
ПРЕДИСЛОВИЕ

Государственный образовательный стандарт дисциплины ОПД.Ф.02.02 «Электроника» направления подготовки студентов 654400 по специальностям: 200900 — сети связи и системы коммутации; 201000 — многоканальные телекоммуникационные системы; 220100 — вычислительные машины, комплексы, системы и сети; 201200 — средства связи с подвижными объектами — включает в себя частично или полностью различные разделы электроники. В основном, госстандартом дисциплины «Электроника» охвачены следующие разделы электроники: полупроводниковая электроника и микроэлектроника, физические основы которых приведены в госстандарте дисциплины «Физические основы электроники».

В предлагаемое учебное пособие «Основы нано- и функциональной электроники» не вошли такие разделы электроники, как вакуумная и плазменная электроника; квантовая и оптическая электроника, так как они не включены в госстандарте указанных дисциплин.

Учебное пособие написано по материалам лекций дисциплин «Электроника» и «Физические основы электроники», прочитанных авторами в разные годы в Московском техническом университете связи и информатики и Ростовской-на-Дону государственной академии сельскохозяйственного машиностроения. При этом Госстандартом указанных дисциплин предусматриваются перспективные основы нано- и функциональной электроники, которые и введены в настоящее учебное пособие согласно

замечательным учебникам и учебным пособиям А. А. Щуки, И. П. Степаненко, В. И. Бойко и др., В. Г. Герасимова и др., Е. И. Ефимова и др., а также других замечательных отечественных ученых и преподавателей, методические находки которых были использованы в учебном процессе и процитированы в учебном пособии.

Учебное пособие включает в себя разделы, пронумерованные арабскими цифрами. В конце каждого раздела приведены контрольные вопросы и рекомендуемая литература. Контрольные вопросы должны быть применены студентами для закрепления лекционного материала и могут также использоваться преподавателями при составлении экзаменационных билетов, а рекомендуемая литература — для углубленного изучения рассматриваемых и возникающих проблем и вопросов.

Работа по написанию учебного пособия была распределена между авторами следующим образом: предисловие, введение, раздел 2, приложение 2 написаны кандидатом технических наук доцентом Ю. А. Смирновым; раздел 1, заключение — доктором технических наук профессором С. В. Соколовым; раздел 3, приложение 1 — кандидатом технических наук доцентом Е. В. Титовым. Компьютерный набор учебного пособия провел Ю. А. Смирнов, а общее редактирование — С. В. Соколов.

Авторы выражают благодарность рецензентам за полезные критические замечания, сделанные ими при просмотре электронного варианта учебного пособия.

Все замечания и пожелания по содержанию учебного пособия просим вас направлять по электронному адресу (e-mail): smirnoff.iura@yandex.ru.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Существует ли наномир, т. е. имеются ли в природе нано-размерные объекты, индивидуальные по свойствам и независимые от других объектов? Несомненно, что наномир существует. Соответственно, для мира науки и техники есть проблема перехода от микромира к наномиру, а в более узком аспекте — от микротехнологии и микроэлектроники к нанотехнологии и наноэлектронике. Наша цель заключается в том, чтобы показать, что полученные экспериментальные факты (достаточно парадоксальные) приводят к развитию новых концепций и идей, которые дадут доказательства очевидности наномира. Проблема наносостояния не нова для химии и материаловедения. Р. Зигмонди в 1925 г. и Т. Сведберг в 1926 г. были первыми, кто получил Нобелевские премии за важные наблюдения в химии дисперсных систем (наносистем). За 70–80 лет химики синтезировали несколько сотен различных нанообъектов: частиц, материалов, структур (кентавры, коацерваты, тактоиды, фазоиды, аллофены, гигантские кластеры, фуллерены, фуллериды, нанотрубки и т. д.). Важно, что все это многообразие форм и составов существует в узком интервале размеров (наноразмеров) либо состоит из наноэлементов структуры.

Для неорганической химии переход в масштаб наноразмеров позволил обнаружить многие новые структурные типы, строение которых не соответствует незыбленным в макромире законам классической (обобщенной) кристаллографии. Наночастицы демонстрируют самые

разнообразные структурные элементы: одномерные, двухмерные, трехмерные, фрактальные и всевозможные их комбинации. Что же предопределяет такое многообразие структур в наномире? Ответ на этот вопрос кроется в квантовом характере наносостояния и особых статистических законах, доминирующих в наномире. Наносистемы далеки от равновесия также из-за наличия развитой поверхности. Положения атомов вблизи поверхности отличаются (геометрически и физически) от положений атомов в объеме кристалла. Состав приповерхностного слоя не соответствует стехиометрическому составу химического соединения. Глубина модуляции структуры может простираться на несколько моноатомных слоев. Такие эффекты позволяют говорить о существовании неавтономных поверхностных фаз и псевдоморфном сопряжении их с внутренней частью частицы.

Ограничение требований регулярности трансляционной симметрии приводит к появлению икосаэдрических форм упаковки с пентагональной симметрией для неорганических частиц. Реализуются также наночастицы — кентавры с когерентными границами раздела между структурными фрагментами различной симметрии. Для того чтобы представить, как это происходит, используют художественные образы, обращаясь к фантастическому (ставшему теперь реальным) миру метаморфоз, развитых выдающимся голландским художником Морисом Эшером, в рисунках которого показано постепенное изменение симметрии при трансляции (метаморфозе).

Наблюдаемое многообразие частиц и структурная неоднородность наносостояния означают, что законы строения наночастиц иные — они не соответствуют законам, используемым в классической кристаллографии. В области теории строения наносостояния развит локальный подход в рамках алгебраической геометрии и аппарата расслоенных пространств, определяемый уникальной полупростой алгеброй, которой соответствует восьмимерная решетка корней.

Дуализм состояний наночастиц определяет случайный характер их образования, что означает временную зави-

симость параметров системы частиц. Для теоретического анализа наносостояния необходимо преодолеть и другие трудности концептуального характера (главное, что они известны).

В 1959 г. нобелевский лауреат Р. Фейнман сказал, что полно игрушек на полу в комнате, объясняя тем самым, что в области малых размеров много интересного. Многие считают это началомnanoэпохи. Но это не так, ведь Р. Фейнман имел в виду чисто количественные аспекты. В 1977 г. другой нобелевский лауреат — И. Р. Пригожин говорил о невозможности простого перехода от процессов на макроскопическом уровне к обратимым процессам на микроскопическом уровне и определил круг проблем, связанных с решением этой задачи. Можно сказать, что И. Р. Пригожин указал, где «дверь в комнату».

Выдающиеся открытия зарубежных и отечественных химиков в области синтеза и исследования строения наночастиц открывают новую страницу в исследовании этой проблемы. Методы микроскопии высокого разрешения и методы изучения фемтосекундных физических и химических процессов позволяют также экспериментально изучать наносостояние с открытыми глазами и определить многие свойства, необходимые для следующего шага — перехода от микро- к нанотехнологиям.

В силу действия различных причин (как чисто геометрических, так и физико-химических) вместе с уменьшением размеров падает и характерное время протекания разнообразных процессов в системе, т. е. возрастает ее потенциальное быстродействие, что очень важно для электроники и вычислительной техники. Уже сейчас достигнутое быстродействие — время, затрачиваемое на одну элементарную операцию в серийно производимых компьютерах, — составляет около 1 нс (10^{-9} с), но может быть еще уменьшено на несколько порядков (до фемтосекунд в ряде наноструктур).

Наивно было бы думать, что до наступления эры нанотехнологии человек не сталкивался и не использовал объекты и процессы на наноуровне. Так, биохимические реакции между макромолекулами, из которых состоит все

живое получение фотографических изображений; катализ в химическом производстве, бродильные процессы при изготовлении вина, сыра, хлеба и другие происходят наnanoуровне. Однако «интуитивная нанотехнология», первоначально развивавшаяся стихийно, без должного понимания природы используемых объектов и процессов, не может быть надежной основой в будущем. Поэтому первостепенное значение имеют фундаментальные исследования, направленные на создание принципиально новых технологических процессов и продуктов. Возможно, нанотехнологии смогут заменить некоторую часть морально устаревших и неэффективных технологий, но все-таки их главное место — в новых областях, в которых традиционными методами в принципе невозможно достигнуть требуемых результатов.

Возможность прямого исследования нанометрических объектов позволила открыть новый уровень организации материи, находящийся между макроскопическим и микроскопическим уровнями. Важным этапом в познании принципиальных свойств наномира было открытие в 1999 г. когерентных границ в наночастицах (кентаврах), из чего следует, что многофазные наночастицы не имеют стандартных границ раздела. Впоследствии А. И. Русанов показал, что понятие фазового, или агрегатного, состояния не применимо к наночастицам. На новый тип динамических состояний материи, названных диссипативными структурами, указал И. Р. Пригожин. Для химии и биологии диссипативные структуры представляют особый интерес. Их появление в системе свидетельствует о когерентных процессах, идущих на надмолекулярном уровне, отражением чего являются своеобразные свойства этих структур.

Таким образом, между макроуровнем (где действуют хорошо разработанные континуальные теории сплошных сред и инженерные методы расчета и конструирования), плавно переходящим в микроуровень, и атомарным уровнем, подчиненным законам квантовой механики, находится обширный уровень структуры материи — наномир. На этом уровне протекают жизненно важные биохимиче-

ские процессы между макромолекулами ДНК, РНК, белков, ферментов, субклеточных структур, требующие более глубокого понимания. Именно в наномире могут быть искусственно созданы неизвестные ранее продукты и технологии, способные радикально изменить жизнь всего человеческого сообщества. При этом не потребуется больших затрат как сырья и энергии, так и средств для их транспортирования, уменьшится количество отходов и загрязнение окружающей среды, труд станет более интеллектуальным и здоровым и т. д.

Основаниями для новой технологии являются глубокие знания свойств каждого атома вещества из Периодической системы элементов Д. И. Менделеева и наличие сил притяжения между ними при расстояниях менее 1 нм. В результате действия этих сил могут образовываться атомные конфигурации с прочными связями (ковалентными, ионными, металлическими) или слабыми (ван дер ваальсовыми, водородными и др.). Атомные ассоциаты, содержащие небольшое количество атомов, называют молекулами, или кластерами. Чем меньше частица и ниже температура, тем сильнее проявляются ее квантовые свойства. Однако сильные изменения свойств наночастиц по сравнению с макрочастицами того же вещества наступают, как правило, задолго до проявления квантовых пределов (обычно при размерах менее 100 нм). Для разных свойств (химических, физических и др.) этот критический размер может быть различным даже для одного и того же вещества, как и характер их изменений.

При малых размерах и низких температурах могут возникнуть специфические квантовые размерные эффекты, которые могут быть использованы в электронике, оптике, вычислительной технике. Ярким проявлением подобного поведения являются так называемые квантовые точки, проволоки, кольца и т. д. Ввиду резкой зависимости свойств вещества от числа одинаковых атомов в кластере его иногда аллегорически называют третьей координатой Периодической системы элементов Д. И. Менделеева.

Взаимодействие наночастиц, образующих большие системы и структуры, — кристаллы, квазикристаллы,

спирали, колеса, оболочечные частицы — будет определяться самоорганизацией этих систем. Наиболее подробно эти вопросы проработаны Ю. Д. Третьяковым. Бакминстер Фуллер заметил, что химики вынуждены признать существенными эти процессы, так как каждый раз, когда они пытаются выделить один элемент из комплекса или изолировать атомы или молекулы из соединения, отдельные части или их отдельные свойства не объясняют целого. Однако работы И. Р. Пригожина показывают глубокую, фундаментальную основу самоорганизации (правда, до сих пор описание этих процессов носит феноменологический характер).

Большая часть работ по выводу генетических алгоритмов образования неорганических материалов основана на оптимизации строения частиц из заданного числа атомов исходя из принципа минимизации его энергии при фактическом игнорировании особенностей взаимодействия с окружением и геометрическими свойствами «вмещающего» пространства. Непоследовательность такого подхода достаточно очевидна, если обратить внимание на многообразие структур, в состав которых входят, например, элементарные координационные многогранники. Общий подход заключается в учете как геометрических свойств первообразующих «строительных» единиц в форме геометрических структурных комплексов, чьи локальные свойства могут быть записаны в виде кода, так и топологических характеристик вмещающего его пространства.

Прогресс в области наноэлектроники связан с непрерывным прогрессом в области миниатюризации, быстродействия и уменьшения мощности для устройств обработки информации: сенсоров приема сигналов, логических устройств обработки, запоминающих устройств, дисплеев и коммуникационного оборудования. Показательными являются достижения в области накопителей информации на магнитных носителях. Можно создать системы, которые под воздействием магнитного поля изменяют свое электрическое сопротивление. Этот эффект, называемый магниторезистивностью, используется для детектирования магнитных полей, представляющих собой магнитные

биты информации в компьютерных жестких дисках. За последние 10 лет (после обнаружения эффекта магнитосопротивления) эта нанотехнология полностью вытеснила старые производства головок для компьютерных дисков. Новая считывающая головка расширила объем памяти с 1 до 20 Гбит. Гиганская магниторезистивность (ГМР) — это энергонезависимая магнитная память. Так как ГМР-эффект защищен от радиационных повреждений, эти блоки памяти будут иметь важное значение в космической и оборонной промышленности. В головке на спиновом затворе, использующей ГМР, медный слой — прокладка — имеет толщину 2 нм, а прокалывающий слой ГМР — 2,5 нм.

Развитиеnanoэлектроники приведет к созданию nanoструктурированных микропроцессоров, коммуникационного оборудования с более высокой передающей частотой, легких запоминающих устройств с емкостями порядка мультитерабитных, интегральных наносенсорных устройств минимального размера, массы и энергопотребления. Лазер с вертикальным резонансным селективным эмиттером используется для волоконной связи, оптических датчиков, кодирующих устройств, дальномеров.

Последние достижения в области нанотехнологий стали возможными в связи с появлением в руках исследователей набора аналитических методов расшифровки тонкой структуры наночастиц, локального химического анализа и компьютерных программ, обеспечивающих пространственную трансляцию изображения наблюдаемых процессов.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ОСНОВЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

1.1.

БАРЬЕРЫ НА ПУТИ ПЕРЕХОДА ОТ МИКРО К НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

В основе физики полупроводниковой и всей остальной микроэлектроники лежит фундаментальное понятие — энергетический барьер. Это прежде всего традиционный *p-n*-переход, а также граница полупроводника либо с другим веществом, либо с окружающей средой (воздух, вакуум, твердое тело). Основной тенденцией развития микроэлектроники является увеличение степени интеграции. В соответствии с пресловутым законом Мура число элементов, входящих в состав одной только микросхемы, удваивается каждые 1,5–2 г. Однако на пути продолжения этой тенденции встают барьеры: технологический, физический, энергетический... Так, фотолитографическая технология, лежащая в основе технологии производства интегральных схем, достигла своего физического совершенства. Сейчас на подходе рентгеновская и лазерная литография. Лазерная литография позволяет получить разрешение элементов схемы лучше 10 нм. Процесс печати схемы занимает всего 250 нс. На преодоление технологического барьера направлена американская программа *The National Technology Roadmap For Semiconductors*. В соответствии с этой программой к 2015 г. будут проектироваться транзисторы с шириной затвора 20 нм при технологической норме 30 нм. Будут увеличены площади кристаллов интегральных схем до 10 см². Это позволит разместить на кристалле 10⁹ вентилей. При этом рабочая частота составит 30 Гц — 30 ГГц.

Однако до сих пор множество вопросов, касающихся преодоления физических барьеров, остаются нерешенны-

ми. Среди них известная проблема межсоединений: в современных интегральных схемах лишь 10% площади занято транзисторами, а 90% — межсоединениями. Масштабирование элементов транзисторных структур с целью перехода от микро- к нанометровым масштабам является весьма деликатным процессом. Создать транзисторные структуры в нанометровом масштабе сегодня уже под силу серьезным фирмам. Однако так и не решены вопросы их интеграции, вопросы создания групповой технологии производства интегральных схем в нанометровом масштабе, создание новых или традиционных компонентов интегральных схем.

В традиционных схемах микроэлектронной схемотехники устройства всегда имеют «вход» и «выход», которые пространственно разделены и локализованы в электрической схеме, а также в определенных контактах интегральной схемы. Все связи в интегральных схемах реализованы с помощью гальванических или емкостных связей. Реализация таких связей осуществляется путем изменения типа проводимости исходной подложки и создания различных энергетических барьеров на пути потока носителей (электроны, дырки).

Информация обрабатывается и хранится в виде отдельных битов (логические нуль и единица), которые физически реализуются в виде тока, напряжения или заряда в определенной точке интегральной схемы.

Совсем иная физическая картина рисуется при рассмотрении наноэлектронных устройств. Уменьшение размеров на несколько порядков практически меняет физические основы работы наноэлементов. Так, в наноэлементе используются уже *не электроны*, как частицы, переносящие электрический заряд, а *их волновые функции*. Процессы дрейфа и диффузии, характерные для микроэлектронных элементов, и вовсе отсутствуют в наноэлектронных элементах. В основе наноэлементов лежат *полевые связи, сформированные потенциальные барьеры*. «Вход» и «выход» элемента локализованы *не в пространстве, а во времени*. В наноэлектронных структурах определение «входа» или «выхода» возможно только в определенные промежутки времени,

когда существует определенный порог внешних воздействий, соответствующий «входу» или «выходу». Этот промежуток времени получил название *рефракторного периода*, и с его помощью обеспечивается распространение сигнала в определенном направлении. Переход от одного устойчивого состояния наноструктуры в другое происходит через возбужденные неустойчивые состояния.

Как правило, наноэлектронный элемент состоит из набора квантовых ям и потенциальных барьеров. Энергетический спектр таких элементов зависит от размеров, а добавление лишь одного электрона существенно меняет энергетическую диаграмму. В микроэлектронике функциональный логический элемент представляет собой совокупность структурных компонентов — резисторов, конденсаторов, диодов и транзисторов. В наноэлектронике структурированные компоненты обладают свойством многофункциональности, способны выполнять сложные динамические функции.

В качестве материалов изделий микроэлектроники используются легированные полупроводники. В наноэлектронике применяются гетероструктуры, наноструктурированные материалы, кластеры, органические материалы. Технология формирования наноструктур основана на процессах направленного роста, методах, связанных со сканирующим туннельным и с атомным силовым микроскопами. Если плотность размещения активных элементов в интегральных схемах достигает 10^8 см^{-2} , то в устройствах наноэлектроники она может достигать $10^9\text{--}10^{10}$ элементов на квадратный сантиметр. Наноэлементы дают возможность получать излучатель и приемник в диапазонах частот $10^9\text{--}10^{13}$ Гц.

1.2. НАЧАЛА НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Под *наноэлектроникой* понимают направление электроники, в котором изучаются физические явления и процессы взаимодействия электронов с электромагнитными полями, а также разработку нанотехнологии создания приборов и устройств, в которых данное взаимодействие используется для передачи, обработки и хранения информации.

Под *нанотехнологией* будем понимать совокупность способов и приемов создания элементов и приборов нанометровых размеров, в том числе из отдельных молекул и атомов.

Исключительно малая инерционность электронов позволяет эффективно использовать взаимодействие электронов с микрополями внутри атома, молекулы или кристаллические решетки для создания приборов и устройств нового поколения, отличающихся высокой производительностью, ничтожным потреблением энергии, сверхминиатюрными размерами.

Наноэлектроника является логическим развитием микроэлектроники. Твердотельные информационные приборы уменьшились от микро- (10^{-6} м) до нанометрового (10^{-9} м) размера.

По мере приближения характерного размера твердотельной структуры электронного прибора к нанометровой области, соизмеримой с размерами атомов, проявляются *квантовые свойства электронов*. Если в микроэлектронных приборах поведение электрона определялось поведением элементарной частицы, имеющей массу и заряд, то в наноэлектронных приборах *поведение электрона определяется его волновыми свойствами*.

Дебройлевская длина волны электрона равна

$$\lambda_e = \frac{h}{P} \text{ или } \lambda_e = 2\pi h / m_e \cdot V,$$

где $P = m_e \cdot V$ — импульс электрона; m_e — масса электрона; V — скорость его движения; h — постоянная Планка.

Импульс электрона P связан с ускоряющим напряжением соотношением

$$P = \sqrt{mE},$$

где E — энергия электрона. Для определения длины волны электрона удобно пользоваться практической формулой

$$\lambda \approx \sqrt{\frac{150}{V}},$$

где V — ускоряющее напряжение, В; λ — длина волны, Е.

Движение электрона как волны описывается уравнением *Шредингера* для нерелятивистских электронов и

уравнением *Дирака* — для релятивистских. В наноэлектронике обычно используются *нерелятивистские электроны*. Для электрона массой m_e , движущегося под действием силы, порождаемой потенциалом $V(x, y, z, t)$, уравнение Шредингера имеет вид

$$ih \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{m_e} \Delta \psi + V(r) \equiv H\psi \quad (1.1)$$

или

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla^2 + V(r) \right] \psi = E\psi, \quad (1.2)$$

где r — функция положения электрона в пространстве; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — оператор *Лапласа*; H — оператор *Гамильтона*; E — полная энергия электрона; ψ — волновая функция (собственная функция уравнения). Смысл функции ψ состоит в том, что величина $\psi^* \psi \cdot dx dy dz$ является вероятностью нахождения электрона в объеме $dx dy dz$, а ψ^* — комплексно сопряженная величина ψ .

Движение электрона в свободном пространстве $V(r) = C$ описывается уравнением

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi = E\psi.$$

Решение этого уравнения запишется в виде

$$\psi \sim e^{i \vec{k} \vec{r}},$$

где \vec{k} — волновой вектор, определяемый как $|k| = k = \frac{2\pi}{\lambda}$.



Рис. 1.1
Атомы кобальта
на медной подложке

На рисунке 1.1 приведена уникальная фотография, экспериментально подтверждающая наличие дебройлевской волны. В лаборатории фирмы ПВМ с помощью туннельного микроскопа удалось рассадить атомы кобальта вдоль периметра кольца диаметром 20 нм на поверхности меди.

Если внутри кольца поместить еще один атом кобальта, то возникнет его изображение, инверсное относительно центра кольца. Эффект инверсности объясняется ин-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru