

УДК 621.382: 539.292

В.П. Блощицкий¹, С.Ю. Ларкин (канд. техн. наук)²,
М.А. Белоголовский (канд. физ.-мат. наук)³

1) ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк,
кафедра автоматизированных систем управления

2) Научно-производственный концерн «Наука», г. Киев

3) Государственный научно-исследовательский центр «Фонон», г. Киев

E-mail: bvp@asu.donntu.edu.ua, nauka_concern@ukr.net, fonon@ukr.net

НАНОРАЗМЕРНЫЕ РЕЗИСТИВНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ КОНТАКТОВ ПРОВОДНИКА СО СЛОЖНЫМ ОКСИДОМ ПЕРЕХОДНОГО МЕТАЛЛА

На примере двухуровневого переключателя проанализирована термодинамика процесса записи физической информации в элементарном устройстве памяти. Показано, что эти процессы являются существенно неравновесными и сопровождаются ростом энтропии системы. Приведены новые экспериментальные данные, доказывающие, что резистивные переключения в контактах металла со сложными оксидами являются результатом электромиграции кислородных вакансий в наноразмерной окрестности границы раздела двух электродов. Предложен новый метод считывания информации в таких устройствах, который позволяет значительно увеличить количество допустимых (без перезаписи) операций и существенно снизить энергопотребление.

Ключевые слова: информация, резистивная память, контакт металла со сложным оксидом, эффект электромиграции, вольт-амперные характеристики.

Общая постановка проблемы

Запись, чтение и удаление информации в современных вычислительных устройствах основаны на чисто физических явлениях и поэтому могут и должны рассматриваться с точки зрения термодинамики соответствующих физических процессов. Впервые такой подход был предложен Ландауэром в работе [1], где он показал, что удаление одного бита информации ведет к диссипации энергии, равной, по крайней мере, $k_B T \ln 2$, где k_B - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, при которой выполняются вычисления. В настоящей работе на примере простейшей двухуровневой системы мы последовательно рассмотрим процесс записи информации и покажем, что в любом случае он требует дополнительной энергии и сопровождается ростом энтропии системы. Далее, в качестве примера подобной системы мы рассмотрим контакт металлического электрода со сложным оксидом переходного металла. Нами было установлено [2], что сопротивление таких структур может принимать два дискретных значения, т.е. они могут служить примером элементарной двухуровневой системы, в которой бинарная информация может быть закодирована в виде «0» (высокое сопротивление) и «1» (низкое сопротивление). Ниже мы приводим дополнительные экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что резистивные переключения в обсуждаемых контактах являются результатом миграции кислородных вакансий в наноразмерной окрестности границы раздела двух электродов под действием внешнего электрического поля.

Наконец, в заключение мы предлагаем новый метод чтения информации в таких устройствах, который позволяет значительно увеличить количество допустимых (без перезаписи) считываний, расширить возможный температурный диапазон и существенно снизить энергопотребление.

Процесс записи информации в двухуровневом переключающем устройстве

Предположим, что устройство памяти представляет собой систему, в которой два состояния с энергиями E_1 и E_2 разделены потенциальным барьером высотой H . Кроме того, окружающая ее среда имеет температуру T . Тогда в соответствии с правилом Крамера вероятность преодолеть этот барьер будет определяться соотношениями $w_{1 \rightarrow 2} \propto \nu \exp((H - E_1)/(k_B T))$ и $w_{2 \rightarrow 1} \propto \nu \exp((H - E_2)/(k_B T))$, где ν - частота попыток системы преодолеть барьер. Введем вероятность p того, что в данный момент система находится в состоянии 0. Тогда имеем следующее дифференциальное уравнение

$$\frac{dp(t)}{dt} = -w_{1 \rightarrow 2} p(t) + w_{2 \rightarrow 1} (1 - p(t)) \quad (1)$$

с коэффициентами, которые удовлетворяют уравнению баланса $w_{1 \rightarrow 2} / w_{2 \rightarrow 1} = \exp(-\Delta E / k_B T)$, где $\Delta E = E_1 - E_2$. В соответствии со стандартным выражением термодинамическая энтропия такой системы в каждый момент времени будет определяться как $S(p) = -k_B (p \ln p + (1 - p) \ln(1 - p))$, а выделяемое при этом в единицу времени тепло $dQ(t) / dt$ будет равным

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dp(t)}{dt} \Delta E \quad (2)$$

Запись определенной информации, например, перемещение системы из состояния 1 в состояние 2 осуществляется путем увеличения энергии E_1 при неизменной величине E_2 . В этом случае вероятность $w_{1 \rightarrow 2}$ становится близкой к единице. Как видно из предыдущей формулы, это приведет к выделению некоторого количества тепла. При этом потеря энергии системы должна быть компенсирована за счет внешнего источника энергии, ее питающего.

Приведенные соображения указывают на важность анализа тепловых процессов в устройствах памяти, в особенности, в тех из них, чей отклик зависит от динамической истории системы [3]. К таким объектам относятся, в частности, элементы резистивной памяти с произвольным доступом, работа которых основана на электромиграции кислородных вакансий в окрестности границы раздела металлического электрода с оксидом переходного металла. В основополагающей работе 2008 года [4] для создания двухуровневого переключающего устройства было предложено использовать наноразмерные пленки бинарных соединений переходных металлов (в частности, диоксида титана) внутри двух металлических слоев. В нашей статье [2] мы обратили внимание на то, что для реализации бистабильного электронного переключения можно использовать не трех-, а двухслойные контакты проводника с четырехкомпонентными оксидами переходных металлов.

Особенность таких материалов заключается в том, что при изменении содержания кислорода меняется валентное состояние атомов, поставляющих электроны в подсистему носителей тока. Например, в иттрий-бариевом купрате $YBa_2Cu_3O_{7-c}$ (YBCO) в случае дефицита кислорода ($c > 0$) валентность ионов меди уменьшается от +2 до +1, что приводит к изменению концентрации носителей тока. Помимо этого, вместе с уменьшением содержания кислорода от O_7 до O_6 увеличиваются размеры элементарной ячейки вдоль оси C кристаллической структуры данного материала. Результатом воздействия этих двух факторов является резко нелинейный рост удельного сопротивления ρ соединения $YBa_2Cu_3O_{7-c}$ с увеличением относительного числа кислородных вакансий c . Существенное влияние дефектности кислородной подрешетки сложных оксидов переходных металлов на транспортные характеристики гетероконтактов на их

основе приводит к двухзначной зависимости тока I от поданного на контакт напряжения V , обнаруженная в работе [2].

Именно гистерезисный характер вольт-амперных кривых подобных гетероструктур и является основным физическим механизмом, который позволяет использовать их в качестве наноразмерных резистивных переключателей, а в будущем - и в качестве базовых элементов электронных систем многоуровневой логики [3].

Биполярные и униполярные переключения в контактах металлического электрода с пленками иттрий-бариевого купрата

Пленки иттрий-бариевого купрата $YBa_2Cu_3O_{7-c}$, выращенные вдоль оси C , были основным объектом исследования в работе [2]. В контактах, образованных такими пленками с металлическим электродом, возникает приповерхностный слой, обедненный кислородом. Этот факт известен уже более двадцати лет и связывается с сильной деградацией приповерхностной области купрата из-за потери кислорода [5]. Внешний переменный ток с достаточно большим периодом, пропускаемый сквозь пленку купрата, воздействует на поверхностное распределение кислорода из-за нарушения установившегося в равновесии баланса диффузионного и дрейфового потоков кислородных вакансий. В результате этого пространственное распределение вакансий $c(\mathbf{r}, t)$ будет периодически меняться во времени t в соответствии с изменением вынуждающей силы. Особенность данного процесса состоит в том, что его частота будет отличаться от частоты внешнего тока (или напряжения), поскольку из-за зависимости сопротивления купрата от концентрации кислородных вакансий воздействие внешнего фактора будет приводить к периодическому изменению еще и сопротивления самой пленки. В результате этого в отклике системы на периодическое возмущение появятся слагаемые с частотами, кратными исходной, а измеряемая вольт-амперная характеристика будет иметь двухзначный характер подобно фигурам Лиссажу, которые возникают при одновременном движении точки в двух взаимно перпендикулярных направлениях с разными частотами. Такие биполярные $I-V$ кривые, одна из которых приведена на рис. 1а, характерны для мемристоров, новых электронных устройств с меняющимся во времени сопротивлением [3,4]. Одной из целей данной работы было создание униполярных устройств, в которых двухзначность вольт-амперных характеристик возникала бы только при одной полярности напряжения.

Согласно литературным данным [6] при комнатных температурах коэффициент диффузии D кислородных вакансий в пленках YBCO, выращенных в направлении оси C , равен примерно $10^{-17} - 10^{-18}$ см²/с. При этом путь, который проходит вакансия за характерное время t порядка периода переменного тока ($\sim 10^3$ с) равен \sqrt{Dt} , т.е. составляет величину, равную примерно одному нанометру. Если учесть, что размеры активной области, определяющей эффект переключений, порядка десятков нанометров [2], то понятно, что роль диффузионных процессов в C -ориентированных пленках YBCO пренебрежимо мала. Однако, как известно, коэффициент диффузии кислородных вакансий $D = D_0 \exp(-U/k_B T)$ в иттрий-бариевом купрате существенно зависит от кристаллографического направления, поскольку сам кристалл является слоистой структурой с параметрами D_0 и U , значения которых в кристаллографической плоскости ab и вдоль оси C радикально отличаются друг от друга. Как показывает эксперимент, отношение D_{ab}/D_c обычно намного превосходит 10^3 . Тогда для плоскости ab характерное расстояние, на которое перемещается вакансия за время полупериода поданного на контакт тока, составит не менее 100 нанометров и будет превосходить размеры той области, которая определяет отличие сопротивлений двух резистивных состояний. Поэтому для зарядового транспорта в ab -плоскости можно ожидать, что после переключения из высоко- в

низкорезистивное состояние и уменьшения абсолютной величины внешнего электрического поля до нуля система может вернуться к исходному распределению вакансий $c_{in}(x)$ уже при малых (отрицательных по знаку) напряжениях. Более того, само это распределение должно радикально отличаться от такового для транспорта вдоль оси C , поскольку из-за высокой подвижности ионов кислорода в плоскости ab концентрация вакансий $c_{in}(x)$ должна существенно превышать ее величину для контакта вдоль оси C . Другими словами, значения $c_{in}(x)$ должны быть близкими к единице на достаточно больших расстояниях от интерфейса. Это означает, что после возврата в исходное состояние при малых по величине, но отрицательных по знаку напряжениях система будет оставаться в высокорезистивном состоянии и при положительных V . Именно этот результат и был обнаружен нами экспериментально (рис. 1б).

Нами были реализованы планарные контакты YBCO с серебром двух типов: с зарядовым транспортом вдоль оси C купрата (рис. 1а) и в плоскости ab (рис. 1б). В первом случае использовался дополнительный слой диоксида кремния, благодаря которому непосредственный контакт YBCO с серебром осуществлялся исключительно вдоль верхней поверхности оксида, а во втором случае он отсутствовал. Результаты измерений вольт-амперных кривых принципиально отличались друг от друга (рис. 1а и 1б).

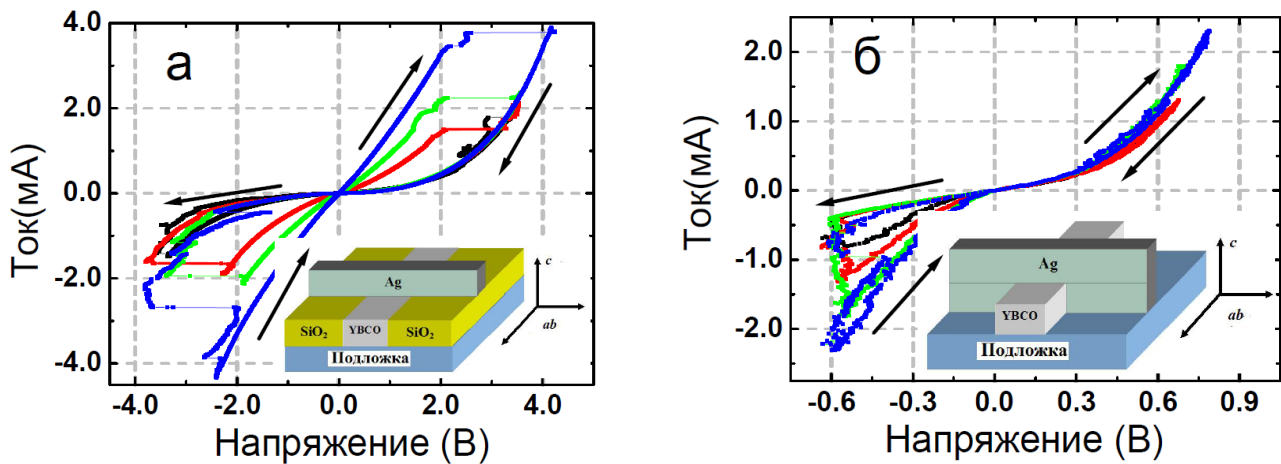


Рисунок 1 — Типичные вольт-амперные характеристики контактов серебра с C -ориентированной пленкой итрий-бариевого купрата, в которых электронный транспорт осуществляется вдоль оси C (а) и в плоскости ab (б); стрелками показаны направления изменения пропускаемого через контакт тока; на вставках схематически изображены исследуемые образцы.

Дальнейшая задача заключалась в создании одномерной математической модели, адекватно описывающей два типа характеристик. Эффект электромиграции кислородных вакансий в сложных оксидах связан с наличием в них двух потоков - дрейфового $J_{drift}(x,t) = c(x,t)\mu q^* E(x,t)$ (прямое воздействие электрического поля $E(x,t)$ на дефект) и диффузионного $J_{dif}(x,t) = -D(dc(x,t)/dx)$ (наличие градиента концентрации вакансий $c(x,t)$), здесь x - координата, t - время, $\mu = D/(k_B T)$ и q^* - подвижность и эффективный заряд кислородных вакансий, D - коэффициент диффузии. Условие сохранения числа вакансий в объеме образца обеспечивается уравнением непрерывности

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial J(x,t)}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

Объединив уравнение (1) с выражением для полного потока $J(x) = J_{\text{drift}}(x) + J_{\text{diff}}(x)$, получим в рамках одномерного приближения следующее нелинейное дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} - D \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial c(x,t)}{\partial x} - \frac{q^*}{k_B T} c(x,t) E(x,t) \right) = 0, \quad (4)$$

которое должно быть решено вместе с соответствующими начальным $c(x, t=0) = c_{\text{in}}(x)$ и граничными условиями.

В нашем эксперименте использовался источник тока, поэтому в геометрии, изображенной на рис. 1а, ток через образец не зависел от координаты и менялся только во времени по синусоидальному закону. В геометрии, изображенной на рис. 1б, ток нарастал вглубь купратной пленки, и его изменение предполагалось линейным. Локальная напряженность внешнего электрического поля рассчитывалась по формуле $E(x,t) = \rho(x,t)I(t)$, где $\rho(x,t)$ - локальное сопротивление образца в пересчете на единицу длины, которое определяется локальной концентрацией кислородных вакансий $c(x,t)$. Что касается последней зависимости, то предполагалось, что она имеет ту же эмпирическую форму, что и для ориентированных вдоль оси C однородных объемных слоев иттрий-бариевого купрата с различным содержанием кислорода, а именно, $\rho(x,t) = \rho_0 \exp[c(x,t)/\bar{c}]$, где параметр $\bar{c} \approx 0.2$, а ρ_0 - удельное электросопротивление [6]. Подчеркнем, что именно эта нелинейная зависимость локальной напряженности электрического поля, действующего на вакансии, от их концентрации в данной точке и приводит к появлению двузначных вольт-амперных кривых (см. рис. 1).

Результаты расчетов для двух экспериментальных ситуаций, изображенных на рис. 1, представлены на рис. 2. Как и в измеренных кривых, в первом случае мы имеем биполярную кривую, известную из предыдущих измерений электрических характеристик контактов Ag/YBCO [2], а во втором – униполярную $I-V$ зависимость, не наблюдавшуюся ранее.

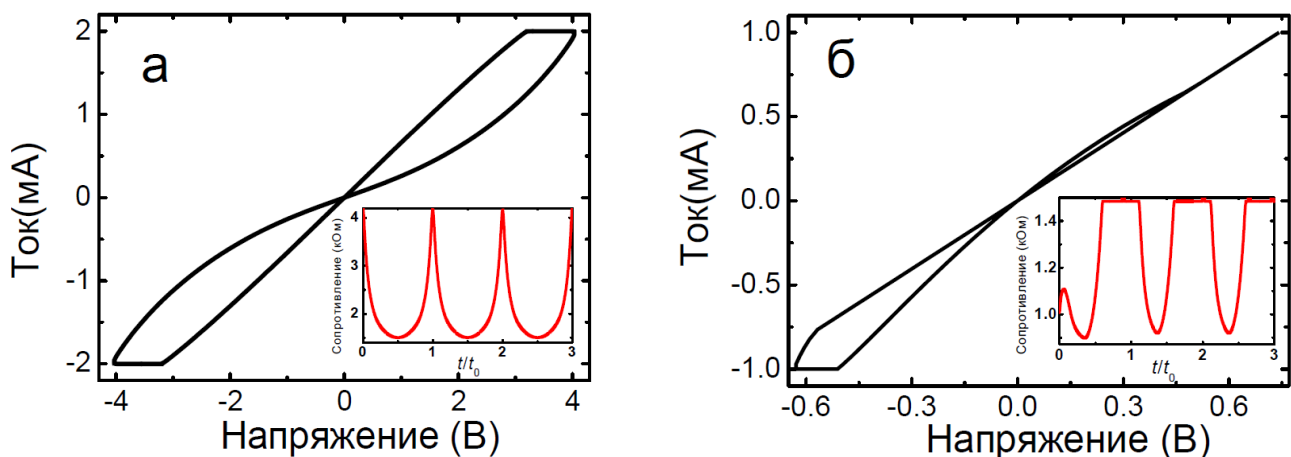


Рисунок 2— Расчетные вольт-амперные характеристики контактов серебра с C -ориентированной пленкой иттрий-бариевого купрата, в которых электронный транспорт осуществляется вдоль оси C (а) и в плоскости ab (б); на вставках показаны зависимости от времени сопротивления контакта, t_0 - период пропускаемого через контакт тока.

Считывание информации в контактах металлического электрода с пленками иттрий-бариевого купрата

Выяснение физической природы эффекта резистивных переключений в контактах обычного металла с оксидами переходных элементов (рис. 1 и 2) позволяет перейти к практическому использованию этого явления в наноэлектронных элементах памяти, чей отклик зависит от динамической истории системы [3]. Наиболее известным устройством такого типа является мемристор, новый пассивный элемент микроэлектроники, способный переключаться из одного резистивного состояния в другое и запоминать свое сопротивление в течение длительного промежутка времени [4].

Внедрению мемристоров в микро- и наноэлектронику препятствует несколько нерешенных проблем. Одна из них заключается в необходимости снизить энергопотребление соответствующей ячейки памяти. Существующий метод считывания информации в мемристоре заключается в подаче на него постоянного напряжения, которое меньше критического значения, инициирующего изменение сопротивления контакта, и определении сопротивления образца путем пропускания через него постоянного электрического тока [7]. Этот метод имеет существенные недостатки, которые состоят (а) в ограниченном количестве циклов считывания сохраненной в мемристоре информации без ее перезаписи, (б) повышенном энергопотреблении при считывании и (в) недостаточном температурном диапазоне, в котором может работать подобная резистивная память с произвольным доступом [7]. Первый недостаток обусловлен возможностью искажения информации, сохраняемой в мемристоре, из-за того, что пропускаемый через него ток меняет размеры той пространственной области, в которой сосредоточены кислородные вакансии, а, значит, и сопротивление контакта металл-оксид, которое и является информативным параметром.

Повышенное энергопотребление возникает из-за большой величины электрического напряжения (порядка вольта), которое нужно подать на мемристор для того, чтобы перезаписать информацию в традиционном подходе [7], а недостаточный температурный интервал связан с существенной зависимостью напряжения, подаваемого на мемристор для записи и/или считывания информации, от температуры [8].

Нами предлагается, во-первых, подавать на мемристор не импульсы напряжения, а импульсы тока, при этом сохраненную в нем информацию определять по величине напряжения на мемристоре и, во-вторых, для считывания информации подавать два импульса тока разной полярности, площади которых меньше площади того тока, который использовался для ее сохранения. Таким образом, для считывания информации мемристор подключают через адресную шину к источнику тока, который генерирует импульс считывания $I_{\text{чит}}(t)$, а потом через другую адресную шину к другому источнику тока, который создает ток поддержки $I_{\text{под}}(t)$ с полярностью, противоположной полярности первого источника.

Заметим, что для обеспечения высокого быстродействия резистивной памяти толщина d активной области оксида должна быть наноразмерной. Действительно, смещение условной границы раздела малой и высокой концентрации кислородных вакансий δw под действием импульса тока $I_{\text{зап}}$ в течение времени $t_{\text{зап}}$ можно оценить как $\delta w = \mu I_{\text{зап}} t_{\text{зап}} r_{\text{н}} / d$, где $r_{\text{н}}$ – сопротивление мемристора в низкорезистивном состоянии. Переключение в состояние с высокой резистивностью происходит при $\delta w \sim d$, следовательно, $t_{\text{зап}} = d^2 / (\mu I_{\text{зап}} r_{\text{н}})$. Оценим, какая толщина оксида d требуется для сокращения продолжительности импульса $t_{\text{зап}}$ до нескольких наносекунд. Пусть $t_{\text{зап}} = 10^{-8}$ с, $I_{\text{зап}} = 10^{-2}$ А, сопротивление $r_{\text{н}} = 1$ Ом, а подвижность вакансий $\mu = 10^{-6}$ м²с⁻¹В⁻¹, тогда $d \cong 10$ нм.

Существенная зависимость I - V кривых от температуры [8] указывает на то, что импульсы напряжения, требуемые для записи информации при определенной температуре, могут оказаться

недостаточными при меньших T . В то же время вариации T не приводит к сколь-нибудь значительному изменению критических токов, меняющих резистивное состояние [8]. Поэтому замена напряжения на ток уменьшает чувствительность предлагаемого устройства к температуре.

Наконец, использование предложенного нами метода позволяет увеличить количество допустимых без перезаписи считываний информации, т.е. измерений сопротивления устройства. Причина заключается в том, что всякое (даже очень кратковременное) протекание электрического тока через мемристор приводит к перераспределению концентрации кислородных вакансий, а, значит, и (пусть очень небольшому) изменению его сопротивления.

Мы предлагаем после импульса считывания подавать на мемристор компенсирующий импульс тока, площадь которого примерно совпадает с площадью импульса считывания, а полярность противоположна полярности последнего. В результате частично нарушенное распределение вакансий будет восстановлено, что позволит существенно увеличить количество возможных считываний информации до момента ее полной потери при сохранении быстродействия резистивной памяти.

Данная работа была выполнена при поддержке Министерства образования и науки Украины в рамках НИР «Разработка систем многоуровневой логики с использованием эффекта электромиграции вакансий в наноразмерных системах».

Выводы

1. Проанализирована термодинамика процесса записи физической информации в двухуровневом устройстве памяти. Показано, что эти процессы являются существенно неравновесными и сопровождаются ростом энтропии системы.

2. На примере иттрий-бариевого купрата предложена и реализована экспериментально конструкция двухслойного униполярного переключателя, основанного на контакте металлического электрода с пленкой сложного оксида.

3. Предложена математическая модель, описывающая двухзначные вольт-амперные характеристики контактов металл – сложный оксид, и новый метод записи и считывания информации в устройствах электронной памяти на основе таких структур.

Список использованной литературы

1. Landauer R. Irreversibility and heat generation in the computing process / R. Landauer // IBM Journal of Research and Development. – 1961. – V. 5, No. 3. – P. 183–191.
2. Resistance switching mechanism in yttrium-based cuprate films / [S. Yu. Larkin, I. V. Boylo, M. A. Belogolovskii *et al.*] // 17th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”, (22-26.06.2009): Proceedings. - Minsk, 2009. – P. 272-273.
3. Pershin Yu. Memory effects in complex materials and nanoscale systems / Yu. Pershin, M. di Ventra // Advances in Physics. – 2011. – V. 60, No. 2. – P. 145 –227.
4. The missing memristor found / [D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart *et al.*] // Nature. – 2008. – V. 453, No. 7191. – P. 80-83.
5. Surface degradation of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ observed by means of contact resistance measurement / [M. Grajcar, A. Plecenik, M. Darula *et al.*] // Solid State Communications. – 1992. - V. 81, No. 2. – P. 191-194.
6. Oxidation kinetics of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films in the presence of atomic oxygen and molecular oxygen by *in-situ* resistivity measurements / [K. Yamamoto, B. M. Lairson, J. C. Bravman *et al.*] // Journal of Applied Physics. – 1991. - V. 69, No. 10. - P. 7189-7201.
7. Sawa A. Resistive switching in transition metal oxides / A. Sawa // Materials Today. – 2008. - V. 11, No. 6. - P. 28-36.

8. Belogolovskii M. A. Inelastic electron tunneling across magnetically active interfaces in cuprate and manganite heterostructures modified by electromigration processes / [M. A. Belogolovskii, Yu. F. Revenko, A. Yu. Gerasimenko *et al.*] // Физика низких температур. - 2002. – Т. 28, № 6. – С. 553-557.

Надійшла до редакції:
22.03.2013

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. Зорі А.А.

В.П. Блощицький, С.Ю. Ларкін, М.О. Білоголовський
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Нанорозмірні резистивні перемикачі на основі контактів провідника зі складним оксидом перехідного металу. На прикладі дворівневого перемикача проаналізована термодинаміка процесу запису фізичної інформації в елементарному пристрою пам'яті. Показано, що ці процеси є суттєво нерівноважними і супроводжуються ростом ентропії системи. Наведено нові експериментальні дані, які доводять, що резистивні перемикання в контактах металу зі складними оксидами є результатом електроміграції кисневих вакансій в нанорозмірній околиці границі розділу двох електродів. Запропоновано новий метод зчитування інформації в таких пристроях, який дозволяє значно збільшити кількість допустимих (без перезапису) операцій та значно знизити енергоспоживання.

Ключові слова: інформація, резистивна пам'ять, контакт металу зі складним оксидом, ефект електроміграції, вольт-амперні характеристики.

V.P. Bloschytskyi, S.Yu. Larkin, M.A. Bilogolovskyi
Donetsk National Technical University

Nano-scale Resistive Switches Based on Contacts of a Conductor with a Transition-Metal Complex Oxide. Information recording process on a two-state physical memory device is analyzed. It is shown that the system has to be driven out of equilibrium, in order to record some information. Resistance changes after applying high current biases to meta-copper oxide $YBa_2Cu_3O_{7-c}$ contacts formed by a sliver counter-electrode and epitaxial C-axis oriented cuprate films are measured. Experimental evidences of a preeminent role played by electrically active oxygen vacancies in the effect are provided. Arguments proving that the resistance switching effect is caused by local modifications of the sample resistivity driven by oxygen-vacancy drift are discussed. A simple mathematical model which accounts for the resistance hysteresis phenomenon in conducting transition-metal oxides is proposed. To validate it, two types of the junctions (i) with a strongly inhomogeneous distribution of oxygen vacancies within a nano-scale poor-conducting region near the metal/oxide interface where the charge transport was restricted to the C-axis direction and (ii) without any great concentration gradient along the C-axis but with a spatially non-uniform current bias have been designed and fabricated. First samples have revealed conventional bipolar switching behavior in the current-voltage curves whereas in the second case we have observed a reentrant switching effect which reveals itself only at a certain bias polarity. Computer simulations qualitatively reproduce the striking difference between the two characteristics. A new method of the data recording in memristors, a new class of random-access memories, is proposed. It is suggested, first, to apply current pulses instead of voltage ones and second, after reading the information to restore the memristor's state with a current pulse of the inverse polarity, the area of which approximately coincides with that of the reading pulse.

Keywords: information, resistive memory, contact metal – complex oxide, electromigration effect, current-voltage characteristics.