

БІЛОГОЛОВСЬКИЙ

Михайло Олександрович –
доктор фізико-математичних
наук, старший науковий
співробітник відділу теорії
динамічних властивостей
складних систем Донецького
фізико-технічного інституту
ім. О.О. Галкіна НАН України,
bel@fti.dn.ua

УДК 539.292:621.382

МЕМРИСТОР – НОВИЙ НАНОРОЗМІРНИЙ ЕЛЕМЕНТ ЕЛЕКТРОННОЇ СХЕМОТЕХНІКИ

У 2008 р. було оголошено про створення мемристора, четвертого базового компонента електронних схем зі здатністю накопичувати інформацію щодо заряду, який пройшов крізь нього. В огляді йдеться про історію цього відкриття, його значущість для подальшого розвитку мікро- і наноелектроніки, фундаментальні аспекти проблеми, а також про внесок українських дослідників у їх розв'язання. Обговорено переваги мемристора порівняно з традиційними елементами електронної схемотехніки та перспективи його практичного застосування.

Ключові слова: мікроелектроніка, резистивні перемикання, електроміграція, кисневі вакансії, комп'ютерна пам'ять, нейроморфні мережі.

Передісторія питання

У 1971 р. американський теоретик-схемотехнік Леон Чуа (L. Chua) ввів поняття мемристора, назву якого було утворено шляхом об'єднання двох слів – *memory* і *resistor*, тобто опір з пам'яттю [1]. Як відомо, електричне коло можна описати чотирма фізичними величинами: двома локальними – силою струму і зарядом та двома диференціальними – магнітним потоком і різницею потенціалів (електричною напругою). Ці чотири характеристики попарно пов'язані одна з одною. Так, опір визначає взаємозв'язок сили струму і напруги, ємність – напруги і заряду, індуктивність – магнітного потоку і сили струму. Відповідно є три базові матеріальні елементи, які реалізують ці взаємозв'язки, – резистор, конденсатор і котушка індуктивності (рис. 1). Не вистачало четвертого базового елемента, який пов'язав би магнітний потік із зарядом. Як показав Л. Чуа, його неможливо скласти із зазначених трьох пасивних елементів, хоча можна змоделювати за допомогою комбінації активних пристроїв, наприклад операційних підсилювачів. Отже, ще до недавнього часу основні електричні схеми було побудовано на трьох пасивних елементах. Щодо четвертого

елемента, то у своїй роботі [1] Л. Чуа лише продемонстрував теоретичну можливість існування мемристора, проте не вказав шляхи його фізичної реалізації.

Створення мемристора

І ось у 2008 р. (через 37 років після пророцтва Л. Чуа) група вчених із компанії Hewlett Packard під керівництвом Стенлі Вільямса (Stanley Williams) оголосили про створення четвертого, «втраченого» елемента [2]. Цей науковий прорив став можливим завдяки появі нових матеріалів і відповідних нанотехнологій. Реалізований у роботі [2] пристрій складається з розташованого між двома надтонкими металевими електродами подвійного шару діоксиду титану завтовшки близько 5 нм, одна частина якого – це TiO_2 стехіометричного складу і є ізолятором, а друга – той самий TiO_2 , але збіднений киснем, і тому провідний. Завдяки дифузії кисню під дією прикладеного електричного поля товщини цих шарів змінюються: залежно від полярності електричної напруги один із них зростає, а другий – зменшується. В результаті залежність струму, що проходить через такий нанорозмірний об'єкт, від прикладеної напруги має двозначний характер, тобто демонструє гістерезис.

Саме наявність гістерезисної кривої в площині струм – напруга при подаванні на електронний пристрій змінного струму або напруги і була, згідно з Л. Чуа [1], одним із основних доказів того, що дослідники мали справу саме з мемристором. Виникнення гістерезису пов'язане з тим, що частота відгуку мемристора відрізняється від частоти зовнішнього струму або поданої напруги f . Ця різниця виникає через те, що мемристорний опір залежить від передісторії. У цьому разі у відгуку на періодичне збурення з'являються доданки з частотами, кратними f вихідній, і вимірювана вольт-амперна характеристика має двозначний характер подібно до фігур Ліссажу, які виникають при одночасному русі точки в двох взаємно перпендикулярних напрямках з різними частотами.

Втім, слід зазначити, що про сам факт наявності неоднозначної залежності струму від напруги в тонких оксидних плівках (зокрема, у діоксиді титану [3]) було відомо ще з 60-х років минулого століття. Згодом, із поступовим зменшенням діаметра металевих провідних ліній, це явище почало становити дедалі більший інтерес для мікроелектроніки. Виявилось, що внаслідок руху іонізованих атомів металу під дією прикладених до нього високих електричних полів (електроміграція) відбувається накопичення вакансій у певному місці мікропровідника, зародження і розвиток там мікропорожнин. Отже, електроміграція є деструктивним чинником, що знижує довговічність інтегральних мікросхем [4]. Однак в обговорюваному випадку той самий ефект відіграє позитивну роль, оскільки завдяки дифузії кисню електричний опір на різних гілках вольт-амперної характеристики мемристора може відрізнитися на кілька порядків [2]. До того ж після вимкнення струму ці зміни резистивного стану зберігаються, і лише зміна полярності струму може перемкнути стан мемристора.

Описаний ефект резистивних перемикачів є одним із характерних проявів надзвичайно широких функціональних можливостей оксидів перехідних металів, і його можна роз-

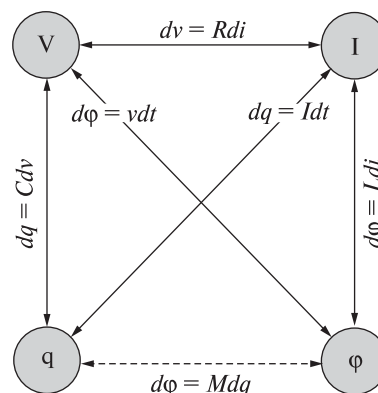


Рис. 1. Чотири фундаментальні величини електричного кола: напруга v , струм i , електричний заряд q і магнітний потік ϕ . Функціональний зв'язок між ними визначається базовими елементами – опором R , індуктивністю L , ємністю C і мемристивністю M . Штрихова лінія – втрачений зв'язок між ϕ і q

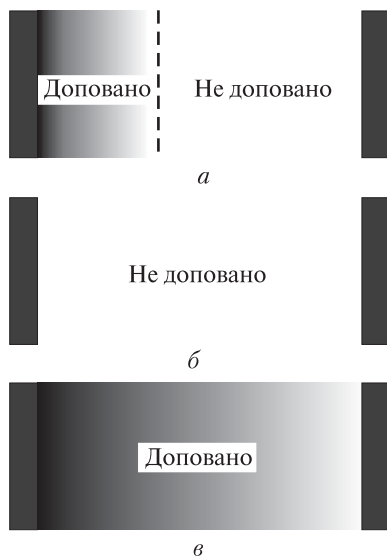


Рис. 2. Схематичне зображення просторового розподілу кисневих вакансій у неоднорідному прошарку з діоксиду титану, який знаходиться між двома металевими електродами мемристора [2]: *а* – вихідний стан; *б* – високорезистивний стан; *в* – низькорезистивний стан

глядати як приклад нових іонтронних технологій. Саме поняття «іонтронні технології» було запропоновано нещодавно за аналогією з уже усталеними термінами «електроніка» і «спінтроніка» (докладніше про це див. огляд [5]). Одна зі специфічних ознак, що відрізняє обговорювані оксиди від більшості інших матеріалів, полягає в рухливості дефектів (передусім кисневих вакансій, а також катіонів), які можуть входити у зразок і виходити з нього, змінюючи локально властивості досліджуваного об'єкта. Особливого значення цей ефект набуває в нанорозмірних системах, коли характерні розміри об'єкта є порівнянними з дифузійною довжиною для рухливих дефектів, а також поблизу поверхні чи межі поділу різних оксидів, де мобільність дефектів особливо висока [5]. В останньому випадку перерозподіл заряджених кисневих вакансій є ефективним способом екранування зовнішніх електростатичних полів. На сьогодні іонну міграцію вже застосовують у твердотільних паливних елементах, літій-іонних акумуляторах, а відтепер ще й у мемристорах.

Незважаючи на те, що іонне походження двозначних вольт-амперних характеристик практично не викликає сумнівів, детально природу ефекту резистивних перемикачів ще не з'ясовано. Насамперед, вона залежить від типу перемикачів, які можуть бути уніполярними чи біполярними. У першому випадку, характерному для бінарних оксидів, вихідним є стан контакту з високим опором (його називають OFF-станом). На початковому етапі формування контакту на нього подають імпульс високої електричної напруги, в результаті чого створюється низькорезистивний ON-стан. Після цього можливі багаторазові плавні ON/OFF- і OFF/ON-переходи, причому в разі OFF/ON-переходу необхідна порогова напруга, вища за відповідну величину для ON/OFF-переходу. Найважливішою обставиною є те, що уніполярний ефект не залежить від полярності прикладеної напруги. Цей факт свідчить про велику роль саме теплових процесів, які створюють провідні канали всередині шару непровідного оксиду між двома металевими берегами (див. огляд [6]).

Біполярні резистивні перемикачів спостерігаються переважно тоді, коли між металевими обкладинками знаходиться неоднорідний за киснем шар діелектрика, який або створюється штучно на основі двох шарів бінарного оксиду (як, наприклад, у цитованій вище роботі [2] чи в більш витонченому експерименті на атомному рівні [7]), або виникає природним шляхом у плівках складних оксидів перехідних металів (див. далі). На рис. 2 умовно показано просторову зміну ступеня доповнення неоднорідного шару діоксиду титану у вихідному стані, високорезистивному стані при подаванні на лівий електрод негативного потенціалу і в низькорезистивному стані при подаванні позитивного потенціалу на лівий електрод.

Для реалізації ідеї авторам роботи [2] знадобилася тришарова структура з двома металевими обкладинками та двома прошарками ізолятора, що відрізняються різним ступенем доповнення кисневими вакансіями. Постає питання: чи можна змодельовати таку саму ситуацію на простому контакті металу з оксидом так, щоб

останній одночасно був і другим електродом, і активною зоною, зміна опору якої спричинює резистивні перемикання всього зразка? Виявляється, можна, якщо замінити в запропонованій авторами [2] тришаровій структурі погано-провідну бінарну сполуку перехідного металу з киснем на складний чотирьохкомпонентний оксид, який в об'ємі є провідником. Термін «складний» у цьому разі означає, що такий матеріал можна розглядати як продукт поєднання двох і більше простих оксидів з близькими хімічними властивостями. Для сполук, отриманих у такий спосіб, спектр фізичних властивостей — магнітних, електричних, оптичних, механічних — виявляється багатшим, ніж для тих простих оксидів, з яких вони складаються [5], а причина різких змін резистивного стану гетероконтактів на основі сильнокорельованих електронних систем, якими є, зокрема, складні оксиди зі структурою перовскіту, є ще більш складною (див. огляд [8]).

Внесок українських учених

З'ясування фундаментальної природи резистивних перемикань у контактах металевго інжектора зі складними оксидами перехідних металів було метою досліджень двох наукових груп з Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна (ФТІНТ) НАН України та Донецького фізико-технічного інституту ім. О.О. Галкіна (ДонФТІ) НАН України. У першій публікації [9] на початку 90-х років співробітники ФТІНТ повідомляли про низькотемпературний ефект резистивних перемикань у мікроконтактах, утворених електродом зі срібла і монокристаллами купратів $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (*Yttrium barium copper oxide*, YBCO) та $HoBa_2Cu_3O_{7-x}$. Автори статті виявили за температури 4,2 К оборотні полярно-залежні перемикання вольт-амперних характеристик між станами з різним надлишковим струмом (аж до його повного пригнічення), які залишалися стійкими принаймні до 100 К, і пов'язали це явище з електроміграцією кисню в кристалічній ґратці високотемпературного надпровідного купрату.

Подальші дослідження харківських фізиків спільно з французькими колегами підтвердили наявність цього ефекту ще в одному високотемпературному надпровіднику $BiSrCaCuO$ і показали, що обговорюваний ефект спостерігається аж до кімнатних температур [10]. Експерименти, виконані в ДонФТІ, продемонстрували наявність резистивних перемикань ще в одному класі матеріалів, а саме, у чотирьохкомпонентних сполуках на основі марганцю, які набули широкої популярності завдяки ефекту колосального магнітоопору [11].

Помітного прогресу в цьому напрямі досліджень було досягнуто завдяки спільним роботам українських фізиків із словацькими колегами [12, 13]. Об'єктом цих експериментів були півки ітрію-барієвого купрату YBCO, вирощені в напрямку осі c , перпендикулярної до площини ab мідь — кисень. Розроблена теорія [14], яка добре узгоджується з результатами вимірювань вольт-амперних характеристик контактів металевго інжектора з YBCO [12, 13], пояснює різкі зміни їх резистивного стану. Завдяки полярній природі складних оксидів навіть за рівноважних умов поблизу поверхні купратних сполук відбувається перерозподіл концентрації кисневих вакансій, що спричинює виникнення там збідненої киснем зони просторового заряду, опір якої (згідно з відомою фазовою діаграмою YBCO) набагато перевищує відповідну величину в об'ємі металевго оксиду. Цей теоретичний результат, зокрема, дозволяє пояснити нещодавні експериментальні дані [15], що вказують на аномально велику глибину приповерхневих змін заряду в купратах порівняно зі стандартними оцінками довжини екранування в них. Вимога рівності дифузійного та дрейфового потоків кисневих вакансій у стаціонарному стані дає змогу розрахувати початковий розподіл кисневих вакансій, який є неоднорідним. Під дією зовнішнього змінного струму з досить великим періодом баланс дифузійного та дрейфового потоків, що встановився у рівновазі, порушується, в результаті чого просторовий розподіл вакансій періодично змінюється в часі відповідно до зміни струму. Особливість цього процесу по-

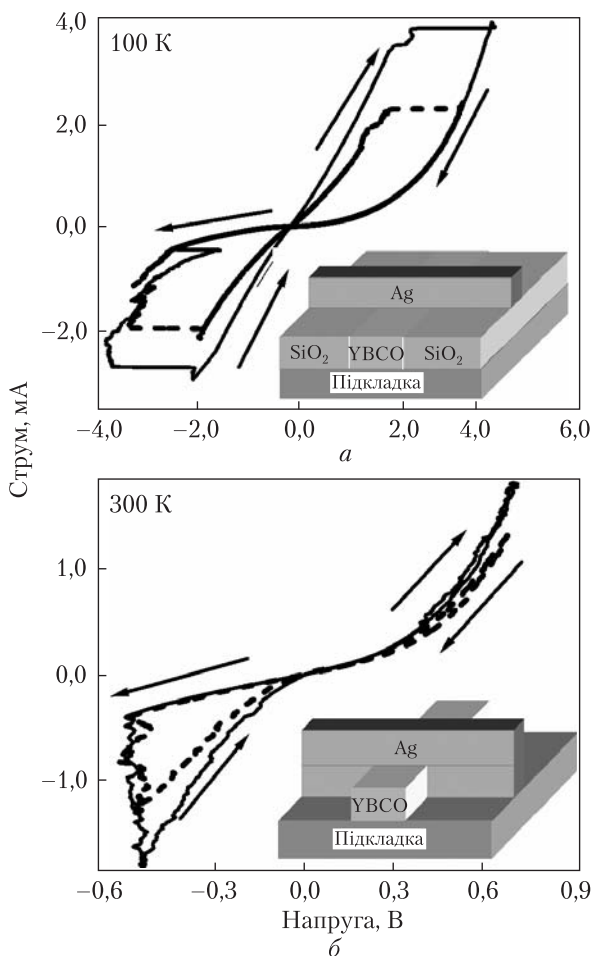


Рис. 3. Типові вольт-амперні характеристики контактів срібла з *c*-орієнтованою плівкою ітрій-барієвого купрату, в яких електронний транспорт здійснюється вздовж осі *c* (а) і в площині *ab* (б). Стрілками показано напрямки зміни струму, що пропускається через контакт; на вставках схематично зображено досліджені зразки [13]

лягає в тому, що його частота відрізнятиметься від частоти струму (або поданої на контакт напруги), оскільки через залежність опору складного оксиду від концентрації кисневих вакансій вплив зовнішнього фактора приводитиме до періодичної зміни ще й опору самої плівки. Внаслідок цього у відгуку системи на періодичне збурення з'являться доданки з частотами, кратними вихідній, а вольт-амперна *I–V*-характеристика матиме двозначний характер подібно до фігур Ліссажу. Саме такі біполярні

I–V-криві було отримано в роботі [13] для контактів срібла з плівкою ітрій-барієвого купрату, в яких електронний транспорт здійснювався вздовж осі *c* (рис. 3а).

Незважаючи на задовільний збіг теорії [15] з експериментом [13], потрібна була додаткова перевірка вихідної гіпотези про те, що просторові варіації підсистеми кисневих вакансій визначають форму *I–V*-кривих для контактів зі складними оксидами. Для цього було використано анізотропію кристалів YBCO, які є шаруватими сполуками [14]. Згідно з літературними даними, за кімнатних температур коефіцієнт дифузії *D* кисневих вакансій у плівках YBCO, вирощених у напрямку осі *c*, становить приблизно 10^{-17} – 10^{-18} см²/с. При цьому шлях, який проходить вакансія за характерний час *t* (порядку періоду змінного струму, в роботі [14] $\sim 10^3$ с), приблизно дорівнює \sqrt{Dt} , тобто становить величину близько одного нанометра. Якщо врахувати, що розміри активної зони, яка визначає ефект перемикання, становлять десятки нанометрів [13, 15], то зрозуміло, що роль дифузійних процесів у *c*-орієнтованих плівках YBCO дуже мала. Однак, як відомо, коефіцієнт дифузії кисневих вакансій в ітрій-барієвому купраті істотно залежить від кристалографічного напрямку, і відношення D_{ab}/D_c зазвичай набагато перевищує 10^3 . Отже, для площини *ab* характерна відстань, на яку переміщується вакансія за час півперіоду поданого на контакт струму, становитиме не менш як 100 нм і перевищуватиме розміри тієї зони, що визначає відмінність опорів двох резистивних станів. Унаслідок цього для зарядового транспорту в *ab*-площині можна очікувати, що після перемикання з високо- в низькорезистивний стан і зменшення абсолютної величини зовнішнього електричного поля до нуля система може повернутися до вихідного розподілу вакансій уже за малих (від'ємних за знаком) напруг. Більш того, саме цей розподіл має радикально відрізнитися від такого для транспорту вздовж осі *c*, оскільки через високу рухливість іонів кисню в площині *ab* концентрація вакансій має істотно перевищувати її величину для контакту вздовж *c*-осі. Це озна-

чає, що після повернення в початковий стан за малих від'ємних за знаком напруг система залишатиметься у високорезистивному стані і за додатних значень V .

Саме таке явище й було виявлено експериментально в роботі [14] (рис. 3б), що однозначно свідчить на користь визначальної ролі, яку відіграє міграція неосновних носіїв заряду (у цьому випадку кисневих вакансій) у формуванні мемристорних характеристик контактів на основі складних оксидів перехідних металів. Однак питання про те, чи є цей висновок універсальним, чи механізм резистивних перемикачів у контактах з бінарними оксидами інший, залишається відкритим. Отже, ця проблема потребує додаткових фундаментальних досліджень.

Перспективи практичного застосування мемристорів

Хоча однозначної інтерпретації резистивних змін у контактах на основі оксидів ще немає, створення нових нанотехнологій дозволяє вже тепер перейти від дослідження цього фізичного явища до практичного застосування мемристорів. Нині такі роботи активно ведуться у усьому світі (здебільшого з використанням бінарних оксидів перехідних металів), і спрямовані вони поки що переважно на розроблення нових елементів комп'ютерної пам'яті.

Слід зауважити, що мемристор демонструє, принаймні, дві суттєві відмінності від традиційних пристроїв пам'яті [16]. По-перше, це двоконтактний пристрій, і тому його можна досить просто інтегрувати в багатопшарові матриці взаємно перпендикулярних металевих нанодротів (*nanowire crossbars*). Така архітектура компактніша і не вимагає так званих транзисторів доступу, які використовують у сучасній архітектурі флеш-пам'яті, а логіка керування такою матрицею перетинних нанодротів набагато простіша (рис. 4).

По-друге, перехід від більш провідного до менш провідного стану в мемристорах безперервний (рис. 3). Це означає, що побудовані на їх основі електронні схеми можуть мати велику кількість різних провідних станів. Відзначимо

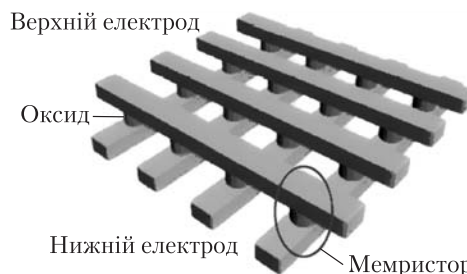


Рис. 4. Принципова схема матриці взаємно перпендикулярних металевих нанодротів, розділених оксидними прошарками (crossbar-архітектура)

у зв'язку з цим препринт [17], що з'явився у жовтні 2013 р. і в якому на основі ефекту резистивних перемикачів у манганіті (що вперше спостерігався в роботі [11]) було реалізовано 6-бітову багаторівневу комірку пам'яті. Ще більш привабливою є ідея створення великого електронного кола, що складалося б тільки зі сполучених між собою мемристорів, і тому його архітектура була б принципово відмінною від архітектури фон Неймана, на якій побудовано всю наявну електроніку.

Без сумніву, використання мемристорів у стандартних мікро- і наноелектронних пристроях — це найближча перспектива. Сьогодні все активніше обговорюються перспективи їх застосування як елементів нейроморфних мереж (*neural networks*), що імітують процес оброблення інформації в головному мозку. Річ у тім, що за складністю та щільністю компоновання основних елементів сучасні електронні пристрої вже наближаються до відповідних біологічних об'єктів. Однак останні є на кілька порядків ефективнішими завдяки набагато краще організованій зв'язності елементів, що забезпечує швидше паралельне оброблення аналогових сигналів. У головному мозку нейрони слугують «дротами», якими нервові імпульси передаються від однієї клітини до іншої, а з'єднання між окремими нейронами здійснюються за допомогою синапсів, які мають різну за величиною проникність і можуть передавати інший за величиною імпульс далі нервовим ланцюгом. Особливість мемристорів полягає в тому, що їх поведінка в електричному колі точно відповідає поведінці одиничного синапсу. Саме тому

можна вважати, що мемристори дозволять максимально наблизитися до штучної реалізації нейронних ланцюгів. Архітектуру відповідних електронних кіл (рис. 4) можна повністю скопіювати з архітектури нервової системи так, що нейрони виготовлятимуть на основі традиційної логіки за допомогою польових транзисторів метал — оксид — напівпровідник, а мемристори відіграватимуть роль синапсів [18].

Висновки

На завершення ще раз підкреслимо той факт, що останнім часом стало зрозуміло, що мемристори — це не просто четвертий пасивний

елемент в електротехніці, а ще й унікальний пристрій, на основі якого можна створити принципово нові обчислювальні системи. Проте, слід зазначити, що, незважаючи на вже досягнуті успіхи, для перетворення мемристора на продукт промислового виробництва вченим потрібно ще докласти величезних зусиль.

Фахівці в галузі фундаментальної фізики твердого тіла мають з'ясувати природу резистивних перемикачів у різних оксидах, матеріалознавці — вирішити питання, як зменшити час спрацювання мемристора і збільшити термін його роботи, а прикладні дослідники — розробити схемотехніку приладів для масового виробництва.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Chua L.* Memristor — the missing circuit element // *IEEE Transactions on Circuit Theory.* — 1971. — V. CT-18, N 5. — P. 507–519.
2. *Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S.* The missing memristor found // *Nature.* — 2008. — V. 453. — P. 80–83; doi: 10.1038/nature06932.
3. *Argall F.* Switching phenomena in titanium oxide thin films // *Solid-State Electronics.* — 1968. — V. 11, N 5. — P. 535–541.
4. *Валиев К.А., Гольдштейн Р.В., Житников Ю.В. и др.* Теория и моделирование процессов разрушения тонкоплёночных проводников и долговечность металлизации интегральных микросхем. Ч. II // *Микроэлектроника.* — 2010. — Т. 39, № 3. — С. 163–176.
5. *Kalinin S.V., Spaldin N.A.* Functional ion defects in transition metal oxides // *Science.* — 2013. — V. 341, N 6148. — P. 858–859.
6. *Sawa A.* Resistive switching in transition metal oxides // *Mater. Today.* — 2008. — V. 11, N 6. — P. 28–36.
7. *Park G.-S., Kim Y.B., Park S.Y. et al.* In situ observation of filamentary conducting channels in an asymmetric Ta₂O_{5-x}/TaO_{2-x} bilayer structure // *Nat. Commun.* — 2013. — V. 4. — P. 2382(1–9).
8. *Тулина Н.А.* Колоссальное электросопротивление и электронная неустойчивость в структурах на основе сильнокоррелированных электронных систем // *Усп. физ. наук.* — 2007. — Т. 177, № 11. — С. 1231–1239.
9. *Рыбальченко Л.Ф., Фисун В.В., Бобров Н.Л. и др.* Обратимый эффект восстановления избыточного тока в микроконтактах Y(Ha)-Ba-Cu-O — нормальный металл при больших напряжениях // *Физика низких температур.* — 1991. — Т. 17, № 2. — С. 202–209.
10. *Rybaltchenko L.F., Bobrov N.L., Fisun V.V. et al.* Reversible transitions in high-Tc cuprates based point contacts // *EPJ B.* — 1999. — V. 10, N 3. — P. 475–480.
11. *Belogolovskii M.A., Revenko Yu.F., Gerasimenko A.Yu. et al.* Inelastic electron tunneling across magnetically active interfaces in cuprate and manganite heterostructures modified by electromigration processes // *Физика низких температур.* — 2002. — Т. 28, № 6. — С. 553–557.
12. *Plečnik A., Tomášek M., Plečnik T. et al.* Studies of resistance switching effects in metal/YBa₂Cu₃O_{7-x} interface junctions // *Appl. Surf. Sci.* — 2010. — V. 256, N 18. — P. 5684–5687.
13. *Plečnik T., Tomášek M., Belogolovskii M. et al.* Effect of crystallographic anisotropy on the resistance switching phenomenon in perovskites // *J. Appl. Phys.* — 2012. — V. 111, N 5. — P. 056106 (1–3).
14. *Белоголовский М.А., Ларкин С.Ю.* Наноэлектронные устройства с памятью на основе эффекта электромиграции кислородных вакансий в сложных оксидах переходных металлов // *Електроніка та зв'язок.* — 2013. — № 2. — С. 9–15.
15. *Jin K., Bach P., Zhang X.H. et al.* Anomalous enhancement of the superconducting transition temperature of electron-doped La_{2-x}Ce_xCuO₄ and Pr_{2-x}Ce_xCuO₄ cuprate heterostructures // *Phys. Rev. B.* — 2011. — V. 83, N 6. — P. 060511(1–4).

16. *Pershin Y.V., Di Ventra M.* Memory effects in complex materials and nanoscale systems // *Adv. Phys.* — 2011. — V. 60, N 2. — P. 145–227.
17. *Stoliar P., Levy P., Sánchez M.J. et al.* Non-volatile multilevel resistive switching memory cell: A transition metal oxide-based circuit // *IEEE Trans. Circuits Syst.* — <http://arxiv.org/abs/1310.3613>.
18. *Pershin Y.V., Di Ventra M.* Neuromorphic, digital and quantum computation with memory circuit elements // *Proc. IEEE.* — 2012. — V. 100, N 6. — P. 2071–2080.

Стаття надійшла 29.10.2013

М.А. Белоголовский

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины
ул. Р. Люксембург, 72, Донецк, 83114, Украина

МЕМРИСТОР – НОВЫЙ НАНОРАЗМЕРНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМОТЕХНИКИ

В 2008 г. было объявлено о создании мемристора, четвертого базового компонента электронных схем, способного накапливать информацию относительно прошедшего через него заряда. В данном обзоре представлены история этого открытия, его значимость для дальнейшего развития микро- и наноэлектроники, фундаментальные аспекты проблемы, а также вклад украинских исследователей в их решение. Обсуждаются преимущества мемристора по сравнению с существующими элементами электронной схемотехники и перспективы его практического применения.

Ключевые слова: микроэлектроника, резистивные переключения, электромиграция, кислородные вакансии, компьютерная память, нейроморфные сети.

М.А. Belogolovskii

Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering
of National Academy of Sciences of Ukraine
72 R. Luxemburg St., Donetsk, 83114, Ukraine

MEMRISTOR, A NEW NANO-SCALED ELEMENT OF THE ELECTRONIC CIRCUITRY

In 2008, the creation of memristor, the fourth component of basic electronic circuits with the ability to accumulate information about the charge that has passed through it, was announced. In this review, the history of the discovery, its significance for further development of micro- and nanoelectronics, fundamental aspects of the problem, as well as the contribution of Ukrainian researchers to their solution are highlighted. Advantages of the memristor in comparison with existing elements of electronic circuitry and prospects for its practical application are discussed.

Keywords: microelectronics, resistive switchings, electromigration, oxygen vacancies, computer memory, neural networks.