

doi:10.15199/48.2019.01.15

Rozwiązania techniczne i zasady funkcjonowania memrystorów

Streszczenie. W pracy omówiono memrystory – nowe elementy obwodów elektrycznych, których stosowanie może znacząco przyczynić się do rozwoju technologii informacyjnych. Opisano własności funkcjonalne memrystorów ferroelektrycznych ze złączem tunelowym oraz memrystorów z dwutlenku tytanu z mobilnymi wakansami tlenowymi. Przedstawiono również symulacje pracy memrystorów oraz możliwości ich zastosowań.

Abstract. In the work the memristors were described - the new elements of electrical circuits, which can contribute to the development of information technologies. The functional properties of the ferroelectric memristors with a tunnel joint and titanium dioxide memristors with mobile oxygen vacancies were presented. The simulations of the work of memristors and the possibilities of their applications are also presented. (**Technical solutions and operations principles of the memristors**).

Słowa kluczowe: elementy obwodu elektrycznego, memrystor, memrystancja, elementy pasywne.

Keywords: elements of electrical circuits, memristor, memristance, passive elements.

Wstęp

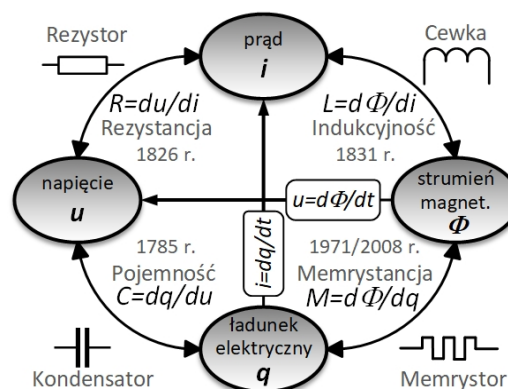
W technologiach komputerowych jednymi z najważniejszych warunków funkcjonowania i wskaźników rozwoju sprzętu są pojemności pamięci, szybkość przetwarzania informacji, wydzielanie się ciepła oraz zużycie energii. Bilanse energii i generacja ciepła są bardzo istotnymi aspektami w funkcjonowaniu wszelkich urządzeń elektrycznych, począwszy od systemów wytwarzania energii, poprzez magazynowanie, przesył i dystrybucję, po jej użytkowanie. Na wszystkich wspomnianych etapach dąży się do ograniczania powstawania strat mocy, zamienianych na ciepło, a w konsekwencji nadmiernych przyrostów temperatury urządzeń i ich podzespołów, jak też poboru energii. Wykorzystuje się często zaawansowane techniki optymalizacyjne, aby osiągnąć najkorzystniejsze warunki pracy urządzeń w tym zakresie [1-6]. Aspekty cieplne są niezwykle ważne, ponieważ mają wpływ na trwałość i niezawodność pracy osprzętu, a jednocześnie zużycie energii oraz materiałów (z uwagi na zachodzące procesy degradacyjne elementów i urządzeń).

Rozwój technologiczny w informatyce przedstawiany jest zwykle ilościowo jako redukcja kosztów produkcji przy jednoczesnym zwiększeniu skali integracji procesorów komputerowych. Zmiany te zachodzą w czasie w trendzie wykładniczym. To empiryczne prawo (zwane prawem Moora) musi jednak ulec załamaniu z powodu istnienia fundamentalnych barier [7]. Część z tych ograniczeń wynika z problemów związanych z przetwarzaniem informacji w układach cyfrowych wytwarzanych w oparciu o technologię CMOS i ma w znacznej mierze podłoże związane z dyssypacją energii i odprowadzeniem ciepła w układach o nanoskopowej skali integracji. Aby zmierzyć się z tym problemem, należy wyjść poza paradygmat cyfrowego przetwarzania sygnału w oparciu o konwencjonalne układy elektroniczne. Jedną z możliwości jest przetwarzanie informacji analogowej przez układy magnetyczne w postaci fal spinowych [8-10]. Układy te (zwane magnonicznymi) mogą być zminiaturyzowane w skali nanometrowej i pozwalają na wykonywanie operacji na sygnałach rzędu dziesiątek GHz z dużą sprawnością energetyczną [11,12], również w reżimie nieliniowym. Innym podejściem są poszukiwania fundamentalnych układów elektronicznych, które pozwalają na nieliniowe przetwarzanie sygnału i realizację funkcji nieulotnej pamięci bez konieczności wykorzystywania własności magnetycznych.

W pracy autorzy przybliżają wdrażane obecnie elementy elektroniczne – wykorzystywane w układach realizujących wspomniane funkcje – zwane *memrystorami*.

Istota memrystancji

Podstawowymi wielkościami fizycznymi związanymi z funkcjonowaniem obwodów elektrycznych są: natężenie prądu i , napięcie u , ładunek elektryczny q oraz strumień magnetyczny Φ . Wzajemne związki między wymienionymi wielkościami określają parametry pasywnych elementów obwodów elektrycznych, a uzupełnione są przez dodatkowe zależności czasowe. Rozważając zatem wszystkie wzajemne relacje między tymi wielkościami można wyróżnić dwa równania dynamiczne: $i = dq/dt$ (definicja prądu), $u = d\Phi/dt$ (zjawisko indukcji elektromagnetycznej) oraz cztery równania określające parametry podstawowych elementów pasywnych: $R = du/di$ (rezystancja), $C = dq/du$ (pojemność), $L = d\Phi/di$ (indukcyjność). Czwartą zależnością jest związek między strumieniem magnetycznym a ładunkiem elektrycznym, determinujący parametr nazwany memrystancją $M = d\Phi/dq$ (rys. 1). Opisujący tę zależność element nazwano memrystorem.



Rys. 1. Wzajemne relacje między głównymi wielkościami fizycznymi związanymi z obwodami elektrycznymi i określenie podstawowych elementów pasywnych

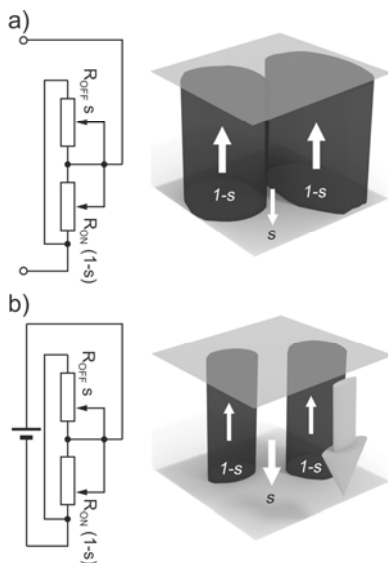
W tworzonych teoretycznych koncepcjach (np. w pracy L. O. Chua [13]) rozważano modele liniowych czwórników, które po obciążeniu wyjścia nieliniowym rezystorem, kondensatorem lub cewką pozwalałyby na uzyskanie na wejściu charakterystyki prądowo-napięciowej typowej dla memrystora. Nie wskazano jednak wówczas w jakim układzie fizycznym można nieliniowo powiązać ze sobą ładunek elektryczny q i strumień magnetyczny Φ . Autor przedstawił natomiast [13] aktywny układ elektroniczny, który pozwala uzyskać charakterystykę prądowo-napięciową typową dla memrystora, czyli taką, jaka wynikałaby z nieliniowej zależności pomiędzy q i Φ .

Fizyczna realizacja memrystora

Poszukiwania pasywnych układów fizycznych realizujących funkcję memrystora są przedmiotem intensywnych badań. Głównym celem jest znalezienie układów, dla których obserwuje się nieliniową zależność pomiędzy prądem $i(t)=dq(t)/dt$ i napięciem $u(t)=d\Phi(t)/dt$ cechującą się ściśniętą histerezą (rys. 5c). Charakterystykę prądowo-napięciową memrystora można zaobserwować w układach, w których przepływ prądu (lub napięcie na końcówkach układu) zależy nie tylko od bieżącej wartości napięcia (lub prądu), lecz również od pewnej *zmiennej stanu*, której pochodna czasowa jest zależna od napięcia (lub prądu). W przypadku memrystora sterowanego napięciem (lub prądem) zmienną stanu może być strumień magnetyczny Φ (lub ładunek elektryczny q). Nie jest to jednak warunek konieczny. Istotne jest natomiast to, by w układzie realizował się proces fizyczny, dla którego można wskazać zmienną stanu spełniającą wspomniany warunek.

Memrystor charakteryzuje się nieliniową i histerezową charakterystyką prądowo-napięciową. Rezystancja memrystora, w zależności od rozwiązania technicznego, może być sterowana napięciowo bądź prądowo. Dzięki temu memrystor może działać jako komórka pamięci.

Funkcję memrystora można zrealizować na wiele sposobów, w oparciu o różne efekty fizyczne. Jedno z ciekawszych rozwiązań zostało zaproponowane przez grupy z Université Paris-Sud i Cambridge Univeristy, gdzie rozważano memrystory wykorzystujące ferroelektryczne złącza tunelowe [14]. Ferroelektryczny memrystor (rys. 2) ma postać złącza tunelowego, w którym przewodzące, metalowe elektrody rozdzielone są barierą utworzoną z cienkiej warstwy ferroelektryka.



Rys. 2. Zmiana rozmiaru domen w ferroelektrycznej warstwie BaTiO₃ w wyniku przyłożenia pola elektrycznego. (a) W stanie początkowym istnieją zarówno domeny spolaryzowane „w górę” warstwy (ciemniejsze obszary) jak i domeny o polaryzacji elektrycznej skierowanej „w dół” warstwy (pozostała, przezroczysta część warstwy). (b) Zewnętrzne pole elektryczne skierowane „w dół” (przedstawione jako duża strzałka na ścianie boku) powoduje zmniejszenie względnej objętości 1-s domen o polaryzacji „w górę” i zwiększenie objętości s domen spolaryzowanych „w dół”. Założono, że górną i dolną elektrodę dobrano w ten sposób, by największa (najmniejsza) rezystancja złącza tunelowego R_{OFF} (R_{ON}) odpowiadała maksymalnej polaryzacji złącza „w dół” – s=1 („w górę” – s=0). Prąd przepływający przez warstwę BaTiO₃ będzie przepływał równolegle przez obszar 1-s domen o małym oporze tunelowym i obszar s domen o dużym oporze tunelowym. Warstwa BaTiO₃ jest elektrycznie równoważna równoległemu połączeniu dwóch oporników, których rezystancja zależy również od objętości (powierzchni) każdego z dwóch rodzajów domen

Rezystancja tunelowa takiego złącza jest określona przez potencjał bariery tunelowej, który z kolei może być modyfikowany przez ładunki indukowane po obu stronach każdego z interfejsów, jaki tworzy bariera z metalowymi elektrodami [15]. Gęstość i znaki indukowanych ładunków zależą od polaryzacji ferroelektryka. Jeśli elektrody wykonane są z różnych metali, to rozkład ładunków w pobliżu każdego z interfejsów będzie nieco inny i bariera potencjału indukowana w ferroelektryku będzie miała inną wysokość dla różnych wartości polaryzacji ferroelektryka. Dzięki temu efektowi rezystancja układu zmienia się wraz ze zmianą polaryzacji ferroelektryka. Polaryzacja ferroelektrycznego złącza może być natomiast zmieniana (przełączana) przez zewnętrzne pole elektryczne.

Materiał ferroelektryczny charakteryzuje się histerezą zależności polaryzacji elektrycznej od pola elektrycznego (przyłożonego napięcia), wynikającą z obecności domen ferroelektrycznych. Ponadto zmiana polaryzacji pod wpływem napięcia elektrycznego następuje z inercją czasową. Z tego powodu polaryzacja może być parametrem stanu ferroelektrycznego memrystora, opisującym jego wewnętrzną dynamikę. Wypadkową polaryzacją ferroelektryka łatwo powiązać z objętościową frakcją domen ferroelektrycznych zorientowanych w jednym z dwóch przeciwnych kierunków. Przyjmując, że jeden z kierunków polaryzacji (np. kierunek „w dół”) odpowiada większemu oporowi złącza otrzymuje się następujący wzór na opór zastępczy złącza tunelowego: $R(t) = R_{OFF}R_{ON}/(R_{OFF}-s(t)(R_{OFF}-R_{ON}))$, gdzie R_{OFF} i R_{ON} są oporami całkowicie spolaryzowanego złącza odpowiednio w kierunku „w dół” i w „w górę”, co odpowiada s = 1 i s = 0.

Pozwala to wprowadzić zmienną stanu s(t) do relacji pomiędzy natężeniem prądu i napięciem:

$$(1) \quad i(t) = u(t) \frac{R_{OFF} - s(t)(R_{OFF} - R_{ON})}{R_{OFF} R_{ON}}$$

Dynamika przełączania domen jest zależna od przyłożonego napięcia u(t) poprzez czas nukleacji $\tau_n(u)$ i propagacji $\tau_p(u)$ domen [16]:

$$(2) \quad \frac{ds(t)}{dt} = (1 - s(t)) \frac{2}{\tau_p(u)} \left(\frac{t - \tau_n(u)}{\tau_p(u)} \right)$$

Równania (1) i (2) pozwalają wyznaczyć charakterystyki elektryczne memrystora, w tym charakterystykę prądowo-napięciową w postaci ściśniętej pętli histerezy [14].

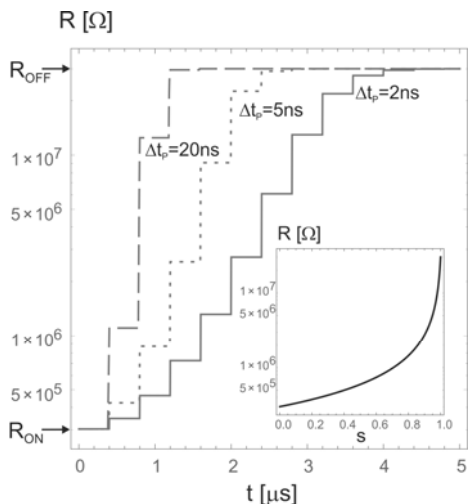
Symulacja pracy ferroelektrycznego memrystora

Z punktu widzenia zastosowań memrystorów jako komórek pamięci istotne jest przedstawienie procesu sterowania rezystancją memrystora za pomocą zewnętrznego bodźca. Warto rozpatrzyć zmiany rezystancji ferroelektrycznego memrystora po podaniu na jego końcówki krótkich prostokątnych impulsów napięcia. Przykładowy wykres zmian rezystancji dla memrystora ze złączem tunelowym na bazie BaTiO₃ przedawniono na rys. 3.

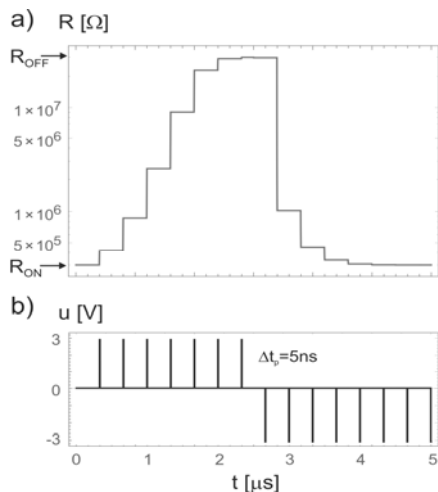
Założono, że w chwili początkowej ferroelektryk jest całkowicie spolaryzowany i jest w stanie niskiej rezystancji: R_{ON}. Kolejne impulsy sterujące przełączają stopniowo polaryzację ferroelektryka. Powoduje to stopniowy wzrost rezystancji złącza, aż do osiągnięcia wartości R_{OFF} odpowiadającej całkowitemu przepolaryzowaniu ferroelektryka.

Zwiększając czas trwania impulsów można szybciej (stosując mniejszą ilość impulsów) przełączyć rezystancję złącza z wartości R_{ON} do R_{OFF}. Warto zauważyć, że zwiększanie się frakcji domen o dużym oporze tunelowym odbywa się kosztem zanikania domen o małym oporze.

Prowadzi to do silnie nieliniowej zależności oporu złącza od objętości każdej z frakcji domen (lub od polaryzacji złącza) – co przedstawiono na wstawce na rys. 3.



Rys. 3. Sterowanie rezystancją ferroelektrycznego memryстора zawierającego warstwę BaTiO₃. Do warstwy BaTiO₃ o grubości $d = 2$ nm przyłożono sterujące napięcie elektryczne w postaci ciągu nanosekundowych impulsów elektrycznych o amplitudzie $U = 3$ V. Założono, że w chwili początkowej występuje (w całej objętości warstwy) jedna domena o polaryzacji przeciwnej do sterującego napięcia: $s=0$. Dla tego stanu opór warstwy jest najmniejszy – przyjęto wartość $R_{ON} = 3 \cdot 10^5 \Omega$. Kolejne impulsy napięcia (generowane co 400 nm) powodują nukleację i rozrost domen o polaryzacji przeciwnej do przyłożonego napięcia, co zwiększa rezystancję warstwy, aż do osiągnięcia wartości $R_{OFF} = 3 \cdot 10^7 \Omega$, co odpowiada całkowitemu przepolaryzowaniu warstwy (wstawka na rysunku przedstawia zależność $R(s)$). W obliczeniach założono, że czas nukleacji i propagacji domen zmienia się z przyłożonym napięciem zgodnie z prawem Marza. Przyjęto wartości pola aktywacji nukleacji i pola aktywacji propagacji równe odpowiednio: $2,03 \cdot 10^{10}$ V/m i $2,76 \cdot 10^{10}$ V/m oraz czasy graniczne τ_0 (dla napięcia $U \rightarrow \infty$) wynoszące odpowiednio: $1,00 \cdot 10^{-7}$ ns i $7,65 \cdot 10^{-5}$ ns. Symulację przeprowadzono dla trzech wartości szerokości impulsów: $\Delta t_p = 2, 5, 20$ ns



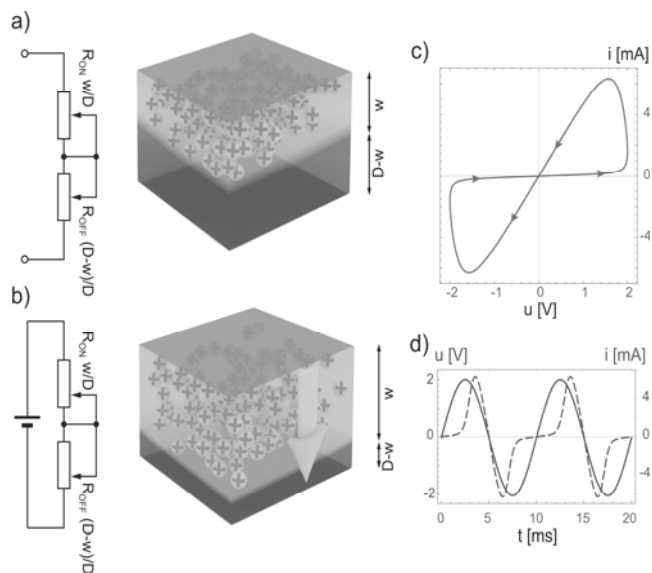
Rys. 4. (a) Przełączanie rezystancji ferroelektrycznego memryстора (o tych samych parametrach jak na rys. 3) sekwencją (b) składającą się z następujących po sobie ciągów pozytywnie i negatywnie spolaryzowanych impulsów

Podając ciąg ujemnych impulsów napięcia można przywrócić początkową, niską wartość rezystancji złącza tunelowego. Proces stopniowego przełączania rezystancji złącza od wartości R_{ON} do R_{OFF} i z powrotem do R_{ON} sterowany ciągiem dodatnich i ujemnych impulsów napięcia został przedstawiony na rys. 4.

Inne rozwiązania memrystorów

Poszukiwanie fizycznej realizacji memrystorów oraz badania nad możliwościami wdrożenia różnych technologii ich wytwarzania są przedmiotem zainteresowania wielu grup badawczych.

Bardzo ciekawym rozwiązaniem, będącym pierwszą eksperymentalną realizacją pasywnego memryстора, jest propozycja grupy badaczy z Hewlett-Packard Laboratories w Palo Alto (USA, 2008 r.) [17-19]. Autorzy badali złącze utworzone z dwóch warstw tlenku tytanu. W jednej z warstw ustalono stechiometryczny stosunek tlenu i tytanu (2:1), w drugiej zmniejszono nieznacznie zawartość tlenu tworząc wakanse tlenowe (rys. 5).



Rys. 5. Migracja wakanse tlenowych w warstwie tlenku tytanu pod wpływem pola elektrycznego. (a) Stan początkowy, gdzie w nieobecności pola zewnętrznego w układzie istnieją: warstwa TiO_{2-x} ze zredukowaną zawartością atomów tlenu (z dodatnio naładowanymi wakansem tlenowymi) oraz warstwa TiO₂ ze stechiometryczną zawartością tlenu. (b) Po przyłożeniu pola elektrycznego wakanse migrują z TiO_{2-x} do TiO₂ (redukcją obszar słabo przewodzącego TiO₂) lub koncentrują się w TiO_{2-x} (zmniejszając grubość warstwy stechiometrycznego TiO₂). (c) Przykładowa charakterystyka prądowo-napięciowa, (d) Przebiegi czasowe prądu i napięcia

Warstwa stechiometrycznego TiO₂ jest słabo przewodząca. Wakanse tlenowe w TiO_{2-x} są natomiast donatorami dla elektronów, co powoduje wzrost przewodnictwa warstwy TiO_{2-x}. Opór dwuwarstwy TiO₂/TiO_{2-x} może być kontrolowany zewnętrznie, gdyż dodatnio naładowane wakanse tlenowe mogą dyfundować pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego. Gdy wyższy potencjał jest przyłożony do warstwy TiO_{2-x}, wtedy wakanse tlenowe stopniowo migrują do obszaru TiO₂, wprowadzając mobilne elektrony do tego obszaru i faktycznie przekształcając TiO₂ w przewodzący TiO_{2-x}. W efekcie tego procesu grubość słabo przewodzącej warstwy TiO₂ jest zredukowana kosztem pogrubienia przewodzącej warstwy TiO_{2-x}, co prowadzi do zmniejszenia oporu elektrycznego dwuwarstwy TiO₂/TiO_{2-x}.

Oprócz omówionych wyżej układów ciekawe wydają się również badania nad memrystorami działającymi w oparciu o magnetyczne złącza tunelowe [10].

Zastosowanie memrystorów w praktyce

Sterowalna wartość oporu memrystorów w połączeniu z niezwykle małymi rozmiarami umożliwiając ich zastosowanie w wielu praktycznych rozwiązaniach. Najbardziej popularne

jest wykorzystanie memrystora jako pamięci – zgodnie z pierwszymi koncepcjami przedstawionymi przez firmę Hewlett-Packard czy Panasonic w 2008 r. [17]. Pamięci zbudowane na bazie memrystora wykorzystującego TiO_x należą do technologii typu ReRAM (pamięć RAM bazująca na zmiennej rezystancji). Memrystory stosowane są również w pamięciach MRAM (pamięci wykorzystujące efekt magnetorezystancyjny) czy PCM (pamięci zmienno-fazowe). Głównymi zaletami pamięci wykorzystujących memrystory są niskie koszty produkcji, większa pojemność w jednostce objętości, brak konieczności zasilania, znikoma ilość energii niezbędna do odczytu i zapisu (mała emisja ciepła), niewielki czas odczytu i zapisu (rzędu 10 ns), wysoki poziom retencji danych oraz duża liczba cykli wytrzymałościowych [17].

Przewiduje się że memrystory mogą być również powszechnie wykorzystywane w układach logicznych, rejestrach (zatrząskach, przerzutnikach), konfigurowalnych przełącznikach, układach analogowych – przestrajanych generatorach, a nawet w filtrach analogowych, które dostrajane są poprzez zmianę oporu memrystora (np. za pomocą impulsu sterującego) [17]. Coraz bardziej popularne stają się również aplikacje memrystorów w różnego rodzaju modulatorach. Obecnie układy elektroniczne z memrystorami na bazie warstw tlenku tytanu są wdrażane do masowej produkcji [20,21] w technologii CMOS.

Niezwykle ciekawym zastosowaniem memrystorów są aplikacje związane z symulacją neuronów. Dotychczasowe doświadczenia wykazały, że w tym zakresie charakteryzują się dużą skutecznością, co sprawia, że stają się one bardzo atrakcyjnym obiektem podczas badań z wykorzystaniem sieci neuronowych oraz sztucznej inteligencji. Obiecującym kierunkiem badań są również prace nad technologią druku elektronicznych układów z memrystorami na elastycznych podłożach [6,20].

Uwagi końcowe i wnioski

Odkrycie memrystorów (podstawowych pasywnych elementów obwodów elektrycznych) było milowym krokiem w drodze do opracowania zarówno nowoczesnych układów nieulotnych pamięci o znacznie mniejszych rozmiarach fizycznych, większym pojemnościach i wydajnościach, ale także układów symulujących zachowanie się niektórych funkcji ludzkiego mózgu (tzw. układów neuromorficznych), takich jak kojarzenie czy uczenie się.

Przewiduje się, że nowo opracowywane technologie umożliwią wytwarzanie układów łączących cechy pamięci i procesora, a w konsekwencji zbudowanie komputerów o całkowicie odmiennej architekturze – bezprocesorowych.

J.W.K. dziękuje za finansowe wsparcie badań przez fundację: 'Die Stiftung Alfred Krupp Kolleg Greifswald'.

L.K. dziękuje Adamowi Kozłowskiemu, moderatorowi strony <http://informatyka.korzenie.edu.pl>, za inspirację.

Autorzy: dr inż. Karol Bednarek, dr inż. Leszek Kasprzyk, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: Karol.Bednarek@put.poznan.pl; Leszek.Kasprzyk@put.poznan.pl; dr. hab. Jarosław Wojciech Kłos, mgr Szymon Mieszczak, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Fizyki, Zakład Fizyki Nanomateriałów, ul. Umultowska 85, 61-614 Poznań, E-mail: klos@amu.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Jajczyk J., Use of personal computers with multi-core processors for optimisation using the genetic algorithm method, *Computational Problems of Electrical Engineering, IEEE Xplore*, (2002), 1-3
- [2] Kasprzyk L., Bednarek K., Speeding up of electromagnetic and optimization calculations by the use of the parallel algorithms, *Przegląd Elektrotechniczny*, 85 (2009), n.12, 65-68
- [3] Kasprzyk L., Tomczewski A., Bednarek K., Bugała A., Minimisation of the LCOE for the hybrid power supply system with the lead-acid battery, *EEMS'2017, E3S Web of Conferences*, 19 (2017), n.01030, 1-6
- [4] Kasprzyk L., Tomczewski A., Bednarek K., The distribution of an electromagnetic and optimization computation of electrical systems by using multi-core processors, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), n.12b, 82-85 (in Polish)
- [5] Kasprzyk L., Tomczewski A., Bednarek K., Efficiency and economic aspects in electromagnetic and optimization calculations of electrical systems, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), n.12, 57-60 (in Polish)
- [6] Pawlak R., Korzeniewska E., Koneczny C., Hałgas B., Properties of thin metal layers deposited on textile composites by using the PVD method for textronic applications, *Autex Research Journal*, 17 (2017), n.3, 229-237
- [7] Markov I. L., Limits on fundamental limits to computation, *Nature*, 512 (2014) n.147
- [8] Chumak A. V., Vasyuchka V. I., Serga A. A., Hillebrands B., Magnon spintronics, *Nature Physics*, 11(2015), 453-461
- [9] Csaba G., Papp A., Porod W., Perspectives of using spin waves for computing and signal processing, *Physics Letters A* 381 (2017), 1471-1476
- [10] Tumański S., Spintronics and magnetic field sensors utilizing spin dependent conductivity, *Przegląd Elektrotechniczny*, 85 (2009), n.2, 93-98 (in Polish)
- [11] Tacchi S., Gruszecki P., Madami M., Carlotti G., Kłos J. W., Krawczyk M., Adeyeye A., Gubbiotti G., Universal dependence of the spin wave band structure on the geometrical characteristics of two-dimensional magnonic crystals, *Scientific Reports*, 5 (2015), 10367
- [12] Kłos J. W., Gruszecki P., Serebryannikov A. E., Krawczyk M., All-Angle Collimation for Spin Waves, *IEEE Magnetic Letters*, 6 (2015), 15638750
- [13] Chua L. O., Memristor – The Missing Circuit Element, *IEEE Transactions on circuit theory*, 18 (1971), n.5, 507-519
- [14] Chanthbouala A., Garcia V., Cherifi R. O., Bouzehouane K., Fusil S., Moya X., Xavier S., Yamada H., Deranlot C., Mathur N. D., Bibes M., Barthélémy A., Grollier J., A ferroelectric memristor, *Nature materials*, 11 (2012), 860-864
- [15] Zhuravlev M. Y., Sabirianov R. F., Jaswal S. S., Tsymbal E. Y., Giant Electroresistance in Ferroelectric Tunnel Junctions, *Physical Review Letters*, 94 (2005), 246802
- [16] Krzysteczko P., Reiss G., Thomas A., Memristive switching of MgO based magnetic tunnel junctions, *Applied Physics Letters*, 95 (2009), 112508
- [17] Williams R. S., How We Found The Missing Memristor, *IEEE Spectrum*, 45 (2008), n.12, 29-35
- [18] Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S., The missing memristor found, *Nature*, 458 (2008), 80-83
- [19] Yang J. J., Pickett M. D., Li X., Ohlberg D. A. A., Stewart D. R., Williams R. S., Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices, *Nature nanotechnology*, 3 (2008), 429-433
- [20] Bessonov A. A., Kirikova M. N., Petukhov D. I., Allen M., Ryhänen T., Bailey M. J. A., Layered memristive and memcapacitive switches for printable electronics, *Nature materials*, 14 (2015), 199-204
- [21] Xia Q., Robinett W., Cumbie M. W., Banerjee N., Cardinali T. J., Yang J. J., Wu W., Li X., Tong W. M., Strukov D. B., Snider G. S., Medeiros-Ribeiro G., Williams R. S., Memristor-CMOS Hybrid Integrated Circuits for Reconfigurable Logic, *Nano letters*, 9 (2009), n.10, 3640-3645