

Prof. dr hab. Tomasz Stobiecki
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Instytut Elektroniki
e-mail:stobieck@agh.edu.pl

Kraków, 7. 01. 2023

Recenzja

pracy doktorskiej mgra inż. Pawła Steblińskiego

Analiza dynamiki przemagnesowania ferromagnetycznych struktur niskowymiarowych

pod kątem zastosowań w układach pamięciowych i przetwarzania informacji

Promotor: prof. dr hab. Tomasz Błachowicz, Instytut Fizyki – Centrum Naukowo-Dydaktyczne,
Politechnika Śląska

Recenzja pracy doktorskiej o ww. tytule w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika została opracowana na podstawie uchwały nr 142/2022 Senatu Politechniki Koszalińskiej podjętej w dniu 26 października 2022 roku.

Wybór tematu pracy

Praca doktorska mgra inż. Pawła Steblińskiego dotyczy **badania teoretycznych** dynamiki procesu przemagnesowania matryc złożonych z nanorozmiarowych elementów ferromagnetycznych do zapisu i przetwarzania informacji, zagadnień bardzo ważnych dla firm zajmujących się technologią i wytwarzaniem urządzeń (twardych dysków) do zapisu magnetycznego o pojemnościach powyżej Tera bit/cal², takich firm jak na przykład Seagate Technology, czy Western Digital. Przeglądowe opracowanie z zakresu technologii wytwarzania twardych dysków i teorii zapisu informacji można znaleźć w pracy T.R. Albrecht et al. *Bit Patterned Magnetic Recording: Theory, Media Fabrication, and Recording Performance IEEE Trans. Magn. 51(5): 0800342 (2015)*.

Technologia zapisu prostopadłego na dysku o warstwie ciągłej, nie pozwala z powodu fizycznych ograniczeń (granica superparamagnetyczna), kodować informacji o pojemnościach większych niż 0.5 Tbit/cal². Dalszy postęp pozostaje w ścisłym związku z postępem w technologii nanostrukturyzacji, kiedy zrezygnujemy z ciągłej warstwy magnetycznej na rzecz matryc nanokomórek bitowych (bit patterned media (BPM)) o gęstości zapisu informacji 1.5 – 4 Tbit/cal². W tym przypadku granica superparamagnetyczna, w rozumieniu cienkiej ciągłej warstwy, zostaje przesunięta do wyższych gęstości zapisu. Dalszy postęp uzyskujemy kiedy na układzie pojedynczych komórek bitowych będziemy zapisywać wspomagając się impulsem laserowym, wtedy na jednej komórce możemy dokonać, poprzez zmianę pola koercji, kilku operacji logicznych. W takim przypadku gęstość zapisu w wspomaganego termicznie (heat-assisted magnetic recording (HAMR)) znacznie wzrośnie do 20 Tbit/cal² (Seagate <https://www.digitimes.com/news/a20210115PD211.html>).

Teza pracy

Zapis, odczyt i przetwarzanie informacji magnetycznej to procesy dynamiki przemagnesowania, które leżą w głównym nurcie pracy doktorskiej mgr inż. Pawła Steblińskiego. Problemy te zaliczamy do elektroniki spinowej (powszechnie nazywanej spintroniką), która zastąpiła przetwarzanie oparte o przepływ prądu ładunkowego, w klasycznej elektronice półprzewodnikowej, przez przetwarzanie oparte na przepływie spolaryzowanego spinowo prądu oraz na kontrolowanej ewolucji zmian czasowo-przestrzennych namagnesowania. Doktorant zdaje sobie sprawę, że takie podejście w pierwszej kolejności wymaga numerycznego rozwiązania równań dynamiki z uwzględnieniem wpływu temperatury. W związku z powyższym postuluje następującą tezę:

„... zmienny w czasie i przestrzeni rozkład temperatury i namagnesowania, zadany poprzez użycie odpowiednich równań dla nieustalonych stanów temperaturowych i namagnesowania, w tym poprzez równania Landaua - Lifszycy - Blocha (LLB), umożliwi określenie optymalnych warunków dla pracy urządzeń pamięciowych o jak najkrótszym czasie przetwarzania informacji oraz o jak największej gęstości zapisu”.

Do realizacji bardzo ambitnej tezy doktorant buduje narzędzia programistyczne, opisane w rozdziale 4. *Oprogramowanie do badania modeli ferromagnetycznych*, które oparte są na mikromagnetycznym oprogramowaniu *Open Source MAGPAR* stworzonym przez Wernera Scholtza z Politechniki Wiedeńskiej w 2003 roku. W rozdziale 4.2. *Modyfikacja i uzupełnienia oprogramowania MAGPAR* wymienia 37 narzędzi programistycznych które wytworzył, a które w istotny sposób modyfikują i uzupełniają oprogramowania MAGPAR przez opracowanie symulatora LLB.

Doktorant jest współautorem 7. doniesień naukowych, do których się odwołuje, bądź opublikowane wyniki przytacza w swojej dysertacji, z tego 5 zostało opublikowanych w indeksowanych czasopismach bazy JCR: *Journal of Applied Physics* (2), *International Journal of Electronics and Telecommunications* (1), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (1) i *Nanomaterials* (1).

Podsumowując ocenę tezy i celów rozprawy doktorskiej mgr Pawła Steblińskiego pragnę podkreślić, że tematyka i metody programistyczne opracowane przez doktoranta są bardzo nowoczesne i naukowo aktualne.

Treść pracy i uwagi ogólne

Przedstawiona rozprawa doktorska liczy 86 stron, ma tradycyjny układ i została podzielona na 7 rozdziałów. 8. i 9. rozdział to listy tabel i rysunków, 10. życiorys i dorobek naukowy autora, 11. bibliografia. Pomimo, że doktorant przed napisaniem rozprawy opublikował 5 prac związanych z doktoratem, nie zdecydował się ich włączyć *in extenso* do książki doktorskiej tylko ponownie szerzej omówił wyniki badań - poddając je ocenie w tym przypadku recenzentów doktoratu.

W rozdziale 1. *Wprowadzenie - cel pracy* doktorant uzasadnia, że powszechnie używane mikromagnetyczne oprogramowanie MAGPAR (Parallel Finite Element Micromagnetics Package) umożliwia tylko badanie modeli opartych na rozwiązywaniu niskotemperaturowego równania Landaua-Lifszycy-Gilberta (LLG w $T = 0$ K) natomiast dla układów ferromagnetycznych dla wyższych od zera bezwzględnej temperatury stosuje się zależne od temperatury mikromagnetyczne równanie Landaua – Lifszycy - Blocha (LLB), które pozwala na uzyskanie zmiennego w czasie i przestrzeni rozkładu temperatur dla całego badanego układu magnetycznego i jego otoczenia. Nowością, jaką zastosował

doktorant, wobec istniejących modeli, jest nieustalone przewodzenie ciepła w układzie poprzez wyznaczanie rozkładu temperatur przy pomocy elementów skończonych metodą Galerkiną opisaną w rozdziale 2.2. Owszem, doktorant opisuje matematycznie metodę dyskretyzacji bardzo szczegółowo, ale nie pisze jak implementuje wyprowadzone wzory do równania LLB. Proszę o wyjaśnienie w czasie dyskusji rozprawy doktorskiej.

Rozdział 3. *Magnetyzm ferromagnetyków w temperaturach powyżej zera absolutnego* autor rozprawy doktorskiej podzielił na 10 podrozdziałów. W celu uzyskania czasowo-przestrzennej dynamiki namagnesowania doktorant wzorując się na pracy *Stochastic form of the Landau-Lifshitz-Bloch equation*, R.F.L.Evans, et al. *Phys. Rev. B* 85, 014433, (2012) rozwiązuje numerycznie stochastyczne równanie LLB dla wyznaczonego pola efektywnego, złożonego z wyrazów pól: wymiany (3.3) anizotropii (3.4), pola materiałowego (3.5), demagnetyzacji (3.6), pól Langevina (3.7) i Zeemana (3.8). Poszczególne wyrazy pól zależne są od namagnesowania (opisanego w podrozdziale 3.1), i innych stałych materiałowych, które zależą od temperatury oraz od kształtu i rozmieszczenia nanoelementów matrycy pamięci magnetycznej. Interesujące jest wprowadzenie przez mgra Steblińskiego (wzorem prac: *Application of Landau-Lifshitz-Bloch dynamics to grain switching in heat-assisted magnetic recording* i T. W. McDaniel, *J. Appl. Phys.* 112, 013914, (2012)) pojęcia pola materiałowego (podrozdział 3.5), które moim zdaniem dubluje się z opisem zależności temperaturowej namagnesowania w podrozdziale 3.1. Czy dobrze rozumiem, że jest to zabieg „kontroli” zależności temperaturowej namagnesowania na dyskretnych elementach układu? Proszę w dyskusji wyników rozprawy podać jaki jest udział pola materiałowego w całkowitym polu efektywnym, warto też przy okazji przedyskutować wielkości wkładów od poszczególnych pól wymienionych powyżej. Bardzo ważnym wynikiem pracy jest rozszerzenie równania LLB o człon Slonczewskiego przeniesienia spinowego momentu siły (spin transfer torque STT) wynikającego z oddziaływania spinowo spolaryzowanego prądu z namagnesowaniem. Do stworzenia symulatora numerycznego, na przykład do zamodelowania szybkiej pamięci jednobitowej (rozdział 6.2), czy wielobitowej (rozdział 6.5) doktorant opracował metody dyskretyzacji równania LLB z członem STT.

W rozdziale 4. mgr Stebliński opisuje oprogramowanie do badania modeli ferromagnetycznych, które stworzył w oparciu o MAGPAR, który jest programem *Open Source*. Licencja programu pozwala na dostęp do plików źródłowych i ich swobodną modyfikację, biblioteki można w sposób darmowy i bezpieczny pobrać z internetu wraz z kodami źródłowymi. Ponadto MAGPAR jest skalowalny i rozproszony. Tak więc mając pełny dostęp doktorant stworzył symulator LLB w oparciu o MAGPAR co opisał wyczerpująco w podrozdziale 4.2 *Modyfikacja i uzupełnienie oprogramowania MAGPAR*.

Rozdział 5. *Koncepcje elektroniki spinowej* w zamiarze autora rozprawy ma zapoznać czytelnika z najnowszymi osiągnięciami spintroniki w zakresie technologii aplikacyjnych dla elektroniki. Niestety odwołania literaturowe odnoszą się do bardzo starych prac z lat pierwszego dziesięciolecia 21. wieku. W mojej ocenie warto by było zawrócić uwagę, zainteresowanych spintroniką, na przeglądowe artykuły, dotyczące rozwiązań komercyjnych w spintronice metalowej m.in.: B. Dieny, et al. *Opportunities and challenges for spintronics in the microelectronics industry*. *Nat. Electron.* **2020**, 3, 446, S. Ikegawa, et al. *Magnetoresistive random access memory: Present and future*. *IEEE Trans. Electron Dev.* **2020**, 67, 1407, A. Hirohata, et al. *Review on spintronics: Principles and device applications*. *J. Magn. Magn. Mater.* **2020**, 509, No. 166711, S. Bhatti, et al. *Spintronics based random access memory: a review*. *Mater. Today* **2017**, 20, 530. Warto również wspomnieć o pamięciach MRAM

opartych na przełączaniu podsieci spinów antyferromagnetyka, praca: J. Železný *et al.* *Spin transport and spin torque in antiferromagnetic devices*, *Nature Physics*, 2018 14, 220–228 (2018), gdzie autorzy zademonstrowali układ oparty na technologii CMOS, z komórkami pamięci antyferromagnetyka CuMnAs.

Doktorant słusznie zwraca uwagę na badania nad układami spintronicznymi posiadającymi cechy architektury neuromorficznej, których praca inspirowana jest działaniem mózgu istot żywych, dla przykładu odwołuje się do publikacji swojego promotora prof. Tomasza Błachowicza *Magnetic Elements for Neuromorphing Computing*, T. Błachowicz, *et al.* *Molecules*, vol. 25(11), (2020). Warto w tym miejscu wspomnieć o przeglądowej pracy opisującej rozwiązania praktyczne i teoretyczne obliczeń neuromorficznych, pionierki tych badań: J. Grollier, *et al.* *Spintronic nanodevices for bioinspired computing*, *Proc. IEEE* 104, 2024 (2016).

Z kolei zagadnienia gęstego zapisu informacji i wysokotemperaturowa dynamika przetwarzania informacji w pamięciach BPM (bit patterned media) opracowane z użyciem symulatora LLB to tematyka najbliższa naukowo doktorantowi. Wyniki badań w tym zakresie mgr Stebliński opisał w rozdziale 6. *Badania modeli układów spintronicznych*. Test prawidłowego działania symulatora (podrozdział 6.1) doktorant przeprowadza na parametrach z publikacji N. Kazantseva *et al.* *Towards multiscale modeling of magnetic materials: Simulations of FePt*, *Phys. Rev.B* 77, 184428, (2008) i T. W. McDaniel, *Application of Landau-Lifshitz-Bloch dynamics to grain switching in heat-assisted magnetic recording*, *J. Appl. Phys.* 112, 013914, (2012) symulując czasowe przebiegi składowych namagnesowania (m_x , m_y , m_z) dla temperatury 0K, pokojowej 300K i w pobliżu temperatury Curie (600K) uzyskując dla stopu FePt takie same wyniki jak ww. pracach.

Kolejny bardzo interesujący naukowo krok w oprogramowaniu symulatora LLB to opracowanie modelu szybkiej jednobitowej pamięci (podrozdział 6.2) przełączanej spinowo spolaryzowanym prądem o gęstości 10^{12} A/m². W przypadku zastosowania takiego sposobu przełączania w pamięciach BPM eliminuje się konieczność stosowania zewnętrznego pola magnetycznego od głowicy przemagnesowującej. Symulator mgra Steblińskiego tak pracuje, że wraz z przepływem prądu i ciepłem Joule’a wydzielanym w układzie, zmienia się temperatura komórek, a tym samym pole efektywne i przebieg dynamiki namagnesowania. Tymczasem finezja oprogramowania symulatora LLB według Steblińskiego uwzględnia subtelności fizyczne pomiędzy temperaturą a momentami sił od prądu spinowego, tak aby oddziaływanie spolaryzowanego spinowo prądu zdołało zmienić ukierunkowanie namagnesowania w warstwie aktywnej z jednego stanu stabilnego (równoległego do osi z) do drugiego (antyrownoległego do osi z) lub odwrotnie, a pobudzający impuls prądowy, nie powinien obniżać bariery energetycznej rozdzielającej stany stabilne polaryzatorów na tyle aby doszło do ich przemagnesowania. Model układu jednobitowych cylindrycznych komórek pamięci magnetycznej o promieniu 3.1 nm i wysokości 30 nm, których stan zmieniany jest prądem (Rys.6.2.1 i 6.2.2 w pracy doktorskiej) doktorant testował na strukturze wielowarstwowej osadzonej na podłożu MgO: górny polaryzator prądu FePt 6 nm, przekładka Ag 4 nm, warstwa przełączana FePt 10 nm, przekładka Ag 4nm, dolny polaryzator prądu FePt 6nm. Cylindryczne komórki połączone ze sobą złączami o długości 735 nm wykonanymi z Ag, odizolowane od otoczenia przez cylindryczną warstwę MgO o promieniu 10 nm, która izoluje układ prądowo od zewnętrznego środowiska odbierającego ciepło (warstwy Ag lub Cu).

Mam pytanie czy zaproponowany układ warstwowy cylindrycznych komórek magnetycznego stopu FePt o podanych wymiarach ma prostopadłą anizotropię magnetyczną wyindukowaną energią od magnesowania? Jeśli tak jest, to proszę to udowodnić. Oczywiście, dla poprawności działania modelu wystarczy założyć prostopadłe do powierzchni warstw FePt (współliniowe z osią cylindra) ułożenie wektorów magnetyzacji w stanie remanencji.

Podsumowując wysoko oceniam, uniwersalność symulatora LLB przetestowanego na modelu pamięci jednobitowej. Doktorant zoptymalizował sygnały prądowe formatujące komórkę, co do wartości impulsu, czasu trwania i kształtu oraz sporządził mapy prawdopodobieństwa stanu komórki – warstwy środkowej i polaryzatorów, przebadął także, wszystkie funkcjonalności dla różnych temperatur i otoczenia odbierającego ciepło Ag i Cu.

Kontynuując problem, autor rozprawy w rozdziale 6.5 *Wielostanowa komórka pamięci przełączana spolaryzowanym prądem* analizuje możliwość pikosekundowego przełączania kulistych komórek magnetycznych wykonanych z żelaza w wyniku przepływu spolaryzowanego spinowo prądu. Wyniki badań opublikował w pracy: P. Stebliński, T. Blachowicz *Conception of magnetic memory switched by time dependant current density and current electron spin polarization*, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 65, 2019.

Zdaniem doktoranta powyższa koncepcja jest możliwa gdyż płaszczyzna magnetycznej energii całkowitej kubicznej sferycznej „kropki” Fe posiada co najmniej 8 ekstremów energetycznych (wynik z pracy P. Stebliński, T. Blachowicz, A. Ehrmann *Analysis of the energy distribution of iron nano-spheres for bit-patterned media* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 562, 2022), w których istnieją quasi – stabilne (niezależne od czasu) rozkłady namagnesowania. Dzięki temu komórka może być wykorzystana jako wielostanowa pamięć o wysokiej gęstości zapisu. Również jako matrycowa pamięć przełączana zewnętrznym polem magnetycznym pochodzącym od głowicy (rozdział 6.4). Wobec tego rozwiązania doktorant jest sceptyczny, cytuję str. 62 „... przełączanie przy pomocy głowicy mechanicznej, może być trudne w realizacji dla pikosekundowych czasów przełączania”.

Mgr Stebliński w swoich futurologicznych pomysłach idzie dalej, w bardzo krótkim rozdziale 6.6 *Koncepcja hybrydowego procesora z rdzeniem spintronicznym* omawia pomysł na procesor spintroniczny, w którym łączy szereg technologii, optycznych/magnetooptycznych/magnetycznych wykonanych w warstwowej strukturze planarnej – jako eksperymentator cienkowarstwowy stwierdzam, że na obecnym etapie nanotechnologii procesorowej jest to projekt trudny do wykonania. Pomysł swój doktorant opublikował w *Wiadomościach Elektrotechnicznych*, 79, 2011 P. Stebliński, T. Blachowicz *Koncepcja hybrydowego procesora cyfrowego z rdzeniem spintronicznym*.

Rozprawę doktorską mgr inż. Paweł Stebliński kończy krótkim ogólnym podsumowaniem z nadzieją, że dzięki spintronice architektura komputerów uzyska nowe możliwości wynikające neuromorficznej właściwości elektroniki spinowej, który to wniosek uważam za słuszny z punktu widzenia rozwoju symulatorów nowych modeli mikromagnetycznych oraz narzędzi projektowych VLSI (Very-large-scale integration).

Układ treści pracy jest prawidłowy, rozdziały zostały ułożone logicznie, forma graficzna bardzo staranna. Nie zauważyłem poważniejszych błędów i pomyłek, ale na przykład rozdział 6.1 *Porównanie symulacji z wynikami literatury* mógłby się kończyć wnioskami co do porównań w symulowanych przebiegów przez doktoranta a nie, że wyniki czytelnik ma sam sobie porównać z rysunkami w

publikacjach do których autor rozprawy się odwołuje. Na str. 21 przed wzorem (90) powinno się cytować pracę [8].

W mojej opinii literatura dotycząca zagadnień fizycznych związanych z dynamiką magnetyzacji równaniami LLG i LLB, magnetyzmem, przewodnictwem cieplnym, metodami informatycznymi z zakresu numerycznych metod dyskretyzacji została prawidłowo dobrana i właściwie cytowana. Natomiast jak wspomniałem wyżej, cytowanie prac przeglądowych omawiających kierunki rozwoju spintroniki aplikacyjnej i teoretyczno-fizycznej są przestarzałe. Z żalem stwierdzam, że tak aktywnie działający naukowo zespół kierowany przez prof. Tomasza Błachowicza, z dużym doświadczeniem w modelowaniu mikromagnetycznym, działa w oderwaniu od eksperymentu, bez prób podjęcia współpracy z licznymi zespołami spintronicznymi/magnonicznymi w naszym kraju, czy zagranicą (takie wrażenie, być może mylnie odniosłem po zapoznaniu się z dorobkiem doktoranta i Jego promotora).

Powyższe krytyczne uwagi nie umniejszają mojej bardzo wysokiej ocenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Steblińskiego.

Ocena rozprawy i uzasadnienie wyróżnienia

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska mgra inż. Pawła Steblińskiego *Analiza dynamiki przemagnesowania ferromagnetycznych struktur nisko wymiarowych pod kątem zastosowań w układach pamięciowych i przetwarzania informacji* zawiera bardzo interesujące i oryginalne wyniki modelowania mikromagnetycznego zależnych temperaturowo procesów dynamicznych, doktorant wykazał się dużą wiedzą z zakresu teorii fizyki magnetyzmu i przewodnictwa cieplnego. Na szczególne wyróżnienie zasługuje, mimo Jego wykształcenia politechnicznego, bardzo głęboko teoretyczne fizycznie opracowanie rozdziałów: 2. *Nieustalone przewodzenie ciepła w układach fizycznych* i 3. *Magnetyzm ferromagnetyków w temperaturach powyżej zera absolutnego*.

Z całą stanowczością chciałbym podkreślić, że teza rozprawy doktorskiej dotycząca opracowania urządzeń pamięciowych o jak najkrótszym czasie przetwarzania informacji oraz o jak największej gęstości zapisu poprzez rozwiązanie równania LLB została udowodniona.

Na szczególne uwagę zasługują następujące oryginalne wyniki:

- opracowanie w oparciu o MAGPAR mikromagnetycznego oprogramowania do numerycznego badania dynamicznych modeli przełączania magnetyzacji w urządzeniach typu BPM przełączanych prądem (poprzez efekt STT) i zewnętrznym polem magnetycznym (głowicą),
- symulacyjno-numeryczne zademonstrowanie działania jednobitowej pamięci zbudowanej na cylindrycznych wielowarstwowych nanoelementach FePt/Ag/FePt,
- rozszerzenie tej koncepcji na wielostanowe pamięci realizowane na nanosferycznych kulkach Fe dzięki stabilnym rozkładom namagnesowania w bcc Fe (praca JMMM 2022).

Pragnę podkreślić, o czym szczegółowo piszę powyżej, że doktorant ma na swoim koncie 7. współautorskich publikacji związanych z pracą doktorską. Doktorant swoją, co należy podkreślić, dużą aktywność naukową opisał w rozdziale 10. *Życiorys i dorobek naukowy autora*, według bazy Web of Science na dzień 10 stycznia 2023 ma 66 cytowań bez autocytowań.

Biorąc pod uwagę nowatorskie wyniki, bardzo wnikliwe i krytyczne ich opracowanie w postaci publikacji i rozprawy doktorskiej stawiam wniosek o wyróżnienie pracy doktorskiej pana mgra inż.

Pawła Steblińskiego *Analiza dynamiki przemagnesowania ferromagnetycznych struktur nisko wymiarowych pod kątem zastosowań w układach pamięciowych i przetwarzania informacji.*

Wniosek końcowy

Na podstawie przeprowadzonej oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że spełnia ona z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy. Dlatego biorąc pod uwagę dorobek naukowy mgr inż. Pawła Steblińskiego i pozytywną ocenę Jego rozprawy doktorskiej uważam, że w myśl ustawy z 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki mgr inż. Paweł Stebliński spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora nauk technicznych, w dziedzinie nauk-inżynieryjno-technicznych dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, wnioskuję o dopuszczenie do publicznej obrony przedstawionej rozprawy oraz stawiam wniosek o jej wyróżnienie.



