

1. Предмет изучения

«Тот, кто раньше овладеет нанотехнологией, займет ведущее место в техносфере будущего»

Э. Тейлор

До настоящего времени традиционная интегральная электроника развивалась путем последовательного уменьшения элементов (биполярных и МДП транзисторов, диодов и др.) от микронных до субмикронных размеров по законам скейлинга (пропорциональное уменьшение всех размеров элемента ИС). Это вызвано стремлением повысить степень интеграции, увеличить быстродействие ИС и снизить энергопотребление. Наряду с этим совершенствовалось и технологическое оборудование с последовательным улучшением традиционных методов литографии, эпитаксии и получения тонких слоев различных материалов.

Однако уменьшающийся процент выхода годных структур, значительное увеличение времени изготовления схем из-за увеличения их сложности и в связи с этим многократно увеличивающиеся материальные затраты обусловили качественные изменения в развитии электронной техники. Совершенствование технологического оборудования происходило в направлении увеличения локальности и уровня сложности воздействия. Причем повышение локальности привело к необходимости перехода от групповых методов формирования структур к индивидуальным. В связи с этим возникла необходимость использования качественно новых технологических методов, позволяющих обеспечить высокую локальность и разнообразие воздействий, необходимых для создания все уменьшающихся в размерах новых структур.

Традиционные методы оптической литографии из-за больших длин волн излучения непригодны для формирования областей нанометровых размеров с разрешающей способностью до долей нанометра. Синхротронное излучение не обеспечивает нанометровых размеров при применении традиционных технологий нанесения и травления резиста. Электронно-лучевой метод в принципе позволяет обеспечить высокую локальность воздействия фокусировкой луча до нанометровых размеров, однако высокая энергия коллимированных электронов приводит к значительному рассеянию пучка в подложке, увеличению числа дефектов и к разрушению подложки. То же можно сказать и о сфокусированных ионных пучках.

Противоречие между разрешающей способностью метода и разрушающим действием частиц при значительном пространственном разделении источника частиц и подложки разрешить не удается. Эту проблему можно решить одним единственным способом — приблизить источник частиц к подложке, т. е. использовать принцип ближнего поля. Это позволяет повысить разрешение вплоть до атомного, уменьшить энергию частиц до величин, меньших энергии тепловых колебаний решетки, и тем самым избежать разрушения подложки.

Принцип ближнего поля впервые был реализован швейцарскими физиками, нобелевскими лауреатами 1986 г., сотрудниками исследовательской лаборатории фирмы ИВМ в Цюрихе Гердом Биннигом и Генрихом Рорером, создавшими уникальный физический прибор — сканирующий туннельный микроскоп (СТМ). Работа прибора основана на квантово-механических закономерностях и, следовательно, его возможности близки к фундаментальным физическим пределам. С помощью сканирующей туннельной микроскопии получили развитие совершенно новые методы исследования поверхности твердых тел, позволяющие «увидеть» их микротопологию с атомным разрешением, что недоступно лучшим электронным микроскопам. Кроме того, СТМ и последующие его модификации стали технологическими инструментами, которые способны работать с отдельными атомами и молекулами.

1.1. Понятие о нанотехнологии

С появлением СТМ интенсивное развитие получило исследование и создание наноразмерных (с низкой мерностью) объектов величиной приблизительно от долей нанометра до 100 нм. Отсюда и пошли названия нанонаука, наноинженерия, наноэлектроника и нанотехнология. К объектам нанотехнологии относятся как индивидуальные частицы, пленки, стержни, трубки (т. е. двух-, и одномерные образования, а также нульмерные объекты — квантовые точки, здесь под мерностью структуры понимается число ее макроразмеров), так и консолидированные наноструктурные и нанопористые материалы и наноустройства. Верхний предел указанного выше интервала размеров чисто условен, а нижний определяется размерами атомов и молекул.

Под термином «нанотехнология» понимают создание и использование материалов, устройств и систем, структура которых реализуется в нанометровом масштабе, т. е. в диапазоне размеров атомов, молекул и надмолекулярных образований. Нанотехнология подразумевает умение работать с такими объектами и создавать из них более крупные структуры, обладающие принципиально новой молекулярной (точнее надмолекулярной) организацией. Они являются искусственными образованиями и характеризуются новыми физическими, химическими и биологическими свойствами.

Нанонаука занимается фундаментальными исследованиями свойств наноматериалов и явлений в нанометровом масштабе. Ее развитие за последнее десятилетие связано в основном с разработкой новых методик создания, исследования, описания и модификации наноструктур.

Наноинженерия обеспечивает поиск эффективных методов использования наноструктур.

1.2. Классификация нанообъектов

При плавном уменьшении размеров образца от больших (макроскопических) значений, например, метра или сантиметра, до очень маленьких свойства образца сначала остаются неизменными, затем начинают медленно меняться, а при

размерах менее 100 нм могут измениться радикально. Если размеры образца в одном измерении лежат в нанометровом диапазоне, а в двух других остаются большими, то такая структура называется квантовой ямой. Это — двумерный нанобъект. К таким нанобъектам относятся тонкие пленки, адсорбционные моно- и полислои на поверхности раздела фаз (в том числе пленки Ленгмюра–Блоджетт) и другие.

Если образец мал в двух измерениях и имеет большие размеры в третьем, то такой объект называют квантовой проволокой. Это — одномерный нанобъект. К одномерным нанобъектам относятся тонкие волокна, очень тонкие капилляры и поры, квантовые проволоки, нанотрубки и др.

Предельный случай процесса уменьшения размеров, при котором размеры во всех трех измерениях лежат в нижней части нанометрового диапазона, называется квантовой точкой, наночастицей или кластером. Это — нульмерные объекты. К этому типу нанобъектов относятся наночастицы различных твердых тел, коллоидные растворы (золи), микроэмульсии, капли различных жидкостей, газовые пузырьки и др.

Эпитет «квантовый» в названиях этих трех типов наноструктур используют потому, что в области ультрамалых масштабов проявляются свойства квантовомеханической природы.

1.3. Размерные эффекты и свойства нанобъектов

Классификация нанобъектов по их мерности важна не только с формальной точки зрения. В соответствии с принципом Эренфеста геометрия частиц (мерность пространства) существенно влияет на характер зависимостей, связывающих физические параметры. Так, показатель степени при расстоянии в законах тяготения Ньютона ($F = G \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot r_{12}^{-2}$, где m_1 и m_2 — массы тел, r_{12} — расстояние между материальными точками, G — гравитационная постоянная) и электростатического взаимодействия Кулона ($F = k \cdot q_1 \cdot q_2 \cdot r_{12}^{-2}$, где q_1 и q_2 — величины взаимодействующих зарядов, r_{12} — расстояние между ними, k — коэффициент, зависящий от выбора

системы единиц) в случае трехмерного пространства равен -2 , а в случае двумерного он имеет значение -1 . Другим примером, подтверждающим выполнение принципа Эренфеста, является разная зависимость теплоемкости твердых тел при постоянном объеме C_v от температуры T в области достаточно низких температур. Так, экспериментально установлено, что для слоистых структур (например, для графита и галлия) вместо закона кубов Дебая для изотропных материалов выполняется закон квадратов ($C_v \sim T^2$), а для цепочечных структур (кристаллы селена, HF, BiO_3 и MgSiO_3) имеет место линейная зависимость $C_v \sim T$. Из теории теплоемкости тонких пленок и тонких стержней (игл), разработанной Лившицем, следует, что при низких температурах зависимости $C_v(T)$ для двумерных и одномерных объектов существенно отличаются от этих зависимостей для трехмерных кристаллов. Еще один пример относится к теории капиллярности. Эмпирический закон Жюрена (1718 г.), описывающий подъем смачивающих жидкостей в капиллярных трубках за счет молекулярных сил, правильно объяснил Лаплас (1804 г.), выдвинувший гипотезу о близкодействии молекулярных сил и что эти силы обратно пропорциональны расстоянию ($\sim r^{-1}$). Следует сказать, что принцип Эренфеста дает физическое обоснование гипотезы Лапласа. Действительно, изменение показателей степени от $n = -2$ в законе Кулона до $n = -1$ в гипотезе Лапласа соответствует, по Эренфесту, переходу от трехмерного объекта к двумерному. Приведенные выше закономерности отражают изменения ряда физико-химических свойств нанобъектов по сравнению с соответствующими свойствами макрофазы.

В начале 80-х годов прошлого века было обнаружено, что частицы твердой фазы нанометровых размеров имеют особые механические, оптические, электрические и магнитные свойства, отличающиеся от аналогичных свойств макросистем, вследствие чего наночастицы нашли широкое применение в различных областях науки и техники. В настоящее время уже четко установлено, что многие фундаментальные свойства веществ (температура плавления, остаточный магнетизм, ширина запрещенной зоны в полупроводниках)

в значительной степени определяются размерами кристаллов в нанометровом интервале. Например, для наночастиц многих металлов и полупроводников (Ag, Au, Pb, Sn, In, Bi, Ga, CdS) наблюдается сильное понижение температуры плавления. Известно также, что прочность нитевидных кристаллов и волокон может быть в несколько раз больше прочности макроскопических тел. Частицы наноразмеров обладают повышенной химической активностью, проявляющейся в увеличении скорости химической реакции с их участием. Это свойство наночастиц используется при создании катализаторов. Следует также отметить, что в наночастицах могут возникнуть фазы, которые не обнаруживаются в макросистемах. Таким образом, принцип Эренфеста имеет фундаментальное значение.

1.4. Определение наночастицы

Наночастицы состоят из объединений нескольких и примерно до 10^6 атомов, поэтому их свойства отличаются от свойств тех же атомов, связанных в объемном веществе. Наночастицами обычно считаются образования из связанных атомов или молекул с размерами < 100 нанометров, т. е. частицы с радиусом < 100 нм могут считаться наночастицами. Это определение наночастицы не совсем удовлетворительно, поскольку оно не учитывает различия между молекулами и наночастицами. Множество молекул состоит из большого числа атомов, особенно молекулы биологического происхождения. Между ними и наночастицами невозможно провести четкой грани. Они могут быть построены как посредством сборки отдельных атомов, так и дроблением объемного материала. Для определения понятия наночастицы необходимо ввести параметр, который бы четко позволял отделять наночастицы от других образований. Таким параметром является характеристическая или критическая длина. Размеры наночастиц, меньшие, чем критические длины, характеризующие многие физические явления, и придают наночастицам уникальные свойства, делая их такими интересными для различных приложений. Вообще, многие физические свойства определяются некоторой критической длиной, например,

характерным расстоянием тепловой диффузии, или длиной рассеяния. Электропроводность металла в большой степени зависит от расстояния, которое электрон проходит между двумя соударениями с колеблющимися атомами или атомами примеси в твердом теле. Это расстояние называется средней длиной свободного пробега, или характеристической длиной рассеяния. Если размер частицы меньше какой-либо характеристической длины (величины), возможно появление новых физических и химических свойств.

Можно принять за рабочее следующее определение: наночастица — это агрегат атомов с размерами от долей нанометра и примерно до 100 нм, рассматриваемый как часть объемного материала, но с размерами меньше характеристических длин некоторых явлений.

При наноструктурировании материалы могут получать новые свойства и необычайные характеристики. В основе такого поведения, как только что говорилось, лежит тот факт, что с каждым свойством вещества связана характеристическая, или критическая длина. Многие свойства твердых тел зависят от характерных размеров. Основные физические и химические свойства меняются, когда размеры твердых тел становятся сравнимыми с характеристическими длинами, большинство из которых лежит в нанометровом диапазоне. Один из наиболее важных примеров такого поведения демонстрируют частицы полупроводника с размерами порядка квантовой длины волны электрона или дырки. Это — квантовые точки (кластеры или точнее — искусственные атомы), лежащие в основе работы лазеров на квантовых точках (использующихся сейчас для чтения компакт-дисков) и являющиеся весьма перспективными для использования в нанoeлектронике.

При изучении объемных материалов микроскопические детали усредняются. В традиционных областях физики — механике, электромагнетизме, оптике, имеющих дело с макромасштабами, изучаются образцы с размерами от миллиметров до метров и более. Свойства таких материалов — это усредненные характеристики — плотность и модуль Юнга в механике, электрическое сопротивление и намагниченность в электромагнетизме, диэлектрическая проницаемость в оптике. Когда имеем дело с объектами в микрометровом или нано-

метровом диапазоне, многие свойства материала, например, механические, сегнетоэлектрические и ферромагнитные, изменяются. Интересно ответить на вопрос, при каком количестве атомов кластер (квантовая точка) начинает вести себя как объемное вещество? Для кластера, содержащего менее 100 атомов, энергия ионизации, т. е. энергия, необходимая для удаления из кластера одного электрона, отличается от работы выхода электрона из объемного материала. Температура плавления кластеров золота становится такой же, как и у объемного золота, при размерах кластера с числом атомов более 1000. На рис. 1.1 показана зависимость температуры плавления наночастиц золота в зависимости от их диаметра. Среднее расстояние между атомами в кластере меди приближается к значению в объемном материале при размерах кластера, содержащего около 100 атомов. Вообще оказывается, что разные физические свойства кластеров достигают значений, характерных для объемных материалов, при разных размерах кластера. Размеры кластера, при которых происходит переход к поведению объемного материала, оказываются зависящими от измеряемой характеристики.

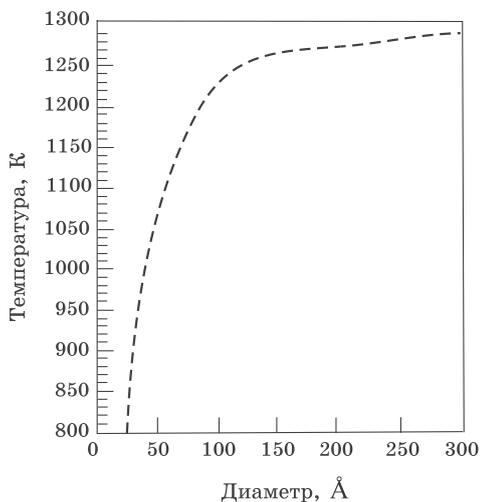


Рис. 1.1. Температура плавления наночастиц золота в зависимости от диаметра наночастицы ($10 \text{ \AA} = 1 \text{ нм}$)

1.5. Характерные особенности нанобъектов

1.5.1. Кристаллическая решетка и магические числа

Большинство металлов кристаллизуется либо в плотноупакованную гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку (Ag, Al, Au, Cu, Pb, Rh), либо в гексагональную плотноупакованную (ГПУ) решетку (Mg, Nd, Os, Re, Y, Zn). Каждый атом в обеих плотноупакованных решетках имеет 12 соседей. На рис. 1.2 показаны 12 соседей атома, находящегося в центре куба (выделен темным цветом) для ГЦК решетки. Такие 13 атомов составляют наименьшую из теоретически возможных наночастиц для ГЦК решетки. На рис. 1.3 показан четырнадцатигранник с минимальным объемом, образуемый соединением этих атомов плоскими гранями, который назвали кубоктаэдром. У этого 14-гранника — шесть квадратных граней и 8 граней в форме равностороннего треугольника. Если нарастить на частицу еще один слой, то есть добавить к этим 13-ти атомам еще 42, то получится частица той же декатессараэдрической формы из 55 атомов. Добавляя слои к такой частице, можем получить еще большие по размеру наночастицы. Они образуют ряд кластеров с суммарным количеством атомов $N = 1, 13, 55, 147, 309, 561, \dots$,

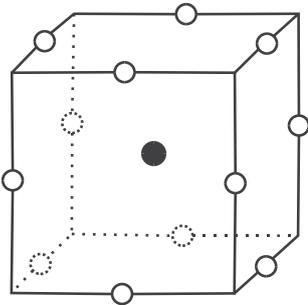


Рис. 1.2. Элементарная ячейка гранецентрированной кубической решетки, построенная вокруг центрального атома (затемнен), включает 12 его ближайших соседей

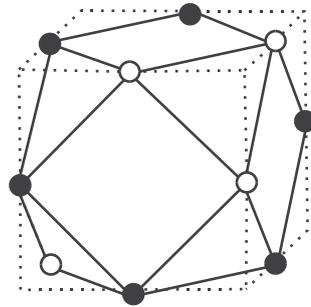


Рис. 1.3. 13-ти атомная ГЦК наночастица, имеющая форму 14-гранника

которые называют структурными магическими числами. Магические числа означают, что кластеры, состоящие из этого количества атомов, более стабильны, чем другие кластеры. Если использовать ту же процедуру для построения гранецентрированной плотной упаковки (ГПУ) наночастиц, то получим несколько отличный от предыдущего ряд магических чисел, а именно: 1, 13, 57, 153, 321, 581, ... Такое название эти числа носят потому, что они получаются при минимизации объема и максимизации плотности наночастицы с формой, близкой к сферической, и плотноупакованной структурой, характерной для объемных тел. Эти магические числа не имеют никакого отношения к электронной структуре составляющих наночастицу атомов.

Конфигурации атомных кластеров, в которых электроны образуют заполненные оболочки, особенно устойчивы и порождают электронные магические числа: $N = 3, 9, 20, 36, 61, \dots$ для ГЦК структур.

1.5.2. Геометрическая структура

Обычно кристаллическая структура наночастицы такая же, как и у объемного материала, но с несколько отличающимся параметром решетки. Рентгеновская дифракция для частиц алюминия размером 80 нм показывает элементарную ячейку ГЦК решетки такую же, как и у объемного алюминия. Однако в некоторых случаях малые частицы с размером < 5 нм могут иметь другую структуру. Например, показано, что частицы золота размерами 3 ... 5 нм имеют икосаэдрическую структуру, хотя в объеме золото кристаллизуется в ГЦК решетку.

1.5.3. Химическая активность и пассивация наночастиц

Существуют многочисленные экспериментальные свидетельства влияния размеров наночастиц на их реакционную способность. В частности, обнаружена зависимость реакционной способности алюминиевых кластеров от количества атомов в них. Аналогичная зависимость от размера наблюдается и для реакционной способности других металлов. Так

у наночастиц золота размером менее 3...5 нм, имеющих, в отличие от ГЦК решетки объемного материала, икосаэдрическую структуру, обнаружена высокая каталитическая активность. Это привело к созданию освежителей воздуха на основе золотых наночастиц на Fe_2O_3 -подложке. Так как некоторые наночастицы из чистых металлов, например, такие как Au_{55} или Al_{13} , обычно очень реакционноспособны и имеют малое время жизни, их можно стабилизировать лигандами, путем присоединения неметаллических ионных групп к металлическим атомам или ионам. Наночастицы Au_{55} изучались, например, в лиганд-стабилизированном виде $\text{Au}_{55}(\text{PPh}_3)_{12}\text{Cl}_6$ с диаметром 1,4 нм, где PPh_3 — органическая группа.

Если бы можно было поместить в воздухе изолированную наночастицу алюминия, она немедленно окислилась бы кислородом воздуха и покрылась слоем оксида Al_2O_3 . Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия 80-нанометровых частиц алюминия, пассивированных кислородом, показывает, что слой Al_2O_3 на их поверхности составляет 3...5 нм. Наночастицы могут быть получены и застабилизированы в жидких средах, что исключает контакт с воздухом.

1.5.4. Электронная структура

Когда частица металла уменьшается в размерах до нескольких сотен атомов, плотность состояний в зоне проводимости — верхней зоне, содержащей электроны — радикально меняется. Непрерывная плотность состояний в зоне заменяется набором дискретных уровней, интервалы между которыми могут оказаться больше, чем тепловая энергия kT , что приводит к образованию энергетической щели. Изменение электронной структуры при переходе от объемного кристалла к большому кластеру, а затем — к маленькому кластеру с размерами меньше 15 атомов, показано на рис. 1.4.

Маленький кластер аналогичен молекуле с ее дискретным набором энергетических уровней, связывающими и антисвязывающими орбиталями. В конце концов, можно уменьшить кластер до размеров, при которых расстояние между противоположными гранями приблизится к длине волны электрона. В таком случае энергетические уровни могут быть получены

Изменение уровней энергии металла
при изменении размера образца



Рис. 1.4. Пример изменения уровней энергии металла при уменьшении количества атомов: *a* — валентная зона объемного металла; *b* — в большом кластере из 100 атомов возникает запрещенная зона; *c* — маленький кластер, состоящий из трех атомов

путем рассмотрения квантовой задачи о частице в потенциальной яме. Интересно отметить, что квантовый размерный эффект появляется в полупроводниках при бóльших размерах, чем в металлах, из-за большей длины волны электронов и дырок в полупроводниках. В полупроводниках длина волны может достигать микрометра, в то время как в металлах она составляет порядка 0,5 нм.

Из-за того, что электронная структура наночастицы зависит от ее размеров, способность реагировать с другими веществами также должна зависеть от ее размеров. Этот факт имеет большое значение для проектирования катализаторов.

1.5.5. Оптические свойства полупроводниковых наночастиц

Название — полупроводниковые наночастицы — несколько обманчиво. Наночастицы германия или кремния сами по себе не являются полупроводниками. Замечательным свойством наночастиц полупроводящих материалов является резко выраженное отличие их оптических свойств от свойств объемного материала. Оптические спектры поглощения существенно сдвигаются в сторону уменьшения длин волн

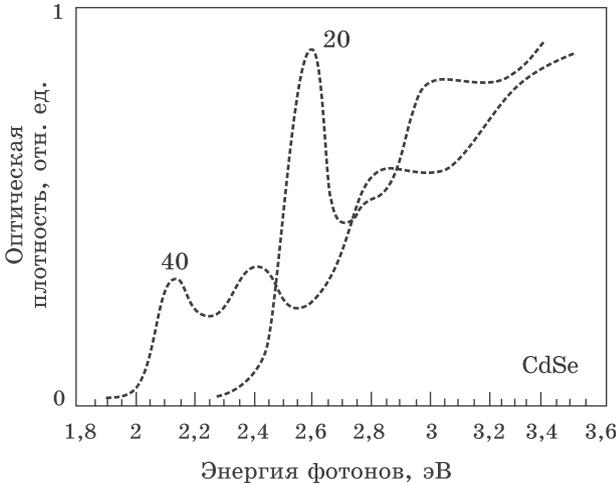


Рис. 1.5. Спектр оптического поглощения наночастиц CdSe размером 20 Å и 40 Å

(в голубую сторону спектра) при уменьшении размеров частиц. На рис. 1.5 показаны спектры поглощения наночастиц CdSe двух разных размеров, измеренные при температуре 10 К. Видно, что наименьшая энергия поглощения, называемая границей поглощения, сдвигается в сторону больших энергий при уменьшении размеров наночастицы. Так как граница поглощения возникает из-за наличия щели в энергетическом спектре, это означает, что щель увеличивается с уменьшением частицы. Наблюдается также увеличение интенсивности поглощения при уменьшении размеров наночастицы.

1.5.6. Размерные эффекты и особенности наноструктур

Интересно выяснить, чем нанобъекты отличаются от объемных материалов. Возьмем в качестве типичного материала GaAs — полупроводник типа $A^{III}B^V$. Параметр решетки этого материала составляет $a = 0,565$ нм, а объем элементарной ячейки — $0,180$ нм³. Каждый тип атомов образует свою ГЦК подрешетку, а эти подрешетки сдвинуты одна

относительно другой на вектор $[\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}]$ по диагонали куба. Решетка содержит около 22 атомов на кубический нанометр, а квантовая точка кубической формы со стороной 10 нм состоит из $5,56 \cdot 10^3$ элементарных ячеек.

Для ответа на вопрос о количестве атомов, находящихся на поверхности наночастицы, удобно пользоваться следующей формулой для кубической частицы со структурой цинковой обманки, присущей GaAs. Если взять элементарную ячейку в виде, показанном на рис. 1.3, а наноструктуру представить состоящей из n^3 таких ячеек, то можно показать, что число атомов на поверхности N_S , полное число атомов N_V и сторона куба d записываются как

$$N_S = 12n^2, \quad N_V = 8n^3 + 6n^2 + 3n, \quad d = n \cdot a = 0,565n.$$

В табл. 1.1 приведены значения N_S , N_V и d и доли атомов на поверхности N_S/N_V для разных n . *Большой процент атомов, находящихся на поверхности при малых n , является одним из принципиально важных факторов, приводящих к различию свойств наноструктур и объемных материалов.* Таблица составлена для кубических наночастиц со структурой алмаза. Легко составить аналогичную таблицу для наночастиц с ГЦК решеткой. Из их сопоставления можно увидеть, что качественно результаты не отличаются, хотя из такого сопоставления следует, что у ГЦК наночастиц доля атомов на поверхности, при том же их полном количестве в частице, больше. Этого и следовало ожидать, так как при вышеприведенном способе вычислений в качестве поверхностных учитывается только один из двух типов атомов в структуре арсенида галлия.

Движение носителей заряда в проводниках и полупроводниках под действием приложенного электрического поля иногда прерывается рассеянием на фононах, примесях, а также на дефектах нульмерных (вакансии и атомы в междоузлиях), одномерных (краевые дислокации), двумерных (границы зерен, дефекты упаковки, двойники, свободные поверхности) и трехмерных (поры, кластеры вакансий, зародыши другой фазы, микротрещины). Все эти дефекты могут вызывать рассеяние электронов и, следовательно, лимити-

Таблица 1.1

Количество атомов на поверхности N_S , в объеме N_V и процент атомов N_S/N_V на поверхности кубической наночастицы со структурой алмаза

n	Размер $n \cdot a$ (нм)*	Полное количество атомов	Количество атомов на поверхности	Процент атомов на поверхности
2	1,13	94	48	51,1
3	1,70	279	108	38,7
4	2,26	620	192	31,0
5	2,83	1165	300	25,8
6	3,39	1962	432	22,0
10	5,65	8630	1200	13,9
15	8,48	$2,84 \cdot 10^4$	2700	9,5
25	14,1	$1,29 \cdot 10^5$	7500	5,8
50	28,3	$1,02 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^4$	2,9
100	56,5	$8,06 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^5$	1,5

* Приведены значения для GaAs ($a = 0,565$ нм)

ровать электропроводность. Однако следует отметить, что некоторые наноструктуры слишком малы для того, чтобы у них присутствовали внутренние дефекты. Следовательно, *нанобъекты с размерами, лежащими в нижней области диапазона наноразмеров, вероятнее всего являются бездефектными.*

Еще один размерный эффект вызван разной степенью легирования полупроводников. Для обычных концентраций доноров от 10^{14} до 10^{16} см⁻³ в квантовой точке размером 100 нм в среднем будет от 10^{-1} до 10^3 электронов проводимости. Нижний предел в 10^{-1} электронов на точку означает, что лишь в одной квантовой точке из десяти будут находиться

такие электроны. Еще меньшие квантовые точки со стороны куба 10 нм будут иметь один электрон в среднем при концентрации примеси 10^{18} см^{-3} , а для концентрации 10^{14} см^{-3} присутствие электрона будет очень маловероятным. Вот почему ранее высказывалось мнение, что наночастицы германия или кремния сами по себе не являются полупроводниками. Аналогичный анализ можно провести для квантовых проволок и квантовых ям. В результате окажется, что такие квантовые структуры обычно характеризуются очень малыми значениями концентрации электронов, которые могли бы участвовать в переносе тока. Это приводит к явлениям *одноэлектронного туннелирования и кулоновской блокады*.

1.5.7. Размерность объекта и электроны проводимости

В трехмерных электронных системах макроскопических размеров электроны проводимости делокализованы и свободно движутся по всей проводящей среде. Ясно, что все размеры макроскопического объекта много больше расстояний между атомами. При уменьшении одного или нескольких размеров образца до величин, всего лишь в несколько раз превышающих расстояния между атомами, положение дел кардинально меняется: делокализация в этих направлениях становится невозможной, и электроны остаются локализованными. Если взять, например, лист меди длиной 10 см, шириной 10 см и толщиной 3,6 нм, которая соответствует 10 элементарным ячейкам, то электроны проводимости будут делокализованы в плоскости листа, но будут локализованы по меньшему измерению. Такой объект, как уже известно, называется квантовой ямой. Уменьшив теперь и ширину листа тоже, например, до 3,6 нм, мы получим квантовую проволоку, длинную в одном направлении, но с диаметром, составляющим нанометры. Электроны в ней делокализованы и свободно движутся только вдоль проволоки, но оказываются локализованными в поперечных направлениях. И, наконец, в квантовой точке, которую можно получить, укоротив квантовую проволоку до наноразмеров и которая может выглядеть как крошечный куб, короткий цилиндр или шар

с размерами в несколько нанометров, электроны локализованы по всем трем пространственным направлениям, так что делокализации вообще не происходит.

1.5.8. Ферми-газ и плотность состояний

Из физики твердого тела известно, что электроны в металле движутся почти без помех и ведут себя как газ, называемый Ферми-газом. Каждый электрон обладает уникальными значениями волновых чисел k_x , k_y и k_z . Эти значения k_x , k_y , k_z различных электронов образуют решетку в k -пространстве, называемом также обращенным пространством. При температуре, равной абсолютному нулю, электроны Ферми-газа занимают все узлы решетки в обращенном пространстве от начального значения $k = 0$ вплоть до расстояния k_F , что соответствует значению энергии, называемому энергией Ферми E_F и равному

$$E_F = \hbar^2 \cdot k_F^2 / 2m,$$

где $\hbar = h/2\pi$ — приведенная постоянная Планка. В предположении, что образец имеет форму куба со стороной L , его объем в обычном координатном пространстве составляет $V = L^3$. Расстояние между двумя соседними электронами в k -пространстве составляет $2\pi / L$, и при абсолютном нуле все электроны проводимости в нем равноудалены друг от друга, располагаясь внутри сферы радиусом k_F и объемом $4\pi \cdot k_F^3 / 3$.

Количество электронов проводимости с заданной энергией зависит от величины этой энергии, а также от размерности пространства. Это происходит из-за того, что в трех измерениях область, в которой находятся электроны, имеет вид шара объемом $4\pi \cdot k_F^3 / 3$, в двух измерениях — круга площадью $\pi \cdot k_F^2$, а в одном измерении — отрезка длиной $2k_F$. Если разделить объемы этих областей на объем элементарной ячейки в k -пространстве и использовать выражение для E_F , приведенное выше, для исключения k_F из формулы, можно

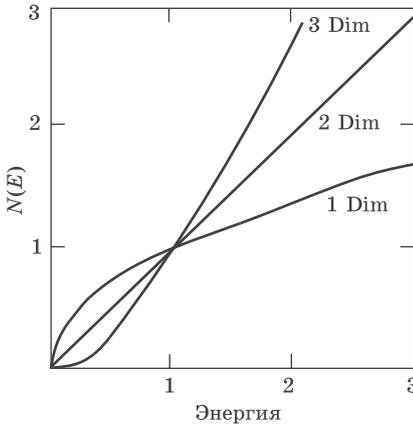


Рис. 1.6. Зависимость количества электронов проводимости $N(E)$ от энергии E в случаях делокализации по одному, двум и трем измерениям

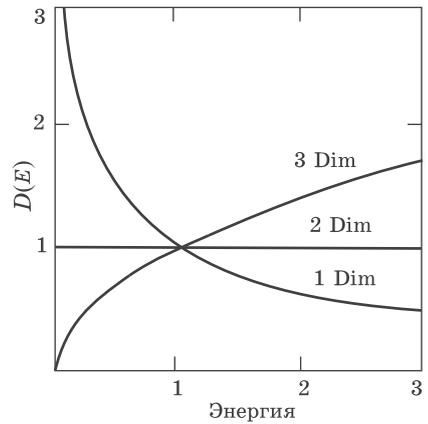


Рис. 1.7. Плотность состояний $D(E) = dN(E)/dE$ как функция энергии E для электронов проводимости в случаях делокализации по одному, двум и трем измерениям

получить зависимость количества электронов N с энергией E от величины этой энергии, изображенную на рис. 1.6.

Наклоны кривых $N(E)$, показанных на рис. 1.6, дают плотность состояний $D(E)$, более строго определяемую как производная $D(E) = dN/dE$. Получающиеся при разных значениях размерности объекта величины $D(E) = dN/dE$ как функция энергии E показаны на рис. 1.7. Из графиков видно, что в одномерных объектах плотность состояний уменьшается с ростом энергии, в двумерных — постоянна, а в трехмерных — растет с увеличением энергии. Таким образом, поведение $D(E)$ в этих трех случаях существенно различается, что очень важно для понимания электрических, тепловых и других свойств металлов и полупроводников. Это означает, что электронные и многие другие свойства металлов и полупроводников радикально изменяются при переходе от трехмерных к низкоразмерным структурам.

Из теории твердого тела следует, что для системы, ограниченной в $3-d$ направлениях и неограниченной в d направле-

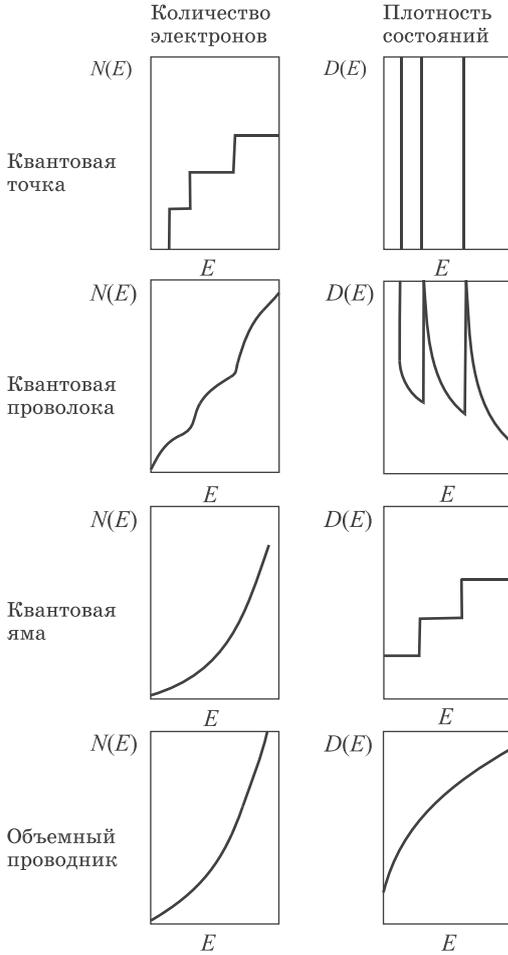


Рис. 1.8. Количество электронов $N(E)$ и плотность состояний $D(E)$ в зависимости от энергии E для четырех типов квантовых структур

ниях, плотность квантовых состояний $D(E)$ в общем случае можно выразить формулой

$$D(E) \sim \sum (E - E_n)^{0,5d-1},$$

где E_n — уровни, возникающие вследствие ограничения. Графики зависимостей количества электронов $N(E)$ и плот-

ности состояний $D(E)$ от энергии E приведены на рис. 1.8 для объемного материала, квантовых ям, квантовых проводов и квантовых точек. Заметим, что определяющим фактором влияния на различные электронные и иные свойства обладает плотность состояний $D(E)$, а она в рассматриваемых случаях трех наноструктур радикально различается, причем каждый из этих графиков демонстрирует свои существенные особенности. Возможно, например, проследить плавный переход между $2D$ и $3D$ структурами. Для этого необходимо увеличить ширину слоев, и в этом случае E_n будет стремиться образовывать псевдоконтинуум. Можно также получить сверхрешетку с равноотстоящими квантовыми ямами. Когда они располагаются достаточно близко друг к другу, состояния E_n уширяются в $1D$ зоны, ступеньки в плотности состояний на рис. 1.8 становятся глаже, а плотность состояний $D(E)$ стремится к такому же поведению, как и $3D$ материал. Из этого следует, что природа размерности и локализации, связанная с конкретной наноструктурой, оказывает явно выраженное влияние на ее свойства. Такое рассмотрение можно использовать для предсказания характеристик наноструктур, а также для идентификации типа структуры по ее свойствам. В то же время все эти случаи являются прекрасным примером общих соображений об образовании зонной структуры.

1.5.9. Свойства, зависящие от плотности состояний

Теплоемкость твердых тел C — это количество теплоты, которое необходимо передать телу для повышения его температуры на один градус. Основной вклад в теплоемкость вносит энергия, требуемая для возбуждения колебаний решетки, а она зависит от фононной плотности состояний $D_{PH}(E)$, которая в свою очередь зависит от размерности объекта. В металлах при низких температурах становится существенным и вклад электронной теплоемкости C_e , которая зависит от плотности состояний на поверхности Ферми:

$$C_e = \pi^2 \cdot D(E_F) \cdot k^2 \cdot T / 3,$$

где k — постоянная Больцмана.

Магнитная восприимчивость $\chi = M/H$ является мерой намагниченности M , или магнитного момента, возникающего под действием магнитного поля H в единице объема образца. Вклад электронов проводимости в χ называется восприимчивостью Паули и задается выражением

$$\chi_e = \mu_B^2 \cdot B \cdot D(E_F),$$

где μ_B — магнетон Бора. Величина χ_e пропорциональна плотности состояний на поверхности Ферми и не зависит от температуры.

Интенсивность рентгеновского излучения. При облучении металлической мишени, например, алюминия быстрыми электронами, энергия которых достаточна для выбивания электрона с некоторого внутреннего уровня атома, оставшийся пустым уровень образует дырку во внутренней зоне. Электрон из зоны проводимости может рекомбинировать с такой дыркой с испусканием кванта излучения. Интенсивность излучения пропорциональна плотности состояний электронов проводимости, так как вероятность захвата дыркой электрона с заданной энергией пропорциональна $D(E)$. Таким образом, спектр испускаемого излучения отражает энергетическую зависимость плотности состояний.

1.6. Что сулит нам развитие нанотехнологии?

Широкий интерес к нанотехнологии в последнее время объясняется по крайней мере тремя обстоятельствами. Во-первых, он связан с надеждами получить с ее помощью принципиально новые устройства и материалы с характеристиками, намного превосходящими их современный уровень, что весьма важно для интенсивного развития многих областей техники, биологии, медицины и т. д. Во-вторых, нанотехнология и нанонаука оказались широкими междисциплинарными областями, в которых сейчас интенсивно работают специалисты по физике, химии, биологии, медицине, технологии, компьютерной технике, экономике, социологии и других областей. В-третьих, нанопроблематика выявила много пробелов в наших как фундаментальных, так и при-

кладных знаниях о материи, что также способствовало концентрации внимания ученых и инженеров на этих проблемах.

Наноструктуры фундаментально отличаются от микроструктур, образующих основу технологии современной микроэлектроники. Хотя микроструктуры также слишком малы для непосредственного наблюдения и изучения, их свойства в основном описываются законами макроскопической физики. Характеристики наноструктур — особенно электрические и магнитные — описываются преимущественно законами квантовой физики. Поэтому они могут стать ключевыми компонентами аппаратуры для информационных технологий нового типа. Малые размеры наноструктур позволяют упаковывать их очень плотно, что дает возможность значительно повысить «информационную емкость» единицы объема запоминающей среды. Плотная упаковка приводит к многообразию электрических и магнитных взаимодействий между элементами структур, что и обеспечивает этим структурам специфические свойства.

Исследования последних лет продемонстрировали важную роль наноструктур в различных областях науки и техники (физика, химия, материаловедение, биология, медицина и т. д.). Например, было обнаружено, что углеродные нанотрубки на порядок прочнее стали (имея при этом в шесть раз меньший удельный вес), наночастицы способны избирательно проникать в раковые клетки и поражать их, некоторые наноструктуры могут в миллионы раз повысить быстродействие ЭВМ и т. д.

В сущности представляется очевидным, что все природные материалы и системы построены из нанообъектов. Именно в интервале наноразмеров, на молекулярном уровне, природа «прогнозирует» основные характеристики веществ, явлений и процессов. Например, молекулярные составляющие биологических систем (белки, нуклеиновые кислоты, липиды, углеводы и их биологические аналоги) являются примерами материалов, чья структура и свойства определяются в наномасштабе. Многие природные наноструктуры и наносистемы образуются при помощи биологических методов самосборки. В нанотехнологии ученые могут многому

научиться у природы. Так, в природе существуют магнитотактические бактерии, обладающие внутренним «компасом», который направляет их движение в магнитных полях. «Компас» представляет собой соединенные в линию магнитные наночастицы. Каждая частица имеет размер ~25 нм, соответствующий отдельному магнитному домену. Внутри бактерии эти магнитные частицы самопроизвольно выстраиваются в цепочки, образуя компас, ориентация которого обеспечивает (при минимальной массе материала) для бактерии возможность располагаться вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Цепь нанокристаллов (используемая этими бактериями для выбора направления движения) демонстрирует действие принципов скейлинга в природе, позволяющее бактериям при минимальной массе биомагнитного материала с максимальной эффективностью использовать намагничивание. Пример живой природы можно использовать в технике. Известно, что время перемагничивания образца экспоненциально зависит от его объема. Поэтому нанокристаллы, например, частицы окиси железа размером несколько десятков нанометров могут быть использованы для создания быстродействующих магнитных устройств памяти, работающих при комнатной температуре.

С появлением СТМ и его модификаций возникло новое направление получения наноструктур, основанное на субмикронной «сборке». В идеальном варианте (при использовании принципов самоорганизации вещества и «самосборки») такие структуры должны создаваться «снизу вверх» в отличие от практикуемого в настоящее время подхода к ультраминиатюризации «сверху вниз» (т. е. когда мелкие объекты создаются из крупных путем уменьшения размеров по законам скейлинга). Но для создания функциональных ансамблей из наноструктур необходимо знать, каким образом эти структуры могут соединяться друг с другом, знать закономерности объединения изолированных наноструктур различного типа в ансамбли. До сих пор неизвестны принципы взаимодействия и объединения таких структур друг с другом и это сдерживает исследования в области синтеза и применения наноструктурных систем и не позволяет выработать стратегию получения новых функциональных характеристик. Ученые

пока только начинают понимать принципы, по которым следует осуществлять конструирование и производство наноструктур и наноустройств. Только после того, как будут поняты принципы, определяющие физико-химические свойства таких материалов, и на этой основе мы научимся моделировать (прогнозировать) свойства получаемых объектов, можно будет добиться большого прогресса в конструировании, изготовлении и сборке наноструктур (это знаменовало бы революцию в науке и технике). С этой точки зрения интересен следующий факт. Ассоциация полупроводниковой промышленности США разработала план непрерывного развития устройств обработки информации (датчики сигналов, процессоры, запоминающие устройства, дисплей). План подразумевает непрерывную миниатюризацию устройств, увеличение скорости действия и понижение энергопотребления. В соответствии с прогнозом к 2012 г. линейные размеры самых миниатюрных элементов некоторых устройств должны снизиться до 50 нм. Однако в указанном плане развитие обозначено только до 2006 г. (и до размеров 100 нм), и авторы воздерживаются от прогнозов на более длительный срок. Указанный план заканчивается именно на подходе к наноструктурам, поскольку до сих пор не совсем ясны методы их изготовления (особенно в промышленном масштабе) и совсем неизвестны методы объединения их в более сложные системы. Указывается, что в области размеров меньше 100 нм требуются новые материалы, новая «архитектура» устройств и технологические процессы нового типа.

Многие свойства твердых тел, как уже отмечалось, связаны с характерными размерами, ниже которых эти свойства изменяются. И эти характерные размеры лежат в диапазоне $10^{-9} \dots 10^{-7}$ м, соответствующем средним размерам атомов и молекул в обычных материалах. Свойства веществ и материалов, образованных структурными элементами с размерами в нанометровом интервале, обусловлены не только малыми размерами структурных элементов, но и проявлением квантово-механических эффектов, волновой природой процесса переноса и доминирующей ролью поверхностей раздела. Управляя размерами и формой наноструктур, таким материалам можно придавать совершенно новые функциональные

характеристики, резко отличающиеся от характеристик обычных материалов. Это открывает возможность перехода к новому поколению материалов, свойства которых изменяются не путем изменения химического состава компонентов, а в результате регулирования их размеров и формы. Нанотехнологический подход означает такое же, но целенаправленное регулирование свойств объектов на молекулярном уровне, определяющем фундаментальные параметры. Такой подход сулит большие перспективы и для фундаментальной науки (например, для физики конденсированных сред) и для развития технологии изготовления наноструктур с заданными свойствами и сборки из них сложных наносистем. Нанотехнология позволяет регулировать строение вещества и происходящие в нем процессы на фундаментальном уровне, определяющем электронные, химические и биологические свойства. Приведем примеры, подтверждающие это суждение.

Свойства наноразмерных групп атомов или молекул (кластеров), как выяснилось, зависят от числа атомов (N) в кластере, которое может рассматриваться в качестве критического параметра, соответствующего проявлению «наномасштабности». В качестве простого примера можно привести тот факт, что потенциал ионизации отдельного атома обычно вдвое превышает работу выхода электрона из макроскопического вещества. Кроме того, измерения зависимостей потенциала ионизации и электронного сродства кластеров металлов от числа N содержащихся в них атомов показали, что измеряемые величины при N , меньшем чем $100 \dots 200$, изменяются не монотонно, а скачком. Были также обнаружены сильные зависимости от N химической активности, магнитного момента, поляризуемости и геометрической структуры.

В качестве следующего примера можно привести зависимость оптической ширины запрещенной зоны кремниевого кластера от числа атомов в нем. Кремний в обычных условиях обладает низкой излучательной способностью в оптическом диапазоне, вследствие чего он не используется для производства оптоэлектронных устройств. Объясняется это тем, что в отличие от других полупроводниковых материалов, на-

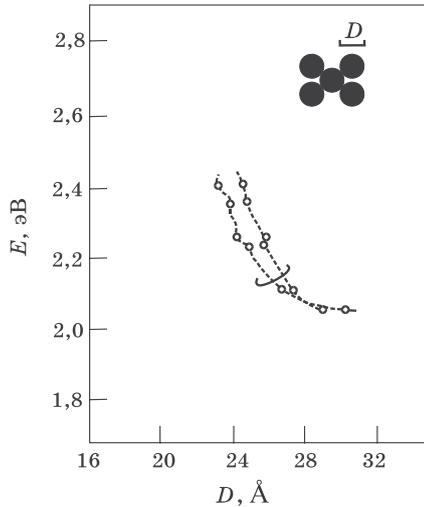


Рис. 1.9. Экспериментальные данные по зависимости оптической ширины запрещенной зоны E от диаметра D кремниевых квантовых точек. Два набора данных соответствуют двум разным методам оценки размеров квантовых точек

пример, арсенида галлия, ширина запрещенной зоны кремния мала и кремний — непрямозонный полупроводник, и поэтому в лазерах и других оптических устройствах применяется обычно арсенид галлия. Если бы свойства кремния путем его модификации удалось приблизить к свойствам арсенида галлия, то получился бы универсальный материал, пригодный как для создания интегральных схем, так и для создания оптоэлектронных устройств на одной подложке. Недавно было обнаружено, что оптические свойства крупного кластера атомов кремния, который называется квантовой точкой, при оптическом возбуждении зависят от его размеров. Зависимость оптической ширины запрещенной зоны (энергии возбуждения) квантовой точки от числа атомов в ней (ее размеров) представлена на рис. 1.9, из которого видно, что с уменьшением размера кластера его оптическое возбуждение значительно усиливается. Этот эффект, называемый квантовым удержанием, позволяет приблизить оптические свойства кремния к свойствам арсенида галлия.

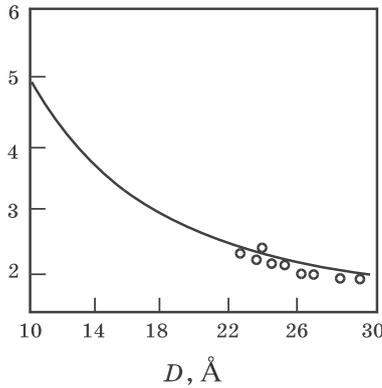


Рис. 1.10. Зависимость оптической ширины запрещенной зоны E от диаметра квантовых точек D . Сплошная линия — теория, точки — эксперимент. См. рис. 1.9

Например, энергия возбуждения кремниевых квантовых точек согласно рис. 1.9 составляет 2 ... 2,5 эВ, что вдвое превышает оптическую ширину запрещенной зоны кристаллического кремния и даже больше ширины запрещенной зоны арсенида галлия (1,5 эВ). Для оценки роли квантового удержания и интерпретации экспериментальных данных была рассчитана ширина запрещенной зоны больших систем атомов кремния (включая кластеры диаметром до 3 нм). Теоретические и экспериментальные результаты для оптической ширины запрещенной зоны хорошо согласуются друг с другом (рис. 1.10).

Рассмотренные примеры подтверждают предположение о том, что макроскопические свойства материала определяются размером образующих его структурных элементов — кластеров (от одного атома до очень большой их совокупности). В связи с этим открывается перспектива конструирования материалов путем контролируемого образования кластеров, или частиц, по атомам и их дальнейшего использования в качестве либо новых материалов, либо структурных элементов для более сложных материалов или устройств. В этом и заключается суть нанотехнологического производства.

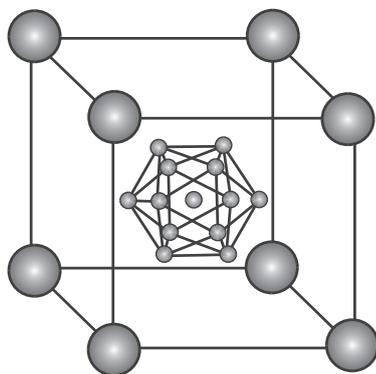


Рис. 1.11. Возможная ОЦК структура решетки, образованной калием и кластерами Al_{13}

Следуя высказанной выше концепции и рассматривая кластеры как суператомы, можно прийти к интригующей возможности построения твердых материалов нового типа, структурными элементами которых являются не атомы или ионы, а кластеры атомов. Твердые тела, построенные из таких кластеров, могут обладать новыми интересными свойствами. Сделаны некоторые теоретические предсказания относительно свойств твердых тел, построенных из таких кластеров как $Al_{12}C$. Атом углерода включен в структуру для достижения количества валентных электронов числа 40, при котором происходит замыкание электронных оболочек кластера, что повышает его стабильность. Это — необходимое условие для построения твердых тел, так как кластеры с незамкнутыми оболочками могут химически взаимодействовать с соседями, что приведет к образованию более крупных кластеров. С помощью вычислений предсказано, что ГЦК структура $Al_{12}C$ обладает очень малой шириной щели, составляющей порядка 0,05 эВ, то есть материал будет полупроводящим.

Рассматривалась также возможность построения ионных твердых тел из кластеров KAl_{13} . Так как сродство к электрону у кластера Al_{13} близко к таковому для хлора, возможно, что это вещество будет иметь структуру, аналогичную струк-

туре KCl. На рис. 1.11 показана возможная ОЦК структура такого материала. Вычислено, что энергия связи такого материала составляет 5,2 эВ, что сравнимо с энергией связи KCl, составляющей 7,19 эВ. Такое кластерное твердое тело весьма стабильно. Эти вычисления показывают, что возможны новые твердые тела с кластерами в качестве структурных единиц, и что такие тела будут обладать новыми интересными свойствами. Можно предположить даже появление новых высокотемпературных сверхпроводников с подобной структурой. Возможно, что из кластеров, обладающих магнитным моментом, можно построить и новые ферромагнитные материалы.

Нанотехнология должна принципиально изменить методы изготовления материалов и устройств. Возможность синтезировать наномасштабные элементы с точно регулируемые размерами и составом, а затем собирать такие элементы в более крупные структуры, обладающие уникальными свойствами и функциями, приведет к революционным изменениям во многих отраслях материаловедения и промышленности. Использование наноструктур позволит получать более легкие и прочные материалы с программируемыми характеристиками, снизить стоимость эксплуатации устройств, благодаря повышению их качества, создать принципиально новые устройства, основанные на новых принципах и имеющие новую «архитектуру». В области электроники на основе нанотехнологий можно ожидать изготовление новых типов чипов (кристаллов с электронными схемами) с более высоким уровнем сложности и функциональных характеристик, сверхмощных по вычислительным возможностям и сверхминиатюрных компьютеров и в то же время очень экономных по потреблению энергии. Приведем несколько примеров.

Сверхмощные и сверхминиатюрные компьютеры. В ближайшем будущем можно ожидать значительного уменьшения размеров ЭВМ (одновременно с ростом их рабочих характеристик), что позволит создать сверхмалые или даже микроскопические вычислительные системы. Нанотехнологии позволяют производить транзисторы, электрический ток в которых соответствует движению очень небольшого числа электронов, в результате чего переключения типа включено-

выключено (*on-off*) станут возможными за счет поведения отдельных электронов. Практически это будет означать возможность уменьшения размеров электрических цепей (и больших вычислительных систем) до предельно малых размеров, а также использование в их работе принципов квантовой механики.

Управление поведением отдельного электрона. Квантовая точка — новое понятие современной физики, означающее некоторую (искусственно созданную) область вещества, в которой можно «хранить» небольшое количество электронов.

Вообще говоря, механизм действия большинства полупроводниковых устройств и приборов (например, широко распространенных транзисторов и т. п.) основан именно на регулировании потока электронов. Транзисторы имеют в настоящее время размеры в несколько микрометров и управляют движением «потока», содержащего от сотен тысяч до 1 миллиона электронов. В отличие от них, квантовые точки управляют движением лишь очень небольшого числа электронов (вплоть до управления одиночными электронами!), так что их можно назвать малоэлектронными (или даже одноэлектронными) транзисторами. Эта особенность квантовых точек открывает перед физиками и инженерами огромные возможности для миниатюризации полупроводниковых устройств и снижения их энергопотребления. Более того, использование квантовых точек позволяет создавать приборы и устройства совершенно новых типов.

Очень важно, что квантовые точки могут образовываться в результате процессов самосборки. Если на кристаллическую поверхность кремния или арсенида галлия нанести небольшое число атомов другого вещества (например, атомов германия и т. п.), то через некоторое время можно наблюдать, как эти «чужеродные» атомы сами собираются в некоторые структуры (так называемые «островки» или островные кристаллические структуры) размером в несколько десятков нанометров. Структуры такого типа и являются квантовыми точками, представляющими собой трехмерные «ловушки» для электронов.

Типичным примером электронных устройств нового типа, связанных с нанотехнологией, могут служить упоминавшиеся выше одноэлектронные транзисторы или запоминающие устройства, работа которых определяется поведением отдельных электронов.

Одноэлектронные запоминающие устройства. Важнейшим элементом современных вычислительных машин являются динамические запоминающие устройства с произвольной выборкой (*Dynamic Random Access Memory, DRAM*), предназначенные для быстрого последовательного считывания информации. В простейшем варианте эти полупроводниковые запоминающие устройства представляют собой комбинацию конденсатора и переключателя (в этом качестве обычно применяется МОП-транзистор), которая позволяет сохранять в конденсаторной части (и, соответственно, при необходимости «выпускать») примерно 100 тысяч электронов, что и соответствует, например, переходу записывающей системы из состояния «0» в состояние «1». Ограниченность возможностей таких устройств, естественно, связана с их физическим объемом и размерами управляющих электрических сетей, что и стимулирует разработку методов, позволяющих осуществлять переключение состояния системы меньшим числом электронов, а в идеальном случае и единственным электроном.

Преимущества такого подхода очевидны. Энергопотребление систем управления одиночными электронами должно, естественно, существенно сократиться. В сущности, в таких наноустройствах конденсаторы окажутся излишними, что позволит снизить размеры схем до минимума. В лабораториях фирмы Hitachi еще в 1993 году было создано первое в мире одноэлектронное запоминающее устройство, работающее при комнатной температуре. В 1995 году оно имело объем памяти 64 бита, а к 1998 году уже работало одноэлектронное запоминающее устройство с объемом памяти в 128 Мбит. Ранее существовали экспериментальные запоминающие устройства такого типа, однако они могли работать лишь при сверхнизких температурах (близких к абсолютному нулю температуры). Основная заслуга специалистов фирмы Hitachi состоит именно в том, что созданное ими в 1993 году

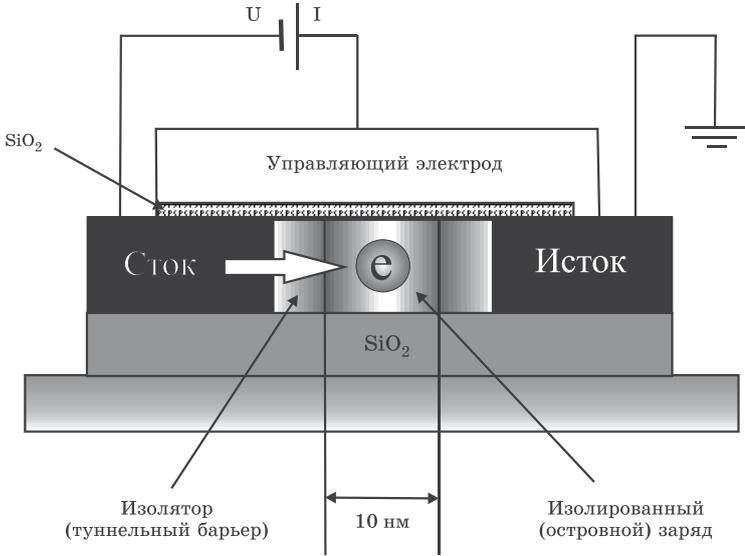
устройство могло работать при комнатных температурах, т. е. было пригодно для практического использования. В 1998 году была достигнута достаточно высокая степень интеграции схемы, в результате чего было изготовлено одноэлектронное запоминающее устройство, потребляющее при работе примерно в 100 раз меньше электроэнергии, чем существующие. В настоящее время размеры таких устройств составляют около 100 нм, причем сама квантовая точка имеет размер около 10 нм. Следует также подчеркнуть, что квантовая точка была сформирована в результате процесса самосборки атомов на поверхности очень тонкой кремниевой пластины, вследствие чего для «подключения» квантовой точки к электрической цепи потребовалось создать специальную методику. Такая сверхминиатюрная электрическая схема работает и регулирует движение отдельных электронов при комнатной температуре, что позволяет надеяться на создание в течение ближайших нескольких лет запоминающих устройств с большим объемом памяти.

Одноэлектронные транзисторы. Одноэлектронный транзистор представляет собой переключающее устройство, способное соединять или разъединять электрические цепи за счет управления движением одного электрона. В существующих транзисторах такое переключение соответствует управлению совместным движением сотен тысяч электронов, поэтому переход к одноэлектронным переключателям обещает резкое снижение энергопотребления и, соответственно, тепловыделения. Одноэлектронный транзистор внешне выглядит как два металлических электрода, разделенных очень тонкой (нанометровой) изолирующей перегородкой, сквозь которую могут происходить туннельные переходы электронов. По этому принципу, называемому «кулоновской блокадой», работают широко распространенные МОП-транзисторы, в которых переключение осуществляется изменением потенциала управляющего электрода.

На рис. 1.12 показана подробная схема устройства одноэлектронного транзистора. В центральной части расположен тот самый участок вещества (с размерами ~ 10 нм), называемый квантовой точкой, в котором находятся изолированные электроны.

Принцип работы одноэлектронного транзистора

Управление движением отдельного электрона с использованием «кулоновской блокады»



Кулоновская блокада

Управление отдельным электроном за счет туннельного эффекта требует ничтожных изменений электрического потенциала



Рис. 1.12. Одноэлектронный транзистор — типичный пример наноустройства

Пока напряжение между управляющим электродом и истоком остается меньше некоторого порогового значения, электрон остается изолированным (как бы живущим на отдельном «острове»), однако при дальнейшем повышении напряжения (т. е. при напряжении выше порогового) «блокада» электрона прорывается, в результате чего устройство в целом срабатывает подобно обычному транзистору.

В 1999 году сотрудники одной из лабораторий Национальной телекомпании NTT из последовательно соединенных на кремниевой пластине одноэлектронных транзисторов смогли создать первый в мире сверхминиатюрный инвертор, т. е. схему, способную «перебрасывать» выходное напряжение на вход. Дальнейшее развитие идеи должно привести к исключительно малым по размерам вычислительным и коммуникационным устройствам, потребляющим ничтожные количества электроэнергии.

Высокоэффективные топливные элементы. Известно, что выхлопные газы автомобилей (углекислый газ и т. д.) относятся к важнейшим факторам возникновения парникового эффекта и загрязнения окружающей среды, вследствие чего во всем мире ведутся активные поиски новых источников энергии, способных заменить бензин в двигателях внутреннего сгорания. Наиболее перспективными в этом смысле представляются так называемые топливные элементы, особенно водородные (поскольку при сгорании водорода образуется лишь экологически безвредная вода!). Развитие таких «экологически безопасных» процессов всегда сдерживалось их низкой эффективностью. Однако в последние годы химики научились создавать новые кристаллические формы углерода (так называемые нанотрубки), способные адсорбировать значительные количества водорода, что позволяет надеяться на быстрый прогресс в этом направлении.

Нанотехнологический прорыв. Техника миниатюризации развилась настолько, что позволяет легко изготавливать детали схем размером около 0,2 мкм. При этом тенденция к уменьшению размеров сохраняется, поэтому можно ожидать, что линейные размеры элементов интегральных схем снизятся к 2011 году до 50 нм! Однако представляется очевидным, что существующие технологические приемы уже не

в состоянии обеспечить эффективное производство элементов электронных схем с точностью до 100 нм (не говоря уже о точности в 50 нм!).

В жестких дисках была получена исключительно высокая плотность записи, что стало сенсацией в компьютерной технике и позволило проектировщикам начать практические работы по созданию сверхмощных вычислительных устройств нового типа. Плотность записи на один квадратный дюйм площади магнитного диска уже составляет 15 Тбит и более, поэтому ожидалось, что в 2007 году она составит ~1 Тбит/кв. дюйм. Эти параметры снова выводят нас на некоторые физические пределы существующих технологий. Действительно, при плотности в 1 Тбит/кв. дюйм запись 1 бита информации соответствует промежуткам длиной около 20 нм, что невозможно реализовать ни в одной из существующих систем магнитной записи. Дело в том, что при предельной плотности записи 1 бит информации может быть связан с состоянием отдельного магнитного домена. На меньших промежутках запись станет неустойчивой из-за термических флуктуаций.

С другой стороны, на цифровых видеодисках многократного использования (*DVD, digital video disk*) и оптических дисках (*ODD, optical digital disk*) плотность записи может достигать нескольких десятков Тбит и выше. Плотность записи при этом лимитируется длиной волны используемого света, так как при меньших длинах волн считывание становится невозможным (этот фактор в оптике называют дифракционным пределом разрешения).

Нанотехнология позволяет преодолеть эти сложности (за счет перехода к атомарному уровню обработки и регулирования состава материалов) и записать, например, 1 бит информации на длине порядка нескольких нм. Для этого необходимо перейти к производству новых материалов с повышенными функциональными характеристиками. Поэтому можно считать, что перспективы развития электроники определяются именно возможностями нанотехнологий.