

# МЕМРИСТОРЫ И КРОССБАРЫ: НАНОТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОЦЕССОРОВ



Н.Елисеев, к.т.н.

Микропроцессоры сейчас быстро приближаются к технологическим пределам своей производительности. Поэтому в последние годы идет активный поиск новых направлений развития процессорной техники, отличных от доминирующих сегодня КМОП-технологий. Элементы новых процессоров должны иметь размеры порядка нанометров, и, соответственно, решения для их создания лежат в области нанотехнологий. К счастью, оказалось, что именно в наномасштабах проявляются свойства материалов, позволяющие реализовать новые подходы к созданию процессорных устройств. Один из таких подходов разрабатывает компания Hewlett Packard (HP). В его основе лежат два ключевых элемента: мемристоры и кроссбары.

## ЧТО ТАКОЕ МЕМРИСТОРЫ

Мемристор можно определить как пассивный элемент электрической цепи, сопротивление которого некоторым образом зависит от прошедшего через него заряда. После отключения напряжения в цепи мемристор не изменяет свое состояние, т.е. "запоминает" последнее значение сопротивления. Отсюда и его название (англ. memristor – сокращение от memory resistor – резистор с памятью).

Существование мемристора было теоретически предсказано американским исследователем Чуа в 1971 году [1]. Он выдвинул и математически обосновал гипотезу о том, что есть четвертый базовый элемент электрических цепей – наряду с индуктивностью, конденсатором и резистором. Чуа исходил из того, что должны быть соотношения, связывающие все четыре основные переменные электрических цепей: ток  $i$ , напряжение  $v$ , заряд  $q$  и магнитный поток  $\phi$  [1, 2]. Всего таких соотношений может быть шесть. Пять из них хорошо известны. Заряд – это интеграл по времени от тока. Связь между напряжением и магнитным потоком определяется через закон электромагнитной индукции Фарадея. Напряжение и ток связаны через сопротивление  $R$ , заряд и напряжение – через

емкость  $C$ , а магнитный поток и ток – через индуктивность  $L$ . Отсутствует шестое соотношение, связывающее поток и заряд. Чуа предположил, что эти величины связаны через "отсутствующий" элемент – мемристор, обладающий "мемристивностью"  $M$ :  $d\phi = M \cdot dq$  (рис.1) [2]. Отметим, что под потоком в данном случае следует понимать интеграл от напряжения по времени (подробнее физический смысл  $\phi$  применительно к мемристору объяснен в [1, 3]). Чуа показал, что в общем случае мемристивность должна зависеть от  $q$ .

Если воспользоваться соотношениями  $d\phi = v \cdot dt$  и  $dq = i \cdot dt$ , то можно записать связь между током и напряжением на мемристоре в виде:

$$v = M(q) \cdot i. \quad (1)$$

Очевидно, что в случае  $M = \text{const}$  мемристивность представляет собой обычное сопротивление и (1) превращается в закон Ома для участка цепи.

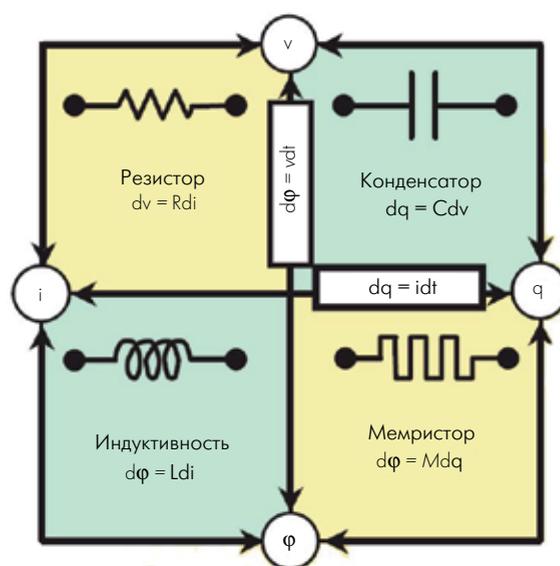


Рис. 1. Четыре базовых элемента электрических цепей: резистор, конденсатор, индуктивность и мемристор

Более четверти века мемристор оставался гипотетическим элементом цепи, не имеющим материальной реализации. Но в 2008 году группа исследователей из компании HP во главе со Стэнли Уильямсом наконец создала реальный мемристор [2]. Его свойства соответствовали модели, предложенной Чуа. Мемристор, разработанный группой Уильямса, представлял собой тонкий слой полупроводникового материала, размещенный между двумя металлическими контактами (рис.2) [2]. С одной стороны слоя находится легирующая примесь (положительные ионы) – в области ширины  $w$ .

Свойства такого мемристора можно продемонстрировать на основе простой модели [2]. Полное сопротивление рассматриваемого устройства можно представить как сумму сопротивлений двух переменных резисторов, соединенных последовательно (см. рис.2). Один из резисторов (легирующая область) имеет низкое сопротивление  $R_{ON}$ , другой – намного более высокое сопротивление  $R_{OFF}$ .

Когда к металлическим контактам прикладывается напряжение, заряженные ионы начинают дрейфовать, и граница между двумя областями смещается. В рассматриваемой модели зависимость между током и напряжением определяется выражением [2]:

$$v(t) = (R_{ON} \frac{w(t)}{D} + R_{OFF} (1 - \frac{w(t)}{D}))i(t). \quad (2)$$

При этом граница смещается по закону [2]:

$$\frac{dw(t)}{dt} = \mu_v \frac{R_{ON}}{D} i(t), \quad (3)$$

где  $\mu_v$  – средняя подвижность ионов.

Интегрирование (3) дает формулу для  $w$ :

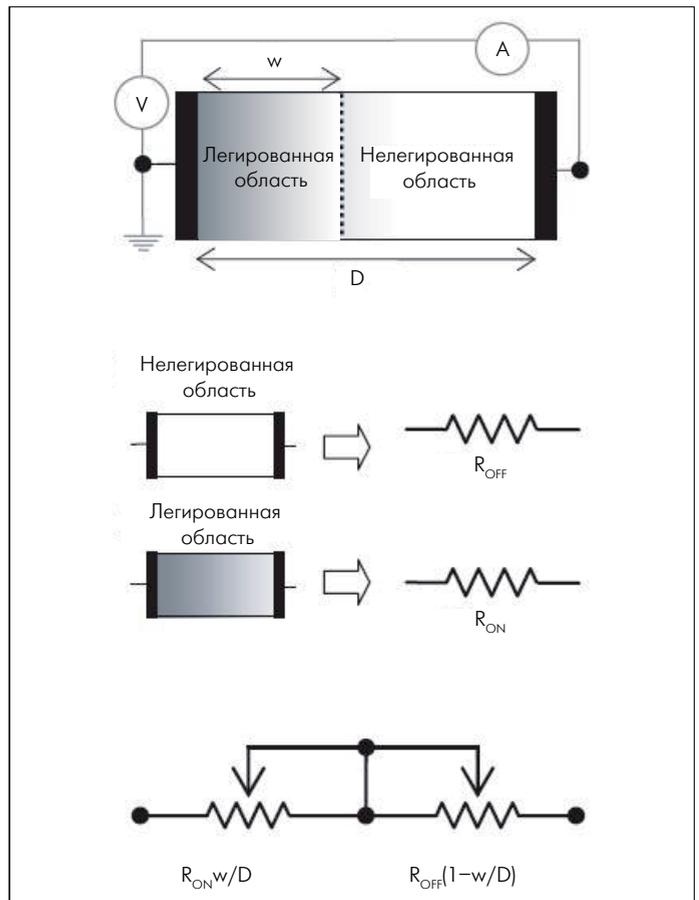
$$w(t) = \mu_v \frac{R_{ON}}{D} q(t). \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2) и учитывая, что  $R_{ON} \ll R_{OFF}$ , получаем выражение для мемристивности:

$$M(q) = R_{OFF} (1 - \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} q(t)). \quad (5)$$

Само выражение (2) при этом приобретает вид (1).

Из выражения (5) следуют два важных вывода. Во-первых, как и предполагалось в модели Чуа, сопротивление мемристора является функцией заряда  $q$ , т.е. зависит от суммарного заряда, прошедшего через мемристор. Во-вторых, мемристивность резко увеличивается с уменьшением  $D$ . Для любого материала в наномасштабах значение  $D$ , содержащегося в формуле, на порядки выше, чем в микромасштабах [2]. Таким образом, мемристивность становится наиболее важной для понимания характеристик рассматриваемого типа электрон-



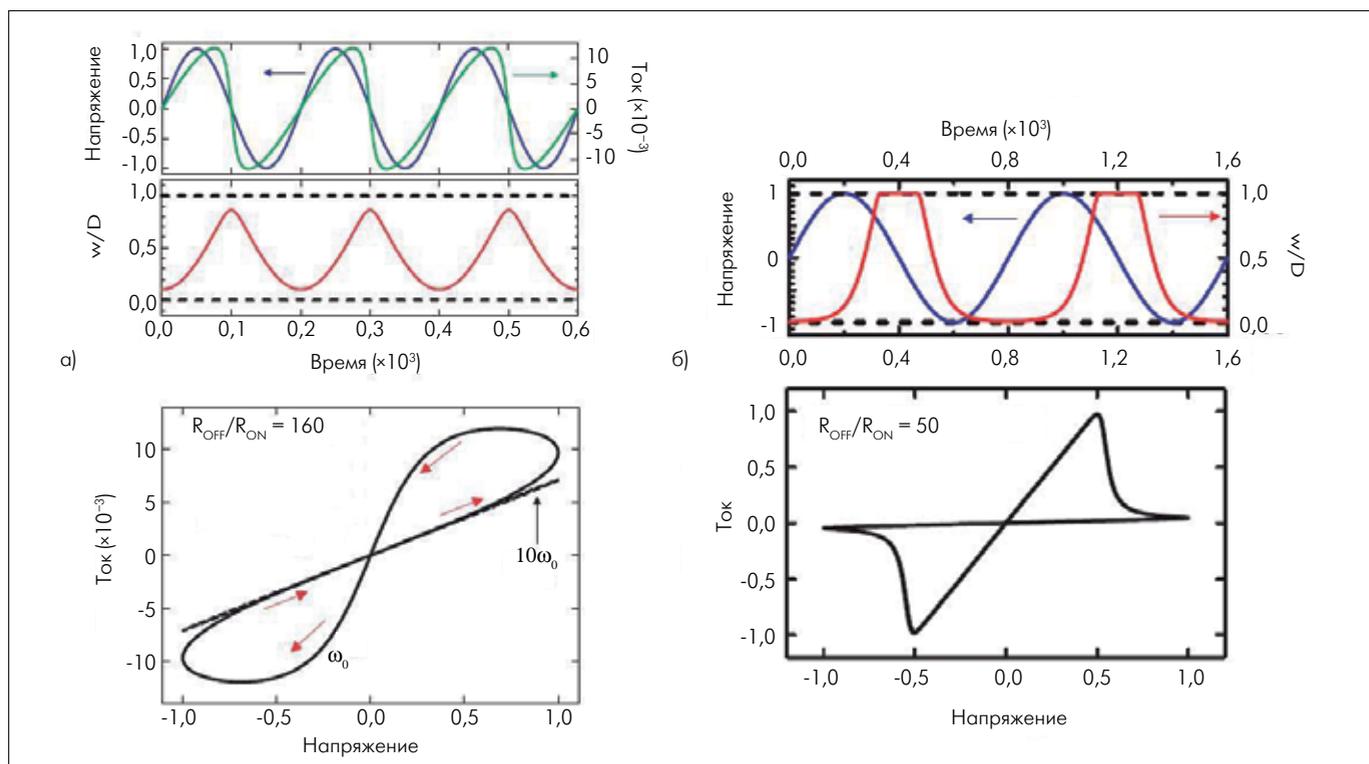
**Рис.2. Структура и эквивалентная цепь мемристора**

ных устройств по мере того, как их размеры уменьшаются до нанометровых масштабов [2].

Если к мемристорам приложено переменное синусоидальное напряжение определенной частоты, его вольт-амперная характеристика принимает вид, напоминающий фигуру Лиссажу с центром в начале координат (рис.3) [2]. То есть мемристор, в отличие от резистора, обладает гистерезисом. С увеличением частоты напряжения гистерезисная кривая вырождается в прямую линию (см. рис.3а).

В реальных системах за счет сильных электрических полей, присутствующих в наномасштабах, проявляются сильные нелинейные эффекты в транспорте ионов, и вид вольт-амперной характеристики изменяется. Например, если умножить правую часть выражения (3) на оконную функцию  $w(1-w)/D^2$  [2], учитывающую эффекты нелинейности, то на вольт-амперной характеристике мемристора появляются достаточно резкие фронты, соответствующие переходу от состояния с низкой проводимостью к состоянию с высокой проводимостью и обратно (см. рис.3б) [2]. Похожая характеристика была получена экспериментально для мемристора на основе двуокиси титана ( $TiO_2$ ) (рис.4) [2].

Подобное поведение мемристора позволяет использовать его в качестве биполярного переключате-



**Рис.3.** Результаты моделирования поведения мемристора: а – на основе модели, описываемой уравнениями (2)–(5); б – при умножении первой части уравнения (3) на оконную функцию  $w(1-w)/D^2$ . По осям отложены безразмерные значения напряжения, тока и времени, нормированные на  $v_0 = 1$  В (рис.3а) и 4 В (рис.3б),  $i_0 = 10$  мА,  $t_0 = 10$  мс, соответственно

ля: при подаче напряжения противоположной полярности мемристор замыкает или размыкает проходящую через него цепь. Если же рассматривать ситуацию с точки зрения цифровой электроники, то можно сказать, что мемристор переходит из состояния "0" в состояние "1" и наоборот. Причем это состояние мемристор "запоминает" и может хранить практически неограниченно долго – и для этого ему не требуется источник напряжения. Достигнутое на сегодняшний день время

переключения мемристора из одного состояния в другое составляет порядка 1 нс [4].

Описанные свойства мемристора дают возможность применять его сразу в нескольких «ипостасях»: переключателя, элемента памяти и составляющей логического элемента.

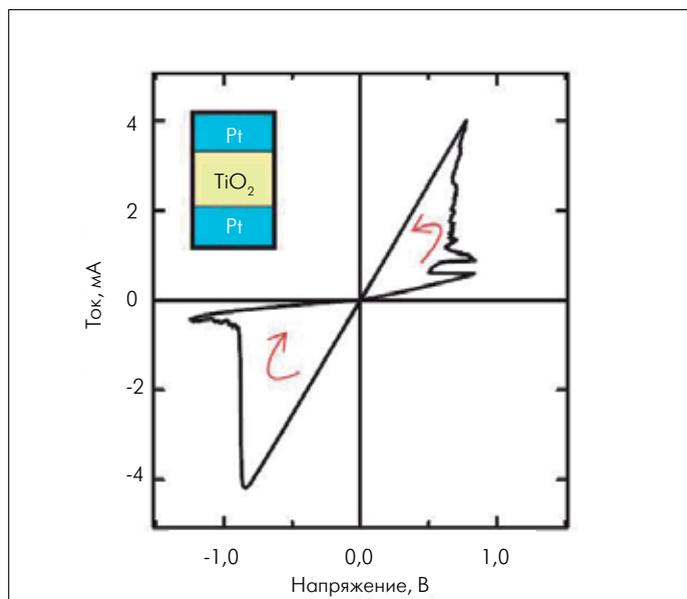
Уже созданы прототипы устройств, которые реализуют такие применения. Они основаны на архитектуре, получившей название "кроссбары" (англ. crossbars).

### МЕМРИСТОРЫ В КРОССБАРАХ

Собственно, кроссбар-устройства в компании HP начали создавать еще до открытия мемристора. Эта работа также велась группой Стэнли Уильямса [5].

Кроссбар представляет собой набор параллельных проволок шириной около 50 нм (будем называть их нанопроволоками), которые пересекаются другим набором нанопроволок. Между ними находятся прокладки из материала, который под действием приложенного напряжения может изменять свою проводимость (рис.5) [5].

Кроссбар-устройства имеют ряд выигрышных особенностей [5]. Регулярная структура из пересекающихся нанопроволок делает их изготовление достаточно простым, особенно в сравнении со сложной структурой современных процессоров на основе КМОП-технологий. Кроссбары можно изготавливать из различных веществ и с использованием разных процессов. Это позволяет максимально гибко адаптировать



**Рис.4.** Экспериментальная вольт-амперная характеристика мемристора на основе двуокиси титана

отработанные архитектурные решения к новым материалам. Наконец, что не менее важно, на основе единой архитектуры и единых элементов можно реализовать память, логику и межсоединения.

В качестве прокладок между кроссбарами были задействованы различные материалы, однако с появлением мемристоров именно последние стали применять для этой цели. Последующие исследования показали, что мемристоры очень удачно "вписались" в кроссбар-системы.

По мнению исследователей из компании HP, мемристоры наиболее эффективны, когда используется логика, основанная на операции импликации [6]. Здесь необходимо отметить, что импликация, совместно с операцией FALSE (ЛОЖЬ) образует полный логический базис для выполнения двоичных операций в процессорах (см. таблицу) [6]. Но до сих пор такой базис не использовался в вычислительной технике.

Сотрудники группы Уильямса экспериментально продемонстрировали, как можно выполнить операцию импликации с помощью двух мемристоров [6]. Для этого они создали кроссбар с мемристорами, состоявший из одной общей платиновой нанопроволоки шириной 50 нм и расположенными сверху перпендикулярно к ней 17 другими такими же проволоками (рис.6а) [6]. Между нижней и верхними проволоками размещались прокладки из двуокиси титана толщиной 50 нм. Они образуют соединения между проволоками, расположенными в разных слоях. Свойства этих соединений таковы, что их сопротивление практически не изменяется, если приложенное напряжение мало, и претерпевает быстрое и значительное изменение, если напряжение превышает определенное пороговое значение (рис.6б) [6]. Одно из этих пороговых напряжений  $V_{OPEN}$  повышает сопротивление и "открывает" мемристор (разрывает соединение). Авторы [6] обозначают это состояние как логический "0". Другое пороговое напряжение  $-V_{CLOSE}$  вызывает уменьшение сопротивления и "закрывает" мемристор, т.е. обеспечивает протекание тока

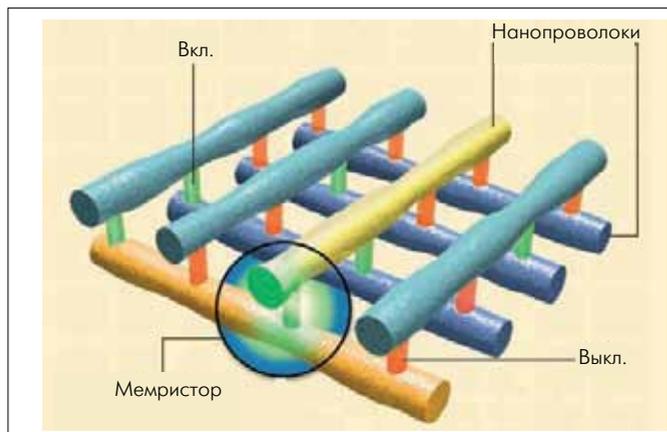


Рис.5. Кроссбар-система

**Вычислительная универсальность операций IMP (импликация) и FALSE: 16 бинарных булевых операций над двумя логическими величинами**

Операция	Таблица истинности				Эквивалентная операция
$p$	1	1	0	0	$= p$
$q$	1	0	1	0	$= q$
TRUE	1	1	1	1	$= p \text{ IMP } p$
$p \text{ OR } q$	1	1	1	0	$= (p \text{ IMP } 0) \text{ IMP } q$
$q \text{ IMP } p$	1	1	0	1	$= q \text{ IMP } p$
$p$	1	1	0	0	$= (p \text{ IMP } 0) \text{ IMP } 0$
$p \text{ IMP } q$	1	0	1	1	$= p \text{ IMP } q$
$q$	1	0	1	0	$= (q \text{ IMP } 0) \text{ IMP } 0$
$p \text{ EQUAL } q$	1	0	0	1	$= ((p \text{ IMP } q) \text{ IMP } ((q \text{ IMP } p) \text{ IMP } 0)) \text{ IMP } 0$
$p \text{ AND } q$	1	0	0	0	$= (p \text{ IMP } (q \text{ IMP } 0)) \text{ IMP } 0$
$p \text{ NAND } q$	0	1	1	1	$= p \text{ IMP } (q \text{ IMP } 0)$
$p \text{ XOR } q$	0	1	1	0	$= (p \text{ IMP } q) \text{ IMP } ((q \text{ IMP } p) \text{ IMP } 0)$
NOT $q$	0	1	0	1	$= q \text{ IMP } 0$
$p \text{ NIMP } q$	0	1	0	0	$= (p \text{ IMP } q) \text{ IMP } 0$
NOT $p$	0	0	1	1	$= p \text{ IMP } 0$
$q \text{ NIMP } p$	0	0	1	0	$= (q \text{ IMP } p) \text{ IMP } 0$
$p \text{ NOR } q$	0	0	0	1	$= ((p \text{ IMP } 0) \text{ IMP } q) \text{ IMP } 0$
FALSE	0	0	0	0	$= 0$

через него (логическая "1"). Это именно то гистерезисное поведение мемристора, о котором шла речь выше.

Операцию импликации демонстрирует простая схема (рис.7) [6]. Два мемристора P и Q подсоединены через общую шину (нижнюю проволоку) к нагрузочному резистору  $R_G$ . Каждое устройство можно перевести в закрытое состояние (логическая "1") приложением отрицательного напряжения  $V_{SET}$ . Для того чтобы компен-

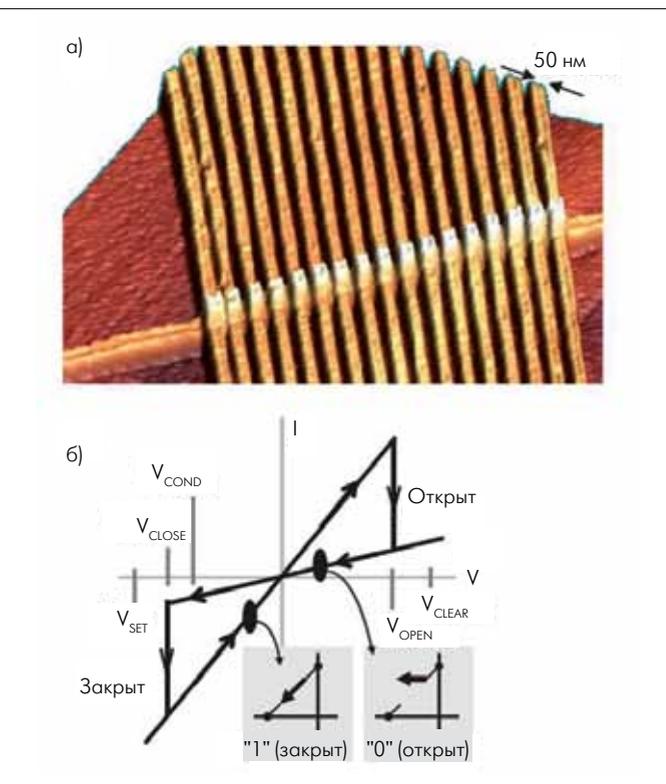
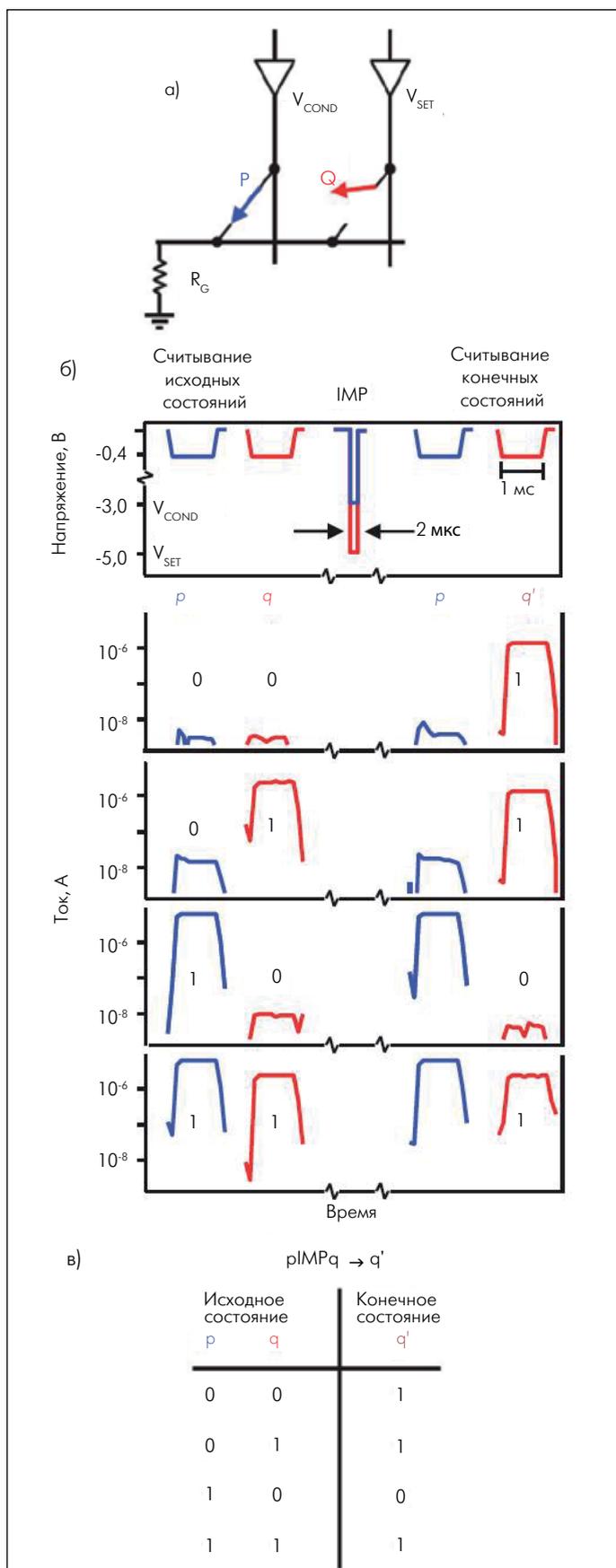


Рис.6. Мемристорный переключатель: а – микрофотография нанопроволоки, полученная атомно-силовым микроскопом; б – идеализированная вольт-амперная характеристика



**Рис.7. Выполнение операции импликации с помощью мемристоров:** а — упрощенная схема цепи; б — токи в цепи до и после приложения импульсов напряжения, обеспечивающих выполнение операции импликации. p и q — логические переменные, обозначающие состояния мемристоров P и Q соответственно

сировать падение напряжения на нагрузочном резисторе, значение V<sub>SET</sub> должно быть несколько больше V<sub>CLOSE</sub> (см. рис.6б). Аналогично, чтобы "открыть" мемристор (логический "0"), нужно приложить положительное напряжение V<sub>CLEAR</sub>, превышающее V<sub>OPEN</sub>. В работе схемы используется также отрицательное напряжение V<sub>COND</sub>, которое несколько меньше V<sub>SET</sub> — его назначение будет продемонстрировано далее.

Импликация выполняется путем одновременного приложения импульса с амплитудой V<sub>SET</sub> к Q и импульса с амплитудой V<sub>COND</sub> к P (см. рис.7а). Здесь становится ясно, зачем нужно напряжение V<sub>COND</sub>. Если отдельно приложить V<sub>SET</sub> к Q, а V<sub>COND</sub> к P, то Q в любом случае окажется в состоянии логической "1", а P останется в исходном состоянии. Но когда эти напряжения приложены одновременно, они вызывают изменения, зависящие от исходных состояний двух мемристоров. Если P открыт, то Q оказывается закрытым независимо от своего исходного состояния, а состояние P не меняется. Если же P закрыт, то импульс V<sub>COND</sub> уменьшает напряжение на Q, и оба мемристора P и Q остаются в неизменном состоянии. Видно, что различные варианты исходных состояний мемристоров P и Q и итоговых состояний мемристора Q после выполнения описанной процедуры соответствуют таблице истинности для операции импликации (см. рис.7б, в).

Итак, в кроссбарах с мемристорами можно реализовать операцию импликации, а на ее основе — и другие логические операции (см. таблицу). Проведенные исследования, говорит С.Уильямс, "показали: все, что может быть вычислено на кремнии, можно сделать с помощью мемристоров" [7]. Следовательно, на основе кроссбаров с мемристорами можно построить полноценный процессор. При этом каждый мемристор может использоваться и как элемент логического вентиля, и как ячейка оперативной памяти. По словам Уильямса, динамическая перенастройка мемристоров между памятью и логическими операциями составляет новую компьютерную парадигму "позволяя выполнять вычисления в том же чипе, где хранятся данные, а не в специализированном процессорном устройстве" [8].

Кроссбары обеспечивают высокую плотность размещения логических вентилях и ячеек памяти. Недавно компания HP объявила о том, что она разработала архитектуру, позволяющую использовать много слоев кроссбаров [8, 9]. За счет этого можно в разы увеличить плотность памяти, а также отношение производительность/энергопотребление. Чипы с такой архитектурой получили название "нанохранилища" (nanostores) [9].

В HP считают, что нанохранилища должны стать основой будущих компьютеров, в том числе серверов.



Стадии коммерческого применения нанохранилища, по мнению представителей HP, достигнут примерно через пять лет [9].

Память на основе мемристоров может заменить и используемую сегодня флеш-память. В HP рассчитывают, что к 2013 году плотность "мемристорной" памяти удастся довести до 20 Гбайт/см<sup>2</sup>, что будет в два раза больше, чем ожидаемая к тому времени плотность флеш-памяти [7]. А поскольку жесткие диски в компьютерах уже сейчас активно заменяют носителями на основе флеш-памяти, то можно ожидать, что память на мемристорах станет единственным типом компьютерной памяти. Благодаря свойствам мемристоров, такие компьютеры можно будет выключать и включать в любой момент, не тратя время на перезагрузку [8].

Если прогнозам и планам компании HP суждено будет сбыться, то уже в недалеком будущем мы сможем увидеть компьютеры нового типа. Они будут иметь совершенно иную архитектуру, создаваться из совершенно других материалов и по абсолютно новым технологиям, сочетать малые размеры и высокую производительность, потреблять мало энергии и не требовать времени на загрузку.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Chua L.O.** Memristor – the missing circuit element. – IEEE Trans. Circuit Theory, 1971, v.18, p.507–519.
2. **Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R. S.** The missing memristor found. – Nature letters, 2008, v.453, p.80–83.
3. Memristor. – en.wikipedia.org/wiki/Memristor.
4. **Markoff J.** H.P. Sees a Revolution in Memory Chip. – www.nytimes.com/2010/04/08/science/08chips.html?\_r=1.
5. **Kuekes P. J., Snider G. S., Williams R. S.** Crossbar nanocomputers. – Scientific American, 2005, v.293, p.72–78.
6. **Borghetti J., Snider G.S., Kuekes P.J.** et al. 'Memristive' switches enable 'stateful' logic operations via material implication. – Nature letters, 2010, v.464, p.873–876.
7. **Bourzac K.** Memristor Memory Readied for Production. – www.technologyreview.com/computing/25018/.
8. **Johnson R.C.** End of the CPU? HP demos configurable memristor. – 4/9/2010, www.eetimes.com/electronics-news/4088557/End-of-the-CPU-HP-demos-configurable-memristor.
9. **Merritt R.** HP researcher predicts memory-centric processors. – 6/2/2010, www.eetimes.com/electronics-news/4199856/HP-researcher-predicts-memory-centric-processors.