

Лекция 5. **Панорама
современного естествознания**

Вопросы:

- Основные концепции природы и этапы формирования физической картины мира
- Достижения современного естествознания
- Квантовые объекты и приборы нанотехнологий
- Квантовые ямы, квантовые нити, квантовые точки
- Углеродные нанотрубки

Основные концепции природы и этапы формирования физической картины мира

- Задачи науки о природе
 1. Познание окружающей действительности в ходе ее экспериментального и теоретического исследования.
 2. Установление закономерных, причинно-следственных связей между познаваемыми природными объектами и явлениями и формирование естественнонаучных теорий.
 3. Разработка и применение универсальных научных принципов, методов и моделей для исследования и описания реальности.

Основные концепции природы и этапы формирования физической картины мира

- Основные концепции природы

Определение. Естественнонаучная (физическая) картина мира – это исторически сложившаяся система научных теорий, описывающих реальность.

Формирование той или иной физической картины мира (ФКМ) связано с процессами эволюции основных концепций природы:

- *материя;*
- *пространство и время;*
- *движение и развитие;*
- *детерминизм и стохастичность.*

Основные концепции природы и этапы формирования физической картины мира

- Этапы формирования ФКМ

Различают следующие исторически сложившиеся системы научных взглядов на окружающий мир.

Механистическая картина мира (МКМ).

Система полностью формируется к середине XVIII в. на основе классической механики И. Ньютона, экспериментального естествознания Г. Галилея, законов небесной механики И. Кеплера, учения Н. Коперника о гелиоцентрической системе мира.

Характерные особенности МКМ следующие.

- В рамках МКМ сложилась дискретная модель объективной реальности. *Материя – вещественная субстанция, состоящая из атомов (корпускул).* Атомы абсолютно прочны, неделимы, непроницаемы, обладают массой.

Основные концепции природы и этапы формирования физической картины мира

- Этапы формирования ФКМ

- Действует ньютоновская *концепция абсолютных пространства и времени*, т. е. пространство, окружающее тела, является трехмерным, евклидовым, оно постоянно, не зависит от вещества; время не зависит ни от пространства, ни от вещества; как пространство, так и время не связаны с движением тел.

- *Движение в МКМ – простое механическое перемещение.* Законы механики рассматриваются как фундаментальные законы мироздания. Самостоятельные тела движутся равномерно и прямолинейно, изменение характера такого движения есть проявление действия на тела внешней силы. Масса тела является мерой инерции (неизменности характера) в его движении. Все тела подвержены далекодействующей силе всемирного тяготения. В целом существует тенденция сведения закономерностей высших форм движения материи к простейшему механическому перемещению.

Основные концепции природы и этапы формирования физической картины мира

- Этапы формирования ФКМ

- Работает *принцип дальнего действия* – взаимодействие между телами происходит мгновенно на любом расстоянии, иначе говоря, действие передается в пустоте с бесконечной скоростью.
- Механические процессы подчиняются *принципу детерминизма*, т.е. они однозначны и строго закономерны. Случайность исключается из физической картины мира.

Электромагнитная картина мира (ЭКМ).

Система полностью формируется к концу XIX в. на основе теорий электромагнетизма М. Фарадея и электромагнитного поля Дж. Максвелла, электронной теории вещества Х. Лоренца, специальной теории относительности А. Эйнштейна.

Основные концепции природы и этапы формирования физической картины мира

Характерные особенности ЭКМ следующие.

- В рамках ЭКМ сложилась полевая континуальная модель действительности. *Материя воспринимается как единое непрерывное электромагнитное поле с точечными силовыми центрами, роль которых играют электрические заряды.* Взаимодействие между зарядами осуществляется через поле.
- Действует концепция *реляционных (относительных) пространства и времени*: пространство и время связаны с движениями, происходящими в поле, т. е. они не самостоятельны и зависимы от материи (вещества).
- *Движение в ЭКМ – это распространение электромагнитных волн в средах,* которые обладают электрическими и магнитными свойствами.
- Работает принцип *близкодействия,* а именно: взаимодействие передается полем от точки к точке непрерывным образом и с конечной скоростью, не превышающей скорости света в вакууме.
- В ЭКМ *введено понятие вероятности,* но оно носит частный характер.

Основные концепции природы и этапы формирования физической картины мира

- Этапы формирования ФКМ

Квантово-полевая картина мира (КПКМ).

Система формируется с начала XX в. на основе квантовой гипотезы М. Планка, квантовой механики В. Гейзенберга, Э. Шрёдингера и П. Дирака, квантовой теории атома и фундаментальных принципов Н. Бора.

Характерные особенности КПКМ следующие.

- В рамках КПКМ сложились квантово-полевые представления о материи. *Материя обладает корпускулярно-волновым дуализмом*, т. е. каждый элемент материи имеет свойства как частицы, так и волны. Формирование физической картины мира в квантовой механике происходит в ходе активного взаимного влияния объекта познания и средств познания (средства наблюдения и измерения, которые использует исследователь).

Основные концепции природы и этапы формирования физической картины мира

- Этапы формирования ФКМ
 - Для описания объектов исследования применяются пространственно-временные и энергетическо-импульсные характеристики. Первые характеристики отражают кинематическую картину движения, вторые – динамическую (причинную) картину. При составлении общей КПКМ *пространство–время и причинность считаются относительными и зависимыми.*
 - *Движение трактуется как частный случай взаимодействия.* Рассматриваются фундаментальные физические взаимодействия: сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное.
 - Взаимодействия описываются *на основе принципа близкодействия*, т. е. они передаются соответствующими квантовыми полями от точки к точке с конечной скоростью, не превышающей скорость света.
 - *Закономерности квантовых процессов носят вероятностный характер* и отражаются в виде статистических законов.

Достижения современного естествознания

Современный этап естествознания (XX в. – настоящее время) связывают с такими достижениями как:

- разработка общей теории относительности (теория гравитации) (А. Эйнштейн, 1916 г.);
- появление модели расширяющейся Вселенной (А. Фридман, 1922 г.);
- разработка основ квантовой механики (В. Гейзенберг, Э. Шрёдингер, П. Дирак, 1925–1928 гг.);
- открытие нейтрона (Д. Чедвик, 1932 г.);
- создание кибернетики (Н. Винер, 1948 г.);
- построение модели молекулы ДНК (Д. Уотсон, Ф. Крик, 1953 г.);
- открытие структуры генетического кода (М. Ниренберг, Х. Корана и др., 1961 г.), появление генной инженерии;
- разработка и первые успехи нанотехнологий (2004 г.).

Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Квантовые объекты

Теоретический аппарат квантовой механики был создан в первой трети XX века, однако широкое применение квантовых эффектов началось именно сейчас, в начале XXI века. Связано это с тем, что современное состояние науки и техники достигло такого уровня, который позволяет оперировать (манипулировать) отдельными молекулами, отдельными атомами и даже отдельными электронами. Эти объекты составляют элементную базу нанотехнологий – новых разделов высоких технологий, в которых изучаются и используются в практических целях процессы, происходящие в областях нанометровых размеров ($1\text{нм} = 10^{-9}\text{ м}$ или 10^{-3} мкм ; по гречески «*ναννος*» – карлик).

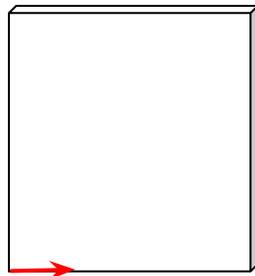
Цель нанотехнологий состоит в управлении поведением отдельных наночастиц – атомов, молекул, молекулярных систем – при создании новых наноструктур, наноустройств и материалов со специальными физическими, химическими и биологическими свойствами. Эти объекты обладают очень интересными физическими особенностями и имеют чрезвычайно широкие перспективы применения в радиоэлектронике, лазерной технике, информационных технологиях, биологии, медицине и т.д.

Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

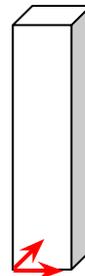
В сферу нанотехнологии попадают объекты, размеры которых хотя бы в одном из направлений сравнимы с дебройлевской длиной волны электрона в кристалле (1...100 нм). На самом деле, диапазон размеров этих объектов еще шире: от 0,1 нм, т.е. от размера атома, до более 1 мкм в одном или двух измерениях.

Эти объекты, имеющие кристаллическую структуру, получили название *нанокристаллов*. К ним, в частности, относятся так называемые квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки. Приведенные названия подчеркивают основную особенность таких структур – квантование энергии находящихся в них электронов связано с пространственным ограничением их движения в одном, двух или трех направлениях (см. рис.).

квантовая
яма



квантовая
нить



квантовая
точка



Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Квантовые объекты

Соотношение характерных размеров квантовых точек с размерами других нано- и микрообъектов показано на рисунке. *Квантовые точки* могут иметь форму пирамид, сфер, сплюснутых капель и т.д., которая зависит от технологических условий их получения.

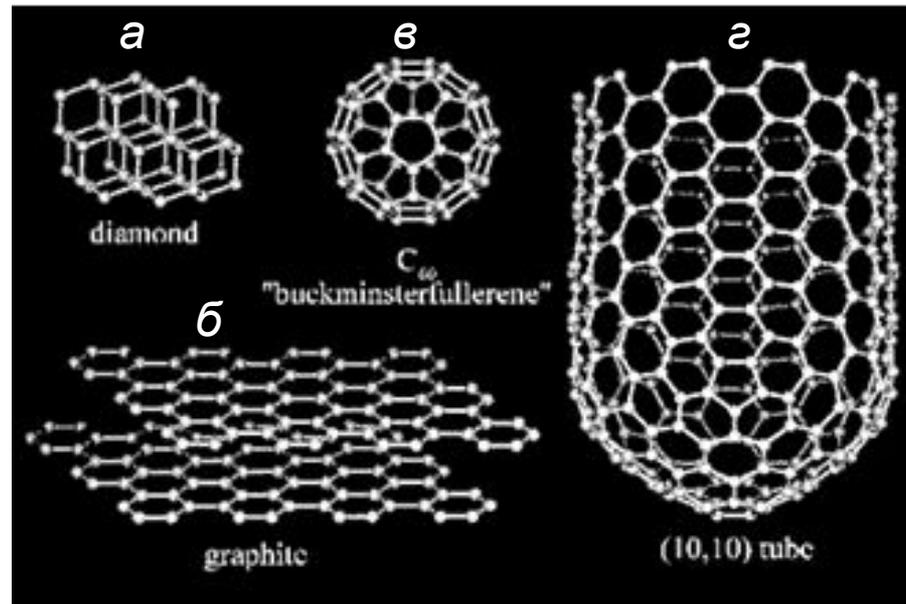


Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Квантовые объекты

Долгое время считалось, что углерод имеет только две кристаллические структуры: *графит* и *алмаз*. Впоследствии было показано, что атомы углерода могут объединяться в сложные молекулы с поверхностями, образованными правильными пяти-, шести-, семи- и восьмиугольниками. В конце XX века были экспериментально открыты новые формы элементарного углерода, среди которых следует выделить *фуллерены* (с молекулярной формулой C_{60} , C_{70} и др.) и *нанотрубки* (см. рис.).

а – алмаз
б – графит
в – фуллерен
г – нанотрубка



Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Квантовые объекты

Фуллерены – сложные молекулы сферической формы, образованные плоскими пятиугольниками из атомов углерода. Фуллерены обладают важными физическими и химическими свойствами, их открытие было удостоено Нобелевской премии по химии 1996 г.

Нанотрубка представляет собой цилиндрическую поверхность, образованную правильными шестиугольниками из атомов углерода. Протяженность этих трубок, при диаметре от долей нанометра до нескольких нанометров, может достигать нескольких сантиметров. В зависимости от условий получения они могут иметь открытые или закрытые концы (торцы). Кроме того, в зависимости от размера и структуры, нанотрубка может обладать либо проводящими, либо полупроводниковыми свойствами. С точки зрения используемой выше терминологии нанотрубка может рассматриваться как квантовая нить, или квантовая проволока.

Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Приборы нанотехнологий

С появлением наноструктур и необходимостью изучения их свойств появилась потребность в разработки и создании новых методов и средств, позволяющих проводить соответствующие исследования. Среди этих методов в первую очередь следует выделить зондовые методы, которые дают возможность с очень высоким разрешением изучать поверхность твердых тел, а также нанобъекты (квантовые точки, нити, отдельные атомы и т.д.), находящиеся на поверхности какого-либо образца. К этим методам относятся: *сканирующая туннельная микроскопия, атомно-силовая микроскопия и оптическая микроскопия ближнего поля.*

Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Приборы нанотехнологий

Сканирующий туннельный микроскоп

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) был создан в 1982 г сотрудниками исследовательского отдела фирмы *IBM* Г. Биннигом и Х. Рёерером. Он открыл многообещающие возможности научных и прикладных исследований в области нанотехники и явился первым техническим устройством, с помощью которого была осуществлена наглядная визуализация атомов и молекул. За создание СТМ авторы в 1986 г были удостоены Нобелевской премии по физике.

Рассмотрим принцип работы сканирующего туннельного микроскопа (см. следующий слайд). К поверхности проводящего образца на характерное межатомное расстояние, составляющее доли нанометра, подводится очень тонкое металлическое острие (*игла*, она же *зонд*).

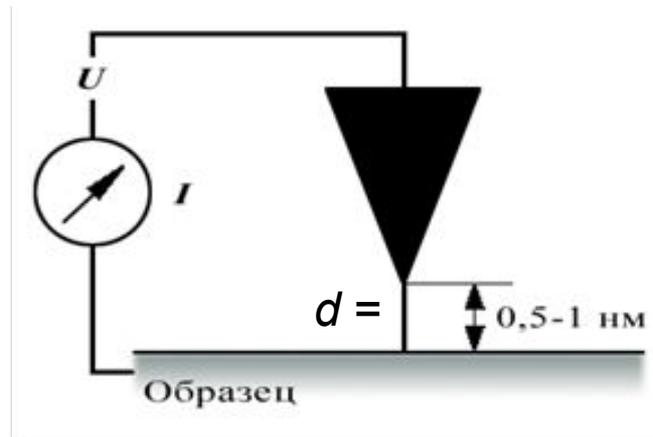
Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Приборы нанотехнологий

Сканирующий туннельный микроскоп

При приложении между образцом и иглой разности потенциалов $U \sim 0,1 \dots 1$ В в цепи (см. рис.) появляется ток, обусловленный туннелированием электронов через зазор d .

Туннельный ток составляет $\sim 1 \dots 10$ нА, т.е. имеет величину, которую вполне можно измерить в эксперименте.

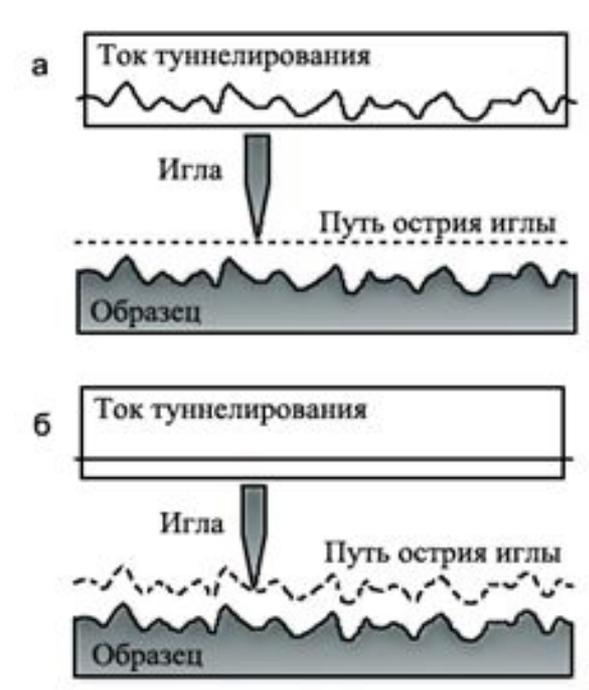


Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Приборы нанотехнологий

Существуют два режима работы СТМ: режим постоянной высоты (*а*) и режим постоянного тока (*б*). При работе в режиме постоянной высоты острие иглы перемещается в горизонтальной плоскости над исследуемой поверхностью (см. рис. *а*). Туннельный ток при этом изменяется и по этим изменениям легко может быть определен рельеф поверхности

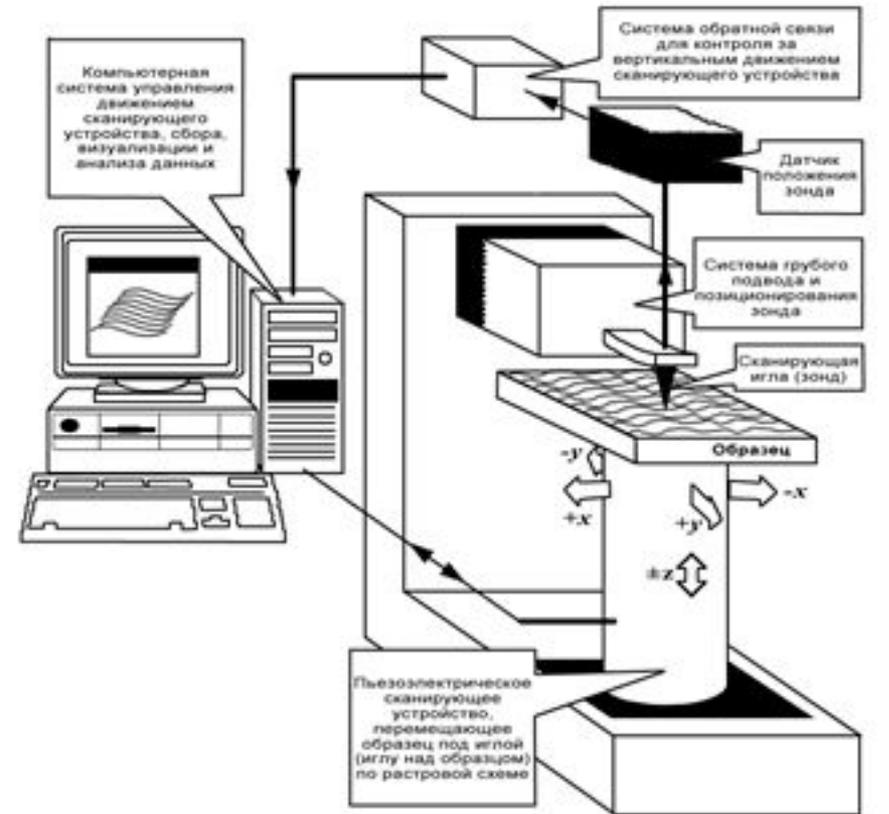
образца. При работе в режиме постоянного тока (рис. *б*) используется система обратной связи, которая поддерживает постоянным туннельный ток за счет перемещения острия иглы в вертикальном направлении. В этом случае информация о рельефе поверхности получается на основании данных о перемещении иглы.



Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Приборы нанотехнологий

Общая схема STM приведена на рисунке. С помощью системы грубого подвода и позиционирования игла STM подводится к исследуемой поверхности на расстояние $\sim 0,1$ мкм. Дальнейшее перемещение иглы и исследование поверхности проводится с помощью специального сканирующего устройства. Это устройство изготовлено из пьезоэлектрика, т.е. вещества, способ-



ного изменять свои линейные размеры при приложении к нему электрического поля, и позволяет перемещать иглу STM над поверхностью образца с очень высокой точностью.

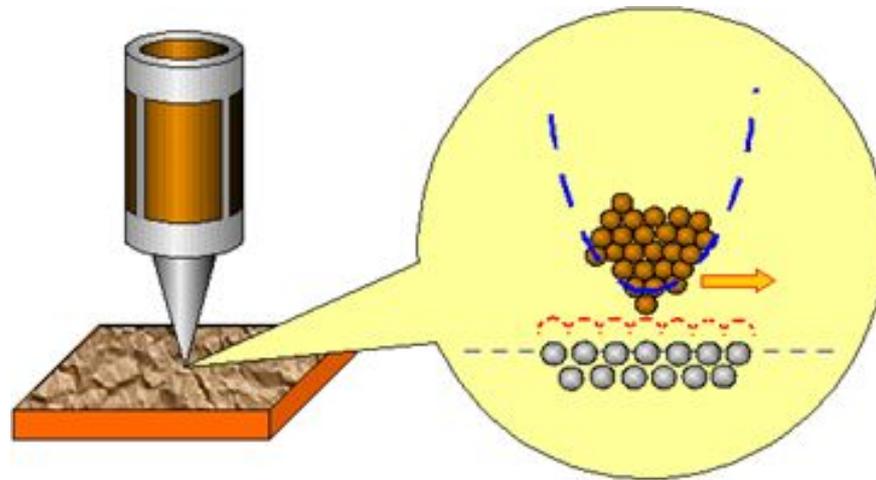
Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Приборы нанотехнологий

Сканирующий туннельный микроскоп

Одним из наиболее важных узлов СТМ является игла (зонд), с помощью которой осуществляется сканирование поверхности образца.

Радиус скругления острия иглы современных зондов составляет 1...50 нм в зависимости от типа СТМ и его предназначения, а также от технологии изготовления.

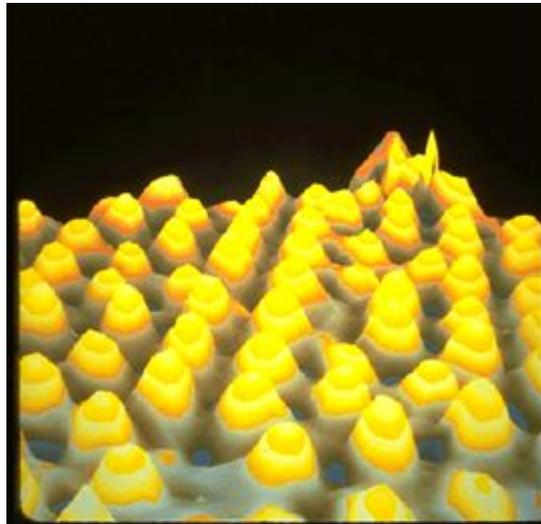


Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Приборы нанотехнологий

Управление движением сканирующего устройства и контроль за работой системы обратной связи осуществляется компьютером. С его помощью проводится запись результатов измерения, их обработка и визуализация исследуемой поверхности.

Типичные результаты исследований, выполненные с помощью СТМ, приведены на рисунке, на котором представлены изображения атомов кремния на поверхности монокристалла кремния (подложка).



Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Приборы нанотехнологий

Определение туннельного тока

Поскольку вероятность туннелирования через потенциальный барьер экспоненциально зависит от ширины барьера – $D = \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \int_{z_1}^{z_2} \sqrt{2m_0[U(z) - E]} dz \right]$,

то туннельный ток при увеличении зазора между иглой и поверхностью образца убывает по экспоненте и уменьшается примерно на порядок при увеличении z на каждые 0,1 нм. Экспоненциальная зависимость туннельного тока от расстояния обеспечивает чрезвычайно высокую разрешающую способность СТМ. Вдоль оси z , перпендикулярной к поверхности образца, разрешающая способность СТМ составляет $\Delta z \sim 10^{-3}$ нм, а вдоль осей x, y , параллельных поверхности образца, $\Delta x, \Delta y \sim 10^{-2}$ нм.

Таким образом, перемещая иглу СТМ вдоль поверхности образца можно получать информацию о рельефе поверхности с атомным пространственным разрешением.

Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

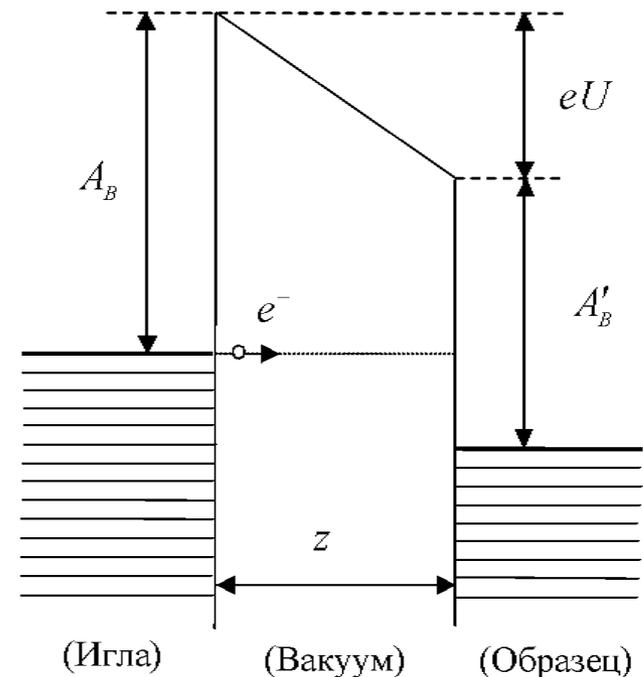
- Приборы нанотехнологий

Определение туннельного тока

Если потенциальный барьер между иглой СТМ и поверхностью образца считать одномерным, то энергетическая диаграмма «туннельного контакта» острия и исследуемой поверхности имеет вид, приведенный на рисунке.

При прямом смещении (см. рис.) электроны в результате туннельного эффекта переходят с заполненных уровней острия на свободные уровни образца. При обратном смещении электроны туннелируют из образца в острие (иглу).

Сила туннельного тока зависит от напряжения смещения, коэффициента прозрачности барьера и плотности состояний электронов вблизи уровня Ферми.



Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Приборы нанотехнологий

Определение туннельного тока

В случае, когда напряжение U невелико (энергия eU меньше работы выхода электрона из металла), выражение для плотности туннельного тока можно записать в виде

$$j = j_0(U) \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m_e A_{cp}} z\right), \quad (1)$$

где m_e - масса электрона, $A_{cp} = \frac{A_B + A'_B}{2}$, где A_B - работа выхода для металла острия, A'_B - работа выхода для металла поверхности, z - ширина потенциального барьера между острием и поверхностью. В (1) считается, что предэкспоненциальный множитель j_0 не зависит от расстояния z , а зависит только от напряжения U . При характерных значениях работы выхода $A_B \sim 4$ эВ константа затухания в экспоненте $\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m_e A_{cp}} \approx 20$ нм⁻¹.

Из (1) следует, что при изменении z на $\sim 0,1$ нм, величина туннельного тока меняется на порядок, что и обуславливает столь высокую чувствительность СТМ.

Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Приборы нанотехнологий

 - Активные функции СТМ

Важной особенностью СТМ является то, что помимо исследовательских функций наблюдения и измерения он может выполнять активные функции (операции):

 - осуществлять захват и перемещение отдельных атомов;
 - манипулировать отдельными молекулами, атомами, квантовыми точками, собирая из них наперед заданные наноструктуры;
 - проводить локальные химические реакции.

Существует два основных способа перемещения атомов по поверхности образца с помощью иглы СТМ – горизонтальный и вертикальный. При горизонтальном способе игла СТМ осуществляет «перекатывание» атома по поверхности. В этом случае процесс перемещения в значительной степени зависит от дефектов поверхности: неровностей (шероховатости), наличия примесных атомов и т.п.

Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Приборы нанотехнологий

- Активные функции СТМ

- Процесс вертикального перемещения подобен работе башенного крана: атом с помощью иглы СТМ отрывают от поверхности образца, перемещают в нужное место а затем опускают и «отцепляют», приближая острие к поверхности и переключая напряжение на игле.

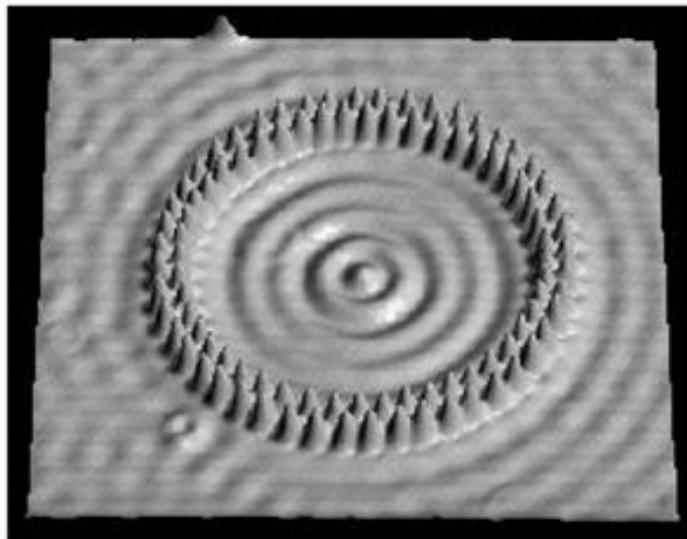
- С помощью СТМ в настоящее время достигнут теоретический предел манипулирования веществом при построении тех или иных конструкций.

- На следующем слайде представлено собранное с помощью СТМ двойное кольцо из атомов железа на поверхности меди, образующее так называемый «квантовый загон».

Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Приборы нанотехнологий
Активные функции СТМ

Внутри «загона» хорошо видны стоячие волны электронной плотности. Они отвечают определенному состоянию электрона, захваченного этой круглой двумерной потенциальной ямой как ловушкой. Полученные данные наглядно подтверждают выводы квантовой механики, согласно которым состояние частицы в потенциальной яме описывается *стоячей волной де Бройля*.



«Квантовый загон»,
собранный из атомов
Fe на поверхности
меди с помощью СТМ

Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Квантовые точки и углеродные нанотрубки

Практические применения квантовых точек

Квантовые точки являются достаточно универсальными объектами, поэтому они находят широкое практическое применение в самых разных областях современных высоких технологий.

1. На основе квантовых точек создаются новые виды полупроводниковых лазеров, в частности оказывается возможным создание сверхмалых лазеров, способных оперировать отдельные живые клетки.
3. Квантовые точки могут быть использованы при создании принципиально новых устройств, например, источников одиночных фотонов для квантовой криптографии.
4. В информационных технологиях (память на квантовых точках, дисплеи на квантовых точках и др.).

Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Квантовые точки и углеродные нанотрубки

Практические применения квантовых точек

4. Одноэлектроника – создание экономичных наноустройств, срабатывающих при перемещении одного электрона.
5. Диагностика объемных микроструктур с субмикронным пространственным разрешением.
7. Медицина (анализ кровеносных сосудов, ранняя диагностика онкологических заболеваний).

Углеродные нанотрубки

Углеродные нанотрубки экспериментально были открыты в 1991 г. японским физиком С. Ииджимой. Они сочетают в себе свойства молекул и твердого тела, поэтому их можно рассматривать как промежуточное состояние вещества (между молекулярным и конденсированным). Нанотрубка представляет собой свернутую в цилиндр графитовую ленту (см. следующий слайд).

Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

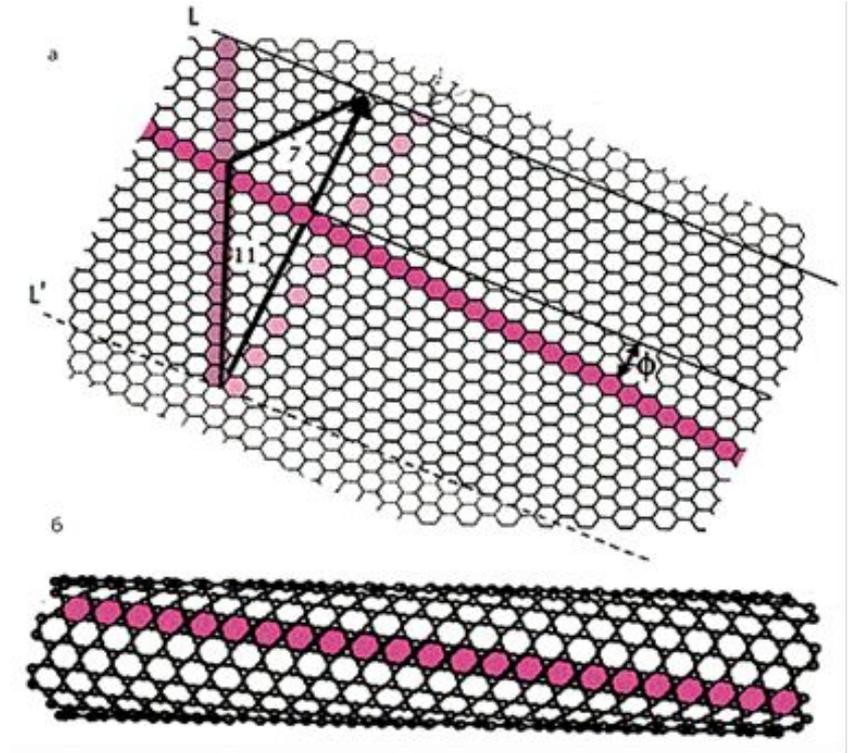
- Квантовые точки и углеродные нанотрубки

Углеродные нанотрубки.

В общем случае *нанотрубки* обладают *винтовой осью симметрии*, при этом углеродные шестиугольники закручиваются по спирали вокруг оси трубки.

Но существуют трубки, у которых шестиугольники ориентированы параллельно оси цилиндра, это *зигзагные трубки*.

Бывают также трубки, называемые *кресельными трубками*, у которых шестиугольники – перпендикулярны оси цилиндра.



Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Квантовые точки и углеродные нанотрубки

Применения углеродных нанотрубок

Чрезвычайно разнообразные свойства углеродных нанотрубок – структурные, электрические, механические и др. определяют широкие возможности их практического применения. Рассмотрим некоторые из них.

1. *Холодные катоды.* Хорошая проводимость нанотрубок в сочетании с миниатюрными размерами и высоким значением отношения длины к диаметру ($> 10^3$) делает их уникальным источником автоэлектронной (холодной, полевой) эмиссии. Использование эмиттеров холодных катодов на основе нанотрубок позволяет заметно улучшить рабочие характеристики плоских мониторов, катодолюминесцентных источников света, рентгеновских трубок и ряда других приборов.

Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Квантовые точки и углеродные нанотрубки

Применения углеродных нанотрубок

2. Использование в электронике. На основе нано-трубок уже созданы выпрямители, транзисторы, осцилляторы нанометровых размеров, быстродействие которых на порядки превосходит быстродействие существующих устройств. В ближайшее время можно будет осуществить революционный переход от кремниевой микроэлектроники к углеродной наноэлектронике.

3. Уникальные перспективы имеют углеродные нанотрубки в медицине, в частности, при создании мозговых имплантантов. Итальянским исследователям удалось вырастить культуру нервных клеток головного мозга человека на субстрате из сети углеродных нанотрубок и установить, что нанотрубки, благодаря своим проводящим свойствам, улучшают передачу нервных импульсов между клетками.

Квантовые объекты и приборы нанотехнологий

- Квантовые точки и углеродные нанотрубки

Применения углеродных нанотрубок

4. Углеродные нанотрубки, как и фуллереновые структуры, являются полыми внутри и могут служить идеальными контейнерами (капсулами) для молекул других веществ. Капсулы из нанотрубок обладают важным свойством защищать капсулированный материал от воздействия со стороны окружающей среды и имеют большие перспективы в различных областях, в частности, в экологии. Особенно интересным представляется нанокапсулирование радиоактивных и магнитных материалов.

5. Благодаря уникальной прочности и упругости углеродные нанотрубки могут быть использованы в качестве армирующих волокон для получения сверхпрочных композитных соединений. (Правительство США приняло программу по созданию спутникового «поводка»).