

**Paweł Stebliński**

Wydział Elektroniki i Informatyki

Politechnika Koszalińska

**Tomasz Błachowicz**

Instytut Fizyki - CND

Politechnika Śląska

## **Wielostanowa komórka pamięci magnetycznej - analiza czasowa szybkości zapisu oraz gęstości upakowania komórek**

**Słowa kluczowe:** spintronika, logika magnetyczna, pamięci BPM, symulacje magnetyczne.

**Cel badań:** miniaturyzacja komórek pamięci, zwiększenie gęstości zapisu, zwiększenie szybkości pracy komórek pamięci.

### **1. Wstęp**

Ważnym problemem poruszonym w publikacjach z dziedziny nanomagnetyzmu jest konstrukcja pamięci stabilniejszych, szybszych i o większej gęstości zapisu niż aktualnie występujące - oparte na półprzewodnikach lub warstwach magnetycznych. Niektóre zespoły badawcze koncentrują się nad opracowaniem konstrukcji pamięci typu MRAM już od wczesnych lat 90 [1]. Inne zespoły poszukują rozwiązań związanych z pamięciami magnetycznymi typu Racetrack, których praca opiera się na ewolucji ściany domenowej w nanodrutach wykonanych z permaloyu [2]. Podobną ideą do Racetrack był pomysł, aby umieszczać więcej niż jeden bit informacji w pojedynczej komórce pamięci magnetycznej o specjalnie dobranym kształcie [3]. Jednakże, wszystkie wspomniane pomysły mają swoje technologiczne ograniczenia, które powstrzymują je od istotnego oddziaływania na rynek pamięci elektronicznych. Jednym z wiodących kierunków badań, na którym trwają intensywne prace są pamięci na bazie struktur periodycznych typu BPM (bit-patterned media) [4].

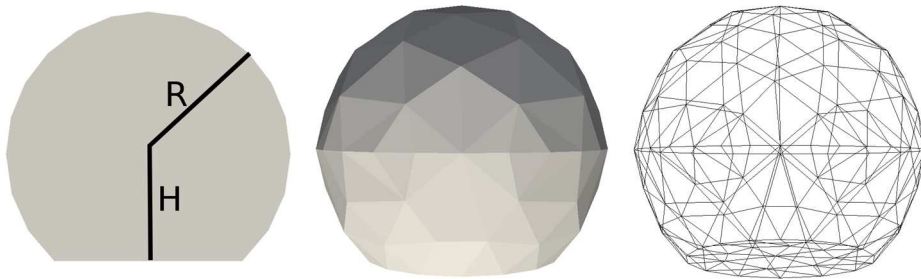
Łącząc ideę pamięci BPM z ideą, aby w jednej komórce umieszczać wiele bitów informacji, kilka grup badawczych przeprowadziło badania, z komórkami nanomagnetycznymi, które były zgodne z istniejącymi rozwiązaniami użycia głowic zapisujących [5 – 8]. Kontynuując podobny kierunek badań, w tej pracy,

skoncentrowano się na uzyskaniu wielostanowej, a przez to wielobitowej komórki nanomagnetycznej, o możliwie najmniejszych wymiarach geometrycznych. Zmniejszenie rozmiarów geometrycznych komórki pamięci daje nadzieję na uzyskanie większej gęstości zapisu oraz niższego czasu zmiany stanu niż ma to miejsce we współczesnych pamięciach. Należy jednak podkreślić, że proponowane rozwiązanie nie nawiązuje bezpośrednio do żadnego, konkretnego procesu technologicznego, a jedynie wskazuje na teoretyczne możliwości, do których technologia powinna się zbliżyć.

W modelu numerycznym rozpatrywanych pamięci, w minimach energetycznych układu magnetycznego, należy poszukiwać rozróżnialnych, stabilnych, stanów namagnesowania (niezależnych od czasu), które mogą służyć do konstrukcji wielostanowej (wielobitowej) komórki pamięci. Stany te można znajdować w procesie minimalizacji energii całkowitej układu. Stan początkowy algorytmu minimalizacji może być ustalony w procesie optymalizacji średniego namagnesowania, przewidując, że poszukiwany rozkład namagnesowania dla lokalnego minimum energetycznego, znajduje się blisko rozkładu otrzymywanego w procesie optymalizacji. Po odnalezieniu możliwych stabilnych rozkładów namagnesowania w minimach energetycznych, należy odpowiednio wyznaczać pola zewnętrzne (sygnały pobudzające układ), które służyłyby do zmiany tychże stanów. Przy założonej n.p. liniowej ewolucji namagnesowania pomiędzy dwoma wybranymi stanami stabilnymi, kształt czasowo – przestrzenny sygnału pobudzającego układ (pole zewnętrznie przyłożone) oraz kierunek wektora pola zależą od wielu czynników. Jak pokazano w [8-9], ewolucja namagnesowania, a w związku z tym konieczne do jej wymuszenia pole zewnętrzne, zależą m.in.: od kształtu geometrycznego układu magnetycznego oraz materiału z którego jest wykonany. Dlatego dobór kształtu i materiału komórki pamięci magnetycznej tak aby uzyskać wiele stanów stabilnych namagnesowania oraz odpowiednie przejścia pomiędzy tymi stanami przy jednorodnym sygnale przełączającym, stanowi poważne wyzwanie badawcze.

## 2. Symulacja

Badaną próbkę magnetyczną, pokazano na Rys. 1. Dla celów symulacji, podzielono ją na elementy skończone (czworościany) zgodnie z metodą Galerki. Symulacje przeprowadzono używając zmodyfikowanego oprogramowania MagPar [10] - rozwiązującego w każdym kroku symulacji równanie LLG. Jako parametry wejściowe oprogramowania użyto następujących stałych: współczynnik tłumienia 0.01, stałe anizotropii dla żelaza  $K_1=4.8e4$  J/m<sup>3</sup>,  $K_2=5.0e3$  J/m<sup>3</sup>, stała wymiany kwantowej  $A=2e-11$  J/m, namagnesowanie w nasyceniu  $M_s=2.1$  T [11,12].

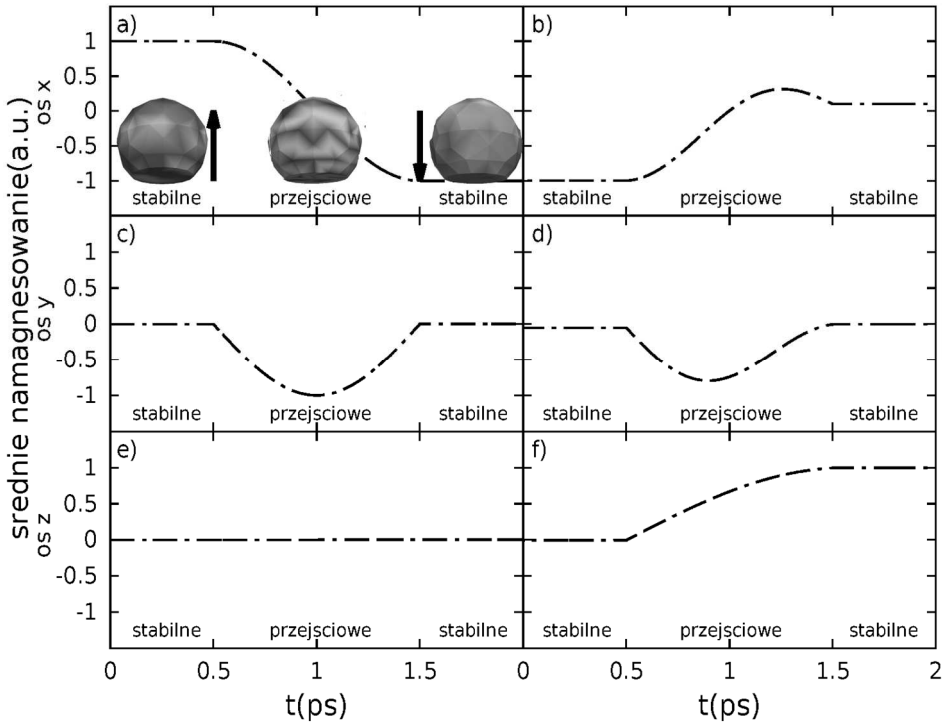


**Rys. 1.** Badana komórka pamięci.  $R=2$  nm,  $H=1.5$  nm, materiał Fe

Symulację przeprowadzono tak, aby w procesie minimalizacji energii, znajdować dwa stabilne, rozróżnialne rozkłady namagnesowania dla lokalnych minimum energetycznych. Następnie ustawiając liniową funkcję przejścia pomiędzy stabilnymi rozkładami namagnesowania dla każdego węzła w próbce, uzyskiwano przejściowe namagnesowanie zależne od czasu. Dla takiego namagnesowania przejściowego, w każdej chwili  $t$  stanu przejściowego, dla której algorytm całkowania wyznaczał krok symulacji, wyznaczano jednorodną wartość sygnału przełączającego w postaci wyrazu zewnętrznego typu pola Zeemana. W tym samym kroku wyznaczano także kierunek we współrzędnych sferycznych (kąty: theta, phi), spod którego sygnał pobudzający należało przykładać. Tak obliczone pole przełączające, po uśrednieniu, stosowano jako pole zewnętrzne podczas symulacji, celem sprawdzenia czy nastąpi odpowiednie przełączenie ze stabilnego rozkładu w pierwszym minimum do stabilnego rozkładu w drugim minimum. Czas przełączania dla wszystkich przypadków ustawiono na 1 ps, 10 ps, 100 ps. Przykładową ewolucję, średniego namagnesowania w zależności od czasu dla dwóch przykładowych par stanów stabilnych przedstawiono na Rys. 2. Natomiast konieczne do wymuszenia przełączeń pole Zeemana wraz z kątami theta, phi opisującymi jego orientację w przestrzeni pokazano na Rys. 3.

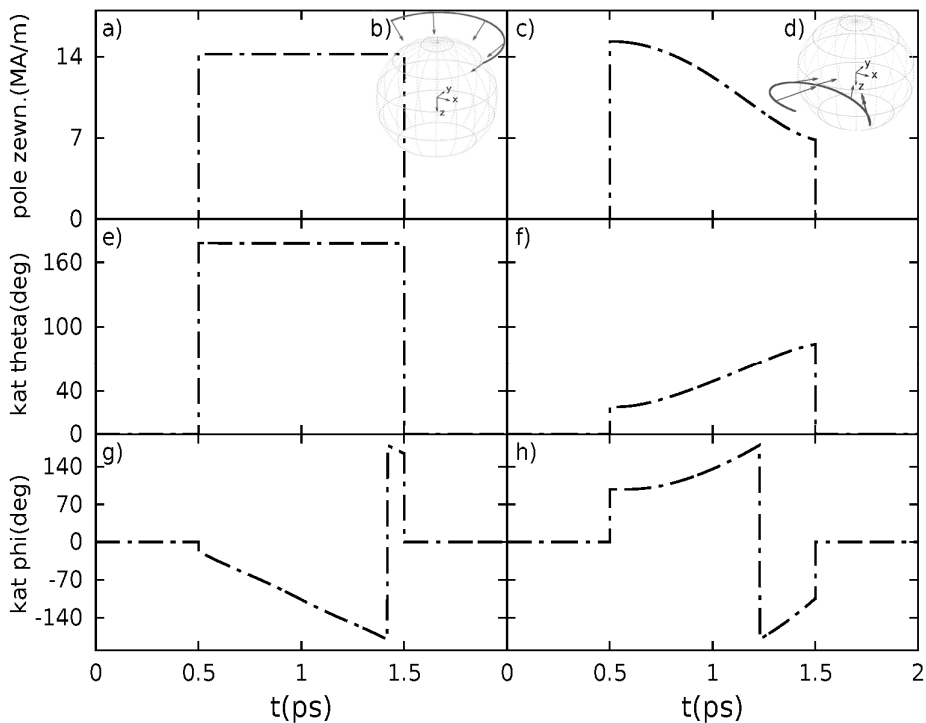
### 3. Rezultaty i dyskusja

W proponowanej komórce pamięci znaleziono 8 rozróżnialnych rozkładów namagnesowania w minimach energetycznych, które mogą służyć jako stabilne stany pamięci. Uzyskano więc 3 bitową komórkę pamięci. Dla zaproponowanych rozmiarów geometrycznych, gęstość zapisu wyniosła by około 200 Terabitów na cal kwadratowy co stanowi istotny wzrost w porównaniu z aktualnie maksymalnymi gęstościami zapisu w pamięciach SSD, które są na poziomie około 2.7 Tbita na cal kwadratowy. Przeprowadzono trzy cykle po 56 symulacji dla trzech różnych czasów przełączania: 1 ps, 10ps, 100ps. Także takie czasy przełączania, „ze stanu do stanu” stanowią istotny postęp w szybkości działania pamięci, których aktualne realizacje półprzewodnikowe charakteryzują się czasem przełączania rzędu 100 ns.



**Rys. 2.** Przebieg ewolucji średniego namagnesowania dla osi x, y, z odpowiednio (a,c,e) oraz (b, d, f) dla przejścia pomiędzy dwoma przykładowymi parami stanów stabilnych

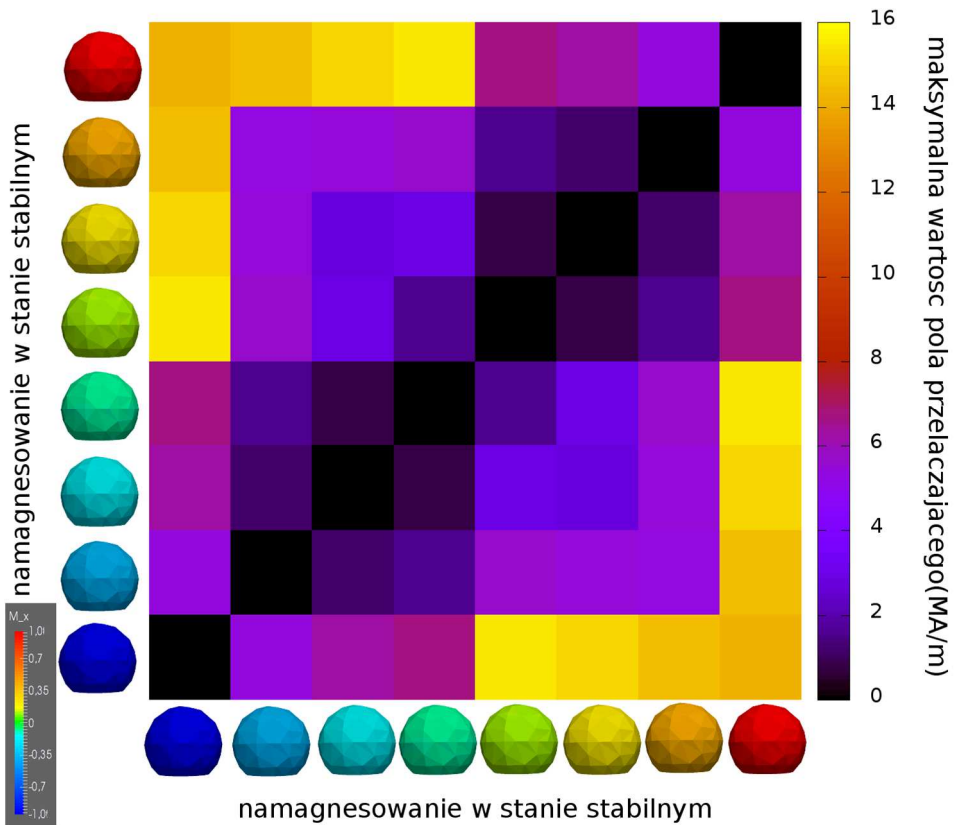
Symulacje potwierdziły prawidłowość wyznaczanych pól Zeemana wymaganych do przełączania pomiędzy wszystkimi kombinacjami par stanów stabilnych. Obliczone i stosowane do przemagnesowania wartości pól przełączających były jednorodne w przestrzeni i zmienne w czasie (Rys. 3 a,c). Także, kierunek spod którego należało przykładać sygnał pobudzający był zmienny w czasie (Rys. 3 e, g oraz f, h). Zależną od czasu trajektorię głowicy przełączającej względem próbki dla stanu przejściowego pokazano na (Rys. 3 b,d). Na Rys. 4 pokazano mapę przejść pomiędzy wszystkimi kombinacjami stanów stabilnych dla czasu przełączania 1ps. Na mapie, kolorem, zaznaczono maksymalną dla całego czasu przełączania, amplitudę pola Zeemana potrzebną do wymuszenia przejścia pomiędzy wybraną parą stanów. Dla czasów przełączania większych 10 krotnie, maksymalne amplitudy pól przełączających spadają około 10 razy. Dla czasu przełączania 100 ps, maksymalne amplitudy pól nie przekraczają 600 kA/m.



**Rys. 3.** Przebieg wartości pola Zeemana (a, c), trajektorii głowicy (b, d) oraz współrzędnych sferycznych (e, g) oraz (f, h) koniecznych do wymuszenia przemagnesowania z Rys. 2 odpowiednio dla (a, c, e) oraz (b, d, f)

#### 4. Podsumowanie

Przebadano model 8 stanowej (3 bitowej) komórki pamięci magnetycznej, dla trzech różnych czasów przełączania. Wyznaczono zależne od czasu wartości i kierunki pól przełączających dla wszystkich (168) przypadków przejść międzystanowych. Uzyskano prawie 100 krotnie większą gęstość zapisu w porównaniu z aktualnymi rozwiązaniami. Czasy przełączania używane w symulacji znacznie zwiększają szybkość operacji odczytu-zapisu pamięci (około 100 tys. razy) w porównaniu z aktualnymi półprzewodnikowymi odpowiednikami. Wadą, która w znaczący sposób może obniżyć szybkość pracy rozpatrywanej komórki pamięci jest zależny od czasu kierunek spod którego musi być przykładane pole przełączające. Dla takiego przypadku wymagana byłaby odpowiednia, mechaniczna głowica przemagnesowująca a jest to rozwiązanie, które obniża szybkość pracy pamięci.



**Rys. 4.** Mapa maksymalnych dla czasu przełączania wartości pól wymuszających przejścia pomiędzy wszystkimi ośmioma stanami stabilnymi dla czasu przełączania 1 ps

Wydaje się, że integracja magnetycznych, wielostanowych komórek pamięci z technologią CMOS pozwoli na pełniejsze wykorzystanie ich szybkości przełączania. Wymaga to zastosowania pól o stałym, niezależnym od czasu kierunku lub innych metod przełączania niż mechanicznie kontrolowane główce, co może być obszarem dla kolejnych wysiłków badawczych.

## Literatura

1. J. Akerman, „*Toward a Universal Memory*”, Science 308 (2005) 508-510.
2. S. S. P. Parkin, M. Hayashi, L. Thomas, „*Magnetic Domain-Wall Racetrack Memory*”, Science 320 (2008) 190-194.

3. T. Kawahara, K. Ito, R. Takemura, H. Ohno, „*Spin-transfer torque RAM technology: Review and prospect*”, *Microelectronics Reliability* 52 (2012) 613-627.
4. H. Richter, A. Dobin, O. Heinonen, K. Gao, R. Veerdonk, R. Lynch, J. Xue, D. Weller, P. Asselin, M. Erden, R. Brockie, „*Recording on Bit-Patterned Media at Densities of 1 Tb/in<sup>2</sup> and Beyond*”, *IEEE Trans. Magn.* 42 (2006) 2255-2260.
5. R. P. Cowburn, D. K. Koltsov, A. O. Adeqeqe, M. E. Welland, and D. M. Tricker, „*Single-Domain Circular Nanomagnets*”, *Phys.Rev.Lett.* 83 (1999) 1042.
6. W. Zhang and S. Haas, „*Phase diagram of magnetization reversal processes in nanorings*”, *Phys. Rev. B* 81 (2010) 064433.
7. K. He, D. J. Smith, and M. R. McCartney, „*Effects of vortex chirality and shape anisotropy on magnetization reversal of Co nanorings (invited)*”, *J. Appl. Phys.* 107 (2010) 09D307.
8. T. Blachowicz, A. Ehrmann, „*Square nano-magnets as bit-patterned media with doubled possible data density*”, *Materials Today: Proceedings XX* (2016) XXX–XXX
9. T. Blachowicz, A. Ehrmann, P. Steblinski, L. Pawela, „*Magnetization reversal in magnetic half-balls influenced by shape perturbations*”, *J. Appl. Phys.* 108, 123906(2010).
10. W. Scholz, J. Fidler, T. Schrefl, D. Suess, R. Dittrich, H. Forster, V. Tsiantos „*Scalable parallel micromagnetic solvers for magnetic nanostructures*”, *Comput.Mater.Sci.* 28 (2003) 366.
11. E. F. Kneller and R. Hawig, „*The exchange-spring magnet: a new material principle for permanent magnets*”, *IEEE Trans. Magn.* 27 (1991) 3588.
12. S. Tehrani, B. Engel, J.M. Slaughter, E. Chen, M. DeHerrera, M. Durlam, P. Naji, R. Whig, J. Janesky, J. Calder „*Recent developments in magnetic tunnel junction MRAM*”, *IEEE Trans. Magn.* 36(2000) 2752.

## Abstract

The model of multi-level magnetic cell memory was examined. The analysis of stable states, a switching signal (Zeeman field) intensity and direction in dependence of switching time along with writing density were performed. The 3-bit (8 independent stable states) magnetic cell memory achieved potential writing density of about 100-times higher than actual SSD memories having actually highest writing density. The examined switching times were from 1000 to 100000 times shorter than up to date semiconductor solutions. Importantly, the advantage of discovered switching field intensity was homogeneous in space and changed in time.

## **Streszczenie**

Przebadano model wielostanowej komórki pamięci magnetycznej. Przeprowadzono analizę ilości stanów stabilnych, wyznaczono natężenie sygnału przełączającego (pole Zeemana) pomiędzy stanami w zależności od czasu przełączania oraz wyznaczono gęstość zapisu. 3-bitowa (o 8 niezależnych stanach stabilnych) komórka pamięci magnetycznej posiadała około 100 razy większą gęstość zapisu niż aktualnie spotykane pamięci SSD o najwyższej gęstości. Badane czasy przełączania były od 1000 do 100 tys. razy mniejsze niż we współczesnych półprzewodnikowych odpowiednikach. Ważną zaletą wyznaczonego nieukierunkowanego pola przełączającego była jego jednorodność w przestrzeni oraz jedynie zmiana w czasie.

**Słowa kluczowe:** spintronika, logika magnetyczna, pamięci BPM, symulacje mikro-magnetyczne.