



НА ПУТИ К НЕЙРОМОРФНОЙ МЕМРИСТОРНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПЛАТФОРМЕ ON THE WAY TO A NEUROMORPHIC MEMRISTOR COMPUTER PLATFORM

А.Петров¹, Л.Алексеева¹, А.Иванов¹, В.Лучинин¹, А.Романов¹, Т.Чикев², Т.Набатамэ²
A.Petrov¹, L.Alekseeva¹, A.Ivanov¹, V.Luchinin¹, A.Romanov¹, T.Chikyow², T.Nabatame²

Интерес к эффектам переключения сопротивления в наноразмерных пленках, как правило, оксидов переходных металлов, возник достаточно давно и стимулирован сравнительно недавней публикацией сотрудников Hewlett-Packard Д.Струкова, Р.С.Вильямса и др. (Nature, 2008), объявивших об обнаружении "неуловимого" мемристора – резистора с памятью (memory resistor), теоретически предсказанного в 1971 году Л.Чуа. Это открыло серьезные перспективы создания резистивной памяти произвольного доступа (ReRAM), в ячейках которой данные сохраняются за счет изменения сопротивления материала, а не электрического заряда.

The effects of resistance switching in nanoscale films, as a rule, made of transition metal oxides has long gained considerable interest, which was fostered by a relatively recent publication of Hewlett-Packard's employees, D.Strukov, R.C.Williams, et al. (Nature, 2008), who declared about the discovery of the "ever-elusive" memristor, or memory resistor, which had been theoretically predicted in 1971 by L. Chua. This opened up large prospects for creating resistance based random access memory (ReRAM) with the cells storing data by modifying the resistance of the material rather than an electric charge.

Сенсационное заявление сотрудников HP не нашло бы отклика в научной среде если бы очевидное уже тогда понимание фундаментальных проблем функционирования базовых устройств микро- и наноэлектроники, связанных с удержанием заряда в непрерывно уменьшающемся объеме, что делало сомнительным перспективы экстенсивного развития элементной базы, и, в частности, памяти.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ

Очевидна необходимость создания альтернативной энергонезависимой памяти с высокой плотностью записи данных, низкой потребляемой мощностью и высокой скоростью работы. Альтернативной, в смысле построенной на иных, по сравнению с существующими, физических принципах, позволяющих перейти к универсальной процессорной среде с интеграцией оперативной и долговременной памяти, реализацией многоуровневости логических состояний с формированием абсолютно новой, так называемой нейроморфной

компьютерной платформы. Актуальность проблемы очевидна, учитывая, что практически любое электронное устройство содержит память, внутреннюю или внешнюю, а появление персональной электроники значительно повышает требования к устройствам памяти.

Электронная промышленность вынуждена постоянно совершенствовать технологию памяти и, в конечном счете, ее базовые параметры. Во-первых, необходимо увеличивать плотность памяти, ее способность хранить все больший объем информации при уменьшении стоимости бита информации. Во-вторых, память должна характеризоваться большим временем наработки, связанным с числом циклов переключения (операций записи и стирания). В-третьих, требуется увеличение времени хранения – это вполне очевидный параметр, не вызывающий особых проблем в большинстве предлагаемых устройств памяти. Наконец, память должна обладать высокой скоростью программирования и доступа, то есть время чтения и записи должно быть минимизировано. В последнее время особое внимание уделяется энергопотреблению, что очевидно

¹ Кафедра микро- и наноэлектроники, СПбГЭТУ "ЛЭТИ" / Department of micro- and nanoelectronics, LETI.

² Международный центрnanoархитектоники материалов, Национальный институт материаловедения / International Center for Materials Nanoarchitectonics (WPI-MANA), National Institute for Materials Science.

коррелирует с плотностью (емкостью) памяти и с мобильностью оснащенных ею устройств.

Очевидно, что совместить все перечисленные требования (как достоинства) едва ли возможно, тем не менее меняются кандидаты, а стремление к созданию "идеальной" памяти остается. Не останавливаясь подробно на обсуждении большого количества возможных вариантов, отметим как наиболее перспективные технологии MRAM, FeRAM, PCM, ReRAM и, не забывая Flash, как базовую энергонезависимую память современных электронных устройств, проведем краткое их сопоставление в стремлении нашупать направления создания "идеальной" памяти.

Фундаментальные физические принципы, лежащие в основе Flash-памяти, накладывают естественные ограничения на ее возможности и на перспективы развития. Во-первых, невозможно достигнуть одновременно быстрого программирования, высокой плотности и произвольного доступа. NAND Flash предлагает быстрое программирование и высокую плотность, но в то же время имеет проблемы произвольного доступа и относительно медленную скорость чтения. С другой стороны, NOR Flash, у которой нет проблем с произвольным доступом, уступает по объему памяти и ряду других параметров. Основным недостатком памяти типа Flash является малое число циклов перезаписи – в зависимости от условий эксплуатации можно рассчитывать на 10^3 – 10^4 циклов. К другим недостаткам Flash следует отнести низкую скорость записи, а также побочный характер стирания/записи ячеек памяти. Существует мнение, что размер элемента традици-

онной Flash-памяти нецелесообразно уменьшать ниже 20 нм, поскольку возникают ограничения, связанные с фундаментальными принципами ее функционирования. Во-первых, уменьшение размеров неминуемо приведет к возрастанию токов утечки, и, следовательно, к деградации элемента памяти и потери информации. То есть очевидна проблема дальнейшего масштабирования и наращивания плотности памяти. Во-вторых, уменьшение размера чипа приведет к сокращению количества сохраняемых в нем "информационных" электронов и, как следствие, вызовет заметный телеграфный шум, а также связанные с этим проблемы надежности. Указанные недостатки Flash являются основным стимулом для поиска новой энергонезависимой памяти.

ПОИСК ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Краткий обзор кандидатов на роль перспективной энергонезависимой памяти, удовлетворяющей отмеченным выше требованиям, начнем с памяти на основе фазового перехода (PCM, PRAM, PCRAM, Ovonic Unified Memory, Chalcogenide RAM) [1, 11]. На фундаментальном уровне память на фазовом переходе использует нагрев, чтобы вызвать фазовый переход в материале, например, теллуриде сурьмы-германия (GST) [12, 13], в результате которого изменится его сопротивление. Как правило, подразумевается фазовый переход между аморфным и кристаллическим состояниями. Характерной особенностью типичной ячейки PCM является нагреватель, включенный в слой изолятора между энергоемким

The "sensational" discovery of the HP employees would have remained unnoticed by the scientific community if there had not been clear understanding of the fundamental problems in the operation of basic micro and nanoelectronic devices that need to retain a charge with the scale continuously diminishing, thus diming any extensive development prospects for elements and, in particular, for memory.

URGENT ISSUES OF NON-VOLATILE MEMORY

There is a clear-cut need for alternative non-volatile memory with data

recording high density, low power and high speed. Alternative memory means that it should be built on some other principles than the existing physical ones, allowing for versatile processor environment that integrates random-access and read-only memories, implements multilevel logic states by forming a new, so-called "neuromorphic", computing platform. The urgency of the problem is apparent with every electronic device containing internal or external memory, and the advent of personal electronics significantly heightens the requirements for memory devices.

The electronic industry is constantly urged to improve the memory technology and, ultimately, its underlying parameters. Firstly, it is necessary to increase memory density: its ability to store the increasing volume of data while reducing the cost of information bits. Secondly, memory must have greater life associated with the number of switching cycles (writes and erases). Thirdly, storage time must become longer, which is a clear parameter that does not cause any special problems in most proposed memory devices. Finally, memory must be characterized by



материалом и нижним электродом. Цель этого нагревателя состоит в том, чтобы увеличить эффективность и уменьшить "мощность" программирования. Существенное преимущество такого подхода – сокращение программного тока из-за эффекта его локализации. Для переключения ячейки PCM из аморфного в кристаллическое состояние, определенного как процесс набора (SET), применяется термический нагрев. Во время этого процесса, используют импульс большей продолжительности и умеренного напряжения / тока. Температура ячейки PCM повышается до температуры кристаллизации ($T_{\text{крyst}}$), но остается ниже температуры плавления ($T_{\text{плавл}}$). Поскольку кристаллизация материала происходит не мгновенно, очень важно, чтобы импульс был достаточно длинным, а температура в материале PCM оставалась высокой в течение достаточного времени. После завершения кристаллизации, устройство переходит из высокоомного в низкоомное состояние. Процесс считывания относительно простой по сравнению со сбросом и набором. Во время считывания используется импульс относительно небольшой амплитуды, не нарушающей состояние памяти устройства. Одной из основных проблем, связанных с PCM, является энергопотребление. Чтобы изменить кристаллическую структуру пленки, необходимы относительно высокая температура и, как следствие, достаточно большой ток. Оценки показывают, что даже для PCM с размером до 15 нм, необходим ток сброса около 40 μA [12].

Сегнетоэлектрическая энергонезависимая память (FeRAM) по своему устройству схожа с DRAM

(конденсатор на основе сегнетоэлектрика). Запись происходит путем изменения вектора поляризации сегнетоэлектрического слоя разностью потенциалов между электродами. Среди преимуществ FeRAM перед Flash-памятью можно выделить низкое энергопотребление, быструю запись информации и существенно увеличенное максимальное число циклов перезаписи, превышающее 10^{14} . К недостаткам FeRAM относят гораздо более низкую плотность записи, ограниченную емкость и более высокую стоимость [13–17]. Одним из мировых лидеров в области разработки и производства электронных компонентов самого различного назначения по запатентованной технологии создания энергонезависимых сегнетоэлектрических ОЗУ (FeRAM) является Ramtron International. В число лицензиатов или партнеров по освоению технологии FeRAM входят такие крупные компании, как Texas Instruments, Fujitsu, Toshiba, Samsung, Hynix и др. В работах [18] и [19] даны прогнозы дальнейшего развития устройств FeRAM, рассмотрены перспективы замены Flash-памяти и сделан вывод о том, что устройства перепрограммируемой памяти на основе сегнетоэлектриков имеют все шансы занять прочную конкурентоспособную позицию среди прочих устройств энергонезависимой памяти при условии, что будут решены проблемы их стабильности и надежности, а также обеспечена возможность неразрушающего считывания информации. Современным подходом к повышению плотности записи информации является использование сегнетоэлектрического эффекта, обнаруженного в

a high speed of programming and access, i.e., the time of reads and writes should be minimized. In recent years, special attention has been apportioned to power consumption, which apparently correlates with the memory density (capacity) and mobility of devices equipped with memory.

It is clear that meeting all the mentioned requirements (seen as advantages) is hardly possible. However, the candidates come and go, but the pursuit for a «perfect» memory remains. Without dwelling too much on the discussion of numerous possible options, we will describe the most promising

technologies, MRAM, FeRAM, PCM, and ReRAM, as well Flash, as the basic non-volatile memory used in modern electronic devices. We will make a brief comparison of them in the quest to find ways for creating the "perfect" memory.

The fundamental physical principles underlying Flash memory impose natural limits on its capacity and prospects of development. Firstly, it is impossible to achieve fast programming, high density, and random access. NAND flash memory offers fast programming and high density, but at the same time, it has problems with random access and relatively slow

read speed. On the other hand, NOR Flash does not have random access problems, but it lags in the amount of memory and a number of other parameters. The main disadvantage of Flash memory is the small number of write cycles, which ranges between 10^3 – 10^4 cycles depending on operating conditions. Other disadvantages of flash memory include low write speed and chunked erase/write operations in memory cells. There is an opinion that it is impractical to reduce the element size of the conventional flash memory lower than 20 nm, because there are restrictions associated with its

наноразмерных пленках, например, легированного оксида гафния.

Магниторезистивная память (MRAM) – запоминающее устройство с произвольным доступом, в котором, в отличие от других типов памяти, информация хранится не в виде электрических зарядов или токов, а в магнитных элементах. Последние сформированы из двух ферромагнитных слоев, разделенных тонким слоем диэлектрика. Магниторезистивная память обладает быстродействием, сравнимым с памятью типа SRAM, такой же плотностью ячеек, но меньшим энергопотреблением, чем у памяти типа DRAM. Она более быстрая и не деградирует во времени по сравнению с Flash-памятью.

Резистивная память произвольного доступа (ReRAM) отличается хранением данных в ячейках за счет изменения сопротивления материала, а не электрического заряда. Речь идет о создании альтернативной энергонезависимой памяти, имеющей высокую плотность записи данных, низкую потребляемую мощность и высокую скорость работы. Сегнетоэлектрическая (FeRAM) и магнитная память (MRAM) не вполне отвечают современным требованиям и даже в перспективе едва ли составят конкуренцию Flash-памяти, во всяком случае, по плотности записи данных. Однако можно считать общепризнанным, что ниже 20 нм с Flash-памятью, построенной на удержании заряда, начнутся проблемы. Представляется, что мемристоры как по масштабированию, так и по скорости переключения соответствуют требованиям совре-

менной энергонезависимой памяти. Более того, привлекательным является низкое энергопотребление при записи информации, а также способность мемристора к многоуровневым состояниям и, как следствие, перспективы его применения в искусственных нейроморфных компьютерных системах с новой технологией хранения, обработки и передачи данных.

МЕМРИСТОР – НОВЫЙ ПРЕДСТАВИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

Мемристор был описан в 1971 году Леоном Чуа [20, 21, 22], но вызвал значительный интерес только после ряда работ Стенли Вильямса и группы исследователей лаборатории HP [23], заявивших о создании твердотельной структуры, реализующей мемристорные свойства. Предполагается, что наблюдаемые уже более 40 лет эффекты переключения и памяти в МОМ-структуратах являются проявлением мемристивности. Тот факт, что наблюдаются они при варьировании большого числа материалов тонких пленок оксидных слоев (ZnO , NiO , SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 , $SrTiO_3$, $Pr_{0,7}Ca_{0,3}MnO_3$ и др.) и электродов (Pt, Au, Ag, Al, TiN и др.), говорит в пользу гипотезы Л.Чуа о существовании четвертого базового элемента электрических цепей [24–38]. Это стимулирует интерес к поиску механизмов, ответственных за эффекты переключения и памяти в структурах МДМ. Существуют различные теории и физические модели, объясняющие механизмы переключения сопротивления в подобных устройствах. К наиболее известным можно отнести модели проводимости

fundamental operation principles. Firstly, size reduction will inevitably result in higher leakage currents and, consequently, degradation of memory elements and information loss. In other words, there is a clear problem in further scaling and increasing the memory density. Secondly, reducing the size of a chip will reduce the number of "informational" electrons stored therein and, consequently, will cause a marked telegraph noise, as well as other related reliability issues. These shortcomings of flash memory are the main incentive for investigating new non-volatile memory types.

SEARCH FOR NEW GENERATION NON-VOLATILE MEMORY

A brief overview of the candidates for the role of future non-volatile memory that meets the above-mentioned requirements will start with the phase transition based memory (PCM, PRAM, PCRAM, Ovonic Unified Memory, Chalcogenide RAM) [1, 11]. Generally, memory uses heat to cause phase transition in the material, for example, in antimony-germanium telluride (GST) [12, 13], which changes its resistance. As a rule, it means phase transition between amorphous and crystalline states. A

characteristic feature of a typical PCM cell is a heater included in the insulating layer between the energy-intensive material and the base electrode. The purpose of this heater is to increase the efficiency and reduce the programming power consumption. A significant advantage of this approach is the reduction of the programming current because of its localization effect. Thermal heating is applied to switch a PCM cell from its amorphous to crystalline state, defined as a "SET" process. This process uses a longer duration pulse and moderate voltage/current. The PCM cell temperature



с механизмами формирования и разрыва проводящих нитей в пределах активного слоя [38, 39], модуляции барьеров Шоттки [40, 41], связанные с процессыми заполнения и освобождения ловушек [35], основанные на переходах Мотта-Андерсона [36], а также на протекании термохимических и электрохимических окислительно-восстановительных реакций [44, 45].

Наиболее популярными подходами к пониманию механизмов переключения сопротивления (как биполярных, так и униполярных процессов) являются модели, основанные на формировании и разрыве нитей проводимости. Как правило, речь идет о вариации концентрации кислородных вакансий в "каналах проводимости". Собственно, последнее является общим местом и признается большинством исследователей как основной механизм, приводящий к явлению переключения сопротивления в структурах МДМ. Однако разногласия возникают при обсуждении механизмов управления "каналами проводимости" – формировании и разрыве, изменении свойств материала и т.п. Добавляет накала в дискуссию наблюдаемое разделение эффекта на биполярное и униполярное переключение, в зависимости от полярности прикладываемого напряжения. Все это усложняется возможными зависимостями от материала и толщины рабочего слоя (оксида), размера верхнего электрода и других факторов. Хотя многие вопросы все еще остаются без ответа, можно уверенно констатировать, что как тип, так и концентрация точечных дефектов в пределах слоя имеют прямое отношение к процессам переключения.

Помимо механизмов переключения, существует и ряд других нерешенных проблем, затрудняющих выход на рынок высокоинтегрированной памяти (ReRAM). К ним относятся интеграция и совместимость с существующей технологией, неоднородность при переключении структур, нестабильность параметров ячеек памяти. Особо следует отметить необходимость в большинстве случаев применять процедуру электроформовки (подачи импульсов достаточно большой амплитуды и определенной полярности), что само по себе представляет определенную проблему, а также связано с неоднозначностью параметров сформированных структур энергонезависимой памяти. Несмотря на обилие нерешенных проблем, интерес к приборной реализации, к оптимизации рабочих структур мемристоров с использованием разных методов синтеза активной среды (чаще всего оксидов), разнообразных конфигураций многослойных структур, вариации конструктивных особенностей устройств не ослабевает. Это позволяет надеяться на создание универсального устройства памяти, которое станет энергонезависимым, как Flash, обеспечит быстрое программирование и время доступа, как SRAM, а также высокую плотность и низкое энергопотребление. Если такая универсальная память осуществима, она сможет заменить не только Flash, но также возможно и DRAM, а значит, будет выступать в качестве универсального носителя, который, в конечном счете, изменит принципы вычислительных систем. Резюмируя, можно констатировать, что именно резистивная память произвольного доступа

is increased to a crystallization temperature (T_{cryst}), but remains below the melting temperature (T_{melt}). Since the material crystallization is not instantaneous, it is very important for the pulse to be long enough, and for the PCM material temperature to remain high for a sufficiently long time. After the completion of crystallization, the device changes its state from high resistance to low resistance state. The read process is relatively simple compared to reset and set processes. The read operation uses a comparatively small amplitude pulse, which does not upset the state the

device memory. One of the main problems associated with PCM is power consumption. Changing the crystalline structure of the film requires a relatively high temperature and, consequently, quite a high current. Estimates show that even a 15 nm PCM requires a reset current of about 40 μ A [12].

Ferroelectric non-volatile memory (FeRAM) is similar to DRAM (capacitor-based ferroelectric) in its structure. The write process is accomplished by changing the polarization vector of the ferroelectric layer based on the difference of potentials

between electrodes. The advantages of FeRAM over flash memory include low power consumption, fast write operations and a significantly greater maximum number of write cycles, which exceeds 10^{14} . The shortcomings of FeRAM include much lower density, limited capacity and higher cost [13–17]. One of the world leaders in the development and manufacture of electronic components for different purposes using a patented technology of creating non-volatile ferroelectric RAM (FeRAM) is Ramtron International. It has large companies as FeRAM technology

Таблица 1. Сравнение параметров различных типов памяти

Table 1. Comparison of parameters of different types of memory

Параметр	Flash NOR	Flash NAND	MRAM	PCM	FeRAM	ReRAM
Площадь ячейки Cell size	$10F^2$	$4F^2$	$20F^2 \rightarrow 8F^2$	$4F^2$	$22F^2$	$4F^2-8F^2$
Количество циклов перезаписи Number of write cycles	10^5	10^4	$>10^{12}$	10^9	$>10^{14}$	10^{12}
Затраты энергии на бит, пДж Energy per bit, pJ	100	100	2	6	0,03	0,1
Напряжение записи/перезаписи, В Write/rewrite voltage, V	10	15	1,8	3	1,3–3,3	1–1,5
Напряжение считывания, В Reading voltage, V	1,8	1,8	1,8	1,2	1,3–3,3	0,1–0,5
Время перезаписи, нс Overwriting time, ns	10^3-10^7	10^5-10^6	35	100	40	1–10
Время хранения, лет Storage time, years	10	10	>10	>10	10	>10

(ReRAM) является кандидатом на роль такой универсальной памяти.

В завершении данного раздела приведем таблицу сравнения параметров используемой и перспективной памяти (табл.1), понимая, что их значения для последней являются ориентировочными.

НА ПУТИ К СОЗДАНИЮ МЕМРИСТОРНОЙ ПАМЯТИ

Технология производства структур резистивной памяти включает подготовку подложек, нанесение

нижнего электрода, как правило, из металла (Pt, Au, Al, ... и TiN), синтез рабочего слоя (чаще всего из оксидов металлов) и нанесение верхнего электрода диаметром не более 100–300 мкм. Отметим, что речь идет об экспериментальных образцах. Для нанесения металлов используются технологии магнетронного распыления, электроннолучевого испарения и др. Синтез металлооксидов осуществляется методами реактивного магнетронного распыления и атомно-слоевого осаждения (Atomic

developing licensees or partners, such as Texas Instruments, Fujitsu, Toshiba, Samsung, Hynix etc. In [18] and [19], the authors make forecasts of the further development of FeRAM devices, discuss the prospects of replacing flash memory, and come to conclusions that reprogrammable memory devices based on ferroelectrics have all the good chance of becoming highly competitive among other non-volatile memory devices, provided the problems of their aging and reliability are resolved and non-destructive information reading is assured. The modern approaches

to increasing the information recording density include using ferroelectric effects found in nanoscale films, for example, in doped hafnium oxide.

Magnetoresistive memory (MRAM) is a random access memory device, which, unlike other types of memory, stores information as using magnetic elements rather than electric charges or currents. This type of memory is formed of two ferromagnetic layers separated by a thin dielectric layer. Magnetoresistive memory has speed comparable to that of SRAM memory. It has the same cell density, but the power

consumption is lower than in DRAM memory. It is faster and does not degrade over time in contrast to flash memory.

Resistive Random Access Memory (ReRAM) is characterized by storing data in cells through changing the material resistance, and not through electric charge. It appears to be alternative non-volatile memory with high storage density, low power consumption and high speed of operations. Ferroelectric (FeRAM) and magnetic (MRAM) memories do not meet today's requirements, and they are unlikely to compete with flash memory even in the long

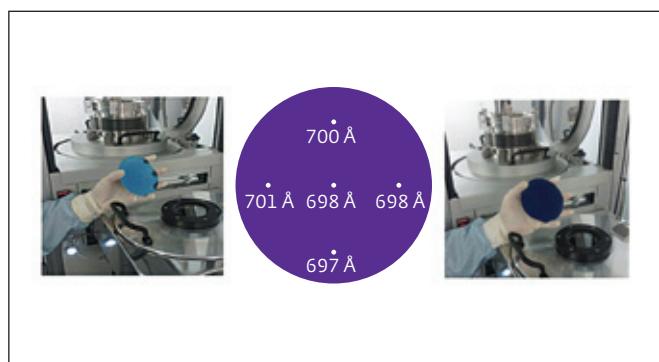


Рис.1. ALD-установка Beneq TFS 200 и пластины с тонкими пленками Al_2O_3 и TiO_2 . В центре – результаты измерения толщины пленки оксида алюминия (неравномерность по толщине менее 0,6%)

Fig.1. ALD system Beneq TFS 200 and wafers with thin films of Al_2O_3 and TiO_2 . In the center – measurements of film thickness of aluminum oxide (thickness irregularity less than 0.6%)

Layer Deposition, ALD). Последний получил достаточно широкое распространение, так как позволяет получать тонкие пленки оксидов металлов хорошего качества (широкий спектр материалов, оптимальная стехиометрия, однородность по толщине, многослойность с резким интерфейсом и т.п.), при этом на рынке представлены ALD-установки достаточно высокого уровня, например, TFS 200 финской компании Beneq.

Ниже приведены полученные авторами данной статьи результаты по реализации элементов резистивной памяти на базе мемристорных двухслой-

term, at least, on a data density level. However, it is commonly believed that flash memory, which stores a charge, starts having problems below 20 nm. Memristors seem to meet the contemporary non-volatile memory requirements in relation to both scaling and switching speed. Moreover, memristors are more attractive due to their low power consumption when recording information and their capacity to have the multi-level states and, consequently, their prospects of being used in artificial neuromorphic computer systems with new technology of data storing, processing and transmitting.

MEMRISTORS AS NEW ELECTRONIC COMPONENTS

The memristor was first described by Leon Chua in 1971 [20, 21, 22]. However, it gained significant interest only after a series of works performed by Stanley Williams and a group of researchers at the HP lab [23], who announced the creation of a solid structure with memristor properties. It is assumed that the switching and memorizing effects observed in IOM-structures for more than 40 years are the manifestation of memristor properties. The fact that they are observed in a large variety of thin oxide layer films (ZnO , NiO , SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 ,

ных структур $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, изготовленных методом атомно-слоевого осаждения с использованием в качестве прекурсоров триметилалюминия (TMA) и тетракис (диметиламино) титана (TDMAT) и H_2O при температуре подложки $\text{Pt}/\text{Ti}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ 200°C. Пленки оксидов титана TiO_2 и алюминия Al_2O_3 осаждались на подложки Si/SiO_2 (пластины монокристаллического кремния с термически выращенным окислом) с нанесенным нижним Pt-электродом на установке TFS 200 компании Beneq (рис.1 и табл.2). После осаждения образцы отжигались в атмосфере кислорода при температуре 200°C в течение 30 с.

Схематические изображения используемых в работе двухслойных структур приведены на рис.2. Слой SiO_2 толщиной 100 нм сформирован на подложке термически окисленного кремния (100) р-типа. Адгезионный слой титана толщиной 10 нм депонирован на слой SiO_2 с последующим нанесением нижнего платинового электрода электроннолучевым испарением. Верхние электроды Pt сформированы электроннолучевым испарением с использованием металлической маски. Площадь верхних электродов составила 10^{-4} см^2 .

Вариация последовательности слоев оксидов алюминия и титана преследовала исследовательские цели. Предполагалось, что это позволит расширить функциональные возможности и повысить основные параметры рабочих структур с эффектом резистивного переключения и памяти. Формально системы $\text{Pt}/\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}$ являются симметричными, однако имеют различные электрические свойства: например, величины сопротивления

SrTiO_3 , $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ etc.) and electrodes (Pt, Au, Ag, Al, TiN etc.) props up L. Chua's idea about existence of a fourth basic element in electric electrical circuits [24-38]. This stimulates the interest for investigating the mechanisms causing the switching and memorizing effects in MDM structures. There are various theories and physical models explaining the mechanisms of resistance switching in such devices. The most famous ones include models of conduction and mechanisms of forming and rupturing conductive filaments inside the active layer [38, 39], modulation of the Schottky barrier [40,

Таблица 2. Характеристики оксидных пленок

Table 2. Characteristics of oxide films

	Al_2O_3	TiO_2
Показатель преломления Refractive index	1,60–1,63	2,35–2,45
Скорость роста, Å/цикл Growth rate, Å/cycle	1,1–1,3	0,50–0,65

структур после изготовления отличаются на семь порядков. Здесь и далее измерение сопротивления производилось при подаче небольшого (0,1 В) постоянного напряжения. Подразумевается, что в этом случае не происходит заметного изменения свойств исследуемых структур. Возможная причина столь заметного различия величин сопротивления многослойных структур может быть связана с особенностями технологий их получения, в частности, с различной продолжительностью теплового воздействия во время синтеза пленок (температура подложки 200°C) и возможным влиянием атмосферы при отжиге после нанесения слоев (200°C, 30 с). В первом случае "нижняя" пленка при синтезе находится при повышенной температуре в два раза дольше. При отжиге существенным может оказаться влияние атмосферы на "верхний" слой. Отметим, что в настоящей работе слои отсчитываются от подложки – "снизу вверх".

СТРУКТУРЫ PT/AL₂O₃/TiO₂/PT

ВАХ структур Pt/Al₂O₃/TiO₂/Pt типична для мемристоров и демонстрирует биполярное

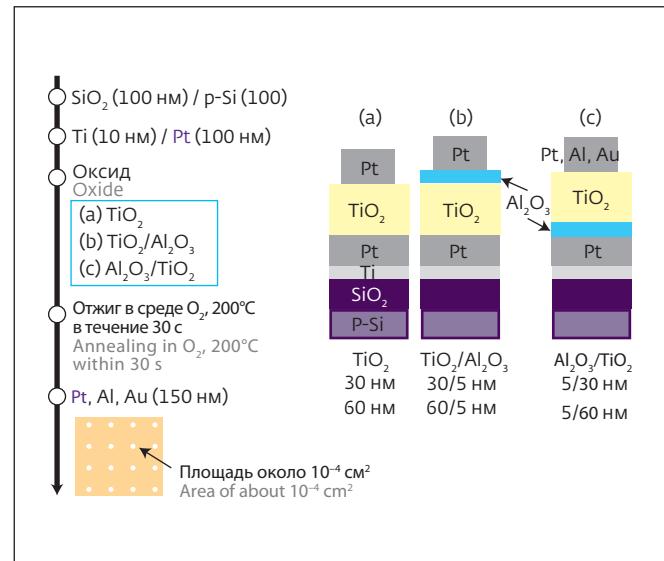


Рис.2. "Технологическая карта" синтеза и полученные на-
норазмерные мемристорные структуры
Fig.2. Synthesis process chart and obtained nanoscale memris-
tor structure

переключение сопротивления между двумя устойчивыми энергонезависимыми состояниями (рис.3а). Именно такое поведение является базовым для создания энергонезависимой резистивной памяти. Устойчивое биполярное переключение сопротивления с отношением $R_{\text{on}}/R_{\text{off}}$ около 10^2 , управляемое небольшим напряжением $\pm 0,8$ В (табл.3), наблюдалось после предварительной двухстадийной электроформовки.

41] associated with the processes of filling and releasing traps [35], based on the Mott-Anderson transitions [36], as well as thermochemical and electrochemical redox reactions [44, 45].

The most popular approaches to understanding the resistance switching mechanisms (both bi- and unipolar processes) are based on the models of forming and rupturing conduction filaments. Usually, they refer to variations in the concentration of oxygen vacancies in the "conduction channels". In fact, the latter is commonplace and recognized by most researchers as the main mechanism causing

the phenomenon of resistance switching in MDM structures. However, disputes arise in the discussion of the "conduction channels" control mechanisms: formation and rupture, changes in the material properties, etc. The discussion becomes even more heated with the seen separation of the effect into bipolar and unipolar switching, depending on the polarity of the used voltage. All of this is further complicated by a possible dependence on the material and thickness of the operational layer (oxide), the size of the counter electrode and other factors. Although many questions remain

unanswered, we can confidently say that both the type and the concentration of point defects within the layer are directly related to the processes of switching.

Besides switching mechanisms, there are a number of other unresolved issues, which prevent highly integrated memory (ReRAM) from becoming widely marketed. They include integration and compatibility with the existing technology, heterogeneity of switching structures, and parametrical instability of memory cells. Particularly noteworthy is the need in most cases to use the electroforming process (using high amplitude impulses

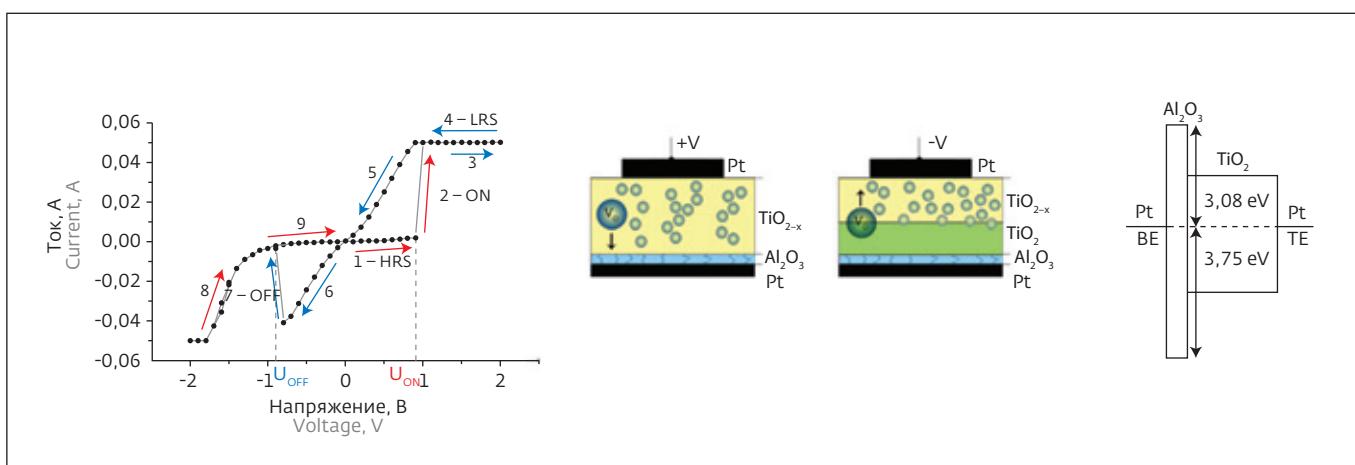


Рис.3. ВАХ системы Pt/Al₂O₃/TiO₂/Pt (а), схематическое изображение механизма переключения: ON (б) и OFF (в), зонная диаграмма структуры (д)

Fig.3. Volt-ampere characteristic of Pt/Al₂O₃/TiO₂/Pt system (a); schematic representation of switching mechanism: ON (b) and OFF (c); band diagram of structure (d)

Сопротивление в высокоомном состоянии (HRS) составляло 2000 Ом, а в низкоомном состоянии (LRS) – 28 Ом.

Мы предполагаем, что первый шаг нетривиального процесса двухстадийной электроформовки связан с необратимым пробоем Al₂O₃-слоя: при приложении положительного напряжения (+5 В) на верхнем Pt-электроде (с ограничением тока 10 мА) ток между электродами резко увеличивался до уровня ограничения, происходило значительное выделение Джоулева тепла и, как следствие, возникал тепловый, необратимый пробой слоя Al₂O₃. Сопротивление при этом изменялось на два

порядка, а система переходила из начального в "промежуточное" состояние.

Второй шаг связан с созданием слоя TiO_{2-x}, обогащенного кислородными вакансиями вблизи верхнего Pt-электрода при подаче на него -2,2 В. Слой вблизи верхнего Pt-электрода обогащается кислородными вакансиями, то есть формируется обедненный по кислороду слой оксида титана TiO_{2-x}. В этом случае система изменяет свое состояние от "промежуточного" до высокоомного (HRS).

Процесс включения (ON) происходит, когда на верхний электрод подается +0,8 В (рис.3б), и система изменяет состояние от HRS до LRS.

and defined polarity), which per se presents a problem, but also related to the parametrical ambiguity of the formed non-volatile memory. Despite the abundance of unresolved problems, the interest in instrumental implementation and optimization of operational structures in memristors using different methods of active medium synthesis (mostly oxides), various configurations of multilayer structures, and various designs of devices remains unabated. This augurs well for the creation of a versatile memory device, which will be non-volatile like flash memory, ensuring fast programming, offering

access speed like in SRAM, high density and low power consumption. If such a versatile memory is producible, then it may replace not only flash, but DRAM too. Hence, it will be used as a versatile carrier, which will ultimately change the principles of computational systems. In summary, we can say that resistive random access memory (ReRAM) is a good candidate for versatile memory.

At the end of this section, we present a table comparing the existing and prospective memory types (Table 1), being aware that the values for the latter are only indicative.

ON THE WAY TO CREATING MEMRISTOR MEMORY

The technology of manufacturing resistive memory structures includes preparation of substrates, deposition of the counter electrode, usually made of metal (Pt, Au, Al,... and TiN), synthesis of the operational layer (most often, of metal oxides) and deposition of the base electrode with a diameter of 100-300 microns. Note that these are experimental samples. Metal layering uses the technology of magnetron sputtering, electron beam evaporation etc. Metal oxides are synthesized using reactive magnetron sputtering and atomic

Таблица 3. Основные параметры переключения системы Pt/Al₂O₃/TiO₂/Pt

Table 3. Main parameters of switch of Pt/Al₂O₃/TiO₂/Pt system

Толщина TiO ₂ , нм Thickness of TiO ₂ , nm	60
Толщина Al ₂ O ₃ , нм Thickness of Al ₂ O ₃ , nm	5
Переключение Switch	Биполярное Bipolar
V _{OFF} /V _{ON} , В	-0,8/0,8
R _{OFF} /R _{ON} , Ом	2000/20

Величина сопротивления изменяется на два порядка: от 2000 до 28 Ом. Противоположное переключение (OFF) и возвращение к HRS (рис.3c) происходит при подаче -0,8 В. В этом типе структур наблюдается устойчивое переключение между двумя состояниями, причем оба демонстрируют эффект энергонезависимой памяти.

СТРУКТУРЫ PT/TIO₂/AL₂O₃/PT

При противоположном расположении слоев TiO₂ и Al₂O₃ сопротивление структур более чем на семь порядков выше. Очевидно, что такую его величину может обеспечить только слой Al₂O₃ (удельное сопротивление 10¹³–10¹⁵ Ом·см, против 10⁴–10⁷ Ом·см для оксида титана). Удельное сопротивление нелегированного анатаза и рутила находится в диапазоне 10⁴–10⁷ Ом·см, но при формировании Ti³⁺ оно уменьшается до 10 Ом·см для анатаза и до 100 Ом·см для рутила [46].

layer deposition (ALD). This synthesis is rather widespread as it creates thin metal oxide films of good quality (a wide range of materials, optimal stoichiometry, uniform thickness, sharp interface layers etc.), while the market offers high-end ALD equipment, for example, TFS 200 produced by the Finnish company Beneq.

Below is the presentation of the results obtained by the authors of this article in the formation of resistive memory elements based on memristor two-layer structures of TiO₂/Al₂O₃ and Al₂O₃/TiO₂, prepared by atomic layer deposition using precursors made of

trimethylaluminum (TMA) and tetrakis (dimethylamino) titanium (TDMAT), and H₂O at the Pt/Ti/SiO₂/Si substrate temperature of 200°C. The titanium oxide (TiO₂) and aluminum oxide (Al₂O₃) films were deposited on the Si/SiO₂ substrate (monocrystalline silicon wafers with thermally grown oxide) with Pt base electrode deposited on the TFS 200 Beneq equipment (Fig.1 and Table 2). After deposition, the samples were annealed in an oxygen atmosphere at a temperature of 200°C for 30 s.

The charts of two-layer structures used in work are shown in

Есть основания полагать, что активный переключающийся слой в этом случае Al₂O₃, а слой TiO₂ выступает в качестве резервуара кислородных вакансий. Такая структура уверенно демонстрирует многоуровневое переключение, причем без предварительного проведения процесса формовки. Это означает, что двухслойная структура данного типа готова к переключению непосредственно после ее синтеза (рис.4a), то есть процесс формовки осуществляется уже на этапе изготовления: синтеза и высокотемпературного отжига. Такая технология является, очевидно, предпочтительной в смысле согласования с "классическими" КМОП-процессами при создании специализированных вычислительных систем.

Процесс набора (SET) для Pt/TiO₂/Al₂O₃/Pt структур происходит при отрицательном напряжении на верхнем электроде, а процесс сброса (RESET) – при положительном напряжении, то есть переключение происходит по часовой стрелке (в то время как в предыдущем случае – против часовой стрелки). Эти циклы устойчиво повторяются с изменениями сопротивления на семь порядков по величине, то есть от 8·10¹² до 6·10⁵ Ом. Уровень переключения зависит от величины напряжения, уменьшающего запоминаемое сопротивление.

Когда отрицательное напряжение прикладывается к верхнему электроду, наблюдается дрейф кислородных вакансий из TiO_{2-x} в Al₂O₃, что обеспечивает смещение зонной диаграммы, приводящее к инжекции носителей заряда (рис.6a).

Fig.2. The SiO₂ layer with a thickness of 100 nm is formed on a substrate of p-type thermally oxidized silicon (100). The titanium adhesion layer with a thickness of 10 nm is deposited on the SiO₂ layer followed by deposition of the platinum base electrode using electron beam evaporation. The counter electrodes Pt are formed by electron beam evaporation using a metal mask. The area of counter electrodes is 10⁻⁴ cm².

The sequential arrangement of aluminum oxide and titanium layers was varied in the pursuit of the research goal. It was assumed that this would extend

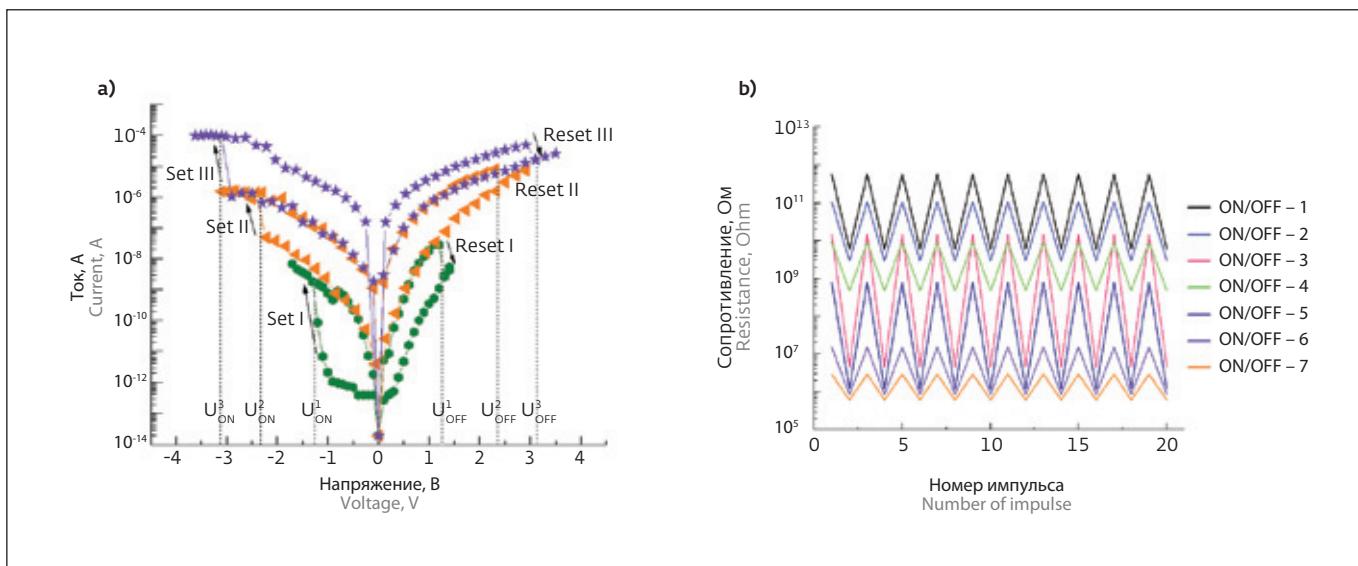


Рис.4. ВАХ в полулогарифмическом масштабе структуры Pt/TiO₂/Al₂O₃/Pt (а) и многоуровневое переключение сопротивления (б)
Fig.4. Volt-ampere characteristic in semi-logarithmic scale of Pt/TiO₂/Al₂O₃/Pt structure (a) and multilevel resistance switching (b)

Увеличение концентрации кислородных вакансий приводит к увеличению концентрации ловушек (1,5 эВ энергии [47]) в запрещенной зоне Al₂O₃ (рис.5б) и появлению проводимости в Al₂O₃-слое (рис.5а). Концентрация ловушек зависит от приложенного напряжения, именно поэтому мы можем наблюдать появление проводимости и изменения уровня переключения. Прыжковый транспорт по ловушечным центрам объясняет значительный рост проводимости при небольшом изменении потенциала на верхнем электроде.

Зависимость проводимости слоя Al₂O₃ от разности потенциалов между электродами и, как предполагается, от концентрации в нем локализованных состояний (N), определяется механизмом прыжкового транспорта, когда проводимость обусловлена неупругим туннелированием между ближайшими центрами [48, 49]. Очевидно, что в этом случае сопротивление слоя диэлектрика будет определяться сеткой случайных сопротивлений (Абрахамса-Миллера) и в первом приближении перколяционным радиусом $r = 0,085N^{-1/3}$:

the functionality and improve the basic parameters of operational structures with the resistance switching and memorizing effects. Formally, the Pt/TiO₂/Al₂O₃/Pt systems are symmetric, but have different electrical properties: for example, the resistance values of the structures after fabrication differ by seven orders of magnitude. Thereinafter, the resistance was measured using low (0.1 V) DC voltage. It was assumed that this did not significantly change the properties of the examined structures. Such noticeable differences in the resistance values of multilayer

structures could be associated with the their fabrication peculiarities, in particular, with different thermal exposure duration in the synthesis of films (substrate temperature of 200°C) and possibly atmospheric effects during the annealing process after deposition (200°C, 30 s). In the first case, the "lower" film during the synthesis is at an elevated temperature for twice as long. At the time of annealing, the atmospheric effect on the "upper" layer may be significant. Note that in the present work, the layers are counted beginning from the substrate, i.e. from bottom to top.

PT/Al₂O₃/TiO₂/PT STRUCTURES

The VA characteristics of Pt/Al₂O₃/TiO₂/Pt structures are typical for memristors and demonstrate bipolar resistance switching between two stable non-volatile states (Fig.3a). It is the behavior, which is fundamental for creating non-volatile resistive memory. Stable bipolar switching with a resistance ratio R_{on}/R_{off} of about 10², driven by a low voltage of ±0.8 V (Table 3), was observed after preliminary two-stage electroforming. The high resistance state (HRS) was 2000 Ohms, and the low-resistance state (LRS) was 28 Ohms.

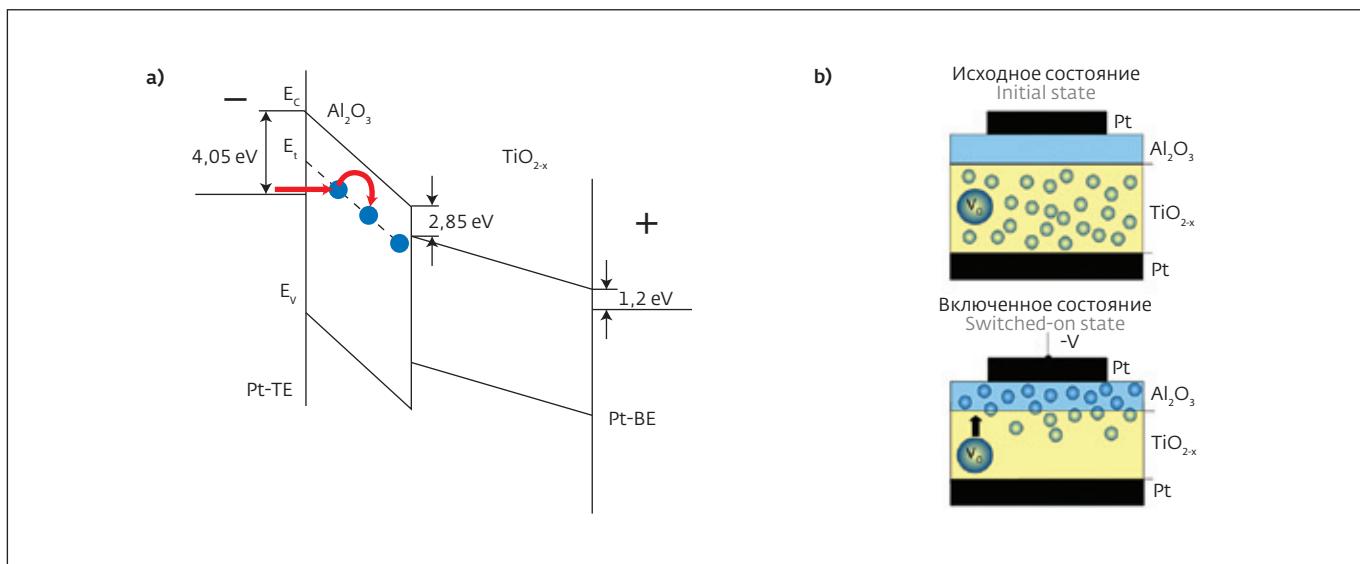


Рис.5. Зонная диаграмма структуры Pt/TiO₂/Al₂O₃/Pt (а) и схема дрейфа кислородных вакансий (б)

Fig.5. Band diagram of Pt/TiO₂/Al₂O₃/Pt structure (a) and scheme of drift of oxygen vacancies (b)

$$\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{1,73}{a N^{1/3}}\right),$$

где $a = \varepsilon \frac{h^2}{m^* e^2}$ – боровский радиус. Инжекция в объем может осуществляться туннелированием по механизму Фаулера-Нордгейма или термоэлектронной эмиссией и термостимулированным туннелированием. Термостимулированное туннелирование доминирует в средних полях и средних температурах, когда тепловая энергия недоста-

точна, чтобы преодолеть потенциальный барьер на контакте.

ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА МЕМРИСТОРНОЙ НЕЙРОМОРФНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Используя двухслойные МДМ-системы Pt/TiO₂/Al₂O₃/Pt и Pt/Al₂O₃/TiO₂/Pt с заметно различающимися свойствами, получены мемристивные структуры с устойчивым биполярным переключением. Предложенный механизм переключения открывает перспективы разработки

We assume that the first step of the non-trivial two-stage electro-forming process is associated with the irreversible disruption of the Al₂O₃-layer: when a positive voltage (+5 V) was applied to the counter Pt-electrode (with a current limit of 10 mA), the current between the electrodes sharply increased to the limit with a significant emission of Joule heat, subsequently causing an irreversible heat disruption in the Al₂O₃ layer. The resistance changed by two orders of magnitude, and the system switched from the initial to "interim" state.

The second step is creation of a TiO_{2-x} layer enriched with

oxygen vacancies near the counter Pt-electrode with -2.2 V applied to it. The layer near the counter Pt-electrode is enriched with oxygen vacancies, i.e. it forms an oxygen-depleted titanium oxide layer TiO_{2-x}. In this case, the system changes its state from the "interim" to high resistance (HRS).

The switching-on process (ON) occurs when the counter electrode receives +0.8 V (Fig.3b), and the system changes from HRS to LRS. The resistance value is changed by two orders of magnitude: from 2000 Ohms to 28 Ohms. The opposite switching (OFF) and return to HRS (Fig.3c) occurs at 0.8 V. This

type of structures is characterized by a steady switching between two states, wherein both the states demonstrate a non-volatile memory effect.

PT/TIO₂/AL₂O₃/PT STRUCTURES

With the opposite arrangement of TiO₂ and Al₂O₃ layers, the resistance of structures is higher by more than seven orders of magnitude. It is clear that this value can only be attained by using an Al₂O₃ layer (its specific resistance is 10¹³–10¹⁵ Ohm·cm in contrast to 10⁴–10⁷ Ohm·cm for titanium oxide). The specific resistance of undoped anatase and rutile are in the range



многоуровневых систем на основе многослойных структур. Создание современной элементной базы микро- и наноэлектроники, основанной на новых физических принципах, открывает неограниченные перспективы повышения параметров устройств энергонезависимой памяти и разработки аналоговых вычислительных систем, в том числе нейроморфных.

Конечной целью создания нового энергонезависимого устройства памяти – мемристора, функционирование которого основано на изменении (переключении) сопротивления, – является формирование систем, обеспечивающих ранее недостижимые параметры и возможности:

- энергонезависимость и энергоэффективность (хранение в памяти не заряда, а состояния, соответствующего определенной проводимости);
- многоуровневость логических состояний (хранение в одной ячейке памяти более одного бита информации);
- сверхвысокая плотность записи информации (многослойная трехуровневая композиция с минимальным энерговыделением);
- сверхвысокая скорость обмена данными (интеграция оперативной и долговременной памяти);
- неограниченное время хранения информации ("хранение" не заряда, а уровня сопротивления).

Совокупность вышеуказанных функциональных возможностей определила перспективы так называемой нейроморфной мемристорной компьютерной платформы, характеризующейся следующими основными особенностями:

- ОЗУ на мемристорных ячейках памяти (кроссбарах);
- оптическая система коммутации функциональных модулей;
- новая компьютерная архитектура и технология вычислений, включая:
 - интеграцию оперативной и долговременной памяти и новую технологию их обмена,
 - архитектуру, в которой память играет ключевую роль в выполнении вычислений,
 - новую технологию хранения данных;
- новая операционная система.

Основным исполнителем данного проекта, получившего название "Machine", является лаборатория LAB8 фирмы HP. Значительная роль в его реализации отводится фирме Sandisk, которая взяла на себя разработку технологии SCM (Storage Class Memory) с целью построения системы по принципу Memory Driving Computing. Среди разработчиков программного обеспечения, ориентированного на нейроморфную мемристорную компьютерную платформу, следует отметить Бостонский университет, который создает специализированное программное обеспечение MONETA (Modular Neural Exploring Traveling Agent) для мемристорной памяти с целью имитации элементов функциональной деятельности мозга млекопитающих. В рамках эволюции компьютерных платформ, безусловно, важное место занимает европейский проект "The EU Human Brain Project" в рамках программы Horizon 2020. Значительную роль в его реализации занимают нейроморфные физические модели (например, 20-уровневая нейронная искусственная

of 10^4 – 10^7 Ohm·cm, but with the formation of Ti^{3+} , it is reduced to 10 Ohm·cm for anatase and 100 Ohm·cm for rutile [46].

It is reasonable to believe that the active switching layer in this case is Al_2O_3 , and the TiO_2 layer acts as a reservoir for oxygen vacancies. This structure stably demonstrates multi-level switching effect without a preformation process. It means that the two-layer structure of this type is ready for switching right after it is synthesized (Fig.4a). In other words, the formation process is accomplished at the stage of fabrication, i.e. synthesis and high-temperature annealing. This

technology is obviously advantageous in terms of matching with the "classic" CMOS processes for creation of specialized computing systems.

The set process (SET) for the $Pt/TiO_2/Al_2O_3/Pt$ structures occurs at a negative voltage applied to counter electrode, and the reset process (RESET) is at a positive voltage, i.e. switching occurs in the clockwise direction, (whereas in the previous case, it was counter-clockwise). These cycles are stably reproduced with resistance change by seven orders of magnitude, i.e. from $8 \cdot 10^{12}$ to $6 \cdot 10^5$ Ohms. The switching level depends on

the voltage that reduces the memorized resistance.

When negative voltage is applied to the counter electrode, oxygen vacancies drift from TiO_{2-x} to Al_2O_3 , thus causing a band diagram displacement resulting in the injection of charge carriers (Fig.6a).

The increase in the concentration of oxygen vacancies increases the concentration of traps (1.5 eV energy [47]) in the Al_2O_3 bandgap (Fig.5b) and results in emergence of conductivity in Al_2O_3 -layer (Fig.5a). The concentration of traps depends on the applied voltage. Therefore, we can observe the emergence of conductivity and change

сеть с базовым уровнем 4 млн. нейронов и 1 млрд синапсов) и компьютерные кластеры (4Tflop/s).

В качестве основных информационно-коммуникационных платформ, ориентированных на нейроморфные компьютерные среды с различной конструкторско-технологической реализацией, определены:

- нейроинформационная платформа;
- медицинская информационная платформа;
- платформа для моделирования мозга;
- платформа высокопроизводительных вычислений;
- нейроморфная вычислительная платформа;
- нейробототехническая платформа.

Представленные экспериментальные результаты [50, 51] по созданию мемристорных структур как основы новой нейроморфной компьютерной платформы получены авторами данной статьи, представляющими NIMS (Национальный институт материаловедения, Япония) и Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ("ЛЭТИ") в рамках реализации международного проекта "Управляемый синтез мемристорных структур на основе наноразмерных композиций оксидов металлов путем осаждения атомных слоев" (работа выполнялась в рамках проекта 14.584.21.0005, финансируемого Минобрнауки РФ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Костылев С. А., Шкут В. А. Электронное переключение в аморфных полупроводниках. - Киев: Наукова думка, 1978. 203 с.

2. Казакова Л.П., Лебедев Э.А., Сморгонская Э.А. и др. / Отв. ред. К.Д.Цэндин. - СПб.: Наука, 1996. 486 с.
3. Yamada N., Ohno E., Nishiuchi K. et al. Rapid phase transitions of GeTe-Sb₂Te₃ pseudobinary amorphous thin films for an optical disk memory // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 69. No. 5. PP. 2849–2856.
4. Bruns G., Merkelbach P., Schlockermann C. et al. Nanosecond switching in GeTe phase change memory cells // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 95. 043108.
5. Burr G.W., Breitwisch M.J., Franceschini M. et al. Phase change memory technology // J. Vac. Sci. Technol. B. 2010. Vol. 28/ No. 2. PP. 223–262.
6. Lai S. Current status of the phase change memory and its future // IEDM Tech.Dig. 2003. 10.1. PP. 255–258.
7. Chen Y.-C., Rettner C.T., Raoux S. et al. Ultra-Thin Phase-Change Bridge Memory Device Using GeSb // IEDM Technical Digest. 2006. S30P3.
8. Choi Y., Song I., Park M-H. et al. A 20nm 1.8V 8Gb PRAM with 40MB/s Program Bandwidth // IEEE International Solid-State Circuits Conference. 2012.
9. Wong H.-S.P., Raoux S., Kim S., Liang J., Reifenberg J.P., Rajendran B., Asheghi M., Kenneth E. Goodson "Phase change memory", Proceedings of IEEE Vol. 98. No. 12. 2010.
10. Pellizzer F., Benvenuti A., Gleixner B., Kim Y., Johnson B., Magistretti M., Marangon T., Pirovano A., Bez R., Atwood G. Symp. VLSI Technology, 2006. C. 150.

in switching levels. The hopping transport in trap centers explains the significant conductivity rise with a small change in the potential on the counter electrode.

The dependence of the Al₂O₃-layer conductivity on the difference of potentials between the electrodes and, as assumed, on the concentration of localized states (N) is determined by the hopping transport mechanism, when the conductivity is subject to inelastic tunneling between the closest centers [48, 49]. It is obvious that the dielectric layer resistance in this case is determined by a grid of random resistances (Abrahams-Miller) and, to a

first approximation, by the percolation radius $r = 0,085 N^{1/3}$:

$$\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{1,73}{aN^{1/3}}\right),$$

where $a = \frac{\hbar^2}{m^* e^2}$ is the Bohr radius. The injection into the volume can be carried out by tunneling through the Fowler-Nordheim mechanism or thermionic emission and thermally stimulated tunneling. Thermally stimulated tunneling dominates under medium fields and medium temperatures, when the thermal energy is insufficient to overcome the potential barrier at the contact.

ELECTRONIC COMPONENTS OF A MEMRISTOR NEUROMORPHIC PLATFORM

Two-layer MDM systems of Pt/TiO₂/Al₂O₃/Pt and Pt/Al₂O₃/TiO₂/Pt with considerably distinct properties helped to obtain memristor structures with stable bipolar switching. The proposed switching mechanism opens up prospects for designing multi-level systems based on multilayer structures. The creation of modern micro- and nanoelectronic elements based on new physical principles opens up unlimited prospects for improving the parameters of non-volatile



11. Boniardi M., Redaelli A., Pirovano A., Tortorelli I., Ielmini D., Pellizzer F. A physicsbased model of electrical conduction decrease with time in amorphous Ge₂Sb₂Te₅, Journal of Applied Physics. 2009. Vol. 105. № 8. PP. 084506.
12. Bae B.-J., Kim S., Zhang Y., Kim Y., Baek I.-G., Park S., Yeo I.-S., Choi S., Moon J.-T., Wong H.-S.P., Kim K. 1D thickness scaling study of phase change material (Ge₂Sb₂Te₅) using a pseudo 3-terminal device, in Proc. IEEE International Electron Devices Meeting, pp. 93–96, 2009.
13. Celii F., Thakre M., Gay M., Summerfelt S. Plasma Etch Processes for Embedded FRAM Integration // Integr. Ferroelectr. 2003. V. 53. P. 269–277.
14. Lee S., Noh K., Kang H., Hong S., Yeom S., Park Y. Characterization of Hynix 16M Feram Adopted Novel Sensing Scheme // Integr. Ferroelectr. 2003. V. 53. P. 343–351.
15. Fujii E., Uchiyama K. First 0,18 μm SBT-Based Embedded FeRAM Technology with Hydrogen Damage Free Stacked Cell Structure // Integr. Ferroelectr. 2003. V. 53. P. 317–323.
16. Kim K., Song Y. Current and Future High Density FRAM Technology // Integr. Ferroelectr. 2004. V. 61. P. 3–15.
17. Fujitsu Semiconductor Memory Manual. FRAM Guide Book / FUJITSU LIMITED Electronic Devices. Japan., 2005.
18. Scott J.F. New developments on FRAMs: 3D structures and all-perovskite FETs // Mat. Science and Eng. B. 2005. V. 120. P. 6–12.
19. Kenji Maruyama. New Ferroelectric Material for Embedded FRAM LSIs – Fujitsu // FUJITSU J. Sci. Tech. 2007. V. 43. №. 4. P. 37–42.
20. Chua L.O. Resistance switching memories are memristors, Appl. Phys. A. 2011. No. 102. PP. 765783.
21. Chua L.O. Circuit Theory. – IEEE Trans. 1971. No. CT 18. PP. 507.
22. Chua L.O., Kang S.M. Proc. – IEEE. 1976. No. 64. PP. 209.
23. Strykov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. Nature. 2008. No. 453. PP. 8083.
24. Lin C.Y., Wu C.Y., Lee T.C., Yang F.L., Hu C., Tseng T.Y. IEEE Electron Device Lett. No. 28. PP. 366.
25. Liu Q., Long S., Wang W., Zuo Q., Zhang S., Chen J., Liu M. IEEE Electron Device Lett. 2009. No. 30. PP. 1335.
26. Lin C.Y., Wu C.Y., Tseng T.Y., Hu C. J. Appl. Phys. No. 102. PP. 094101, 2007.
27. Wang S.Y., Lee D.Y., Tseng T.Y., Lin C.Y. Appl. Phys. Lett. 2009. No. 95. PP. 112904.
28. Wu M.C., Lin Y.W., Jang W.Y., Lin C.H., Tseng T.Y. IEEE Electron Device Lett. 2011. No. 32. PP. 1026.
29. Panda D., Dhar A., Ray S.K. IEEE Trans. Nanotechnol. 2011. No. 11. PP. 51.
30. Kim K.M., Choi B.J., Jeong D.S., Hwang C.S., Hun S. Appl. Phys. Lett. 2006. No. 89. PP. 162912.
31. Choi B.J., Choi S., Kim K.M., Shin Y.C., Hwang C.S., Hwang S.Y., Cho S.S., Park S., Hong S.K. Appl. Phys. Lett. 2006. No. 89. PP. 012906.
32. Sawa A., Fujii T., Kawasaki M., Tokura Y. Appl. Phys. Lett. 2004. No. 85. PP. 4073.

memory devices and developing analogous computing systems, including neuromorphic ones.

The ultimate goal of creating a new non-volatile memory device, or memristor, which functions based on resistance change (switching), is to develop systems that provide earlier unattainable parameters and features:

- energy independence and energy efficiency (storage in the memory of a state corresponding to a particular conductivity rather than a charge);
- multi-level logical states (storage in a single memory cell of more than one bit of data);

- ultra-high density recording of information (multilayer three-level arrangement with minimum energy emission);
- ultra-high speed data exchange (integration of operational and long-term memories);
- unlimited information storage time ("storing" a resistance level rather than a charge).

The combination of the above functionalities has outlined the prospects for the so-called neuromorphic memristor computing platform with the following main features:

- RAM with memristor memory cells (crossbars);
- optical switching system of functional modules;

- new computing architecture and technology, including:
 - integration of operational and long-term memories and new technology of data exchange;
 - architecture, where the memory plays a key role in performing calculations;
 - new data storage technology;
 - new operating system.

The main executor of this project titled Machine is HP's LAB8 laboratory. A significant role in its implementation is played by Sandisk, which took over the development of SCM (Storage Class Memory)

33. Lin M.H., Wu M.C., Lin C.H., Tseng T.Y. *J. Appl. Phys.* 2010. No. 107. PP. 12411.
34. Lin M.H., Wu M.C., Lin C.H., Tseng T.Y. *IEEE Trans. Electron Device.* 2010. No. 57. PP. 1801.
35. Xu N., Liu L.F., Sun X., Wang Y., Han D.D., Liu X.Y., Han R.Q., Kang J.F., Yu B. *Semicond. Sci. Technol.* 2008. No. 23. PP. 075019.
36. Chen M.C., Chang T.C., Tsai C.T., Hung S.Y., Chen S.C., Hu C.W., Simon M.C., Tsai M.J. *Appl. Phys. Lett.* 2010. No. 96. PP. 262110.
37. Panda D., Dhar A., Ray S.K. *J. Appl. Phys.* 2010. No. 108. PP. 104513.
38. Ielmini D., Nardi F., Cagli. *Nanotechnology.* 2011. No. 22. PP. 254022.
39. Zhirnov V.V., Reade R., Cavin R.K., Sandhu G. *Nanotechnology.* 2011. No. 22. PP. 254027.
40. Kim D.C., Seo S., Ahn S.E., Suh D.S., Lee M.J., Park B.H., Yoo I.K., Baek I.G., Kim H.J., Yim E.K., Lee J.E., Park S.O., Kim H.S., Chung U.In., Moon J.T., Ryu B.I. *Appl. Phys. Lett.* 2006. No. 88. PP. 202102.
41. Lee S.B., Lee J.S., Chang S.H., Yoo H.K., Kang B.S., Kahng B., Lee M.J., Kim C.J., Noh T.W. *Appl. Phys. Lett.* 2011. No. 98. PP. 033502.
42. Hur J.H., Lee M.J., Lee C.B., Kim Y.B., Kim C.J. *Phys. Rev. B.* 2010. No. 82. PP. 15532.
43. Wuttig N.Y. *Nature Mater.* 2007. No. 6. PP. 824.
44. Waser R. *Electrochemical and thermochemical memories.* – IEEE International Electron Devices Meeting, Tech. Dig. 2008. PP. 289292.
45. Waser R., Aono M. *Nanoionics-based resistive switching memories* // *NatureMater.* 2007. No. 6. PP. 833840.
46. Tang H., Prasad K., Sanjines R., Schmid P.E., Levy F. *Electrical and optical properties of TiO₂ anatase thin films* // *Journal of Applied Physics.* 1994. V. 75. № 4. P. 2042–2047.
47. Nasyrov K.A., Gritsenko V.A. *Phys. Usp.* 2013. V. 183, № 10. P. 1099.
48. Hopping transport in solids (eds. M. Pollak, B. Shklovskii). North-Holland, 1991.
49. Shklovskii B.I., Efros A.L. *Electronic Properties of Doped Semiconductors* (Berlin: Springer-Verlag, 1984) Translated from Russian: Elektronnnye Svoistva Legirovannykh Poluprovodnikov. – Moscow: Nauka, 1979.
50. Alekseeva L., Chigirev D., Chikyow T., Nabatame T., Osachev E., Petrov A., Romanov A. Resistive switching and memory effects in metal oxide thin films grown by atomic-layer deposition, INC 11 Japan NanoDay, Hilton Fukuoka Sea Hawk, Fukuoka, Japan, May 11–13, 2015.
51. Alekseeva L., Petrov A., Romanov A., Chikyow T., Nabatame T., Chigirev D., Osachev E. Resistive Switching and Memory Effects in BE-Pt/Al₂O₃/TiO₂/Pt-TE and BE-Pt/TiO₂/Al₂O₃/Pt-TE Systems Fabricated by Atomic Layer Deposition, Dielectric thin films for future electron devices (Science and technology) IWDTF-2015, November 2–4, 2015, Miraikan, National Museum of Emerging Science and Innovation, Tokyo, Japan, pp. 65–66.

technology with the aim of building a system of Memory-Driven Computing. Among software developers of memristor-based neuromorphic computing platform, we should note Boston University, which creates specialized software called MONETA (Modular Neural Exploring Traveling Agent) for memristor memory to simulate some elements of the mammalian brain functional activity. An important place within the evolution of computer platforms is occupied by The EU Human Brain Project realized under the Horizon 2020 program. Neuromorphic physical models (for example, 20-level artificial

neural network with a basic level of 4 million neurons and 1 billion synapses) and computer clusters (4Tflop/s) play a significant role in its implementation.

The major information and communication platforms for neuromorphic computing environments with various designs and technological embodiments are:

- neuroinformation platform;
- medical information platform;
- brain modeling platform;
- high-performance computing platform;
- neuromorphic computing platform;
- neurorobotics platform.

The illustrated experimental results [50, 51] of creating memristor structures as the basis for a new neuromorphic computing platform were worked out by the authors of this article, who represent the NIMS (National Institute for Materials Science, Japan) and St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI) in the framework of the international project "Controlled synthesis of memristor structures based on nanoscale compositions of metal oxides by atomic layer deposition" (the work was carried out under Project 14.584.21.0005 funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation). ■