

# Молекулярная память

## И НЕ ТОЛЬКО...

**Развитие нанотехнологий предвещает революционные изменения в микроэлектронике. Широкий фронт научных исследований, заинтересованность крупных фирм в производстве молекулярных устройств обеспечивают быстрое развитие «молетроники».**

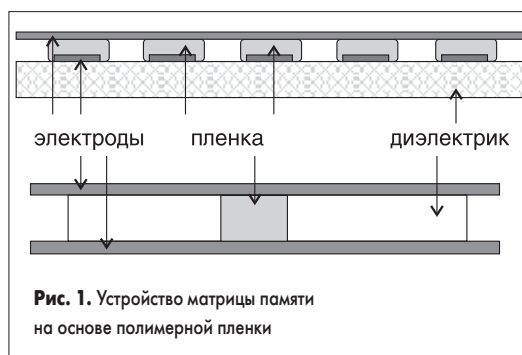
**Владимир Дмитриев**

Развитие современной электронной технологии, условно начавшееся 50 лет назад с изобретения транзистора и десятью годами позже — твердотельной интегральной схемы, по-прежнему вписывается в открытый в 1965 году сотрудником корпорации Intel Гордоном Муром закон: каждый новый чип, произведенный через 18–24 месяца после предыдущего, имеет примерно вдвое большую емкость памяти. Данное движение должно естественным образом закончиться через 10–15 лет ввиду необходимости перехода к использованию взаимодействия элементов на основе квантовой механики. Действительно, размеры элементов должны быть соизмеримы с нанометром (нм), равным  $10^{-9}$  метра, который в тысячу раз меньше микрометра (мкм), или, по старинке, микрона (мк).

Итак, закон Мура впору отменять, иначе впереди — тупик. Однако в последние годы обозначился реальный выход из создавшегося положения, основанный на достижениях химических наук. Соответствующие технологии построения устройств вычислительной техники получили название нанотехнологий.

### Полимерная память

Шведская компания ThinFilm считает, что память будущего будет основана на пластмассе. Очень тонкий лист полимера, зажатый между двумя сетками крошечных электродов, представляет собой матрицу памяти. В каждом пересечении шахматной доски электродов (один провод сверху слоя полимера, а другой — снизу его) создается бистабильная ячейка памяти. Электрическое напряжение, приложен-



ное к данной ячейке, может изменять структуру полимера, переводя его из одного стабильного состояния в другое. Альтернативные состояния полимера соответствуют логическим нулю и единице. Данное состояние может сохраняться достаточно продолжительное время, так как изменение состояния полимера носит химический характер. По этой же причине состояние ячейки энергонезависимо. На рис. 1 показаны варианты структуры матрицы памяти.

Достигнутые размеры элементов устройства были следующими: диаметр проводника составлял около 0,5 мкм, толщина пленки находилась в пределах 0,1–0,5 мкм.

Практически технология создания устройств памяти данного вида может представлять собой раскатывание рулона полимера и напоминать работу газетной типографии. Особенно впечатляет плотность такой памяти. Если сейчас одна ячейка SRAM занимает площадь размером 4–6 квадратных микрометров, предлагаемая технология позволит разместить элемент памяти на площади около одной четверти квадратного микрометра. Причина этого — отсутствие в составе ячейки активных элементов (транзисторов). Активные элементы адресования, считывания и записи могут находиться по периметру матрицы памяти или, как альтернатива, выше или ниже ее. Если учесть, что современная память емкостью в один гигабит требует применения от 1,5 до 6,5 млрд транзисторов, то система полимерной памяти ограничивается примерно половиной миллиона активных элементов. Для повышения плотности памяти листы полимера могут быть сложены стопкой. Согласно расчетам специалистов фирмы ThinFilm, устройство памяти размером с кредитную карточку, построенное по этой технологии, могло бы хранить 60 000 фильмов в стандарте DVD; или 126 лет музыки в стандарте MP3; или 400 000 компакт-дисков; или 250 миллионов цифровых фотографий высокого разрешения! Таким образом, предлагается следующий путь развития систем памяти: от реле к электронно-лучевым трубкам, затем к магнитной памяти, от нее к кремниевой и, наконец, к полимерной. По-видимому, данная картина является во многом идеальной, но время покажет, какова будет ниша полимерной памяти в реальной нанотехнологии.

## Молекулярная память

Если предыдущий подход к совершенствованию систем памяти можно условно назвать эволюционным (путем масштабирования проводники становятся все тоньше, также постепенно утончается слой полимера), то поистине революционным является идея использования в качестве элементов электронной техники молекул.

Уже относительно давно был создан прототип системы памяти, использующей в качестве ячеек молекулы протеина, который называется бактериородопсин (bacteriorhodopsin). Он имеет пурпурный цвет, поглощает свет и присутствует в мембране микроорганизма, называемого *halobacterium halobium*. Этот микроорганизм был обнаружен в соляных болотах, где температура может достигать +150 °С. Когда уровень содержания кислорода в окружающей среде настолько низок, что для получения энергии невозможно использовать дыхание (окисление), он для фотосинтеза использует протеин.

Бактериородопсин был выбран потому, что фотоцикл (последовательность структурных изменений, которые молекула претерпевает при реакции со светом) делает эту молекулу идеальным логическим запоминающим элементом типа «&» или типа переключателя из одного состояния в другое (триггер). Как показали исследования, bR-состояние (логическое значение «0») и Q-состояние (логическое значение «1») являются промежуточными состояниями молекулы и могут оставаться стабильными в течение многих лет. Это свойство, в частности обеспечивающее удивительную стабильность протеина, и было приобретено эволюционным путем в борьбе за выживание в суровых условиях соляных болот.

Другой важной особенностью бактериородопсина является то, что эти два состояния имеют заметно отличающиеся спектры поглощения. Это позволяет легко определить текущее состояние молекулы с помощью лазера, настроенного на соответствующую частоту. Данные, записанные в таком запоминающем устройстве, могут сохраняться приблизительно по пять лет.

Был построен прототип системы памяти, в котором бактериородопсин запоминает данные в трехмерной матрице. Такая матрица представляет собой кювету (прозрачный сосуд), заполненную полиакридным гелем, в который помещен протеин. Кювета имеет продолговатую форму размером 1×1×2 дюйма. Протеин, который находится в bR-состоянии, фиксируется в пространстве при полимеризации геля. Кювету окружают батарея лазеров и детекторная матрица, построенная на базе прибора, использующего принцип зарядовой инжекции (CID — Charge Injection Device), которые служат для записи и чтения данных.

При записи данных для перевода молекул в Q-состояние сначала надо использовать желтый «страничный» лазер. Пространственный световой модулятор (SLM), который, как говорилось ранее, представляет собой LCD-матрицу, создающую маску на пути луча, вызывает возникновение активной (возбуж-

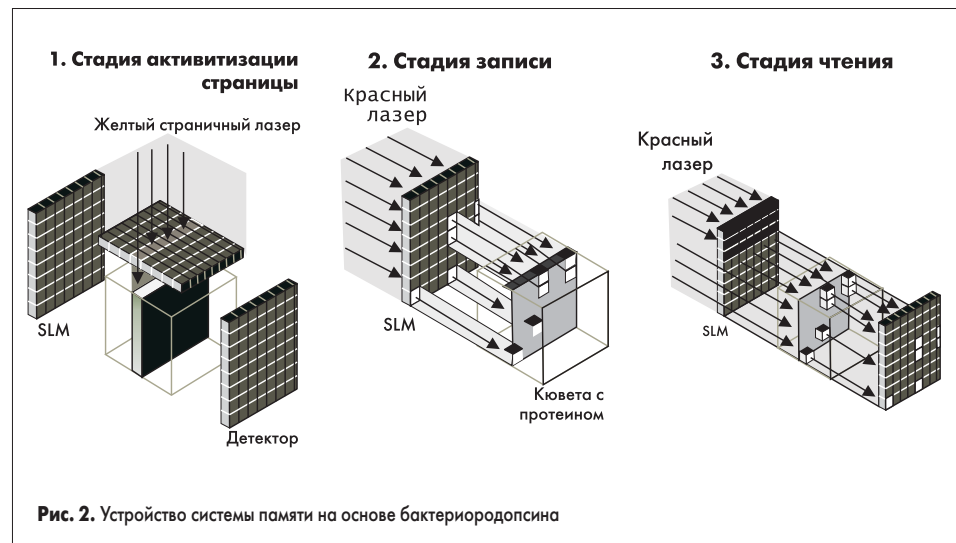


Рис. 2. Устройство системы памяти на основе бактериородопсина

денной) плоскости в материале внутри кюветы. Эта энергоактивная плоскость представляет собой страницу данных, которая может вмещать массив размером 4096×4096 ячеек. Для возврата протеина в состояние покоя используется красный записывающий лазер, располагаемый под прямым углом по отношению к желтому. Второй SLM также управляется матрицей двоичных данных и, таким образом, создает на пути луча соответствующую маску, поэтому облучению подвергнутся только определенные точки страницы. Молекулы в этих местах перейдут в Q-состояние и будут представлять двоичную единицу. Оставшаяся часть страницы возвратится в первоначальное bR-состояние и будет представлять двоичные нули. Для того чтобы прочитать данные, надо опять использовать страничный лазер, который переводит читаемую страницу в Q-состояние. Это делается для того, чтобы в дальнейшем с помощью различия в спектрах поглощения идентифицировать двоичные нули и единицы. Через две миллисекунды после этого страница облучается красным лазером низкой интенсивности излучения. Низкая интенсивность нужна для того, чтобы предупредить переход молекул в Q-состояние. Молекулы, представляющие двоичный ноль, поглощают красный свет, а представляющие двоичную единицу — не реагируют на него. Это создает «шахматный» рисунок из светлых и темных пятен на LCD-матрице, которая считывает страницу цифровой информации.

Для стирания данных достаточно короткого импульса синего лазера, чтобы вернуть молекулы из Q-состояния в исходное bR-состояние. Синий свет не обязательно должен идти от лазера — можно стереть всю кювету с помощью обыкновенной ультрафиолетовой лампы. Для обеспечения целостности данных при выборочном стирании страниц применяется кэширование нескольких смежных страниц. При операциях чтения-записи, чтобы защититься от ошибок, используется код с общей проверкой на четность. Страница данных может быть прочитана без разрушения до 5000 раз. Каждая страница отслеживается счетчиком, и если происходит 1024 чтения, то страница «освежается» (регенерируется) с помощью новой операции записи.

Суммарное время выполнения операции чтения или записи составляет около 10 мс. По аналогии с системой голографической памяти устройство осуществляет параллельный доступ в цикле чтения-записи, что позволяет рассчитывать на общую скорость до 10 Мбит/с. Предполагается, что если объединить по восемь запоминающих битовых ячеек в байт с параллельным доступом, то можно достигнуть скорости 80 Мбит/с, но для такого способа необходима соответствующая схемотехническая реализация подсистемы памяти. Предложенная система по быстродействию близка к полупроводниковой памяти. Теоретически кювета, содержащая протеин, может вместить около одного терабита данных. Ограничения на емкость связаны, в основном, с проблемами линзовой системы и качеством протеина.

Такая молекулярная память «первого поколения» уже обладает определенными преимуществами по сравнению с традиционной полупроводниковой памятью. Во-первых, она основана на протеине, который производится в большом количестве и по невысокой цене, чему способствуют достижения генной инженерии. Во-вторых, система может функционировать в более широком диапазоне температур, чем существующая полупроводниковая память. В-третьих, такая память энергонезависима. Наконец, кюветы с данными можно долго и безопасно хранить.

Следующим шагом в развитии молекулярной памяти явилось исследование свойств отдельных молекул, способных находиться в бистабильном состоянии и управляемых не оптически, а электрически.

Впервые идея использования молекул ДНК в качестве ячеек памяти была представлена в статье Л. Адлемана (L. Adleman) в журнале Science в 1994 году. Использовался тот факт, что природа молекул ДНК такова, что их взаимодействие обеспечивает возможность наличия четырех различных фаз одной последовательности молекул. Подобно этому молекулы типа РНК и белки (протеины), способные создавать подобные структуры, также можно использовать в этих целях.

Обработка информации в молекулярном масштабе предполагалась несколькими способами, но только Адлеман определил пути по-

## Углеродные нанотрубки

строения на ее основе компьютера общего назначения, основанного на теории универсального вычисления. Он определил, что некоторые комбинации биологических молекул естественным образом обладают «комбинаторной сложностью», которая лежит в основе самой жизни. Собственно говоря, ученый просто искал один из путей решения проблемы вычислительной сложности решения задач NP-полноты и обратил внимание на молекулярные структуры, которые позволяют осуществлять параллельные вычисления («массивный параллелизм»). Как затем выяснилось, молекулярные структуры способны решать гораздо больший круг задач, например создавать эффективные устройства памяти.

Память типа RAM, ключевой компонент системы памяти компьютеров, который позволяет пользователям хранить данные и управлять ими, может быть основана на использовании молекулы «catenane», которая состоит из двух колец атомов, взаимодействующих электрохимически. Электрический импульс удаляет один электрон из молекулы и заставляет одно кольцо атомов повернуться на некоторый угол относительно второго (положение «включено»). При возвращении электрона состояние пары колец восстанавливается (положение «выключено»). Такие переключения могут производиться неограниченное количество раз. Электрохимический характер изменения состояния молекул определяет энергонезависимость построенной на их основе как статической, так и динамической памяти. Предыдущий эксперимент, проведенный с молекулами, называемыми готаханами, показал возможность лишь однократного переключения состояния ячейки памяти. Эффект, соответствующий действию плавкого предохранителя, позволял создать память, пригодную только для чтения (ROM).

В настоящее время химики работают с более чем полудюжиной различных видов молекулярных выключателей, каждый с его собственными уникальными характеристиками, превосходящими свойства «catenane».

Специалисты фирмы ZettaCore размещают четыре органических молекулы вещества,

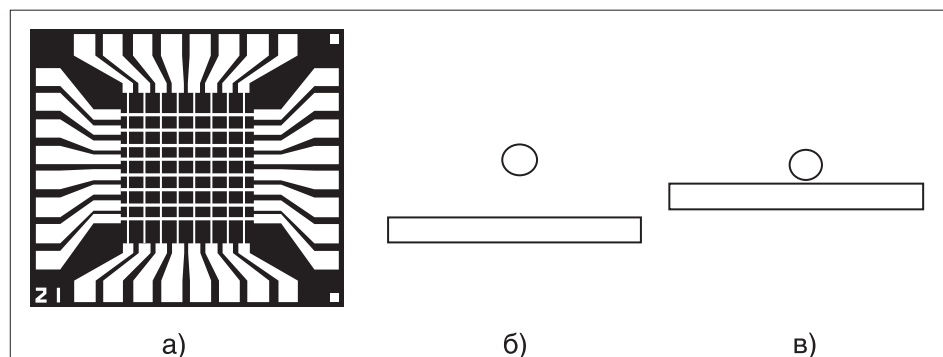
известного как porphyrins, в ряд и подают небольшое напряжение поперек цепи. Данное воздействие заставляет молекулы терять электроны, что приводит к изменению их электрохимического состояния. Состояние молекулы считывается как отсутствие или наличие бита информации (единица или ноль). В отличие от существующих ячеек энергонезависимой памяти, которые для хранения всего лишь одного бита информации требуют шесть транзисторов, здесь каждая ячейка может хранить три бита.

На первом этапе исследований молекулы необходимо было размещать отдельно друг от друга, но затем ученым удалось синтезировать самоорганизующуюся структуру (self-assembly) типа масляной пленки, имеющей толщину в несколько атомов. Особенно важным был переход от хаотической ориентации молекул в растворе к их самоорганизации в тонкой пленке.

Экспериментально было показано, что «самоорганизованный» монослой молекул между двумя электродами обладает свойствами устройства памяти (DRAM) в условиях комнатной температуры. Устройство работало безотказно в течение года, причем память сохранялась без необходимости регенерации заряда более 15 минут (типичная кремниевая ячейка памяти должна регенерировать заряд примерно тысячу раз в секунду).

Одной из многих проблем наноэлектроники является процесс упорядочения молекул в структурах. Представитель фирмы MITRE (США) Alex Wissner-Gross изобрел в 1998 году методику, названную им нанометрическим масштабированием или NanoPGM. Она заключается в создании структуры «нанопальцев» (nanofingers), которые, имея размеры в несколько нанометров, могли бы формировать упорядоченные в заданном смысле массивы молекул для создания устройств наноэлектроники.

Другой проблемой создания устройств на основе молекулярной памяти является создание сети проводов, подводящих электрические импульсы к каждой отдельной молекуле. С этой целью предполагается использовать так называемые нанотрубки.



**Рис. 3.** Схема работы ячейки памяти на основе сетки нанотрубок: а) общий вид сетки нанотрубок; б) исходное состояние, силы упругости не позволяют нанотрубкам касаться друг друга — большое электрическое сопротивление; в) после подачи электрического потенциала трубки притянулись друг к другу и остались в таком положении из-за воздействия сил Ван-дер-Ваальса — малое электрическое сопротивление контакта.  
Примечание: силы межмолекулярного притяжения Ван-дер-Ваальса проявляются на расстоянии между центрами молекул порядка одного нанометра и имеют электромагнитную и квантовую природу.

Параллельным исследовательским процессом, не менее важным, чем поиск молекулярных ячеек памяти, явилось создание углеродных нанотрубок, способных выступать в качестве элементов электронных устройств в нанотехнологии.

Революцию в микроэлектронике может осуществить монооксид углерода (carbon monoxide) — ядовитое вещество, называемое угарным газом. Молекулы СО в присутствии железного катализатора при достаточно высокой температуре образуют шестиугольные молекулы из атомов углерода, которые затем формируют упорядоченную пленку, из которой создаются бесшовные цилиндры — нанотрубки. Хотя они могут содержать миллионы атомов, их размеры не превышают размеров точки в конце этого предложения. Тем не менее нанотрубка — единая молекула. Более прочная, чем сталь, данная конструкция одновременно объединяет свойства меди и кремния.

Углеродные нанотрубки (single-walled carbon nanotubes — SWNT) были открыты в 1991 году Sumio Iijima (фирма NEC, Япония). Позже было выяснено, что данные образования имеют двойственную природу: они могут вести себя как проводники или как полупроводники (становящиеся проводниками при подаче напряжения определенной величины) при условии закручивания молекулы в спираль. Подобный дуализм — идеальное сочетание для создания элементов вычислительной техники наноразмеров. Геометрические комбинации нанотрубок показали идентичность их свойств диодам, транзисторам, ключевым элементам и другим компонентам существующей кремниевой технологии.

Простым и эффективным решением явилось использование прямоугольной сетки нанотрубок одновременно в качестве матрицы ячеек памяти и устройств ввода-вывода. Такая структура обеспечивает бистабильное электростатически переключаемое состояние в каждом пересечении сетки нанотрубок. Детальный анализ показал, что сила упругости, возникающая в момент, когда верхняя нанотрубка максимально удалена от нижней, и силы Ван дер Ваальса, возникающие при сближении трубок в точке их пересечения, определяют два ярко выраженных энергетических состояния ячейки памяти. В первом состоянии переходное сопротивление между нанотрубками велико, во втором состоянии — мало. Обеспечивая электрически притягивающие и отталкивающие силы между нанотрубками, можно вводить данные. Так как электростатическое воздействие прикладывается только к концу конкретной нанотрубки, а не к каждой ячейке памяти, проблема соединения «макромира» и «микромира» в значительной мере будет решена.

Проблемой является заданная ориентация нанотрубок и их соединение. Эта задача решается химическим путем так, что на нанотрубках закрепляются химические «бирки», которые самоорганизуют нанотрубки в необходимые конструкции. Данный процесс назван «избирательной функциональностью» (selective functionalization). Бирки притягива-

ют или отталкивают концы нанопроводников и нанополупроводников, создавая функциональные цепи. Однако ряд ученых полагает, что решение такой задачи не под силу современной химии. Они считают, что достаточно для начала хотя бы дополнить существующие предельные кремниевые технологии нанотехнологиями на основе нанотрубок.

Существуют и другие возможные применения нанотрубок. Samsung и Lucent Technologies предлагают использовать их в сверхтонких телевизионных дисплеях, в качестве экранов электромагнитного излучения в трубках сотовой связи и портативных ЭВМ. Учитывая высокую прочность трубок (в 100 раз большую, чем сталь) ряд исследователей предлагает использовать их для исполнения мечты Артура Кларка — соединения ИСЗ на геостационарной орбите с поверхностью Земли тросом.

Таким образом, нанотрубки могут сами явиться материалом для создания элементов микроэлектронной техники, кроме того, как проводники они потенциально могут обеспечить электрическую связь молекулярных устройств с «внешним миром». Однако существующие самые тонкие «толстые провода макромира» имеют диаметр около 200 нанометров, а толщина нанотрубок составляет лишь около двух нанометров, что соответствует десяти атомам углерода.

Исследователи из Hewlett-Packard предполагают обеспечить создание таких соединений с помощью случайного химического процесса с последующим отбором нужных связей. Граница контакта макро- и микропроводов «засевается» частицами золота. Экспериментально определено, что оптимальная концентрация частиц золота обеспечивает вероятность 50% соединения «микроскопических» проводников с «макроскопическими». Случайный набор связей макропроводников с микропроводниками можно определить как кодовое слово, определяющее уникальный адрес нанопровода. В идеальном случае для адресования тысячи нанопроводов необходимо было бы сто макропроводов ( $2^{10} = 1024$ ), однако адреса дублируются и эффективное адресование существенно хуже. Использование большего числа макропроводов исправляет ситуацию (что вполне соответствует теории кодирования). Специалисты Hewlett-Packard считают, что увеличение числа макропроводников равно учетверенному логарифму числа нанопроводников (по-видимому, данные имеют экспериментальное подтверждение). Для определения всех уникальных адресов создан специальный алгоритм, использующий результаты измерения сопротивления соединенных нано- и макропроводников.

### Концепция молекулярной электроники DARPA

Ограничения на ряд основных параметров микроэлектронных устройств (объем, вес, энергопотребление) достигли своих предельных значений в рамках «кремниевой» технологии. Дальнейшее увеличение плотности памяти, когда каждый транзистор имеет размеры в несколько сотен нанометров, становится чрезвычайно дорогим. Предполагают, что расходы в

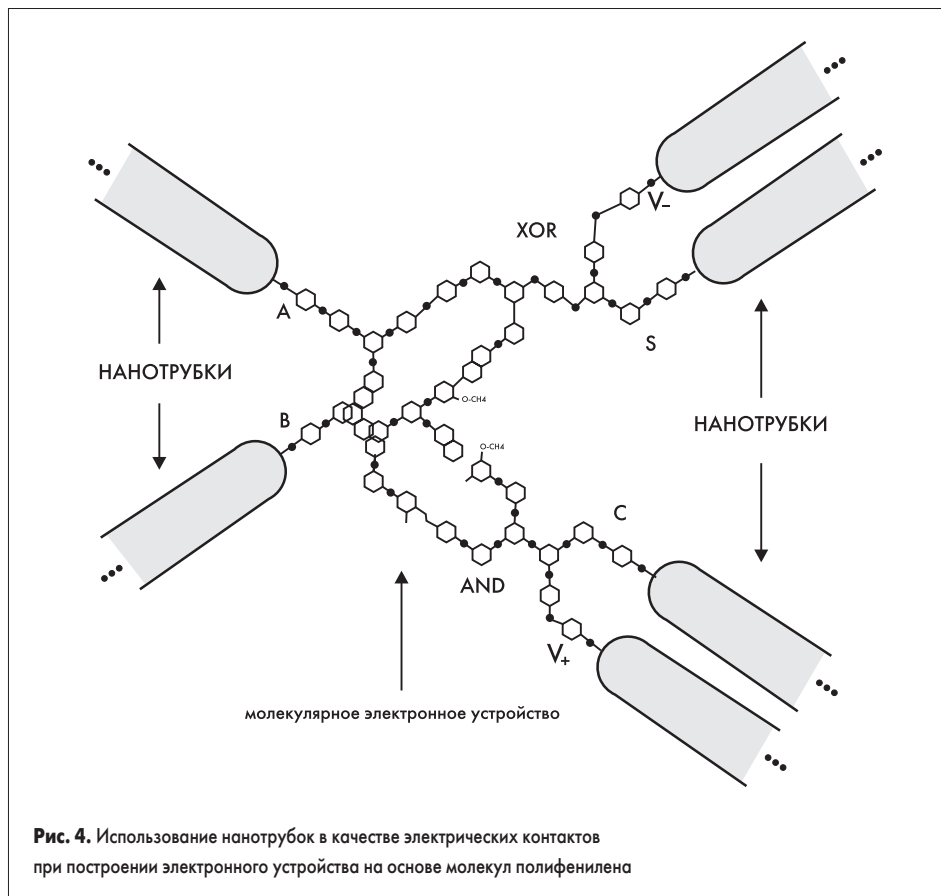


Рис. 4. Использование нанотрубок в качестве электрических контактов при построении электронного устройства на основе молекул полифенилена

этом направлении к 2010 году составят от 30 до 50 млрд долларов. Далее любые расходы уже не будут иметь смысла, так как приблизятся фундаментальные физические ограничения.

В 1997–1998 гг. DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency, США) разработала программу формирования новой наукоемкой технологии — молекулярной электроники (молетроники, moletronics).

Целью реализации программы создания молетроники является доказательство возможности интеграции молекул или других наночастиц в законченные функциональные электронные устройства, которые связаны друг с другом и с внешними устройствами вычислительной техники. Информация передается или хранится в них в виде электронов или в виде разности электрических потенциалов, определяемых количеством все тех же электронов. Собственно говоря, как обычно, нужны логические элементы и элементы памяти. Те и другие должны функционировать в привычном диапазоне температур (промышленном и коммерческом), иметь очень высокую плотность, малую мощность энергопотребления при управлении. Память должна быть энергонезависимой, словарной (например, байтной) и терабитного уровня по объему. Сами устройства создаются по принципу направленной самоорганизации, так как масштабирование здесь теряет смысл. Их структура предпочтительно должна быть трехмерной. Наконец, разрабатываемые устройства должны в какой-то мере «вписаться» в существующее производство электронной аппаратуры и не требовать его полной реконструкции.

Однако молетроника является лишь частью так называемой «вычислительной науки жизни» (ВНЖ, она же computational life science — CLS). Цель данного направления науки заклю-

чается в выяснении связи между жизнью и развитием вычислительных систем (последние развиваются значительно быстрее). В относительно недалеком прошлом одно из направлений связи биологии и техники называлось бионикой, сейчас встречается термин «биоинженерия».

Действительно, живые клетки естественным образом представляют собой устройства памяти. Более того, в некоторых биологических структурах они взаимодействуют особым образом друг с другом при передаче потоков данных. Остается только организовать этот процесс.

В жизни на Земле существует определенная иерархия биологических систем: молекулы, органеллы (organelle), клетки, ткани (особенно мозг), личности, общества и экосистемы. С точки зрения ВНЖ каждый из этих слоев должен определенным образом «компьютеризироваться» и подвергнуться «инжинирингу». Исследования традиционно охватывают моделирование, определение степени проникновения и эффективности применения результатов разработки научных гипотез. В области инженерии рассматривается программа прикладного внедрения полученных результатов. Все остается так, как и было: ученые делают открытия, а инженеры их внедряют в жизнь.

### Заключение

За последние несколько десятилетий наблюдался почти экспоненциальный рост возможностей микроэлектроники, основанной на кремнии. Однако в новом тысячелетии рост возможностей данной технологии существенно замедлится по двум причинам: во-первых, с уменьшением размеров ячеек памяти огра-



ничающую роль начинают играть фундаментальные физические законы, не позволяющие работать существующим структурам ячеек памяти; во-вторых, при применении специальных мер, устраняющих данные ограничения и повышающих степень интеграции устройств, экспоненциально повышаются затраты на их производство.

При использовании достижений нанотехнологии речь идет уже не об улучшении таких характеристик вычислительных систем, как объем, быстрдействие и энергопотребление, а о создании новых принципов вычислений, свойственных биологической материи от природы. Такой подход, однако, в целом не исключает использования известных принципов электроники на молекулярном уровне.

Отличия молекулоники и ВНЖ состоят в следующем:

Молекулярное вычисление рассматривает не только компьютеризацию жизни, но также и другие применения технологии типа создания наномашин и обработку информации в биологических системах.

Молекулярное вычисление основано не на известных принципах электроники, а на явлении самоорганизации молекул.

Нанотехнологии позволят радикально изменить образ жизни человека. Как альтернатива беспроводной связи, которая уже в ближайшее время достигнет пределов своей пропускной способности, доступ к базам информации может быть осуществлен через устройства, похожие на банкоматы, или с помощью карманных хранилищ данных, уместяющихся в бумажнике. Реально достижимое в ближайшие несколько лет эволюционное увеличение плотности

памяти в 100 раз по сравнению с существующей технологией необходимо уже сейчас из-за постоянного роста производительности процессоров. Предполагаемая замена 128 мегабайтов динамической памяти на 128 гигабайтов в тех же массо-габаритно-энергетических параметрах позволит смотреть видео на сотовом телефоне. В дополнение к гигантскому росту плотности памяти она становится практически энергонезависимой, потребляющей мизерное количество энергии. В целом это позволит распространить действие закона Мура на XXI век.

Данный подход позволяет реализовать в будущем и второй закон Мура, который реже упоминается, но не становится от этого менее важным — уменьшение стоимости системы памяти пропорционально уменьшает стоимость производства изделия. Для этого необходимо решить чрезвычайно сложную задачу развертывания промышленного, конкурентоспособного производства компонентов на принципах нанотехнологии.

Исследователи предсказывают, что молекулярные компьютеры в конечном счете заменят те системы, которые основаны на кремниевых чипах. Это позволит в конечном счете изготовить компьютер настолько маленьким, что его можно было бы включать, например, в ткань одежды.

Нанотехнологии означают не только радикальное увеличение плотности размещения элементов вычислительных устройств. Революционные изменения затронут проектирование, производство и сферы применения вычислительной техники. Новые материалы, сложные микромашины, биомедицинская диагностика, космическая микротехника (где вес

и габариты значат очень много). Уже сейчас возникает масса новых идей. Одна из них — микроробот размером с комнатную муху, имеющий в своем составе сеть нанокomпьютеров, каждый из которых размером с песчинку. Однако вопрос стоит шире: на молекулярном уровне возможно слияние вычислительной машины и ее программного обеспечения. Может измениться отношение к манипулированию информацией, она будет не передаваться (хотя бы частично), а сразу загружаться в молекулярные структуры. Все необходимое из имеющегося в памяти человечества всегда будет под рукой.

Уже идет гонка за создание нанотехнологии, где приз — баснословные прибыли и даже более того: создание безусловного превосходства в информационных технологиях (уже не в электронике). Не зря все технические решения тщательно патентуются. Билл Клинтон, будучи президентом США, в 2001 году выделил 497 млн долларов на национальную программу развития нанотехнологии.

Однако насколько все это близко к потребительскому рынку? Даже если ни одно из этих революционных решений не укрепит-ся в ближайшее время в практической жизни, имеющиеся в настоящее время успехи в эволюционном развитии нанотехнологии достаточно впечатляющи. Реально практическое повсеместное применение устройств молекулярной памяти можно ожидать в течение ближайших 5–10 лет. Сначала данные изделия будут применяться в исключительных случаях, когда им просто не найдется достойной альтернативы. Затем сфера их применения будет неуклонно расширяться. ■