



К 100 - ЛЕТИЮ И. К. КИКОИНА

Нанотехнологии: когда размер имеет значение

К.БОГДАНОВ

Вы можете произнести слово «птица» на самых разных языках, но, сделав это, вы все равно ничего нового о птицах не узнаете. Не лучше ли сначала просто взглянуть на любую птицу и задуматься над тем, что это такое!. Существует большая разница между знанием названия чего-нибудь и знанием того, как это работает.

Р.Фейнман

НА НАШИХ ГЛАЗАХ ФАНТАСТИКА СТАНОВИТСЯ реальностью – люди научились перемещать отдельные атомы и складывать из них, как из кубиков, устройства и механизмы необычайно малых размеров и поэтому невидимые обычным глазом. Появилась целая отрасль науки – НАНОТЕХНОЛОГИЯ, впитавшая в себя самые новые достижения физики, химии и биологии. Ученые-нанотехнологи работают с ничтожно малыми объектами, размеры которых измеряются в нанометрах. Нанотехнология – не просто количественный, а качественный скачок от работы с веществом к манипуляции отдельными атомами.

В переводе с греческого слово «нано» означает карлик. Один нанометр (нм) – это одна миллиардная часть метра (10^{-9} м). Нанометр во столько же раз меньше одного метра, во сколько раз толщина пальца меньше диаметра Земли. Размеры объектов, с которыми имеют дело нанотехнологи, лежат в диапазоне от 0,1 до 100 нм. Большинство атомов имеют диаметр от 0,1 до 0,2 нм, толщина нитей ДНК – около 2 нм, диаметр эритроцитов – 7000 нм, а толщина человеческого волоса – 80000 нм.

Ученые утверждают, что в наступившем XXI веке стержнем новой технической революции станут материалы, лекарства, устройства, средства связи и доставки, сделанные с использованием нанотехнологий.

С чего все начиналось

Идея о том, что вполне возможно собирать устройства и работать с объектами, которые имеют наноразмеры, впервые прозвучала в выступлении лауреата Нобелевской премии Ричарда Фейнмана в 1959 году в Калифорнийском технологическом институте. Лекция называлась «Там, внизу, полно места!» Слово «внизу» в названии лекции означало в «мире очень малых размеров». Тогда Фейнман сказал, что когда-нибудь, например в 2000 году, люди будут удивляться тому,

что до 1960 года никто не относился серьезно к исследованиям наномира. По словам Фейнмана, человек очень долго жил, не замечая, что рядом с ним живет целый мир объектов, разглядеть которые он не в состоянии. Ну, а если мы не видим эти объекты, то мы не можем и работать с ними.

Тем не менее, наши клетки – кирпичики, из которых состоит наш организм, – прекрасно научились работать сnanoобъектами. Клетка всю свою жизнь собирает из различных атомов молекулы сложных веществ. Собрав эти молекулы, клетка размещает их в различных частях – одни оказываются в ядре, другие – в цитоплазме, а третьи – в мембране. Представьте себе возможности, которые открываются перед человечеством, если оно овладеет такими же нанотехнологиями, которыми уже владеет каждая клетка человека.

Фейнман так описывает последствия нанотехнологической революции для компьютеров: «Если, например, диаметр соединяющих проводов будет составлять от 10 до 100 атомов, то размер любой схемы не будет превышать нескольких тысяч ангстрем. Каждый, кто связан с компьютерной техникой, знает о тех возможностях, которые обещает ее развитие и усложнение. Если число используемых элементов возрастет в миллионы раз, то возможности компьютеров существенно расширятся. Они научатся рассуждать, анализировать опыт и рассчитывать собственные действия, находить новые вычислительные методы и т. п. Рост числа элементов приведет к важным качественным изменениям характеристик ЭВМ».

Позав ученых в наномир, Фейнман сразу же предупреждает о тех препятствиях, которые их там ожидают, на примере изготовления микроавтомобиля длиной всего 1 мм. Так как детали обычного автомобиля сделаны с точностью 10^{-5} м, то детали микроавтомобиля следует изготавливать с точностью в 4000 раз выше, т.е. $2,5 \cdot 10^{-9}$ м. Таким образом, размеры деталей микроавтомобиля должны соответствовать расчетным с точностью ± 10 слоев атомов.

Наномир не только полон препятствий и проблем. Нас в наномире ожидают и хорошие новости – все детали наномира оказываются очень прочными. Происходит это из-за того, что масса nanoобъектов уменьшается пропорционально третьей степени их размеров, а площадь их поперечного сечения – пропорционально второй степени. Значит, механическая нагрузка на

каждый элемент объекта – отношение силы тяжести элемента к площади его поперечного сечения – уменьшается пропорционально размерам объекта. Таким образом, пропорционально уменьшенный наностол обладает в миллиард раз более толстыми наноножками, чем это необходимо из соображений прочности.

Фейнман считал, что человек сможет легко освоить наномир, если создаст робота, способного делать уменьшенную, но работоспособную копию самого себя. Пусть, например, мы научились делать робот, который может без нашего участия создавать свою уменьшенную в 4 раза копию. Тогда этот маленький робот сможет сделать копию первоначального, уменьшенную уже в 16 раз, и так далее (рис.1). Очевидно, что десятое поколение таких роботов будет создавать роботы, размеры

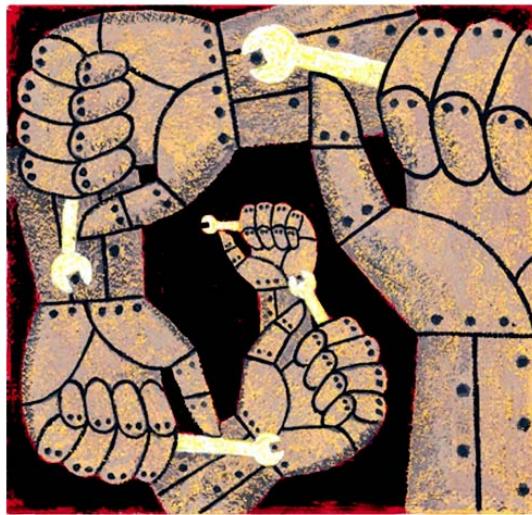


Рис.1. Иллюстрация концепции Р.Фейнмана о том, чтобы роботы научились автономно делать свои уменьшенные копии которых будут в миллионы раз меньше первоначальных.

Конечно, по мере уменьшения размеров мы будем постоянно сталкиваться с весьма необычными физическими явлениями. Ничтожный вес деталей наноробота приведет к тому, что они будут прилипать друг другу под действием сил межмолекулярного взаимодействия, и гайка, например, не будет отделяться от болта после откручивания. Однако известные нам законы физики не запрещают создавать объекты «атом за атомом». Манипуляция атомами, в принципе, вполне реальна и не нарушает никаких законов природы. Практические же трудности ее реализации обусловлены лишь тем, что мы сами являемся слишком крупными и громоздкими объектами, вследствие чего нам сложно осуществлять такие манипуляции.

Чтобы как-то стимулировать создание микрообъектов, Фейнман обещал заплатить 1000 долларов тому, кто соорудит электромоторчик размером 1/64 дюйма (1 дюйм ≈ 2,5 см). И совсем скоро такой микромоторчик был создан. С 1993 года ежегодно присуждается

премия имени Фейнмана за выдающиеся достижения в области нанотехнологий.

В своей лекции Фейнман говорил и о перспективах нанохимии. Сейчас химики используют для синтеза новых веществ сложные и разнообразные приемы. Как только физики создадут устройства, способные оперировать отдельными атомами, многие методы традиционного химического синтеза могут быть заменены приемами «атомной сборки». При этом, как считал Фейнман, физики действительно могут научиться синтезировать любое вещество, исходя из записанной химической формулы. Химики будут заказывать синтез, а физики – просто «укладывать» атомы в предлагаемом порядке. Развитие техники манипуляции на атомарном уровне позволит решить многие проблемы химии и биологии.

Машины созидания

Нанотехнология стала самостоятельной областью науки и превратилась в долгосрочный технический проект после детального анализа, проведенного американским ученым Эриком Дрекслером в начале 1980-х годов, и публикации его книги «Машины созидания: грядущая эра нанотехнологии».

По определению Дрекслера, нанотехнология – «ожидаемая технология производства, ориентированная на дешевое получение устройств и веществ с заранее заданной атомарной структурой». Как считают многие специалисты, в течение следующих 50 лет многие устройства станут такими маленькими, что тысяча таких наномашин вполне смогут разместиться на площади, занимаемой точкой в конце этого предложения.

Чтобы собирать наномашины, необходимо:

1) научиться работать с одиночными атомами – брать их и ставить на нужное место;

2) разработать сборщики – наноустройства, которые могли бы соответствующим образом работать с одиночными атомами по программам, написанным человеком, но без его участия;

3) разработать репликаторы – устройства, которые бы изготавливали наносборщики, так как их понадобится очень и очень много.

Что такое нанопроволоки и почему они такие прочные?

Нанопроволоками называют проволоки с диаметром несколько десятков и менее нанометров, изготовленные из металла, полупроводника или диэлектрика. Длина нанопроволок часто может превышать их диаметр в 1000 и более раз. Нанопроволоки часто называют одномерными структурами, а их чрезвычайно малый диаметр (около 100 размеров атома) дает возможность проявляться различным квантово-механическим эффектам. Поэтому нанопроволоки иногда называют «квантовыми проволоками». Уникальные электрические и механические свойства нанопроволок создают предпосылки для их использования в будущих наноэлектронных и наноэлектромеханических приборах, а также в качестве элементов новых композитных материалов и биосенсоров.

В природе нанопроволок не существует. В лабораториях нанопроволоки чаще всего получают методом эпитаксии, т.е. ориентированного роста одного монокристалла на поверхности другого, когда кристаллизация вещества происходит только в одном направлении. Например, нанопроволоку из кремния можно вырастить так, как изображено на рисунке 2 слева. Наноча-

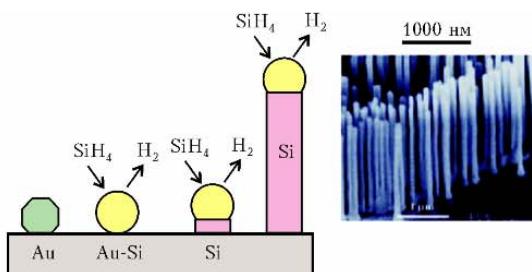


Рис.2. Получение кремниевой нанопроволоки методом эпитаксии с помощью золотой наночастицы

стину золота помещают в атмосферу газа силана (SiH_4), и эта наночастица становится катализатором реакции распада силана на водород и жидкий кремний. Жидкий кремний скатывается с золотой наночастицы и кристаллизуется под ней. Если концентрация силана вокруг наночастицы поддерживается неизменной, то процесс эпитаксии продолжается, и все новые слои жидкого кремния кристаллизуются на его уже затвердевших слоях. В результате нанопроволока из кремния растет, приподнимая наночастицу золота все выше и выше. При этом, очевидно, размер наночастицы определяет диаметр нанопроволоки. Справа на рисунке 2 показан «лес» из ZnO -нанопроволок, полученных аналогичным образом.

Как известно, прочность – это свойство твердых тел сопротивляться разрушению (разделению на части), а также необратимому изменению формы под действием внешних нагрузок. Когда цилиндрический образец с площадью поперечного сечения S растягивают силой F , он деформируется сначала обратимо, т.е. упруго – его механическое напряжение $\sigma = F/S$ растет прямо пропорционально относительному удлинению $\varepsilon = (L - L_0)/L_0$ (рис.3, область O), затем пластически, т.е. необратимо (рис.3, область P). При дальнейшей деформации структурные неоднородности образ-

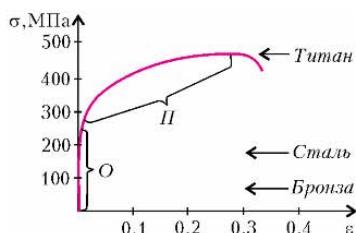


Рис.3. Взаимосвязь между механическим напряжением и относительной деформацией образца. Стрелками указаны пределы прочности для некоторых материалов

ца (дефекты кристаллической решетки, или дислокации) начинают двигаться и, сталкиваясь с другими, образуют микротрецины. При этом чем больше будет этих дислокаций и чем быстрее они смогут двигаться по образцу, тем больше будет микротрецин. Когда растягивающее напряжение достигает предела прочности, соседние микротрецины, соединяясь друг с другом, достигают критического размера, и образец разрушается.

Нанопроволока – это монокристалл, в кристаллической решетке которого практически отсутствуют дефекты (дислокации). При этом отношение площади поверхности к объему для нанопроволок гораздо больше, чем для образцов обычных размеров. Поэтому поверхность нанопроволок легко «поглощает» выходящие наружу дислокации без образования микротрецин. Кроме того, поверхность нанопроволоки, имеющая чрезвычайно малый радиус кривизны (около 10 нм), сильно сжата и поэтому препятствует движению дислокации наружу, т.е. образованию микротрецины. Все это приводит

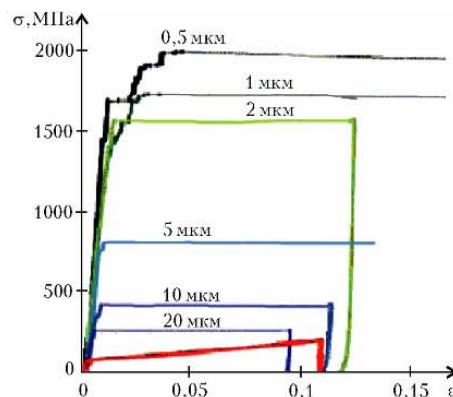


Рис.4. Зависимость механического напряжения от относительной деформации для микрообразцов из никеля и его сплавов разного диаметра. Для сравнения красным показана эта зависимость для поликристаллического макрообразца

к тому, что у нанопроволок почти отсутствует пластическая деформации, а предел прочности в десятки раз выше, чем у обычных образцов (рис.4).

Почему наночастицы плавятся при низкой температуре?

При уменьшении размеров частиц изменяются не только механические свойства, но и термодинамические характеристики. Так, температура плавления становится гораздо ниже, чем у образцов обычного размера. На рисунке 5 представлена экспериментальная кривая падения температуры плавления наночастиц алюминия с уменьшением размеров частицы. При этом температура плавления частицы размером 4 нм уменьшается на 140 °C по сравнению с температурой плавления образца алюминия обычных размеров.

Зависимости, аналогичные той, которая показана на рисунке 5, были получены для многих металлов. Так, при уменьшении диаметра наночастиц из олова до 8 нм

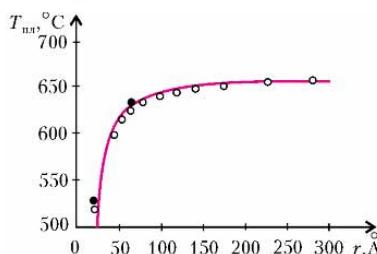


Рис.5. Зависимость температуры плавления алюминиевых наночастиц от их радиуса

их температура плавления падает на 100°C . При этом самое большое падение температуры плавления (более чем на 500°C) было обнаружено у наночастиц золота.

У наночастиц почти все атомы – на поверхности. Причиной понижения температуры плавления у наночастиц служит то, что атомы на поверхности всех кристаллов находятся в особых условиях, а доля таких поверхностных атомов у наночастиц становится очень большой. Сделаем оценку этой поверхностной доли для алюминия.

Легко вычислить, что в 1 см^3 алюминия содержится примерно $6 \cdot 10^{22}$ атомов. Для простоты будем считать, что атомы находятся в узлах кубической кристаллической решетки, тогда расстояние между соседними атомами будет около $4 \cdot 10^{-8} \text{ см}$. Значит, плотность атомов на поверхности составит $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Теперь возьмем кубик из алюминия с ребром 1 см. Число поверхностных атомов у него $36 \cdot 10^{14}$, а число атомов внутри $6 \cdot 10^{22}$. Таким образом, доля поверхностных атомов у такого алюминиевого кубика «обычных» размеров составляет всего $6 \cdot 10^{-8}$.

Если сделать такие же вычисления для кубика из алюминия размером 5 нм, то окажется, что на поверхности такого «нанокубика» находится уже 12% всех его атомов. Ну, а на поверхности кубика размером 1 нм вообще находится больше половины всех атомов! Зависимость поверхностной доли α от числа атомов N показана на рисунке 6.

На поверхности кристалла порядка нет. С начала 60-х годов прошлого века ученые считают, что атомы, расположенные на поверхности кристаллов, пребыва-

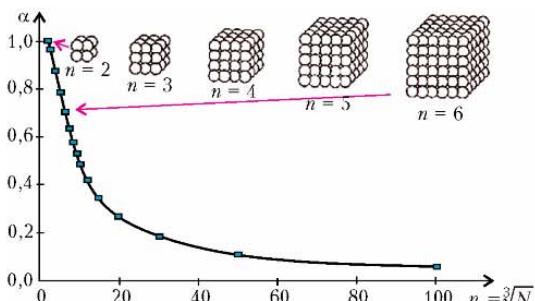


Рис.6. Зависимость поверхностной доли атомов от их числа в кубике кристаллического вещества

ют в особых условиях. Силы, заставляющие их находиться в узлах кристаллической решетки, действуют на них только снизу. Поэтому поверхностным атомам (или молекулам) ничего не стоит «уклониться от советов и объятий» молекул решетки. И если это происходит, то к такому же решению приходят сразу несколько поверхностных слоев атомов. В результате на поверхности всех кристаллов образуется пленка жидкости. Кстати, кристаллы льда не являются исключением (рис.7), поэтому лед и скользкий.

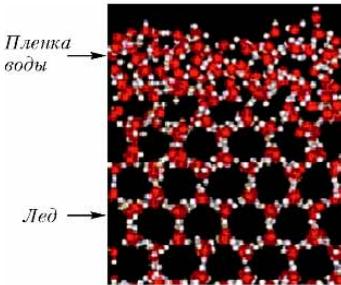


Рис.7. Схематическое изображение поперечного сечения среза льда. Красные кружки – атомы кислорода, белые – водорода

Толщина жидкой пленки на поверхности кристалла растет с температурой, так как более высокая тепловая энергия молекул вырывает из кристаллической решетки большие поверхностных слоев. Теоретические оценки и эксперименты показывают, что как только толщина жидкой пленки на поверхности кристалла начинает превышать $1/10$ размеров кристалла, кристаллическая решетка разрушается.

Очевидно, что «легкоплавкость» наночастиц следует учитывать на любых нанопроизводствах. Известно, например, что размеры современных элементов электронных микросхем находятся в нанодиапазоне. Поэтому понижение температуры плавления кристаллических нанообъектов накладывает определенные ограничения на температурные режимы работы современных и будущих микросхем.

Закон Ома для углеродных нанотрубок

В наномире изменяются не только механические свойства и температуры плавления веществ, но и их электрические характеристики. Оказывается, сопротивление R цилиндрического резистора наноразмеров нельзя вычислять по известной формуле $R = \rho L/S$, где L – длина, S – площадь поперечного сечения, а ρ – удельное сопротивление материала резистора. Мало того, сопротивление R_0 нанорезисторов вообще не зависит от их размеров и вещества, из которого они сделаны, а определяется только двумя фундаментальными физическими константами:

$$R_0 = \frac{h}{2e^2} = 12,9 \text{ кОм},$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, а $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж/с – постоянная Планка. Величину R_0 назвали квантом электрического сопротивления,

имея в виду, что в наномире сопротивления всех резисторов одинаковы.

Квантование электрического сопротивления – не единственная особенность проводимости в наномире. Оказалось, что в нанорезисторе при прохождении тока не выделяется джоулево тепло. Этую необычную проводимость в наномире, независящую от размеров и материала резистора и не сопровождающуюся выделением тепла, назвали баллистической. В переводе с греческого «баллио» означает бросаю; соответственно, баллистика – наука о движении артиллерийских снарядов, пули и т.п. Названием проводимости в наномире «баллистической» его авторы хотели подчеркнуть, что электроны, как искусно запущенные снаряды, движутся через нанорезистор, не сталкиваясь с его атомами, находящимися в узлах кристаллической решетки.

Углеродные нанотрубки – квантовые резисторы. Примером нанорезисторов, обладающих баллистической проводимостью, являются углеродные нанотрубки – протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров. Углеродные нанотрубки – это каркасные структуры или гигантские молекулы, состоящие только из атомов углерода. Такую нанотрубку легко себе представить, если вообразить, что вы сворачиваете в трубку один из молекулярных слоев графита – графен (рис.8). Способ сворачивания нанотрубок – угол между направлением оси нанотрубки по

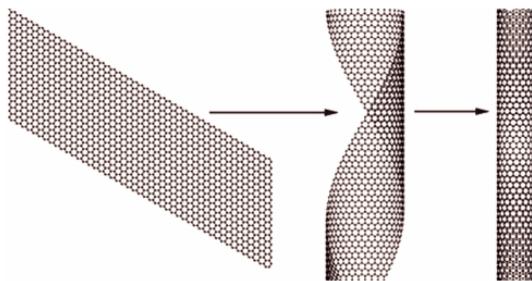


Рис.8. Один из способов воображаемого изготовления нанотрубки из молекулярного слоя графита

отношению к осям симметрии графена (угол закручивания) – во многом определяет ее свойства.

Конечно, никто не изготавливает нанотрубки, сворачивая их из графитового листа. Нанотрубки образуются сами, например – на поверхности угольных электродов при дуговом разряде между ними. При разряде атомы углерода испаряются с поверхности и, соединяясь между собой, образуют нанотрубки самого различного вида – однослойные, многослойные и с разными углами закручивания. В зависимости от угла закручивания нанотрубки могут обладать высокой, как у металлов, проводимостью, а могут иметь свойства полупроводников. Дальше речь пойдет только о нанотрубках с высокой проводимостью.

Открытие квантовой проводимости углеродных нанотрубок было сделано, когда измеряли зависимость их сопротивления от длины, погружая их в ртуть.

Диаметр нанотрубок составлял от 1,4 до 50 нм, а длина – от 1 до 5 мкм. Но несмотря на такой большой разброс в размерах сопротивление ВСЕХ нанотрубок составляло 12,9 кОм.

Почему электричество в наномире превращается в оптику? Ток переносится в проводнике электронами, образующими так называемый электронный газ. Среднеквадратичный импульс \bar{p} одного из таких электронов можно найти из соотношения для среднеквадратичной энергии \bar{E} частицы идеального газа:

$$\bar{E} = \frac{\bar{p}^2}{2m_e} = \frac{3}{2}kT,$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона. Подставляя сюда $T = 300$ К, получаем $\bar{p} = 10,6 \cdot 10^{-26}$ кг·м/с.

Известно, что каждую частицу можно представить в виде волны де Бройля с длиной волны $\lambda = h/p$. Для электрона проводимости в металле получаем $\lambda = 6,2$ нм. Это значит, что для углеродных нанотрубок диаметром несколько нанометров или меньше электрон проводимости будет проявлять главным образом волновые свойства. Через такие нанотрубки электроны будут проходить, как световые волны проходят через световоды. Таким образом, электричество в наномире превращается в оптику, а джоулево тепло рассеивается только на границах наномира, где, например, нанотрубка соединяется с проводником обычных размеров.

Чему равен квант сопротивления R_0 ? Попробуем вывести «на пальцах» упомянутую выше красивейшую формулу, связывающую квант сопротивления с фундаментальными физическими константами. Так как нанотрубка обладает баллистической проводимостью, а значит джоулево тепло в ней не выделяется, можно считать, что ее длина меньше длины свободного пробега электрона проводимости. Пусть между сечениями A и B нанотрубки приложено напряжение U , а сила тока в ней равна I . Поскольку энергия не рассеивается, изменение энергии ΔE электрона между сечениями A и B составляет $\Delta E = eU$. Это изменение энергии произошло за интервал времени Δt , равный времени пролета электрона между сечениями A и B . Соотношение неопределенностей Гейзенберга накладывает определенные ограничения на изменения ΔE и Δt :

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar,$$

откуда следует, что

$$U \approx \frac{\hbar}{e\Delta t}.$$

Оценим теперь силу тока в нанотрубке. Нанотрубка – одномерная квантовая структура. В ней, как в атоме гелия, могут уживаться только два электрона, обладающие разными значениями спина. Это означает, что ток I между сечениями A и B нанотрубки равен

$$I = \frac{2e}{\Delta t}.$$

Из двух последних соотношений легко найти формулу для сопротивления R_0 между сечениями A и B нано-

трубки:

$$R_0 = \frac{U}{I} = \frac{h}{2e^2}.$$

Кстати, эту формулу можно вывести и с помощью теории размерностей, считая, что квант сопротивления может зависеть только от двух мировых констант – элементарного заряда и постоянной Планка.

Так как нагрев у нанотрубок отсутствует, они способны пропускать токи огромной плотности – более 10^7 А/см². Если бы у углеродных нанотрубок была обычная (не баллистическая) проводимость, то при токах аналогичной плотности их температура выросла бы до 20000 К, что гораздо выше температуры их сгорания (700 К).

Существование баллистической проводимости дает зеленый свет инженерам, старающимся еще и еще уменьшить размеры электронных микросхем: уменьшайте элементы микросхем до наноразмеров, и схемы перестанут нагреваться!

Почему цвет наночастицы может зависеть от размера?

Нас окружают предметы обычных размеров, и мы привыкли к тому, что цвет предмета зависит только от оптических свойств вещества, из которого он сделан, или красителя, которым покрашен. В наномире такое представление оказывается несправедливым, и это отличает нанооптику от обычной.

Лет 10–15 тому назад нанооптики вообще не существовало. Да и как она могла быть, если из курса обычной оптики следует, что свет не чувствует нанообъекты, поскольку их размеры существенно меньше длины волны света $\lambda = 400 - 800$ нм. Согласно волновой теории света, нанообъекты не должны иметь тени и свет от них не может отражаться. Сфокусировать видимый свет на площади, соответствующей нанообъекту, тоже нельзя. Значит, и увидеть наночастицы невозможно.

Однако, с другой стороны, световая волна, как и любое электромагнитное поле, все-таки должна действовать на нанообъекты. Например, свет, упав на полупроводниковую частицу, может своим электрическим полем оторвать от ее атома один из валентных электронов. Этот электрон на некоторое время станет электроном проводимости, а потом опять вернется «домой», испустив при этом квант света, соответствующий ширине так называемой запрещенной зоны – минимальной энергии, необходимой для того, чтобы валентному электрону стать свободным (рис.9).

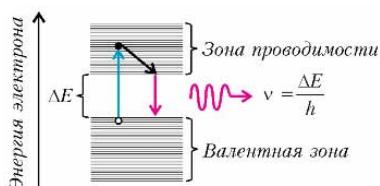


Рис.9. Схематическое изображение уровней энергии и энергетических зон электрона в полупроводнике

Таким образом, полупроводники даже наноразмеров должны чувствовать падающий на них свет, испуская при этом свет меньшей частоты. Другими словами, полупроводниковые наночастицы на свету могут становиться флуоресцентными, испуская свет строго определенной частоты, соответствующей ширине запрещенной зоны.

Светиться в соответствии с размером! Флуоресцентная способность полупроводниковых наночастиц была обнаружена в самом конце прошлого века. И, самое интересное, оказалось, что частота света, испускаемого этими частицами, уменьшается с увеличением размеров частиц.

Как видно из рисунка 10, цвет взвеси наночастиц зависит от их диаметра. Зависимость цвета флюоресценции, т.е. ее частоты v , от размера наночастицы

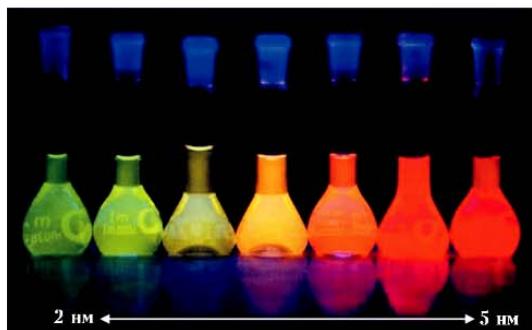


Рис.10. Флюоресценция взвесей коллоидных частиц различных размеров (от 2 до 5 нм). Сверху все колбы освещаются одним и тем же синим светом, содержащим ультрафиолетовую составляющую

означает, что от размера частицы зависит также и ширина запрещенной зоны ΔE . Глядя на рисунок 10, можно утверждать, что при увеличении размеров наночастиц ширина запрещенной зоны ΔE должна уменьшаться, так как $\Delta E = hv$. Такую зависимость можно объяснить следующим образом.

«Оторваться» легче, если вокруг много соседей. Минимальная энергия, необходимая для отрыва валентного электрона и перевода его в зону проводимости, зависит не только от заряда атомного ядра и положения электрона в атоме. Чем больше вокруг атомов, тем легче оторвать электрон – ведь ядра соседних атомов тоже притягивают его к себе. Этот же вывод справедлив и для ионизации атомов.

На рисунке 11 показано, как меняется среднее число ближайших соседей n у атома платины при увеличении диаметра частицы D . Когда число атомов в частице невелико, значительная их часть расположена на поверхности, а, значит, среднее число ближайших соседей гораздо меньше того, которое соответствует кристаллической решетке платины (11). При увеличении размеров частицы среднее число ближайших соседей приближается к пределу, соответствующему данной кристаллической решетке. Из рисунка следует, что ионизовать (оторвать электрон) атом

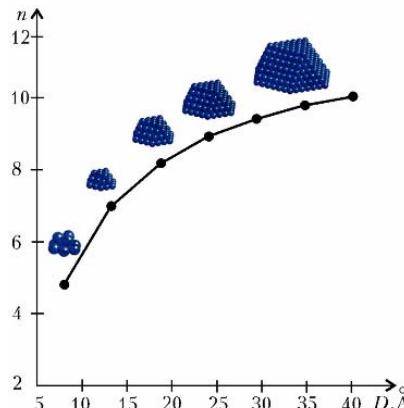


Рис.11. Зависимость среднего числа ближайших соседей по кристаллической решетке от диаметра частицы платины

тяжелее, если он находится в частице малых размеров, так как в среднем у такого атома мало ближайших соседей.

На рисунке 12 представлен график изменения потенциала ионизации, т.е. работы выхода $A_{\text{вых}}$, для наночастиц, содержащих различное число атомов железа

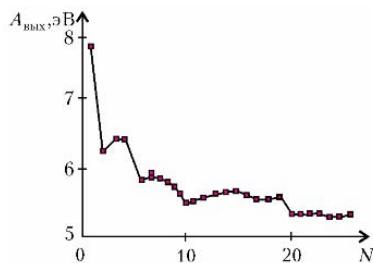


Рис.12. Зависимость работы выхода от числа атомов в наночастице железа

N . Видно, что с ростом N работа выхода падает, стремясь к предельному значению, соответствующему работе выхода для образцов обычных размеров. Изменение $A_{\text{вых}}$ с диаметром частицы D можно довольно хорошо описать формулой

$$A_{\text{вых}} \approx A_{\text{вых}0} + \frac{2Ze^2}{D},$$

где $A_{\text{вых}0}$ — работа выхода для образцов обычных размеров, Z — заряд атомного ядра, а e — заряд электрона.

Очевидно, что ширина запрещенной зоны ΔE зависит от размеров полупроводниковой частицы таким же образом, как и работа выхода из металлических частиц, — уменьшается с ростом диаметра частицы. Поэтому длина волн флюoresценции полупроводниковых наночастиц растет с ростом диаметра частиц, что и иллюстрирует рисунок 10.

Квантовые точки — рукотворные атомы. Полупро-

водниковые наночастицы часто называют «квантовыми точками». Своими свойствами они напоминают атомы, точнее «искусственные атомы», имеющие наноразмеры. Ведь электроны в атомах, переходя с одной орбиты на другую, тоже излучают квант света строго определенной частоты. Но, в отличие от настоящих атомов, внутреннюю структуру и спектр излучения которых мы изменить не можем, параметры квантовых точек зависят от их создателей, нанотехнологов.

Квантовые точки уже сейчас являются удобным инструментом для биологов, пытающихся разглядеть различные структуры внутри клеток. Дело в том, что различные клеточные структуры одинаково прозрачны и не окрашены. Поэтому если смотреть на клетку в микроскоп, то ничего, кроме ее краев, и не увидишь. Чтобы сделать заметной определенную структуру клетки, были созданы квантовые точки, способные прилипать к определенным внутриклеточным структурам.

Так, для того чтобы раскрасить клетку на рисунке 13 в разные цвета, были сделаны квантовые точки трех размеров. К самым маленьким, светящимся зеленым светом, приклеили молекулы, способные при-

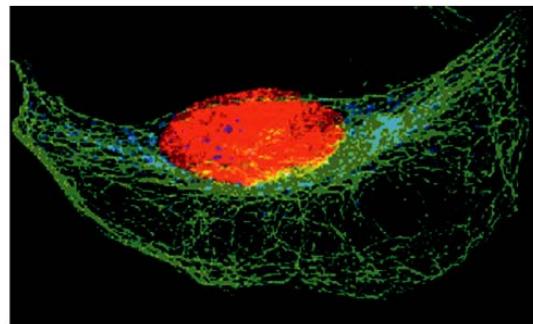


Рис.13. Раскрашивание разных внутриклеточных структур в разные цвета с помощью квантовых точек: ядро — красное, микротрубочки — зеленые, аппарат Гольджи — желтый

липать к микротрубочкам, составляющим внутренний скелет клетки. Средние по размеру квантовые точки могли прилипать к мембранам аппарата Гольджи, а самые крупные — к ядру клетки. Когда клетку окунули в раствор, содержащий все эти квантовые точки, и подержали в нем некоторое время, точки проникли внутрь и прилипли туда, куда могли. После этого клетку сполоснули в растворе, не содержащем квантовых точек, и положили под микроскоп. Как и следовало ожидать, вышеупомянутые клеточные структуры стали разноцветными и хорошо заметными.