightarrow \left\langle \frac{m \propto L^3}{k \propto L} \right\rangle \Longrightarrow \omega \propto L^{-1}$$

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

Полупроводниковые и металлические эмиттеры





Type (b): Oxidation sharpened etched Si tips

0 C4

Наноразмерные эмиттеры (нанотрубки, нановолокна и пр.)







[W.I. Milne et.al, J.Mater.Chem.,2004]

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





Ме подложка



Автоколебания полевого эмиттера в постоянном поле





Колебания гибкого эмиттера



Амплитуда колебаний: Xmax=X (Іэмисс)

Эмиссионный ток: Іэмисс=I(V)=I(q/c)

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

> Заряд на эмиттере: q(t)~exp(t/Rc)

Незатухающие колебания:

Rc > Тмех.колеб.

Модель автоколебательной системы



Модель автоколебательной системы

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



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

 I_0 I_1 Закон Бугера-Ламберта $d \rightarrow 0; I \rightarrow I_0$ $I = I_0 e^{-kd}$

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.



Длина волны, нм

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

Отрицательный показатель преломления







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



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.

Фотонные кристаллы



Механизм формирования фотонной зонной структуры



Уравнение Шредингера

Волновое уравнение

Механизм формирования электронной зонной структуры



Механизм формирования фотонной зонной структуры



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

Фотонные кристаллы



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/]

- 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.
- 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.
- Распространение электромагнитных волн (света) и взаимодействие с магнитным полем имеет в наноструктурированных материалах существенные отличия по сравнению с аналогичными характеристиками макроскопически однородных материальных сред.