

# Наноэлектроника

## Лекция 8

к.т.н., доц. Марончук И.И.

# Мемристорная электроника

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.

## Мемристор и его свойства

Мемристор (от *memori* — память и *resistor* — сопротивление) представляет собой пассивный элемент, способный изменять свое сопротивление в магнитном потоке. К пассивным элементам относятся диоды, резисторы, конденсаторы и индуктивность, которая в интегральных схемах не используется.

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  $\phi$



Существует известное соотношение между величиной резистора  $R$ , напряжением на нем  $U$  и силой тока  $I$ , протекающего через резистор. Это соотношение известно как закон Ома:

$$R = dU/dI.$$

Емкость конденсатора  $C$  можно определить из соотношения:

$$dQ = CdU,$$

где  $Q$  — величина заряда. Одновременно  $dQ = Idt$ , где  $dt$  — промежуток времени.

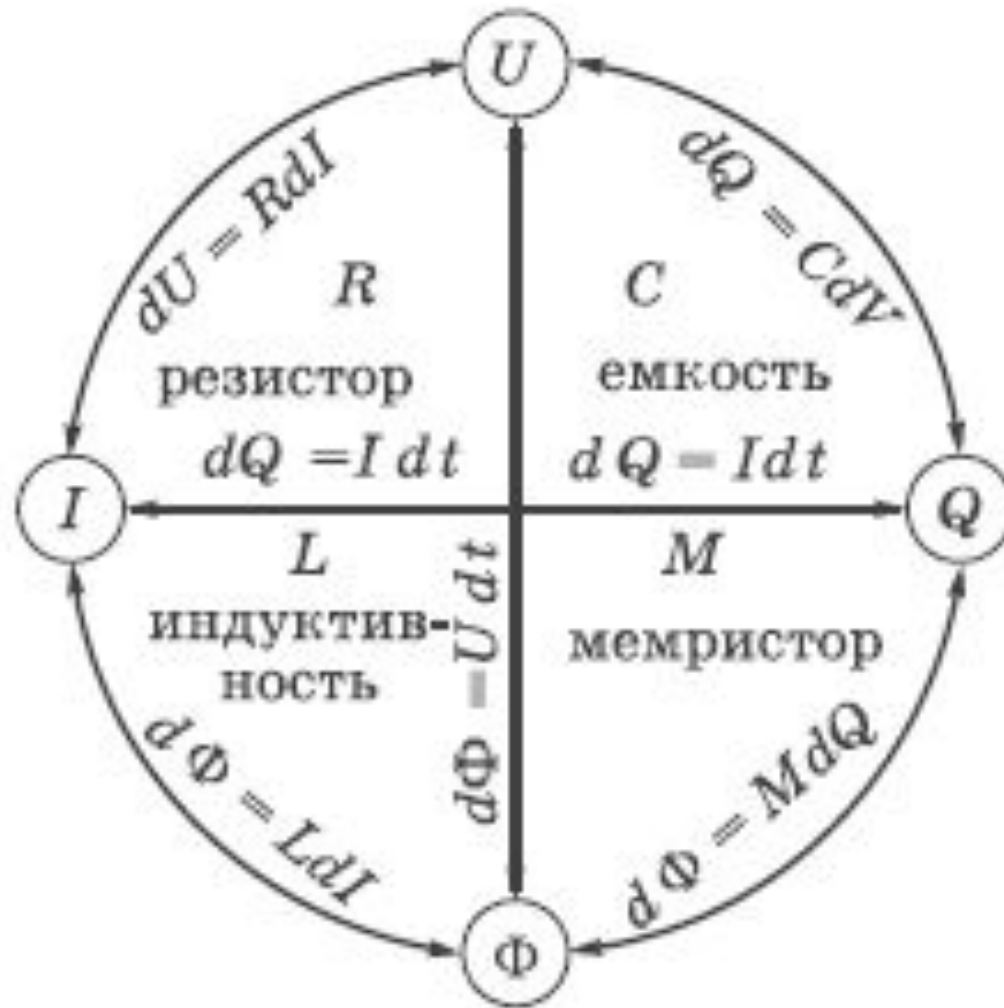
Индуктивность  $L$  представляет собой коэффициент пропорциональности между величинами изменения магнитного потока  $d\Phi$  и изменения тока  $dI$ :

$$d\Phi = LdI.$$

В свою очередь,  $d\Phi = Udt$ .

Идея мемристора вытекает из простого анализа соотношения между изменением магнитного потока  $d\Phi$  и вызывающим это изменение зарядом  $dQ$ , то есть

$$d\Phi = MdQ \text{ (рис.)}$$



Соотношения между фундаментальными электрическими величинами

Таким образом, введен четвертый пассивный элемент электрических схем «индуктоконденсатор», величина которого определяется значением мемрезистивности  $M$ . Если выражение  $d\Phi = MdQ$  для мемрезистивности продифференцировать по времени, то получим:

$$d\Phi/dt = MdQ/dt \text{ или } U = MI.$$

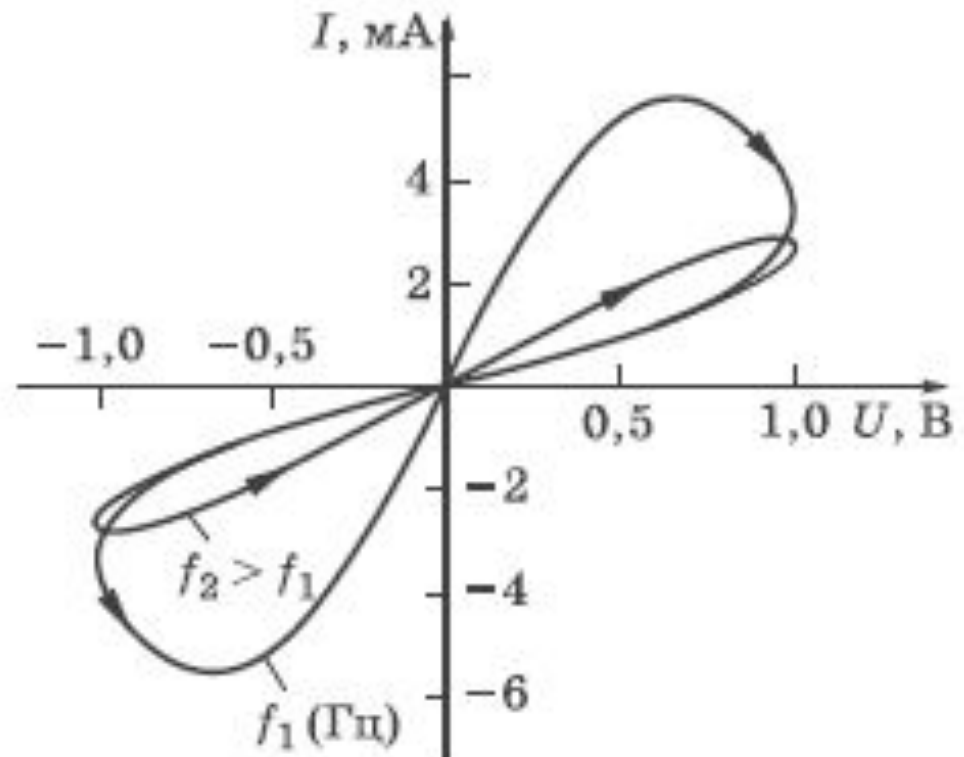
Это аналог закона Ома. Параметр  $M$ , согласно определению, есть функция заряда. Но и ток есть функция заряда, потому мемрезистивность, напряжение и ток — величины взаимосвязанные. Из уравнений мемристора следует, что величина  $M$  постоянна, если ток равен нулю.

Значение этой константы зависит от длительности протекания через элемент тока — то есть от количества заряда, прошедшего через элемент ранее. Другими словами, параметр  $M$  обладает эффектом памяти и поэтому назван мемристором.



Зависимость тока на мемристоре от переменного напряжения имеет вид гистерезисной кривой, характерной для магнитных структур (рис.). Видно, что сопротивление мемристора может быть различным и определяется предшествующими параметрами цепи. На нисходящем участке синусоиды, когда напряжение падает, сопротивление будет больше, чем на восходящем, возрастающем участке синусоиды.

Зависимость тока на мемристоре от переменного напряжения на нем при разных частотах



С увеличением частоты гистерезис приближается к наклонной прямой, и его характеристика становится близка к характеристике резистора. Подобный гистерезис ВАХ наблюдается в некоторых электрохимических системах, где имеет место ионный перенос заряда. Таким образом, мемристорам присущи множественные состояния проводимости: проводящее и непроводящее, а также с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Заметим, что запоминающие устройства с использованием гистерезисных явлений энергонезависимы. Потребив энергию во время записи, такие устройства могут сколь угодно долго хранить информацию.

Применение мемристоров в наноэлектронике позволит перейти от использования трехконтактных транзисторов к двухконтактным мемристорам. При этом ожидаются существенная экономия энергии и повышение компактности устройств. Кроме того важно наличие двух контактов (вместо трех у транзистора), что существенно упрощает построение наноэлектронических цепей на основе мемристорных элементов. В устройствах памяти могут быть достигнуты впечатляющие результаты, основанные на принципиально отличных от транзисторных структур физических явлениях. В ячейках современных устройств памяти логические нули или единицы хранятся в виде зарядов электронов, при этом необходимо создавать барьеры против их утечки, периодически регенерировать, тратить энергию и время на преодоление этих барьеров при записи информации, например, на флеш-память.

Мемристоры лишены этих недостатков. Время хранения информации ограничено лишь химическими процессами деградации материала, продолжительность которых составляет десятки лет. Процессы записи и считывания информации позволяют сохранить текущее состояние оперативного запоминающего устройства и процессора при внезапном выключении питания и мгновенно возобновить работу после его включения. Мемристоры работают при напряжении питания  $\sim 1$  В, в то время как для современной компьютерной памяти необходимо вдвое большее напряжение. Быстродействие мемристоров ожидается на уровне 50 нс. Скоростная память на мемристорах может расширить процессорную память до нескольких терабайт и сделать ее энергонезависимой. Память на мемристорах уже получила название ReRAM (Resistive Random-Access Memory).

На основе мемристоров возможно создание принципиально нового типа логических элементов, например, двухвыводных ячеек, способных менять структуру в реальном времени. Такие логические элементы, построенные из обычных транзисторов и мемристоров, будут структурно перестраиваться для выполнения необходимых функций. Принципиальное отличие мемристора от большинства типов современной полупроводниковой памяти и его главное преимущество перед ними заключаются в том, что он не хранит свои свойства в виде заряда. Это означает, что ему не страшны утечки заряда, с которыми приходится бороться при переходе на микросхемы нанометровых масштабов, и что он полностью энергонезависим. Проще говоря, данные могут храниться в мемристоре до тех пор, пока существуют материалы, из которых он изготовлен. Для сравнения: флэш-память начинает терять записанную информацию уже после года хранения без доступа к электрическому току.

Напомним, в основном, сегодняшние устройства компьютерной памяти для хранения информации работают на двух основных принципах.

На основе сохранения заряда, это например, долговременная флеш-память, Или мы фиксируем уровень падения напряжения на активном элементе памяти, это оперативная память на основе триггерных схем. Это токовые элементы памяти.

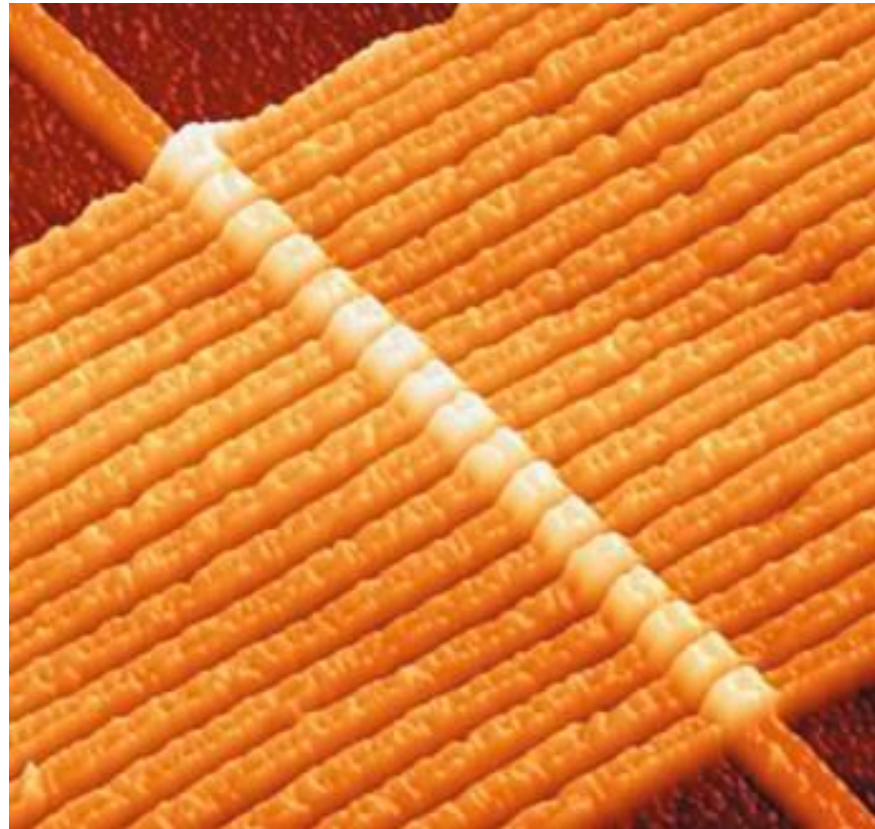
И второй способ сохранения информации - магнитный. В этом случае сохраняется остаточная намагниченность сердечника после пропускания тока. Или той части ферромагнитной поверхности, рядом с которой прошла электрическая катушка головки записи-считывания машинной памяти. Мы фиксируем уровень и направление магнитного потока части поверхности. Мемристор работает как-то не так, он не хранит заряд, но и магнитных материалов в нем нет.

Конструктивно мемристоры состоят из тонкой 50-нм плёнки, состоящей из двух слоёв - изолирующего диоксида титана и слоя, обеднённого кислородом. Плёнка расположена между двумя платиновыми 5-нм электродами. При подаче на электроды напряжения изменяется кристаллическая структура диоксида титана: благодаря диффузии кислорода его электрическое сопротивление увеличивается на несколько порядков (в тысячи раз). При этом после отключения тока изменения в ячейке сохраняются. Смена полярности подаваемого тока переключает состояние ячейки, причём, как утверждают в HP, число таких переключений не ограничено.

На практике мемристор может принимать не только обычные для обычных чипов памяти два положения - 0 или 1, но и любые значения в промежутке от нуля до единицы, так что такой переключатель способен работать как в цифровом (дискретном), так и в аналоговом режимах.

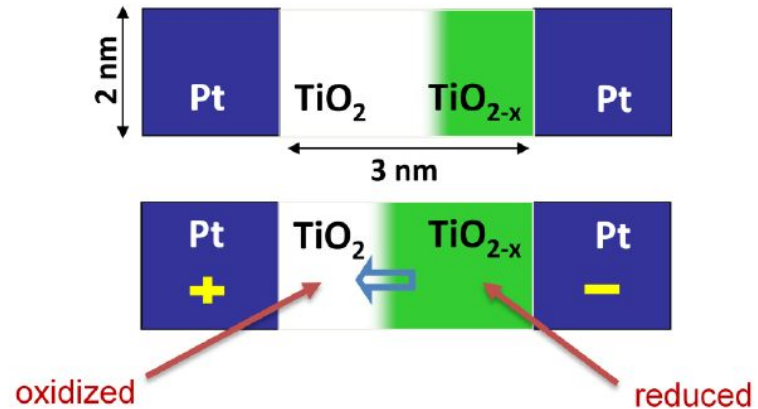
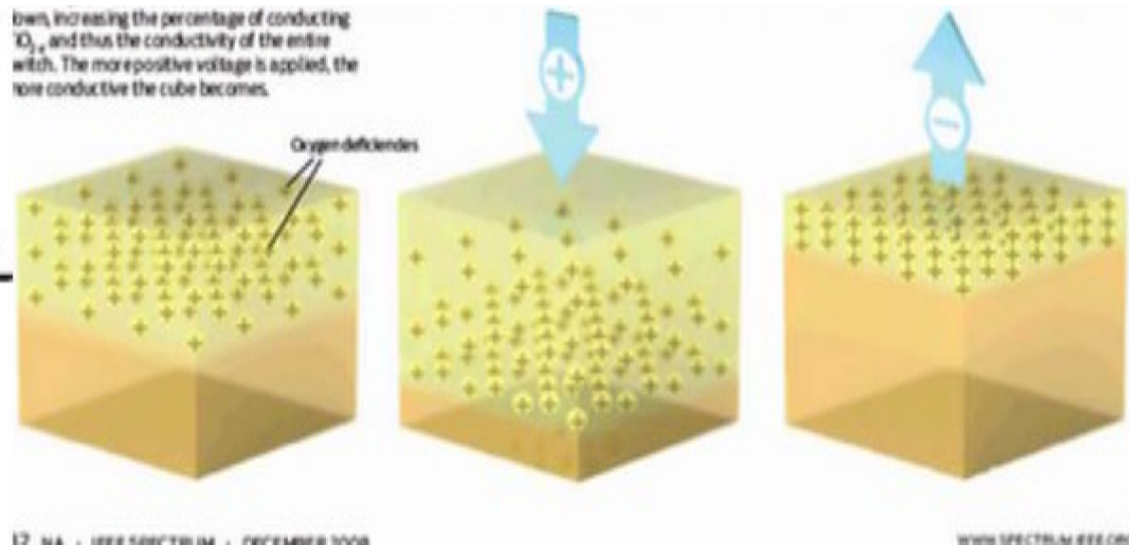
В качестве основного материала первого слоя кристаллической структуры мемристора используется диоксид титана  $\text{TiO}_2$ . В качестве легирующего элемента второго слоя использован чистый титан. Возможно, это естественный процесс при осаждении диоксида титана, т.к. нагревание до  $2200^\circ\text{C}$  приводит сначала к отщеплению кислорода с образованием синего  $\text{Ti}_3\text{O}_5$  (то есть  $\text{TiO}_2 \cdot \text{Ti}_2\text{O}_3$ ), а затем и тёмно-фиолетового  $\text{Ti}_2\text{O}_3$ .

Структура  
мемристора

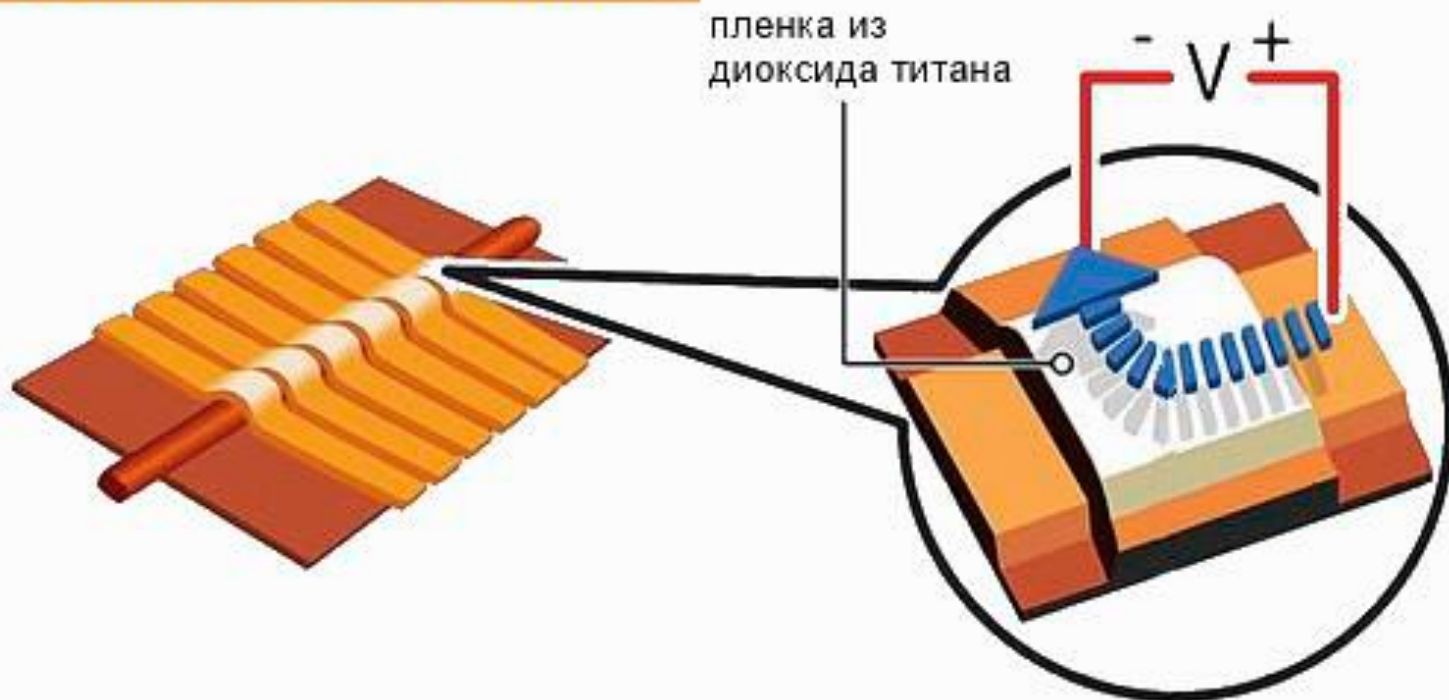




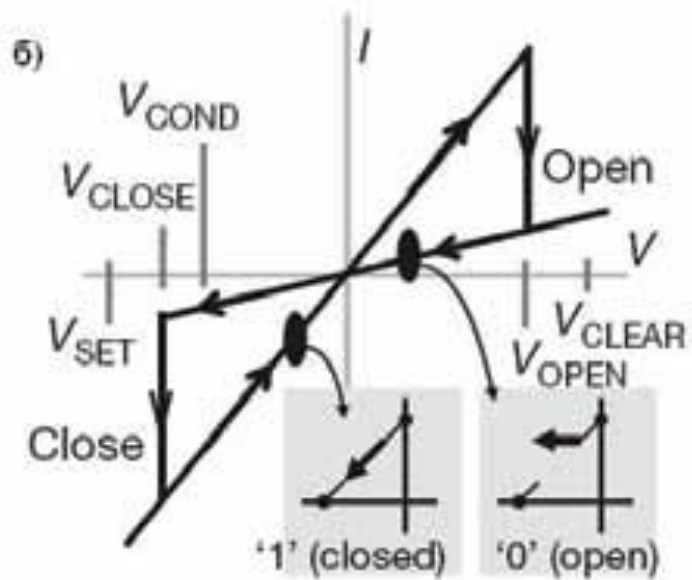
Смесь  $Ti+TiO_2$  и создает слой обедненный кислородом. В кристаллической структуре создаются ионы титана со свободными электронными связями. Вот эти открытые связи и меняют электрическое сопротивление цепи мемристора в зависимости от тока и времени его протекания. Гистерезис здесь имеет токовый характер. Для возврата мемристора в исходное состояние необходимо поменять полярность напряжения на выводах мемристора и пропустить какой-то ток.



## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МЕМРИСТОРА



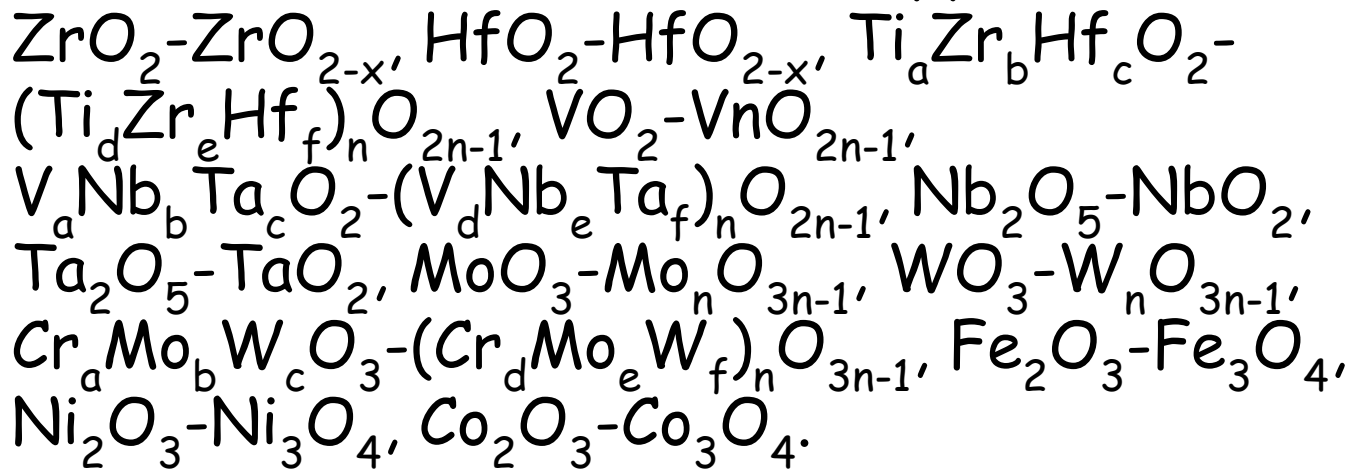
Принцип действия мемристора



Мемристорный переключатель: а - микрофотография наноцепи, полученная атомно-силовым микроскопом; б - идеализированная вольт-амперная характеристика

В последние годы был предложен ряд альтернативных материалов для использования в качестве активного слоя мемристора. Эффект мемристивности был продемонстрирован в системе нанопора-ионный раствор, в устройствах на основе токопроводящих полимеров и протеиновых молекул, ансамблей наночастиц, в частности, наночастиц монокристаллического магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Однако мемристоры на основе подобных материалов формируются методами, нехарактерными для современной кремниевой технологии создания интегральных схем. Соответственно, использование данных материалов в качестве активного слоя мемристора существенно затрудняет интеграцию мемристоров в современную производство.

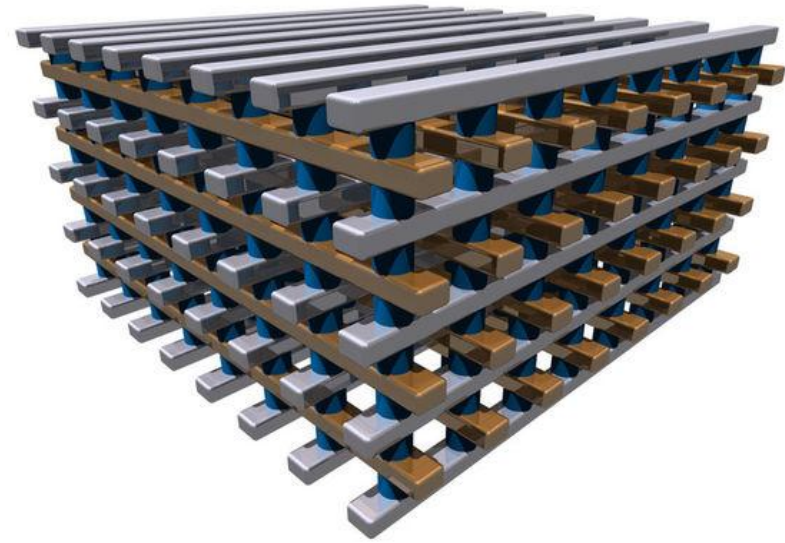
Поэтому в качестве основы мемристорных электронных устройств чаще всего используют структуры металл-диэлектрик-металл, легко интегрируемые в кремниевую технологию. Как и в первом мемристоре, в качестве диэлектрического слоя часто применяется оксид титана  $TiO_2-Ti_nO_{2n-1}$  толщиной 5-40 нм, а также другие оксиды металлов:



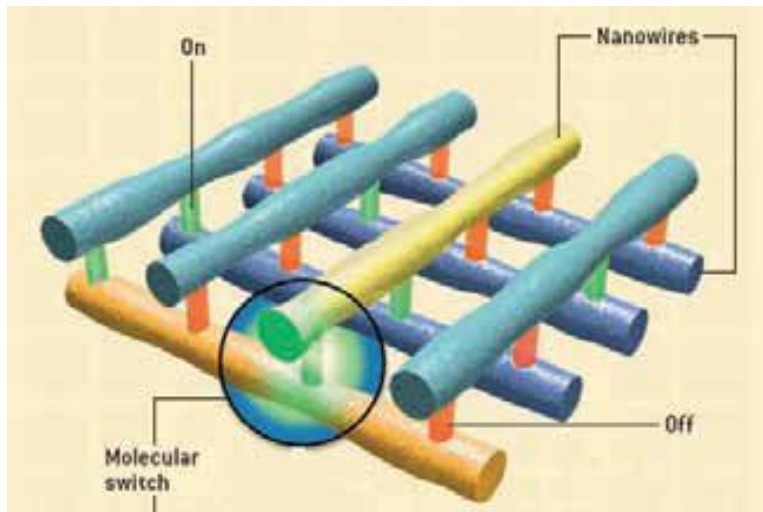
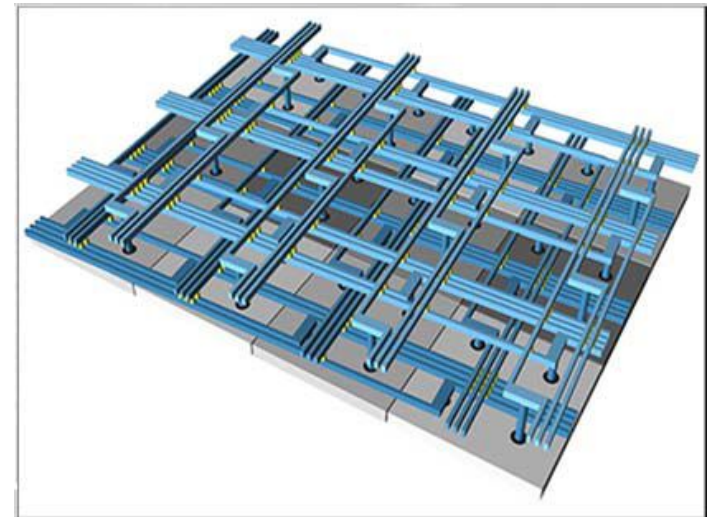
Одним из подходов улучшения функциональных свойств мемристоров на основе оксидов переходных металлов ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ) является легирование оксидов трехвалентной примесью, например, Al. Известны теоретические работы, в которых показано, что добавление Al в  $\text{ZrO}_2$  приводит к уменьшению энергии образования кислородных вакансий, движение которых в электрическом поле дает в конечном итоге мемристинный эффект структуры, в  $\sim 1.7$  раз [2]. Существуют экспериментальные исследования, показавшие улучшение мемристинных характеристик структур на основе трехкомпонентных оксидов металлов  $\text{HfAlO}_x$  и  $\text{TiAlO}_x$  по сравнению с классическими системами  $\text{TiO}_2$ - $\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$ ,  $\text{HfO}_2$ - $\text{HfO}_{2-x}$ .

## Кроссбар-архитектура

Кроссбар представляет собой набор параллельных нанопроволок, пересекающихся под прямым углом с аналогичным набором нанопроволок. Между такими наборами проволок находится прокладка из материала, способного менять свою проводимость под действием приложенного напряжения. В качестве прокладок целесообразно использовать мемристоры. Толщины нанопроволок соответствуют сотне атомов. В точках пересечения проводников формируются электронные ключи, имеющие замкнутое или разомкнутое состояния. При подаче на определенную пару нанопроводников достаточно большого напряжения возникает состояние с малым сопротивлением, и формируется молекулярный ключ. Такое разомкнутое состояние сохраняется, пока на эту пару не будет подано напряжение противоположной полярности (рис.).



Фрагмент кроссбар-архитектуры

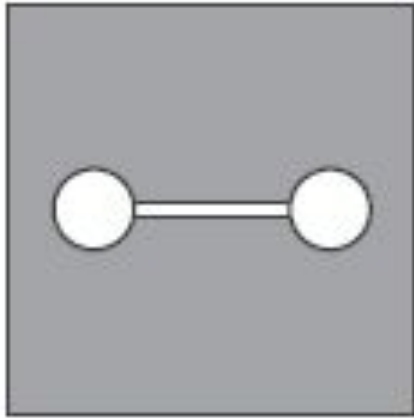




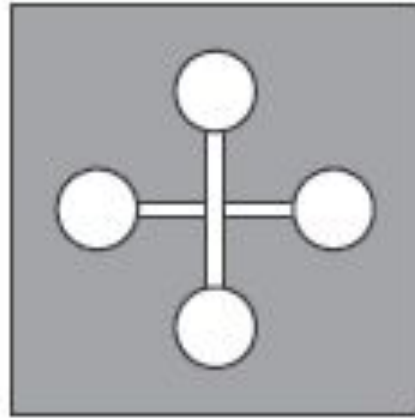
Регулярная структура изпересекающихся нанопроволок делает изготовление кроссбар-устройства более технологичным, чем, например, получение процессора или схемы памяти по МОП-технологии. Кроссбар архитектуры легко адаптируются к новым материалам и технологиям. Кроссбар-наноструктура может стать основой для реализации оперативной памяти большой емкости. Ее устройство позволит реализовать и программируемые логические схемы. Кроссбар-структуры имеют микроэлектронные схемы управления на основе почти стандартных демультиплексоров и специально разработанных программных алгоритмов. Архитектура кроссбара позволяет выявлять и обходить дефектные элементы на основе использования теории кодирования. Изначальная избыточность кроссбаров позволяет надеяться на их стойкость к воздействию факторов, приводящих к катастрофическим отказам.

Кроссбар-архитектура нашла развитие и в нанопроволочной электронике. На окисленной кремниевой подложке выкладывают первый слой параллельных друг другу нанопроволок из кремния  $p$ -типа проводимости. Перпендикулярно этой системе выкладывают новый упорядоченный слой нанопроволок из прямого зонного полупроводника с электронным типом проводимости. Это могут быть, например, GaN ( $E_g = 3,36$  эВ), CdS (2,42 эВ), CdSe (1,7 эВ), InP (1,35 эВ). В итоге формируется матрица из нанопроволок, или кроссбар-архитектура (рис. а). На пересечении нанопроволок образуются наносветодиоды (рис. б), зонная структура показана рядом. Технология позволяет создавать многослойные кроссбары. В семействе полупроводниковых соединений  $A_3B_5$  можно создать светодиоды любого цвета без дорогостоящих технологических процессов эпитаксии.

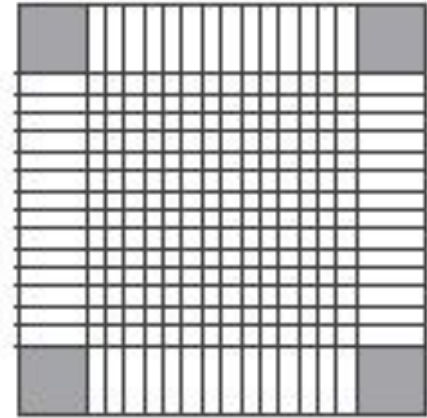
Первый слой  
нанопроводников



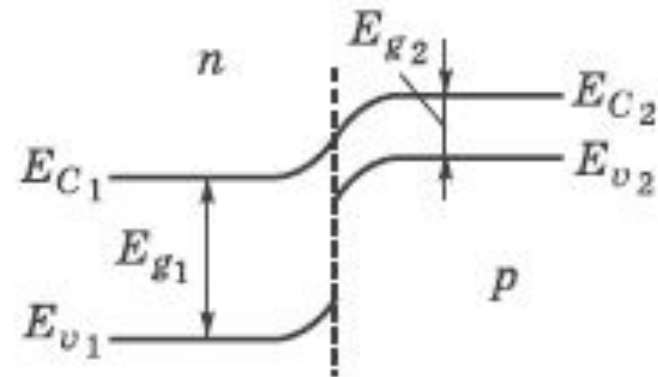
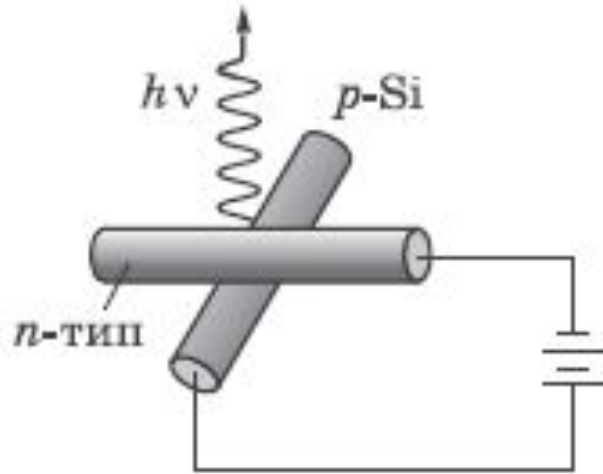
Второй слой  
нанопроводников



Кроссбар  
архитектура



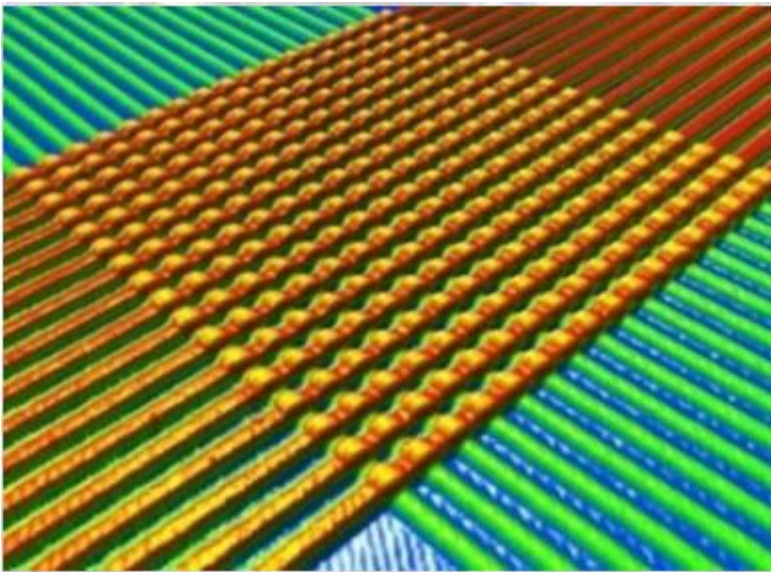
*a*



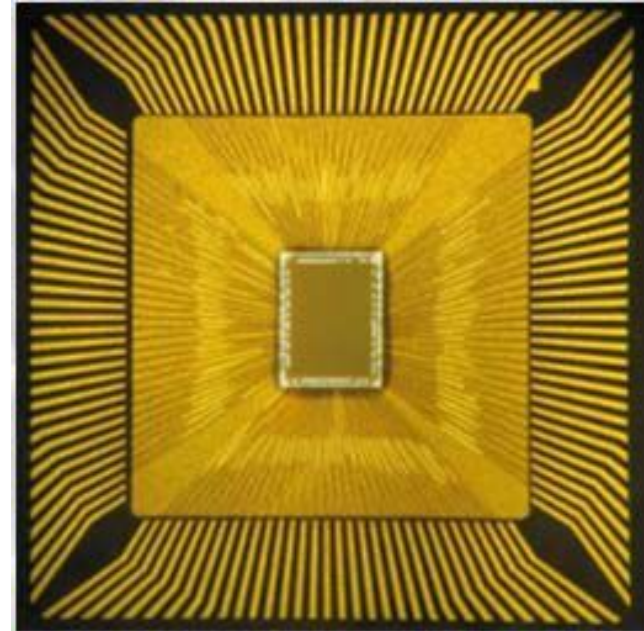
*б*

Процесс выстраивания нанопроволок и формирование кроссбар-архитектуры (а), образование светодиодных структур и их зонная диаграмма (б)

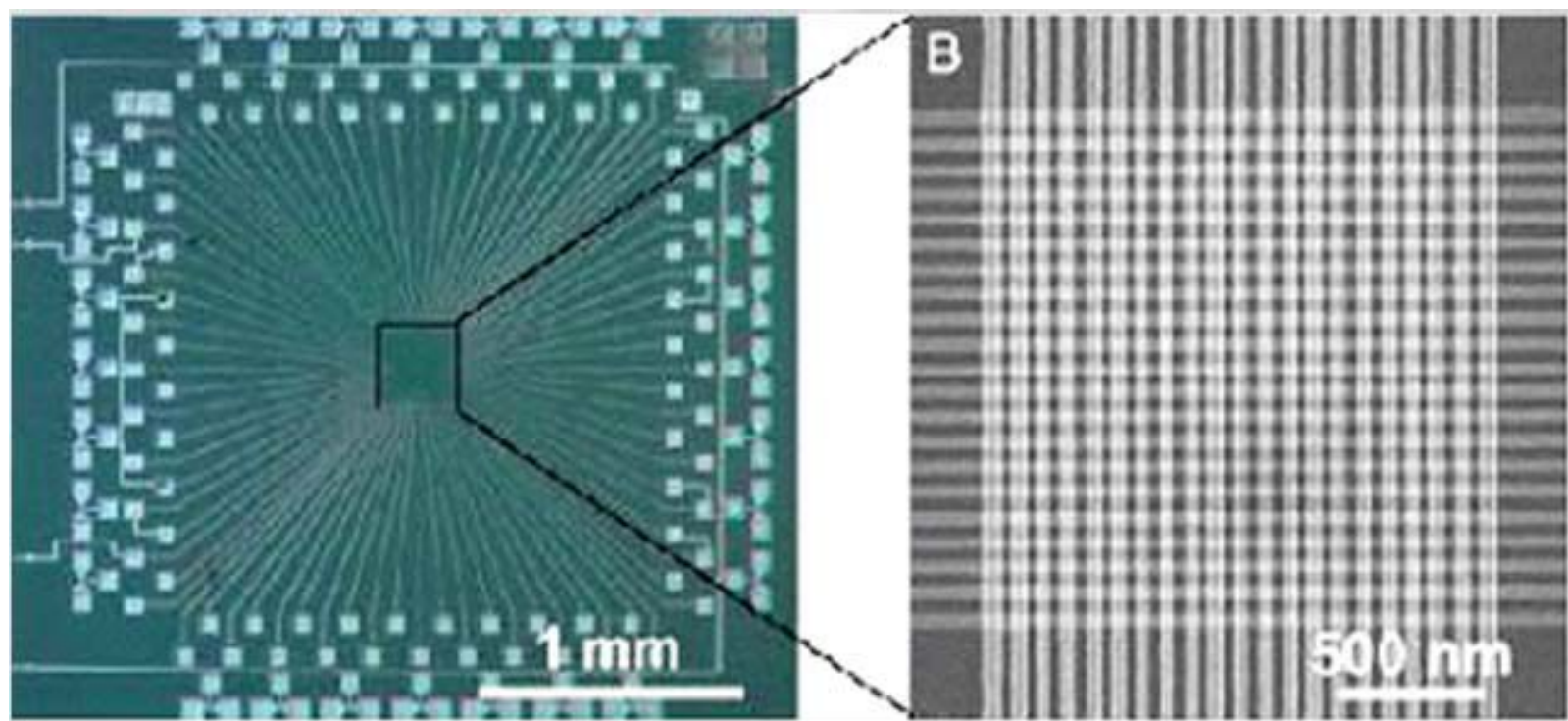
На основе кроссбаров с мемристорами можно построить полноценный процессор. Кроссбары обеспечивают высокую плотность размещения логических вентилей и ячеек памяти. Так же разработана архитектура, позволяющая использовать много слоев кроссбаров. За счет этого можно в разы увеличить плотность памяти, а также отношение производительность/энергопотребление. Чипы с такой архитектурой получили название «нанохранилища».



Мемристорный наноматериал



Мемристорная микросхема



## Нанoeлектронные устройства памяти

В нанoeлектронных устройствах памяти важно не только предельно миниатюризировать бит информации, но и сделать его энергонезависимым. Одним из перспективных устройств этого класса является запоминающее устройство типа *Millipede* (многоножка). В качестве носителя в ней используется полимерная подложка. Идея формирования информационного бита позаимствована из старого патефона. Именно в патефонах считывающая игла скользила по спиральной борозде и считывала записанную информацию, соответствующую глубине рельефа бороздки.

В цифровых системах обработки информации создаются ямки, соответствующие записи «1», а их отсутствие соответствует «0».

Запись в полимерный носитель осуществляется щупом высокодопированного кремниевого кантилевера путем локального разогрева. Нагретые иглы выдавливают в полимерном носителе углубление конической формы — пит. Пит имеет глубину не более 25 нм и ширину ~40 нм. Так записывается логическая единица. Отсутствие углубления в нужном месте обозначает логический ноль. Стирание информации происходит путем «залечивания» питов с помощью горячей иглы кантилевера. Считывание записанных питов осуществляется той же иглой кантилевера, нагретой до 300 °С. Попадая в углубление, игла отдает тепло поверхности пластика и охлаждается. При этом электрическое сопротивление уменьшается на доли процента. Сигнальный процессор эти слабые изменения преобразует в выходной сигнал, состоящий из логических единиц и нулей (рис.).

Перфорированные углубления



Поток данных

001111010001010100101110

Выходной сигнал



Процесс считывания информации



Информация записывается на тонкой органической пленке полиметилметакрилата. Матрица записи/считывания содержит 4096 кантилеверов общим размером 6,3х 6,3 мм. Такая конструкция типа «многоножка» представлена на рис.

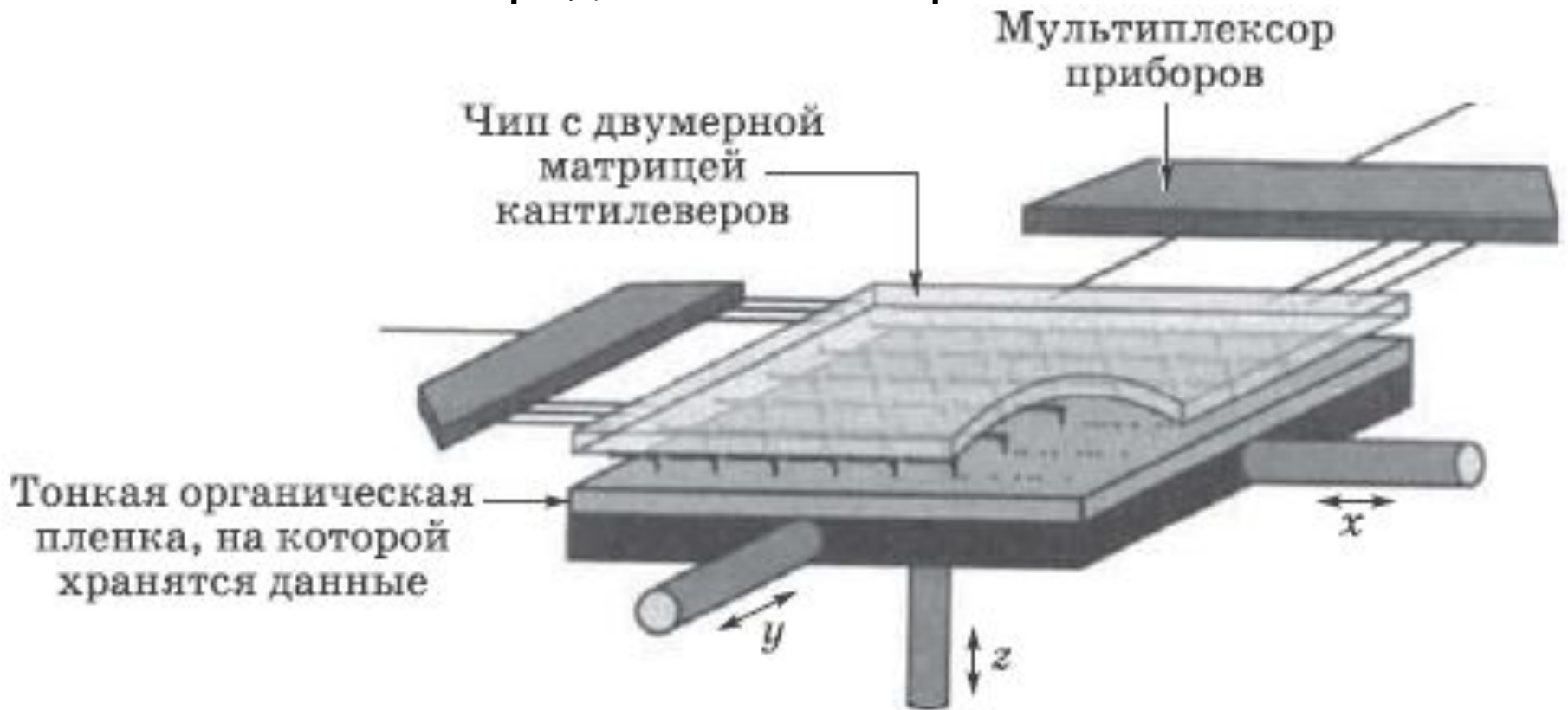


Схема запоминающего устройства типа «многоножка»

В процессе записи/считывания привод кремниевого «стола», на котором размещена пленка с данными, позиционирует ее в плоскости по заданным координатам  $X, Y$ . Приводы мультиплексоров позволяют управлять каждым кантилевером, обеспечивая адресацию памяти. Важно отметить, что матрица кантилеверов обеспечивает параллельность процессов записи и считывания информации. На площади в квадратный дюйм можно записать 1,2 терабит информации. Другими словами, в чип размером в почтовую марку можно записать 25 DVD-дисков.

Это уже не микроэлектронное, а наноэлектронное запоминающее устройство. Ожидается появление таких устройств емкостью до 100 Гб, которое вполне может заменить чипы флеш-памяти в мобильных телефонах. По скорости обработки информации такое запоминающее устройство не уступает электронному.

В американском Университете Райса разрабатывают элементы памяти не из диоксида титана, а из гораздо более дешёвого оксида кремния, который легко получить из обычного песка. Расчётная толщина слоя оксида кремния составляет от 5 до 20 нм, скорость переключения - не более 100 нс. В Университете Райса была успешно решена задача многократной записи в ячейки памяти на основе мемристоров из оксида кремния.

В американском Национальном институте стандартов и технологии (NIST) разработана технология изготовления гибких элементов памяти на основе мемристоров из диоксида титана. В качестве подложки был использован полимерный материал, а получившийся элемент сохраняет работоспособность после четырёх тысяч циклов изгиба. Была построена модель мемристора на основе слоя из смеси серебра и кремния и вольфрамовых электродов, причём в ближайших планах учёных - создание больших схем, состоящих из тысяч таких элементов.

Характеристики различных типов памяти

	<i>Мемристор</i>	<i>DRAM</i>	<i>FLASH</i>	<i>HDD</i>
Время чтения, [нс]	10	10 – 50	25 000	$(5-8) \cdot 10^6$
Время записи, [нс]	0,2 – 20	10 – 50	200 000	$(5-8) \cdot 10^6$
Время хранения информации	годы	менее сек.	годы	Годы
Количество циклов записи	$10^{12}$	$10^{16}$	$10^3 - 10^6$	$10^{15}$
Энергия на запись одного бита, [пДж]	0,1 – 3	2	10 000	$(1-10) \cdot 10^9$

Чтобы эффективно использовать свойства мемристоров, необходимо включить их в состав электрической цепи с активными элементами. В начале 2009 года в Hewlett-Packard была разработана такая гибридная микросхема. Чип представляет собой матрицу из 42 проводников диаметром 40 нм, 21 из которых натянута параллельно друг другу, а другие 21 - перпендикулярно им. Слой диоксида титана толщиной 20 нм расположен между взаимно перпендикулярными проводниками, и в этих местах формируются мемристоры.

Вокруг этой "сетки" расположен массив полевых транзисторов, подключённых к выводам мемристоров. Далее всё верно. Полевые транзисторы обеспечивают смену полярности напряжения на мемристорах схемы памяти. Это массив управления мемристорной памятью.

## Компьютеры на мемристорах

Уже изученные свойства мемристоров позволяют говорить о том, что на их основе можно создавать компьютеры принципиально новой архитектуры, по производительности значительно превышающие полупроводниковые. Современные компьютеры построены на базе архитектуры фон Неймана: и данные, и программы хранятся в памяти машины в двоичном коде, причём вычислительный модуль отделён от устройств хранения, а программы выполняются последовательно, одна за другой. Прогрессивная в середине прошлого столетия, такая архитектура сегодня уже не отвечает требованиям, предъявляемым к компьютерной технике: программы стали намного сложнее, а объёмы обрабатываемых данных выросли на порядки, если не в десятки порядков.

В мемристорном компьютере параллельно и независимо друг от друга работают множество модулей, а возможность запоминать и оперировать неограниченным множеством значений от 0 до 1 означает, что исполняемые программы не ограничены двоичным кодом. Более того, станут в принципе ненужными отдельные аппаратные компоненты компьютера - процессоры, видеочипы, память и жёсткие диски; машина будет архитектурно однородным устройством, где одновременно будут храниться все данные и проводиться все операции с ними. Для апгрейда достаточно будет установить дополнительные мемристорные модули, а для ремонта - заменить вышедшие из строя.

Мемристорный компьютер не надо будет "загружать": сразу после включения он будет готов продолжить работу, причём с того самого места, на котором она была прервана. По сравнению с современной техникой, энергопотребление мемристорных машин будет ничтожным, а вычислительная мощность просто гигантской. Учитывая, что до серийного производства мемристоров остался буквально один шаг, очень может быть, что именно мемристорный компьютер станет промежуточной ступенью на пути к квантовому компьютеру. Если же использовать достаточное количество мемристоров, то теоретически возможно создать действующую модель мозга - и не просто с возможностью вычислений, но и с функцией самообучения.



В апреле 2010 года в HP объявили о существенном прогрессе в исследованиях мемристоров: в лабораториях компании разработаны образцы ячеек со стороной 3 нм и скоростью переключения около одной наносекунды. Кроме того, учёным удалось создать трёхмерный массив таких элементов, способный выполнять логические операции и работающий аналогично синапсам - "сигнальным линиям" между нейронными клетками в мозгу человека. Скорость передачи сигнала по синапсу зависит от времени активации нейронов: чем меньше временной промежуток между активацией, тем быстрее передаётся сигнал по синапсу. Точно так же работает и массив мемристоров: при подаче тока с промежутками в 20 мс сопротивление мемристора вдвое меньше, чем при 40-мс промежутках. По словам Стэнли Уильямса, менее чем через три года 3D-массив мемристоров позволит размещать 20 Гбайт данных в объёме  $1 \text{ см}^3$ , сравнимом с кусочком сахара.

По недавним подсчётам, чтобы построить модель коры мозга человека из современных компьютерных комплектующих, потребуется как минимум 150 000 процессоров и 144 Тбайта одной только оперативной памяти, причём речь не идёт даже об интеллекте уровня младенца.

Мемристоры вызвали необычайный ажиотаж среди разработчиков нейронных сетей, увидевших в этих устройствах средство для построения более компактных и совершенных самообучающихся систем, т.к. запоминание состояния в мемристоре похоже на аналогичный процесс в синапсах.

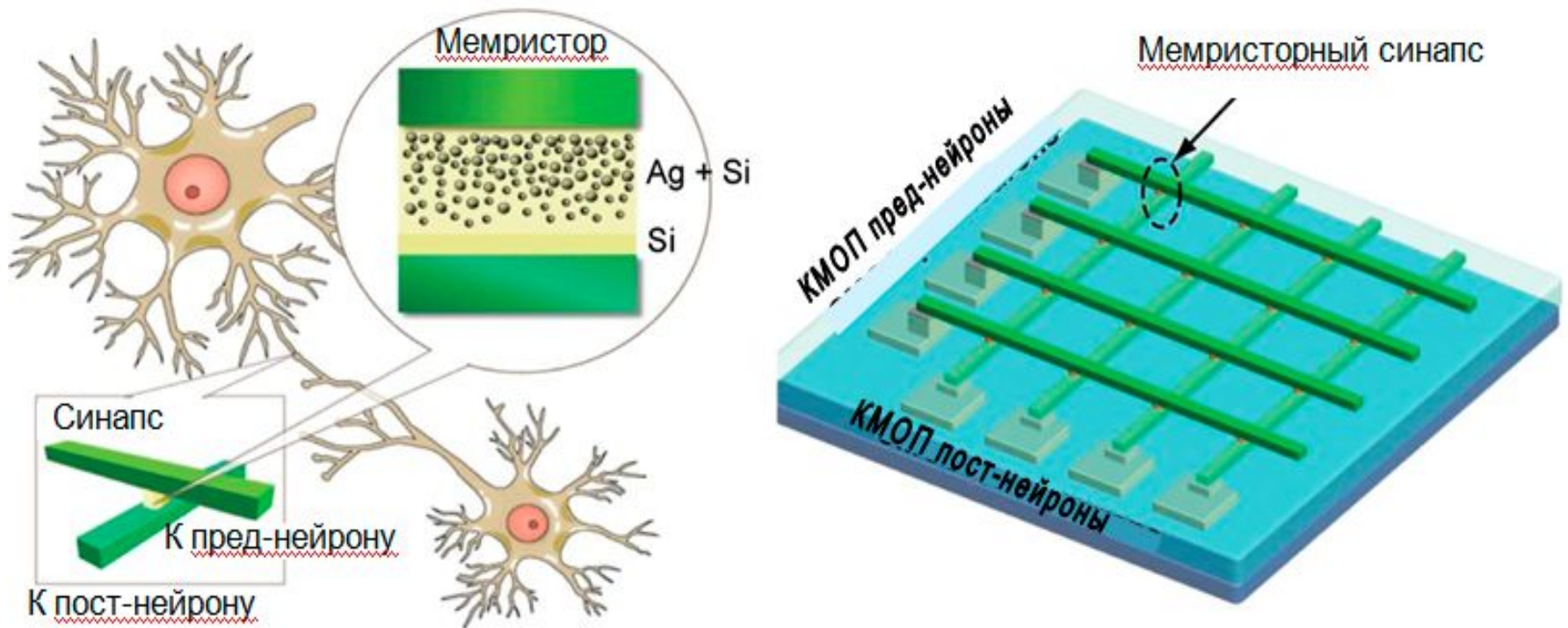
Мемристоры на сегодня являются единственным неживым материалом, приближающимся по своим функциям к синапсам живого мозга. Синаптические соединения могут быть смоделированы и на КМОП-транзисторах, но транзисторные схемы несравнимо больше, медленнее, сложнее, энергозатратнее и дороже, чем мемристивные.

## Мемристор в гибридных аналогово-цифровых схемах

Искусственные нейронные сети, которые в настоящий момент активно разрабатываются, имеют гибридную аналогоцифровую архитектуру (рис. а, б). В данном случае двухполюсные мемристоры коммутационной матрицы, образованные в точках схождения проводов, соединяют пресинаптические и постсинаптические нейроны, построенные на КМОП элементах.

Нейроны изготавливают на основе обычных КМОП транзисторов, а роль синапса играет мемристор.

Мемристор представляет собой двухполюсное электронное устройство, проводимость которого зависит от протекшего через него суммарного заряда, и обладающее синаптической пластичностью.



Характеристики нанометрического мемристора и его использование в качестве синапса.

(а) Концептуальная схема использования мемристора в качестве синапса, соединяющего нейроны. На врезках показаны схема подключения двухполюсных мемристора и слоистая структура одного устройства.

(б) Нейроморфическая структура с КМОП нейронами и мемристорными синапсами, расположенными на коммутационной матрице.

При современном уровне развития мемристоров функциональный элемент имеет стандартные латеральные размеры 100 нм x 100 нм и менее (см. рис. 8), если не рассматривать экзотические, далекие от внедрения, варианты на нанотрубках, позволяющие сформировать ячейки экстремально малых размеров (до 1.5 x 1.5 нм). Толщина диэлектрических слоев в таких ФЭ составляет обычно 5-20 нм.

Изготовление массива мемристоров с латеральным размером порядка 100 нм и электрических контактов к мемристорам, без которых невозможно исследование их электрофизических характеристик, достигается путем нескольких циклов электронной и фотолитографии.

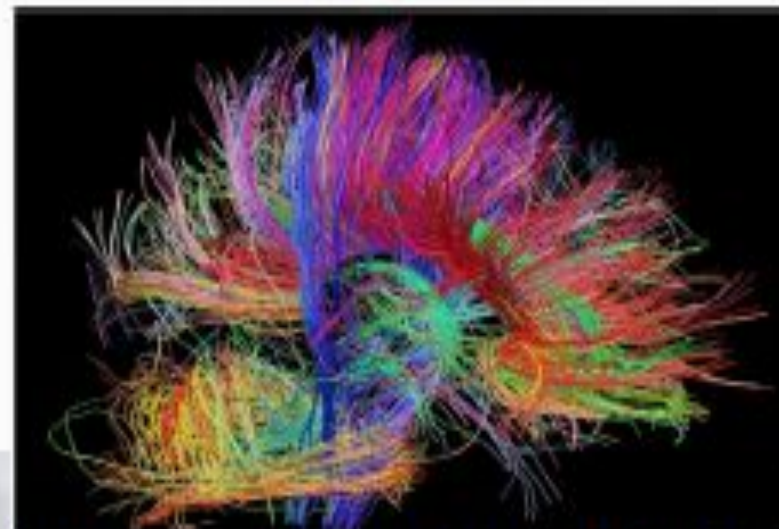
## На основе обучаемой мемристорной электроники корпорация IBM реализует проект «Когнитивный компьютер» - «Cognitive Computing via Synaptronic and Supercomputing» (C2S2)

Руководитель проекта Дхармендра С. Модха:



«При принятии решения о реализации проекта **C2S2** IBM исходила из того, что количество цифровых данных в мире ежегодно увеличивается на 60%. Официально заявленная IBM конечная цель проекта определена как создание моделирующей организацию мозга интеллектуальных компьютеров, способных к самостоятельному усвоению новых знаний, постоянно получаемых из различных источников, распознаванию образов, продолжительному обучению, к пониманию контекстуального значения многозначной информации для решения сложных проблем в условиях реального мира на основе своих способностей к восприятию, поведению и познанию.

В результате проекта должен появиться принципиально новый класс искусственных когнитивных систем, новая парадигма вычислительной архитектуры с многочисленными приложениями во всех областях человеческой деятельности, появятся новые отрасли промышленности»

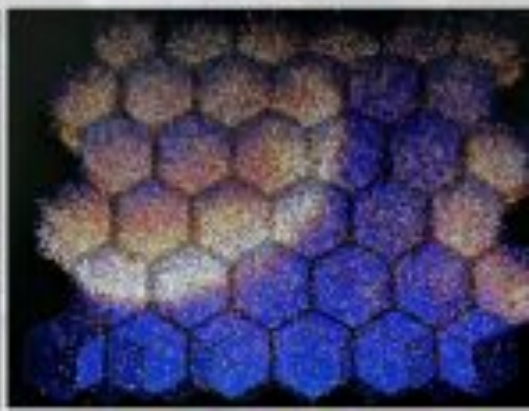
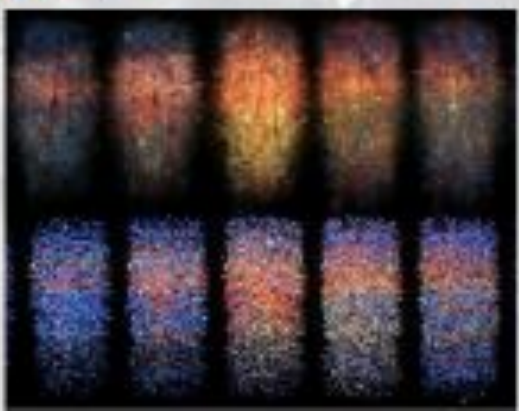
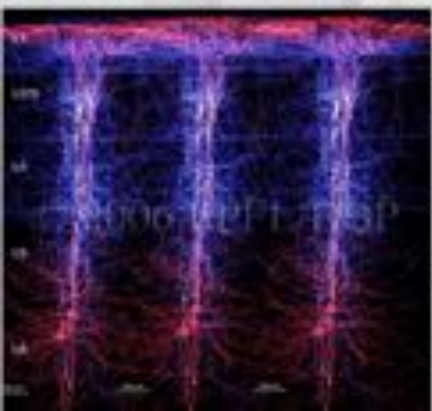


По прогнозу Д.Модхи IBM создаст компьютер с достаточными вычислительными ресурсами для моделирования мозга человека в целом к 2019 г.



Проекты по созданию мемристорной электроники опираются на данные об Организации коры мозга, получаемые в рамках таких проектов, как Blue Brain Project корпорации IBM и Швейцарского федерального политехнического института в Лозанне (EPFL).

**Руководитель проекта Генри Маркрам:** «Целью Blue Brain Project является детальное моделирование отдельных нейронов и образуемых ими типовых колонок новой коры мозга – **неокортикальных колонок (NCC)**. Каждая NCC имеет порядка 0,5 мм в диаметре и 2 мм высотой и содержит несколько тысяч нейронов со сложной упорядоченной структурой. В проекте используется компьютер IBM Blue Gene с 8192 процессорами, который позволяет моделировать распространение электрической активности внутри NCC в режиме реального времени. За одну секунду моделирования система обрабатывает 100 гигабайт данных, связанных с моделированием структуры межнейронных связей, и еще 150 гигабайт, связанных с моделированием электрического импульса. В 2007 г. была построена модель NCC крысы, состоящей из десяти тысяч нейронов с тридцатью миллионами синапсов. Летом 2010 г. объявлено о начале нового проекта – **Human Brain Project**, который должен завершиться созданием модели мозга человека к 2023 г.





## Обучаемая мемристорная электроника позволит создать по настоящему интеллектуальных роботов различного назначения



**Марк Райберт, президент Boston Dynamics:** «Petman - антропоморфный робот, разрабатываемый компанией Boston Dynamics по заказу DARPA для армии США. В отличие от человекоподобных роботов, ранее созданных в Японии, США и Европе, Petman балансирует при ходьбе, ползает и выполняет различные гимнастические движения, являясь первым роботом, воспроизводящим динамику человека. Естественные и гибкие движения нового робота играют важную роль для выполнения его основной функции - солдата в реальных условиях. Программа создания робота заняла 13 месяцев проектирования и 17 месяцев создания первого образца, который будет поставлен заказчику в 2011 г. Petman стал оледующим успешным проектом компании после робота BigDog. Сейчас компания работает над прототипом робота-гепарда Cheetah, завершение работ над которым ожидается уже через 20 месяцев»



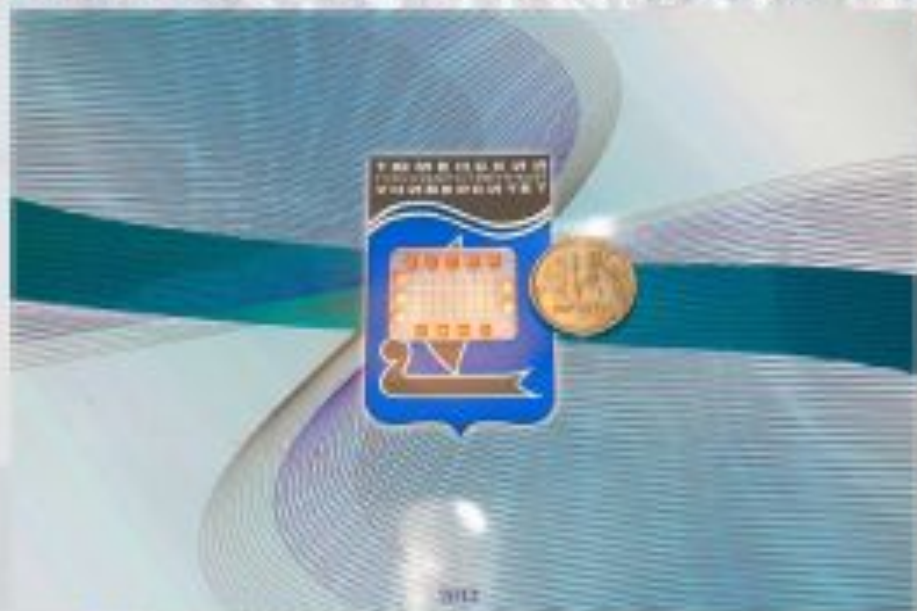
Boston Dynamics



Boston Dynamics



## 12 апреля 2012 г. в ТюмГУ получены российские мемристоры



Лабораторный образец микросхемы на базе мемристоров, созданный в ТюмГУ в апреле 2012 г.

Для получения мемристоров на подложку были нанесены поперечные проводящие дорожки, на которые был нанесен слой диоксида титана толщиной 15 нанометров. Поверх него были нанесены продольные проводящие дорожки. В местах пересечения дорожек получен выраженный мемристивный эффект снижения сопротивления и потенциации связи в зависимости от проведенного тока.



Работа над мемристивной микросхемой в чистой комнате ТюмГУ

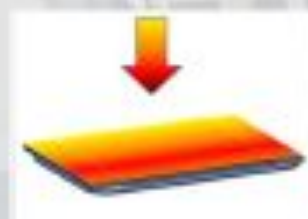


ТюмГУ получено заключение от федерального испытательного центра веществ, материалов и продукции наноиндустрии ФГУП «Уральский научно-исследовательский институт метрологии» о наличии мемристивного эффекта в созданных прототипах мемристивной микросхемы (Протокол испытаний № 53-251-1587/2012 от 13.06.2012 г.).

# Основные этапы производства мемристорной микросхемы (топология упрощена) и часть использующихся модулей НТК «Нанофаб-100» ТюмГУ



1. На сапфировую или кремниевую подложку наносится фоторезистивная матрица, экспонируемая по заданной маске. Неполимеризованные участки растворяются.



2. Магнетронным напылением наносится медь



3. Убираются остатки полимера с ненужной медью, между электродами формируются проводящие дорожки



4. Магнетронным напылением формируется слой  $TiO_2$



5. Повторяя операции создаются поперечные проводящие дорожки. Мемристоры возникают на пересечении продольных и поперечных дорожек в слое  $TiO_2$



Радиальный транспортный модуль



Модуль загрузки и хранения образцов



Модуль нанобработки фокусированными ионными пучками



Имплантационный модуль фокусированных ионных пучков



Модуль магнетронного напыления



Модуль плазмохимического травления

Разработка мемристоров завершена, но HP и Hynix не хотят подрывать рынок флэш-памяти.

В 2012 был обнародован план коммерциализации разработки, предусматривающий выпуск новой памяти летом 2013 года.

Согласно сообщению источника, ссылающегося на слова старшего научного сотрудника HP Labs Стэна Вильямса (Stan Williams), мемристоры выйдут на рынок не раньше конца 2013 года.

Интересно, что господин Вильямс уточнил, что дело не в технической стороне.

«Наш партнер, Hynix, является крупным производителем флэш-памяти, и мемристоры подорвут его бизнес, отняв часть рынка у флэш-памяти, — сказал господин Вильямс. — Так что подобрать время для выпуска мемристоров на рынок оказалось очень важным. Гораздо больше денег сейчас тратится на моделирование и понимание рынка, чем на исследовательскую работу».

Что касается этой самой исследовательской работы, она, по словам Стэна Вильямса, в основном завершена, так что выпуск новой памяти сможет освоить любая фабрика.

