**Десять в минус девятой**

Популярно о нанотехнологиях

В последнее время в России сложно найти издание, которое не упоминало бы слово "нанотехнологии по поводу и без него. Однако реальный смысл этого термина понятен далеко не всем. В данном проекте, подготовленном с участием специалистов РОСНАНО, мы постараемся рассказать, что на самом деле означает это слово

ЧТО ТАКОЕ "НАНО"?

Приставка "нано" (vavo£ по-гречески - "карлик") означает "одна миллиардная доля". То есть один нанометр (1 нм) - одна миллиардная доля метра (10-9 м). Чтобы оценить масштаб, представьте себе земной шар и копеечную монету - примерно так соотносятся между собой метр и нанометр. Миллиметрами (тысячными долями метра) размечена школьная линейка, микрометры (они же микроны, миллионные доли метра) - размер того, что видно в хороший микроскоп (клетки, микробы и их органы). Сотнями нанометров исчисляются размеры вирусов, десятками - крупные белковые молекулы, с недавних пор - транзисторы в компьютерных процессорах. Простые молекулы измеряются единицами нанометров, атомы - десятыми долями.

НАНОМАСШТАБ

В наномасштабе принято измерять то, что умещается по размерам в диапазон от атомов до вирусов (0,1-100 нм). Почему диапазон наноразмеров вызывает повышенный интерес ученых и технологов? Дело в том, что оперировать с предметами таких размеров исследователи научились совсем недавно. А ведь именно на этом уровне наблюдаются многие процессы фундаментальной важности - от химических реакций до квантовых эффектов. Знание этих процессов позволит создавать наноразмерные структуры, которые придают материалам и устройствам полезные, а иногда просто необыкновенные свойства.

НАУКА И ТЕХНОЛОГИЯ

Способы создания таких наноразмерных структур как раз и называются нанотехнологиями. Вообще говоря, нанотехнологии не являются самостоятельным разделом науки. Скорее это именно комплекс прикладных технологий, фундаментальные основы которых изучаются в таких дисциплинах, как коллоидная химия, физика поверхности, квантовая механика, молекулярная биология и т.п.

ПОЩУПАТЬ НАНОМИР

Разрешения обычного оптического микроскопа (порядка половины длины волны света) недостаточно для предметов наномасштаба. Для того чтобы увидеть наномир, пришлось разработать другие методы

Дифракционный предел для видимого света позволяет достичь примерно 1000-кратного увеличения - это соответствует разрешению порядка нескольких сотен нанометров. Объекты размером в десятки, а тем более метров в такой микроскоп разглядеть невозможно. Поэтому первым шагом к наномиру стал электронный микроскоп.

ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП

По своему принципу он напоминает обычный микроскоп, но вместо света здесь работают электроны, фокусируемые магнитными линзами. Пучок электронов, проходя через тонкий образец, взаимодействует с ним, а затем попадает на люминесцентный экран, делающий картину видимой для человеческого глаза. На фотографиях, сделанных с помощью просвечивающего электронного микроскопа, который позволяет достигать увеличения в миллионы раз, уже видны атомные слои и ступеньки. Атомы там имеют вид точек, а чтобы рассмотреть поверхность детально, нужны более совершенные инструменты, использующие другие принципы.

\*\*\*

ЭЛЕКТРОНЫ ВМЕСТО СВЕТА

До 1980-х годов электронный микроскоп, разработанный в 1930-х, оставался единственным способом заглянуть в наномир

\*\*\*

Как работает электронный микроскоп (ЭМ) Работа ЭМ основана на том, что электроны, подобно фотонам, проявляют одновременно и корпускулярные (присущие частицам), и волновые свойства. Разогнанные до высоких энергий, они могут иметь дебройлевскую длину волны в сотые доли нанометра (15 кэВ соответствует 0,01 нм). И хотя электронные линзы значительно уступают оптическим по фокусировочным свойствам, увеличение электронного микроскопа может достигать миллионов раз, а разрешение - десятых долей нанометра.

\*\*\*

Сканирующий туннельный микроскоп

Рассматривать отдельные атомы позволяет устройство, использующее квантовый эффект туннелирования - сканирующий туннельный микроскоп (СТМ). Впрочем, если быть точным, сканирующий туннельный микроскоп не рассматривает, а скорее "ощупывает" исследуемую поверхность. Не в буквальном смысле, конечно: очень тонкая игла-зонд с острием толщиной в один атом перемещается над поверхностью объекта на расстоянии порядка одного нанометра. При этом, согласно законам квантовой механики, электроны преодолевают вакуумный барьер между объектом и иглой - туннелируют, и между зондом и образцом начинает течь ток. Величина этого тока очень сильно зависит от расстояния между концом иглы и поверхностью образца - при изменении зазора на десятые доли нанометра ток может возрасти или уменьшиться на порядок. Так что, перемещая зонд вдоль поверхности с помощью пьезоэлементов и отслеживая изменение тока, можно исследовать ее рельеф практически "на ощупь".

Создание СТМ стало значительным шагом в освоении наномира. В 1986 году сотрудникам Исследовательского центра компании IBM в Цюрихе Герду Биннигу и Генриху Рореру за это достижение была присуждена Нобелевская премия.

СТМ позволяет увидеть детали поверхности с разрешением в сотые и даже тысячные доли нанометра (соответствует увеличению порядка 100 миллионов раз). На самом деле, как уже было сказано, это не фотография. Это всего лишь графическое изображение того, как меняется зазор между зондом и поверхностью для поддержания постоянного значения тока. Взаимодействие зонда СТМ с электронными оболочками атомов дает возможность изучить самые мельчайшие подробности, доступные на сегодняшний день.

МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ СИЛОВАЯ ТОМОГРАФИЯ

Магнитно-резонансная СМР) томография буквально произвела революцию в современной медицине. Впервые стало возможным наблюдать за биологическими процессами в реальном времени, не нарушая их естественного протекания. Однако наибольшее разрешение современных томографов измеряется долями миллиметра, при переходе к меньшему масштабу начинают возникать проблемы. Специальные MP-микроскопы имеют разрешение порядка микрометров - это все, что удается получить с помощью традиционных магнитно-резонансных методов. Добиться большей точности мешает шум в принимаемом катушками сигнале. Но ученые придумали способ обойти это ограничение: в недавно появившихся магнитно-резонансных силовых микроскопах используется прямое измерение силы взаимодействия градиентного магнитного поля со спинами ядер водорода в образце, расположенном на наконечнике кантилевера. Отклонение кантилевера измеряется с помощью лазерного интерферометра. Используя эту технику, в 2007 году в Альмаденском исследовательском центре IBM в Сан-Хосе было достигнуто разрешение порядка 0,1 мкм (на срезе неорганического образца). А совсем недавно там же исследователи построили и продемонстрировали возможности трехмерного MP-сканирования на образце вируса табачной мозаики (диаметром 18 нм и длиной до 300 нм). Совместив MP силовую микроскопию с трехмерным механическим сканированием и используя специальный алгоритм обработки полученных данных, ученые смогли достичь пространственного разрешения порядка 4 нм при сканировании биологического образца.

\*\*\*

КАК РАССМОТРЕТЬ ЖИВЫЕ ВИРУСЫ

Образец располагается на наконечнике кантилевера, под которым расположен постоянный магнит, создающий градиентное магнитное поле. Вокруг провода создается радиочастотное магнитное поле, взаимодействие спинов с полем определяется по амплитуде отклонения кантилевера

\*\*\*

АТОМЫ НА ОЩУПЬ

Атомно-силовой микроскоп буквально ощупывает образец, регистрируя силу взаимодействия между зондом и поверхностью

\*\*\*

Увидеть нанометр

АСМ и СТМ - частные случаи так называемой сканирующей зондовой микроскопии, очень мощного исследовательского инструмента, позволяющего изучать различные свойства поверхностей, а не только рельеф. Все определяется тем, что использовать в качестве зонда. Скажем, с помощью проводящей иглы можно изучать локальные диэлектрические свойства поверхности с нанометровой точностью - это электросиловая микроскопия (ЭСМ). С помощью ферромагнитного зонда можно изучать распределение магнитного поля в нанометровых масштабах (МСМ, магнитно-силовая микроскопия).

Один из самых интересных и экзотических вариантов зондовой микроскопии - сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия СБОМ), разработанная сотрудником Исследовательского центра IBM в Цюрихе Дитером Полем. В качестве зонда при этом используется диафрагма диаметром в несколько нанометров. Свет с длиной волны в сотни нанометров способен проникать через такую субволновую диафрагму согласно законам квантовой механики, но на небольшое расстояние, сравнимое с диаметром отверстия (это так называемое ближнее поле). Если разместить там образец, отраженный от него свет можно зарегистрировать. При этом получается настоящее изображение поверхности в видимом свете, зависящее от ее локальных оптических свойств, причем с нанометровым разрешением!

\*\*\*

АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОП

У СТМ есть одно важное ограничение: объектом исследования могут быть только металлы или полупроводники (напомним, что эффект основан на туннельном токе). Диэлектрики в СТМ "рассмотреть" не получится. Для их исследования разработчиками СТМ был предложен другой метод, названный сканирующей атомно-силовой микроскопией. Принцип его работы заключается в том, что на малых расстояниях между зондом и образцом действует сила, величина и направление которой зависят от зазора. Эту силу измеряют, закрепляя иглу зонда на упругом консольном подвесе (кантилевере) и определяя ее отклонение. С помощью атомно-силовой микроскопии можно изучать любые поверхности - независимо от того, являются ли они проводниками или диэлектриками.

Одно из важных преимуществ атомно-силового микроскопа (АСМ) - возможность его применения при исследованиях биологических образцов: он не требует вакуума или тонких слоев (в отличие от электронного микроскопа). АСМ также позволяет изучать не только рельеф поверхности, но и взаимодействие между конкретными молекулярными объектами - достаточно "закрепить" на острие зонда одну из изучаемых молекул. Однако АСМ сильно уступает СТМ по разрешению (порядка единиц нанометров) из-за сильных тепловых шумов, влияющих на измерения.

\*\*\*

СКАНИРУЮЩИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП

Если не просвечивать образец, а сканировать его поверхность сфокусированным в очень маленькое пятно (несколько нанометров) пучком электронов, последние не только рассеиваются на атомах образца, но и порождают вторичные электроны, рентгеновское и видимое излучение. На регистрации этих данных основана работа сканирующего электронного микроскопа. В отличие от просвечивающего ЭМ, с его помощью можно исследовать "толстые" образцы. Регистрируя углы рассеяния, интенсивность излучения и энергии вторичных электронов, можно изучать не только рельеф поверхности, но и химический состав образца, а также структуру образца в приповерхностном слое (десятки и сотни нанометров). Разрешение сканирующего электронного микроскопа обычно несколько меньше, чем у просвечивающего, и составляет от единиц до десятков нанометров.

**Список литературы**

Популярная механика № 4 (78) апрель 2009