

3

Интерлюдия первая — фундаментальная наука в основе нанотехнологии

В этой главе...

• Электроны	34
• Атомы и ионы	36
• Молекулы	37
• Металлы	39
• Другие материалы	41
• Биосистемы	44
• Молекулярное распознавание	48
• Электропроводность и закон Ома	50
• Квантовая механика и квантовые идеи	51
• Оптика	53

Несмотря на то что данная книга предназначена для неученых, перед тем, как войти в дом к атомам и молекулам, все же полезно будет напомнить некоторые базовые научные принципы. Данные научные темы затрагивают физику, химию, биологию, материаловедение и технику. Необходимая информация будет рассматриваться быстро, мы не будем углубляться в сложные и элегантные научные конструкции. Данный обзор задуман как удобное путешествие по наиболее значимым научным темам, необходимым для понимания наномасштаба. На всю главу будет всего два уравнения, обещаем!

ЭЛЕКТРОНЫ

Представление химика о физическом мире основывается на существовании двух частиц, меньших, чем атом. Эти частицы — *протон* и *электрон* (*нейтрон* — это комбинация этих двух частиц). Хотя существуют и субатомные частицы (кварки, адроны и т.п.), протоны и электроны в некотором смысле представляют простейшие частицы, необходимые для описания материи.

Электрон был открыт в начале двадцатого столетия. Электроны очень легкие (в 2 000 раз легче наименьшего атома, водорода) и обладают отрицательным зарядом. Протоны, составляющие оставшуюся часть массы водорода, имеют положительный заряд. Взаимодействие двух электронов, подошедших близко один к другому, описывается фундаментальным законом электрического взаимодействия. Силу взаимодействия можно выразить в простом уравнении, которое иногда называется *законом Кулона*.

Для двух заряженных частиц, разделенных расстоянием r , сила, действующая между ними, равна

$$F = Q_1 Q_2 / r^2.$$

Здесь F — сила, действующая между двумя частицами, разделенными расстоянием r , а заряды частиц равны соответственно Q_1 и Q_2 . Обратите внимание на то, что если обе частицы — это электроны, то Q_1 и Q_2 имеют одинаковый знак (а также одинаковое значение); следовательно, F — положительное число. Когда на частицу действует положительная сила, эта частица отталкивается. Поскольку *одноименные заряды отталкиваются* (например, два одноименных полюса магнита трудно приблизить друг к другу), два электрона не желают сближаться. Обратное утверждение также справедливо. Если есть две частицы с противоположными зарядами, сила, действующая между ними, будет отрицательной. Эти частички будут притягиваться, так что *разноименные заряды притягиваются*. Это следует непосредственно из закона Кулона.

Из закона Кулона также следует, что сила взаимодействия мала, если частички очень удалены друг от друга (так, что r становится очень большим). Следовательно, два электрона, расположенные близко, будут отталкиваться до тех пор, пока расстояние между ними не станет настолько велико, что сила их взаимодействия станет несущественной.

Когда поток электронов создает электрический ток, бывает полезно описать, что происходит в пространстве, из которого уходят электроны. Эти участки пространства называются “дырками”, и их нельзя назвать действительными частицами, это просто места, где должны были быть электроны, и куда они стремятся попасть. Принято, что дырки имеют положительный заряд; следовательно, электрический ток можно представить как группу электронов, пытающихся перейти из места с избытком электронов (отрицательных зарядов), например, низ батарейки, в место, где расположены дырки (положительные заряды), — верх батарейки. Чтобы это сделать, электроны проходят по электрическим цепям, и их можно заставить выполнять полезную работу.

Электроны могут не только формировать ток, они отвечают за химические свойства атома, к которому они относятся, и ниже мы рассмотрим эту тему подробнее.

АТОМЫ И ИОНЫ

Простейшая картина атома состоит из плотного тяжелого ядра с положительным зарядом, окруженного группой электронов, вращающихся вокруг ядра и имеющих (как все электроны) отрицательные заряды. Поскольку ядро и электроны имеют противоположные заряды, электрические силы удерживают атом вместе почти так же, как гравитация удерживает планеты вокруг Солнца. В ядре сосредоточена основная масса атома — порядка $1\,999/2\,000$ массы водорода и еще большая доля для других атомов.

В природе существует 91 атом и каждый из этих 91 атомов имеет различный заряд ядра. Положительный заряд ядра равен числу протонов, которые в нем содержатся, так что наиболее легкий атом (водород) имеет заряд ядра +1, второй по легкости (гелий) — +2, третий (литий) — +3 и т.д. Самый тяжелый из встречающихся в природе атомов — уран — имеет заряд ядра +92. (Возможно, вы думали, что 91-й атом будет иметь заряд +91, но элемент с номером 43, технеций, не встречается в природе, поэтому при подсчете мы его пропустили.) Все сказанное можно видеть в периодической системе элементов Менделеева.

В незаряженных атомах число электронов точно уравнивает заряд ядра, так что существует один электрон на каждый протон. Водород имеет один электрон, гелий — два, литий — три, а уран — 92. Поскольку все электроны упакованы вокруг ядра, обычно атомы с большим числом электронов несколько больше атомов с меньшим числом электронов.

Если число электронов не равно заряду ядра (числу протонов), атом имеет ненулевой заряд и называется *ионом* (это слово любят употреблять в кроссвордах). Если число электронов больше числа протонов, суммарный заряд отрицательный, и ион называется отрицательным ионом (*анионом*). С другой стороны, если число протонов превышает число электронов,

имеем обратную ситуацию и положительный ион (*катион*). Положительные ионы несколько меньше нейтральных атомов с тем же ядром, поскольку они содержат меньше электронов, которые ближе расположены к суммарному положительному заряду. Анионы несколько больше незаряженных собратьев из-за дополнительных электронов. Все атомы имеют размер порядка 0,1 нанометра, а наибольший диаметр у урана — около 0,22 нанометра. Следовательно, все атомы имеют приблизительно одинаковый размер (отличаются не более чем в 3 раза), и все атомы немного меньше наноразмеров.

Упомянутые атомы являются фундаментальными строительными блоками всей природы, которую мы видим. Их можно представлять как кирпичики разного цвета и размера, из которых можно сделать любые стены, башни, здания и детские площадки. Это “строительство” подобно объединению атомов в молекулы.

МОЛЕКУЛЫ

Когда атомы связываются в стационарную структуру, они формируют молекулу. Построение похоже на совмещение частей в детском конструкторе. Хотя набор частей и невелик, можно построить почти что угодно, что придет на ум строителю, и что не противоречит нескольким базовым законам физики, касающимся сборки частей. Природа и нанотехнолог имеют для игры 91 атом — каждый приблизительно сферической формы, но отличающийся по размерам и способности взаимодействовать и соединяться с другими атомами. Существует множество различных молекул — миллионы известны, и сотни новых синтезируются или открываются каждый год. На рис. 3.1 показано несколько молекул, содержащих от 2 до 21 атомов. Размер любой молекулы, состоящей из 30 или больше атомов, превышает 1 нанометр.

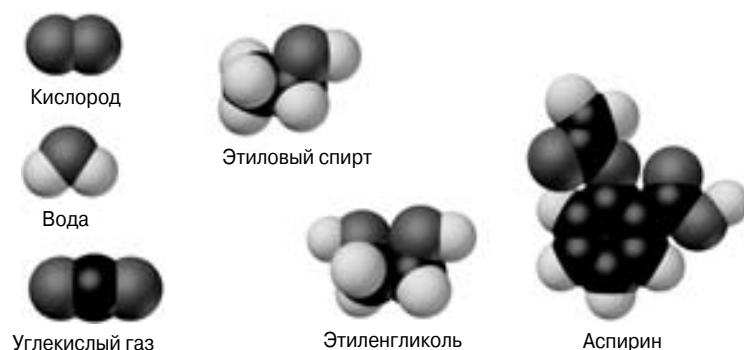


Рис. 3.1. Модели некоторых распространенных небольших молекул. Белые сферы представляют водород, темные — углерод и кислород. Из книги Brown/LeMay/Bursten *Chemistry: The Central Science*, 9/e, © Pearson Education, Inc. Перепечатано с разрешения Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New York

Чтобы сформировать молекулы, атомы связываются вместе. Существует множество типов химических связей, но все они порождены взаимодействием электронов атомов или ионов. Например, нетрудно видеть, что положительный ион будет притягиваться к отрицательному. Напомним, что сила притяжения описывается законом Кулона. Фактически это и есть то притяжение, которое формирует связи в поваренной соли (хлорид натрия). Разрыв и формирование связей является химической реакцией. Поскольку электроны отвечают за связи, а химические реакции — это просто создание и разрыв связей, можно утверждать, что электроны отвечают за химические свойства атомов и молекул. Если изменить электроны, изменятся свойства. Хороший пример этому — поваренная соль. И натрий, и хлор (два задействованных атома) ядовиты для человека, если их употреблять по отдельности. Если же их объединить, они безопасны и вкусны.

Связи являются ключом к нанотехнологии. Они объединяют атомы и ионы в молекулы и сами могут действовать как механические устройства — петли, опоры или структурные со-

ставляющие машин, имеющих наноскопические размеры. Для микроскопических и больших устройств связи — это просто средство создания материалов и реакций. В наном мире, где сами молекулы могут быть устройствами, связи также могут быть компонентами устройств.

Меньшие отдельные молекулы обычно встречаются только как пары. Когда они собираются в достаточно массивную единицу, молекулы могут взаимодействовать с другими атомами, ионами и молекулами так же, как атомы могут взаимодействовать друг с другом — через электрические заряды и закон Кулона. Следовательно, хотя отдельные молекулы воды являются газом при комнатной температуре, многие молекулы воды собираются в кластер и могут стать каплей воды, которая уже относится к жидкости. Если охладить жидкость ниже 0 °C, она перейдет в твердое состояние. Жидкая, твердая и газообразная вода имеет одинаковый молекулярный состав, но отличается упаковкой молекул.

Подобное поведение характерно для многих молекул. Молекула диоксида углерода обычно формирует газ (углекислый газ), но если множество таких молекул соберутся вместе, они сформируют сухой лед. Следовательно, определенные твердые материалы могут состоять просто из молекул. Обычно данные молекулы относительно невелики, состоят из менее сотни атомов. Гораздо большие молекулы, называемые *полимерами*, сами являются материалами и ключом к нанонауке.

МЕТАЛЛЫ

Большинство из встречающихся в природе атомов организовывают кластеры с другими. Данный процесс позволяет получать огромные молекулоподобные структуры, содержащие миллиарды миллиардов атомов одного типа. В большинстве случаев они становятся тяжелыми, блестящими, ковкими структурами, называемыми *металлами*. В металлах некоторые

электроны могут покидать их “родные” атомы и проходить сквозь толщу металла. Данные текущие электроны составляют электрический ток, и поэтому металлы проводят ток. Примерами устройств, в которых электрические заряды проходят по металлическим структурам, являются удлинитель, линии электропередач и телевизионные антенны.

Представить сказанное может быть довольно тяжело. Думайте об этом как о банке, в котором вкладчиками являются атомы, доллары и электроны, а само здание банка — это макроскопический блок материала или гигантская молекула. Вы лично имеете определенную сумму денег, которая, возможно, слишком мала в масштабах всей экономики. В то же время, как только вы внесли деньги в банк, они объединяются со всеми деньгами, которые внесли другие люди, и далее возникает поток денег между вкладчиками и заемщиками. Если банк дает займы деньги кому-то извне, он создает бизнес-связь с заемщиком почти аналогично тому, как формируется химическая связь. Если порвать связь с банком, вы получаете назад, если не считать процентов, ту же сумму, что была до прихода в банк. Свободный поток денег через банковскую систему аналогичен электрическому току, проходящему сквозь толщу нашего металла. В противном случае, когда деньги хранятся под подушкой, и нет свободного потока или обмена, можно провести аналогию с *диэлектриками*, или непроводниками. Данная аналогия не идеальна, но она помогает представить общую картину.

Большинство металлов блестящие, поскольку при падении света на металл свет рассеивается движущимися электронами. Некоторые материалы, сделанные из подобных атомов, не относятся к металлам. Эти материалы обычно составлены из более легких атомов. Несколько примеров: графит, уголь, алмаз, желтая сера и черный или красный фосфор. Эти материалы иногда называют диэлектриками, поскольку они не имеют движущихся электронов, проводящих электрический ток. В общем случае

они также неблестящие, поскольку нет свободных электронов, отражающих падающий на них свет. Вообще, то, насколько свободен поток электронов в материале, является очень важным вопросом для нанотехнологии.

ДРУГИЕ МАТЕРИАЛЫ

Нанонаука и технология сфокусированы на материалах: физических и твердых объектах. Традиционно в материаловедении рассматривается три основных класса материалов — металлы, полимеры и керамика. Выше были рассмотрены металлы, обратимся теперь к двум оставшимся классам.

Наиболее распространенными полимерами являются пластики. Иногда их называют макромолекулами в том смысле, что они очень большие по молекулярным стандартам (хотя обычно не настолько велики, чтобы их можно было видеть невооруженным глазом, что обычно предполагает приставка “макро”). Большинство полимеров основаны на углероде, поскольку он имеет практически уникальную способность связываться с самим собой. *Полимеры* — это отдельные молекулы, сформированные повторяющимися шаблонами атомов (называемыми *мономерами*), связанными в цепочку. В образце, таком как полистирольная чашка, будет множество различных структур, и цепочки будут иметь различные длины.

Полимеры могут “сшиваться” — это означает, что цепочки мономеров соединяются с другими цепочками со связями между цепочками. “Сильно сшитые” полимеры не только ведут себя как более привычные неметаллы, но и часто тяжелее, поскольку имеют жесткую конструкцию. Возможен альтернативный вариант — вращение цепочек полимеров и спутывание их (как спагетти или компьютерные кабели) с формированием очень пластичных и резиноподобных материалов. Этот класс называется *аморфными полимерами*. Примером сильно сшитого полимера является поливинилхлорид (материал, приме-

няемый для создания труб и множества других бытовых вещей). Используемые повсеместно полистирольные чашки являются преимущественно аморфными.

Простые полимеры, такие как полиэтилен или полистирол, часто используются в технике. В отличие от металлов углеродные полимеры практически всегда являются изолирующими материалами, поскольку электроны остаются локализованными возле ядра родительского атома и не могут свободно путешествовать по материалу. Тот факт, что указанные вещества также являются гибкими изоляторами, объясняет их использование для покрытия электрических проводов. Как стоило ожидать, пластики неблестящие — вспомните вид поливинилхлоридной душевой занавески или полипропиленового каната.

В биологическом мире помимо синтетических (искусственных) полимеров существует множество других важных полимеров. Примеры — паутина, молекулы ДНК, хранящие генетическую информацию, белки и полисахариды. Все они рассмотрены в следующем разделе.

Полимеры обычно не проводят электрический ток, но можно создать специальные полимеры, обладающие такой способностью. Данный факт важен, поскольку полимеры легкие, гибкие, дешевые, устойчивые и их легко производить. По этим причинам использование проводящих полимеров для замены природных металлов в некоторых приложениях (от таких простых технологических операций, как снятие статического электричества, до таких наноскопических приложений, как создание молекулярных проводов) представляет важную сферу применения необычных полимеров.



Рис. 3.2. Молекулярная модель сегмента полиэтиленовой цепочки. Данный сегмент содержит 28 атомов углерода (темные), но в коммерческом полиэтилене имеется более тысячи атомов углерода на нить. Из книги Brown/LeMay/Bursten *Chemistry: The Central Science*, 9/e. © Person Education, Inc. Перепечатано с разрешения Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New York

Последняя область традиционного материаловедения — это керамика. *Керамикой* часто (но не всегда) являются оксиды — структуры, в которых один из образующих атомов является кислородом. Керамические материалы построены из нескольких различных типов атомов. Глина — это преимущественно оксид алюминия, песок образован из диоксида кремния, огнеупорный кирпич — это оксид силиката магния, а оксид кальция важен в традиционном плиточном деле. Подобно полимерам и в отличие от металлов керамика обычно имеет локализованные электроны, не проводит электричество (хотя при очень сильном охлаждении некоторые керамические материалы имеют свойства

сверхпроводников) и обычно не является блестящей. Керамика часто очень тяжелая и иногда хрупкая. Этот класс только начинают использовать в нанотехнологиях, но он обладает большим потенциалом для таких приложений, как замена костей.

Итак, мы рассмотрели три основные ветви материаловедения, но данное обсуждение, похоже, не коснулось множества знакомых материалов. Лопата, полная земли, омлет, батон хлеба, дерево, волокна и листья — все являются неоднородными структурами, составленными из множества компонентов, и свойства материала отражают как свойства компонентов, так и уникальные свойства, возникающие при смешивании компонентов. Данные неоднородные смеси очень важны в инженерных приложениях, но большей частью они несущественны в наномире.

БИОСИСТЕМЫ

Из 91 элемента, встречающегося в природе, многие фигурируют в биологии. Как людям, нам для выполнения специфических биологических функций требуются такие необычные металлические микроэлементы, как цинк, железо, ванадий, марганец, селен, медь и все остальные составляющие пачки витаминов. Однако из общей массы большинства растений и животных более 95% состоит из четырех атомов: водорода, кислорода, азота и углерода. Эти элементы также преобладают в большинстве синтетических полимеров. Причина этого достаточно проста. Данные атомы могут формировать множество типов связей; следовательно, природа может их использовать для построения некоторых очень сложных наноструктур, выполняющих ту же работу, что и в повседневной жизни, а ученые могут их применять для получения новых материалов. Например, молекулы в наших телах отвечают за дыхание, пищеварение, регулирование температуры, защиту и все остальное, что требуется телу. Очевидно, что для выполнения всех этих работ необходим широкий ассортимент довольно сложных наноструктур.

В общем случае молекулы, встречающиеся в природе, сложны и являются источником смятения для студентов, начинающих изучать органическую химию. Чтобы эти молекулы выполняли полезные функции, их должно быть легко собрать, распознать и связать с другими молекулами. Они также должны получаться в результате биологических процессов и иметь различные свойства. Чтобы это было так, данные молекулы должны быть не обычными повторяющимися полимерами, такими как полиэтилен или полипропилен, а иметь более сложную нерегулярную структуру.

Существует четыре больших класса биологических молекул. Первые три — нуклеиновые кислоты, белки и углеводы, все являющиеся полимерными структурами. Четвертая категория составлена из особенно малых молекул, которые решают специальные задачи.

Белки выполняют большую часть объема работ в биологии. Наши ногти и волосы состоят в основном из белка кератина, кислород переносится по нашей крови белком гемоглобином, а белок нитрогеназа отвечает за извлечение азота из воздуха (в узелках бобовых) и превращение его в нитраты, способствующие росту растений. Существуют тысячи белков, структуры и функции некоторых очень хорошо понятны, а некоторые все еще относятся к категории загадочных. Белки являются машинами биологии, функциональными агентами, которые отвечают за все происходящее.

Нуклеиновые кислоты делятся на две категории: ДНК и РНК. Обе нужны для создания белков, но РНК не очень используются в наноструктурах, поэтому ограничим наше рассмотрение ДНК. Схема ДНК изображена на рис. 3.3. Она состоит из сахарного скелета, содержащего отрицательные заряды из-за наличия атомов фосфора и кислорода. Внутри выстроены плоские молекулы, лежащие одна поверх другой, как колода карт. Каждая карта состоит из двух отдельных плоских молекул, слабо связанных мостиками между кислородом или азотом и водородом. Поскольку каждая карта фиксирована на

правом и левом краях и поскольку структура спиральная, ДНК выглядит как двойная спираль (пружина). Когда ДНК смотана, она относительно компактна.

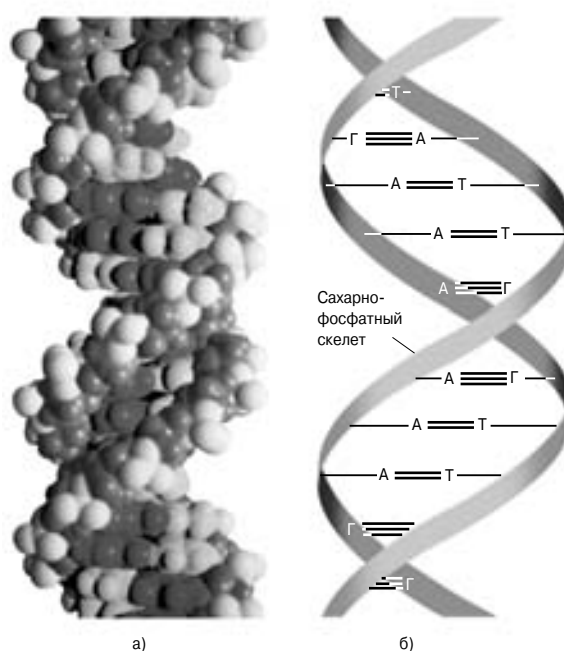


Рис. 3.3. ДНК: а) компьютерная модель двойной спирали; б) схематическое изображение реальных комплементарных пар оснований нуклеиновых кислот, связанных друг с другом. Из книги Broton/LeMay/Bursten *Chemistry: The Central Science*, 9/e, © Person Education, Inc. Перепечатано с разрешения Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New York

ДНК является практически уникальной молекулой, поскольку каждая карта (называемая *комплементарной парой основания*) может иметь одно из четырех строений (называются АТ, ТА, ЦГ и ГЦ). Для каждого положения в цепи можно контролировать,

какая комплементарная пара присутствует. Это объясняется тем, что две плоские молекулы, составляющие их, можно выбирать из набора всего четырех молекул, называемых *аденином* (А), *тимин*ом (Т), *гуанином* (Г) и *цитозином* (Ц). А и Т подходят только друг к другу и не подходят ни к Г, ни к Ц. Г и Ц также подходят только друг к другу и не подходят ни к А, ни к Т. Из-за этих ограничений единственными возможными парами являются АТ и ГЦ и противоположные им — ТА и ЦГ. Все они располагаются на двойной спирали в определенном порядке и кодируют все биологические функции. *Генетический код* — это просто упорядоченные комплементарные пары в двойной спирали ДНК, и это — код, который считывается РНК и белками, которые используют эту информацию для создания белковых биологических структур, составляющих основу жизни.

Третий класс макромолекул, встречающихся в биологии, — это *полисахариды*, которые представляют собой просто сахар, сделанный из очень длинных молекул. Все они нужны для функционирования клеток, а некоторые входят в состав человеческих связок и других биологических структурных материалов. В то же время, они не активно используются в нанотехнологиях.

Четвертый класс биологических молекул состоит из очень малых молекул. В их число входит вода (необходима для функционирования практически всех биологических организмов), кислород (как основной источник энергии), диоксид углерода (сырье для построения растений) и окись азота. Последняя молекула очень мала и состоит из азота и кислорода, связанных вместе. Она играет множество ролей в биологии — от “вторичного передатчика” (своеобразный элемент внутриклеточной системы связи) до участия в функции сокращения.

Существуют и другие молекулы, не такие маленькие, но такие же важные в биологических приложениях. В их число входит простой сахар и все молекулы медикаментов. Лекарства обычно действуют, связываясь либо с белком, либо с ДНК и вызывая изменения в функциях этих структур. Иногда связывание этих небольших молекул является весьма своеобразным и очень важным.

МОЛЕКУЛЯРНОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ...

Выше говорилось, что молекулы могут иметь формы и заряды, а это означает, что части молекул сделаны из различных атомов и имеют различные плотности электронов. Поскольку закон Кулона гласит, что положительные заряды притягиваются к отрицательным, молекулы могут взаимодействовать друг с другом с электрическими (кулоновскими) силами. Например, на рис. 3.4 показано, как объединяются заряженные атомы, и как две молекулы можно связать, основываясь на распределении заряда в молекулярной структуре.

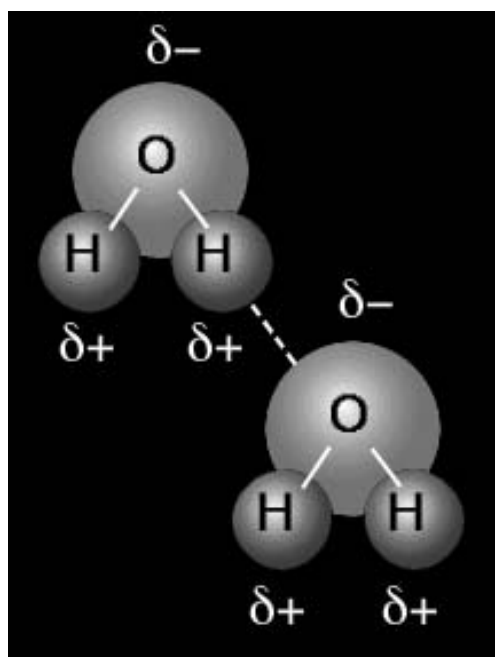


Рис. 3.4. Молекулярная связь двух молекул воды. Символами δ^+ и δ^- обозначены положительные и отрицательные заряды соответственно. Перепечатано с разрешения Advanced Light Source, Ло-ренсовская национальная библиотека в Беркли

Способность одной молекулы притягивать другую и связываться с ней часто называется *молекулярным распознаванием*. Молекулярное распознавание может быть очень специфическим. Оно является базовой силой, вызывающей аллергию, при которой определенные длинные молекулы распознаются телом, связываются и подвергаются воздействию больших чужеродных молекул, называемых *аллергенами*. В число аллергенов входят пыльца, сахар и некоторые естественные молекулярные компоненты шоколада, арахиса и других вещей.

Молекулярное распознавание может использоваться другими сенсорными процессами. Наше чувство обоняния основано практически полностью на распознавании конкретных молекул сенсорами в обонятельных луковицах; в результате молекулярное распознавание является причиной того, что мы чувствуем запах розы или свежескошенной травы. Оно также позволяет учуять дым и избежать пожара. Молекулярное распознавание используется и в биологии. Насекомые привлекают друг друга, производя и испуская молекулы, называемые *феромонами*. Если вы часто используете Internet, вы, скорее всего, получали несколько писем, предлагающих купить феромоны человека. Наконец, молекулярное распознавание можно использовать в качестве строительной стратегии. Большие биологические молекулы, такие как белки, могут распознавать одна другую и строить при этом клетки, из которых составлены высшие биологические организмы. Молекулярное распознавание отвечает за то, что корень сельдерея жесткий, вода утоляет жажду, клеи склеивают, а нефть плавает по воде.

Молекулярное распознавание является одним из ключевых элементов нанотехнологии. Поскольку большая часть нанотехнологий зависит от восходящего построения, это делает молекулы, которые могут самоорганизовываться или организовываться с помощью такой опорной поверхности, как металл или пластик, ключевой стратегией при производстве на-

ноструктур. В качестве макроскопической аналогии приведем следующую: если нужно, чтобы люди выстроились по линии, они должны видеть эту линию и место, где им следует стать. В наномире работу “зрения” выполняет молекулярное распознавание.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ И ЗАКОН ОМА

Обычно человек использует свои чувства, чтобы получать информацию об объектах. Свет видится глазами, давление ощущается ушами и руками, а молекулы воспринимаются на вкус и запах. Все эти чувства требуют взаимодействия органов чувств тела и таких внешних структур, как молекулы, энергия или физические объекты.

Все взаимодействия, влияющие на вкус, обоняние и зрение, требуют потока электронов по телу. Электрические заряды движутся по нашим нервным системам, чтобы сообщить мозгу, что нога споткнулась или рука вспотела. Все эти сигналы действительно зависят от движения зарядов, а следовательно, подчиняются закону Кулона для одно- и разноименных зарядов. Повторимся, вся химия (и даже биология) действительно сводится к электронам. Известно, что металлы содержат свободные электроны, которые могут переносить заряд и отражать свет. Но даже в таких неметаллических структурах, как наши нервы или носы, электрические взаимодействия и кулоновские силы важны. Движущиеся электроны также дают энергию нашему обществу — от электрических лампочек до батарей и компьютеров.

Закон Кулона является фундаментальным для описания сил, действующих на электрический заряд, а ток, включающий в себя электроны, движущиеся через материал, имеет определяющее уравнение, которое называется *законом Ома*.

Наиболее распространенной аналогией с потоком электронов является течение реки. Поток электронов сквозь материал называется *током*, обычно обозначается I и измеряется в электронах за секунду. Сопротивление потоку тока (аналог камней в потоке) обозначается R . Напряжение — это последняя из ключевых величин в законе Ома, представить которую сложнее всего. Напряжение — это вынуждающая сила, толкающая поток воды по наклону русла. Напряжение обозначается U .

$$U = IR$$

По закону Ома, который просто сообщает, что напряжение равно произведению силы тока на сопротивление, работают все электрические и электронные схемы, встречающиеся в повседневной жизни. Нетрудно видеть, что из этого следует. Если есть большая вынуждающая сила и то же сопротивление, сила тока должна увеличиваться. Если держать вынуждающую силу постоянной, но увеличивать сопротивление, сила тока должна уменьшиться. Практически во всех случаях это справедливо. Закон Ома работает для фенов, компьютеров и линий энергоснабжения. Все интегрированные схемы (чипы) также работают по закону Ома.

Стоит, однако, отметить, что не все подчиняется закону Ома. Существуют сверхпроводники — материалы, в которых нет эффективного сопротивления, и закон Ома здесь не действует. Можно назвать и другие ситуации, включая некоторые специфические наноструктуры (такие как углеродные нанотрубки), в которых закон Ома также не работает. Это позволяет создать некоторые интересные приложения и задачи, которые будут рассмотрены ниже при обсуждении молекулярной электроники.

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА И КВАНТОВЫЕ ИДЕИ

До двадцатого века в физике материалов доминировали представления Исаака Ньютона, который заложил основы классической механики, развиваемые и дополняемые другими

учеными на протяжении последующих двух веков. Законы Ньютона описывают довольно точно все движения, которые можно наблюдать в макромире, такие как движение автомобилей, эффект гравитации и траектория полета футбольного мяча. Однако, когда физики начинают изучать очень маленькие структуры в наномасштабе и мельче, некоторые правила, сформулированные в классической физике для материалов, не работают, как ожидается. Атомы отказываются вести себя как крошечные Солнечные системы, а электроны демонстрируют свойства и волн, и частиц. Из-за этих и других наблюдений некоторые идеи классической механики были заменены или дополнены новой теорией, названной *квантовой механикой*.

Квантовая механика объединяет несколько интересных, элегантных и дерзких идей; в то же время нам достаточно нескольких существенных замечаний. Например, при таких малых масштабах энергию и заряд нельзя складывать непрерывно, их можно прибавлять небольшими кусочками. Данные кусочки называются *квантами*. Изменение заряда иона, например, может произойти только при прибавлении или вычитании электронов. Следовательно, заряд иона квантуется (увеличивается) на заряд одного электрона. Прибавить половину электрона невозможно.

Повседневный опыт дает мало примеров квантового поведения. Электрический ток кажется непрерывным, величина энергии, которую можно прибавить к футбольному мячу пинком или к бильярдному шару ударом кия, кажется непрерывной переменной — чем сильнее ударить, тем быстрее покатится мяч. Несмотря на это в повседневной жизни существует несколько квантованных вещей. Один хороший пример — деньги. Копейку разделить невозможно, но для больших сумм всегда можно (теоретически) найти предмет, стоящий ровно столько.

Многие базовые правила, определяющие поведение наноструктур, — это замаскированные законы квантовой механики.

В качестве примеров можно привести такие вопросы: насколько малый провод еще может проводить электрический ток, сколько энергии помещается в молекулу до того, как она меняет свое состояние или начинает действовать как ячейка памяти.

ОПТИКА

Квантовая механика может быть существенной во многих вопросах, возникающих в нанотехнологии, включая понимание аспектов оптики — например, как свет взаимодействует с материей. Так, цвета отдельных красителей фиксируются квантовой механикой. Большие молекулы, называемые *фталоцианином*, придают синий цвет джинсам, и их можно изменить, чтобы они давали зеленоватый или пурпурный цвет, трансформировав химическую или геометрическую структуру молекулы. Данные модификации меняют размер кванта света, взаимодействующего с молекулой, и, следовательно, меняют воспринимаемый цвет. Подобным образом, различные флуоресцентные лампы дают несколько более зеленые или пурпурные оттенки, поскольку меняются молекулы или наноструктуры, заполняющие трубку и испускающие свет. Даже свет звезд имеет различный цвет, поскольку поступает от звезд с разной температурой и различных элементов, горящих в атмосфере звезды.

Свет также может взаимодействовать с материей другими способами. Если коснуться черной машины в солнечный день, можно почувствовать тепловую энергию, переданную металлу светом солнца. Вещество также может отдавать световую энергию, как при горении или в электрических лампочках. Во всех случаях, интересующих нас, общий объем энергии, задействованной в процессе, не меняется (технический термин — “энергия консервируется”). Однако, манипулируя этой энергией, можно получать очень интересные вещи.

Когда металлические объекты становятся меньше, кванты энергии (размеры приращения энергии), применимые к ним, становятся больше. Эта связь похожа на поведение барабанов: чем туже кожа на барабане, тем выше энергия и тон звука. Это также справедливо для колоколов: в общем случае, чем меньше колокольчик, тем выше тон. Данная связь между размером структуры и квантом энергии, который взаимодействует с ней, очень важна для управления светом с помощью молекул и наноструктур и является одной из основных тем в нанонауке. Именно поэтому золото, рассмотренное в главе 2, меняло цвет.