

Poznań, 23 stycznia 2018

Prof. Maciej Krawczyk
Wydział Fizyki
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

**Recenzja pracy doktorskiej
pana mgra Jakuba Chęcińskiego
pt. „*Modeling of magnetization dynamics in spintronic oscillators*”.**

Praca doktorska mgra Jakuba Chęcińskiego została wykonana na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie pod kierunkiem prof. dra hab. Tomasza Stobieckiego i promotora pomocniczego dra inż. Marka Frankowskiego. Praca doktorska została złożona w listopadzie 2018 roku.

Celem pracy doktorskiej było przeprowadzenie badań naukowych przy wykorzystaniu symulacji mikromagnetycznych i modeli teoretycznych zmierzających do wyjaśnienia złożonych zjawisk fizycznych związanych z dynamiką magnetyzacji w spintronicznych oscylatorach pod kątem ich przydatności w wybranych urządzeniach do przechowywania i przetwarzania informacji.

W skład rozprawy doktorskiej włączonych zostało 5 publikacji pogrupowanych tematycznie w trzech rozdziałach (rozdziały 4–6). Całość została uzupełniona dwoma rozdziałami wprowadzającymi w tematykę badawczą poruszaną w publikacjach, oraz krótkim wstępem i zakończeniem. Poniżej omówię kolejne rozdziały.

W rozdziale drugim zaprezentowane zostały podstawowe zasady funkcjonowania, właściwości i sposoby teoretycznego opisu oscylatorów spintronicznych opartych o transfer spinowego momentu siły (tzw. oscylatory *spin-transfer torque*, STT) oraz wykorzystujące spinowy efekt Halla (*spin-Hall effect*, SHE). Dołączone zostało wprowadzenie również do nowego działu spintroniki, tj. fizyki oscylatorów spinowych w oparciu o materiały antyferromagnetyczne. W rozdziale 3 pokrótce omówione zostały numeryczne metody stosowane w mikromagnetyzmie, przedstawiono wprowadzenie do obliczeń z wykorzystaniem sieci neuromorficznych i możliwości wykorzystania do ich budowy oscylatorów spintronicznych oraz przedstawiono metodę liniowej regresji i metodę walidacji krzyżowej. W dalszej części pracy przedstawione zostały wyniki badań naukowych przeprowadzonych przez doktoranta i stanowiących sedno pracy doktorskiej. W szczególności zaprezentowano zastosowanie oscylatora STT do detekcji pola magnetycznego, z wskazaniem potencjalnego wykorzystania oscylatora STT w głowicach odczytowych magnetycznych dysków twardych (HDD). Opisany został wpływ niejednorodności zewnętrznego pola magnetycznego na działanie takiego urządzenia oraz zaproponowano metodę jednoczesnego odczytu informacji dwóch bitów zapisanych w sąsiednich domenach. Wykorzystanie głowicy opartej o oscylator typu STT pozwoliło zachować wysoki stosunek sygnału do szumu przy detekcji dwu bitowej.

Następnie, przedstawiono możliwości realizacji obliczeń neuromorficznych przy użyciu połączonych ze sobą oscylatorów opartych o SHE, demonstrując wykorzystanie tych układów do przeprowadzenia algorytmu detekcji krawędzi. W kolejnej części zbadano numerycznie w oparciu o modelowe obliczenia działanie oscylatorów antyferromagnetycznych w zastosowaniu

do detekcji zewnętrznego pola magnetycznego. Pokazano, że zewnętrzne pole magnetyczne może wprowadzać nowe elementy w dynamice, takie jak przesunięcia fazowe odpowiedzi układu na przyłożony sygnał harmoniczny, czy możliwość rezonansowego wzmacniania amplitudy oscylacji.

Do pracy doktorskiej dołączone zostało również oprogramowanie typu *open-source*, przygotowane przy dużym udziale doktoranta, ułatwiające przygotowywanie plików konfiguracyjnych do symulacji mikromagnetycznych oraz analizy danych otrzymanych w wyniku tych symulacji. Przedstawiono również fenomenologiczną metodę szacowania szumu termicznego w magnetycznych złączach tunelowych (*magnetic tunnel junctions*, MTJ) w oparciu o kilka parametrów, które są dostępne w standardowych pomiarach. Otrzymane wyniki zostały porównane z wynikami eksperymentalnymi, co pozwoliło potwierdzić, iż informacje o rezystancji, objętości i czułości polowej są wystarczające do określenia mocy szumu białego jak i typu $1/f$ w standardowych czujnikach działających w oparciu o MTJ przy wykorzystaniu prądu o dowolnej amplitudzie.

Przechodząc do oceny poszczególnych części pracy doktorskiej, mogę stwierdzić, że wprowadzenie w rozdziale 2, jest bardzo dobrze napisane, jasnym językiem, tworząc spójne logicznie opracowanie wstępu do fizyki oscylatorów spintronicznych w oparciu o STT i SHE, ze wskazaniem różnic i zalet obu typów oscylatorów. Wprowadzenie zawiera również ogólne omówienie podstaw symulacji mikromagnetycznych jak i wykorzystywanych w publikacjach modeli teoretycznych. Moją uwagę zwróciło bardzo interesujące wprowadzenie do synchronizacji oscylatorów i ciekawe omówienie warunków występowania synchronizacji w oparciu o model wprowadzony przez Slavina i Tiberkevicha. Tutaj nasunęło się pytanie. Mianowicie, z wprowadzonego równania (5) wynika założenie kołowej precesji magnetyzacji, choć chyba nie wspomniane bezpośrednio przez autora. Interesujące by było poznać warunki kiedy to założenie jest spełnione i czy jest znana teoria z eliptyczną precesją magnetyzacji. Niemniej interesujące jest wprowadzenie do antyferromagnetycznych oscylatorów, które pokazuje na szerokie zainteresowania doktoranta, znajomość aktualnej literatury i znajomość rachunku wariacyjnego. W całym wprowadzeniu zidentyfikowałem tylko pojedyncze błędy językowe (jak na stronie 13 w 3 linii „*ferromagnetic layer are*”), czy drobne niekonsekwencje przy stosowaniu odnośników do równań (na stronie 13 jest „*Eq.1*”, w pozostałej części pracy jest *'equation ...'*), co świadczy o wysokim poziomie redakcyjnym przygotowanej rozprawy.

Rozdział 3 jest na równie wysokim poziomie, co poprzedni. Szczególnie interesujące z mojego punktu widzenia jest ładnie i klarownie napisane wprowadzenie do elementów metod statystycznych wykorzystywanych w pracy doktorskiej, tj. liniowej regresji i walidacji krzyżowej (*cross-validation*) z podaniem prostego przykładu jak te metody działają. Prezentowane informacje, potwierdzają szerokie horyzonty i szerokie spektrum zainteresowań doktoranta. Jedyne pytanie, jakie mi się nasunęło w trakcie lektury to brak jasnego wyjaśnienia co do stosowanego kroku czasowego, ustalonego na 0.1 ps, czy adaptacyjnego, stosowanego w symulacjach mikromagnetycznych. Jaki jest najkrótszy krok czasowy przy stosowaniu funkcji automatycznego doboru kroku czasowego?

Przechodząc do rozdziałów stanowiących sedno pracy doktorskiej mgra Jakuba Chęcińskiego, mogę stwierdzić, że w skład rozdziału 4 wchodzi trzy bardzo ciekawe i dobrze napisane prace. Dwie pierwsze prezentują wspomniane wyżej zastosowanie oscylatorów do detekcji pola magnetycznego. Tutaj zabrakło mi informacji, jakie najmniejsze zmiany częstotliwości oscylatora byłyby mierzalne w warunkach laboratoryjnych i ewentualnych zastosowaniach w głowicach HDD? Trochę szkoda, że ostatni manuskrypt wchodzący w skład tego rozdziału, dotyczący bardzo aktualnego zagadnienia, jakim jest realizacja obliczeń

neuromorficznych przy wykorzystaniu nanoscylatorów SHE, choć uzasadnione prawami autorskimi, jest okrojony o szczegóły fizyki tych układów. Nie łamiąc ochrony praw autorskiej, ciekawe byłby oszacowanie wydajności rozpoznawania krawędzi obrazów przy wykorzystaniu proponowanych układów z SHE nano-oscylatorów w porównaniu z klasycznymi algorytmami przy wykorzystaniu układów CMOS. Mam nadzieję, że tematyka obliczeń neuromorficznych będzie przez doktoranta kontynuowana, a badania zakończą się publikacją w najlepszych czasopismach, na co wskazują zaprezentowane wyniki.

W skład rozdziału 5 wchodzi jedna ciekawa i wartościowa w mojej opinii publikacja. Dotyczy dynamiki w nano-oscylatorach w oparciu o materiały antyferromagnetyczne, będąca naturalną kontynuacją badań nad nano-oscylatorami ferromagnetycznymi omawianymi w rozdziale poprzednim. Jest to kolejny temat poruszany przez doktoranta, będący w aktualnym kręgu zainteresowań wielu wiodących ośrodków naukowych na świecie, a prezentowane badania mogą stanowić interesujący punkt odniesienia i wskazanie jednej z możliwości ich wykorzystania. Uzyskana została bardzo dobra zgodność wyników numerycznych otrzymanych w ramach przyjętego modelu z wynikami analitycznymi. Ciekawa i intrygująca jest bardzo ostra i jednoznaczna relacja między odpowiedzią nano-oscylatora a zmianami zewnętrznego pola magnetycznego (Rys. 8 w pracy). Ciekawe jest jakie efekty występujące w rzeczywistych układach zostały w modelu zaniedbane, i z jakiego powodu, w przypadku oscylatorów ferromagnetycznych reakcja nano-oscylatorów jest istotnie zmodyfikowana.

W skład ostatniego rozdziału pracy doktorskiej wchodzi dwie publikacje. Pierwsza z opisem oprogramowania współtworzonego przez doktoranta do pomocy w prowadzeniu symulacji mikromagnetycznych. Warto podkreślić jest udostępnienie opracowanych kodów na licencji kodów otwartych (*open-source*), co pozwala innym na wykorzystanie czy zapoznanie się z pracą zrealizowaną w ramach pracy doktorskiej, dalsze ich rozwijanie czy przystosowywanie do własnych potrzeb. Druga publikacja poświęcona jest opracowaniu modelu pozwalającego oszacować poziom szumu termicznego w cienkich warstwach ferromagnetycznych z tunelowym magnetooporem przy wykorzystaniu metod statystycznych omawianych wcześniej. Są to bardzo ciekawe badania, w których opracowywany model jest zweryfikowany eksperymentalnie. Pokazuje, to na możliwości doktoranta do współpracy z grupami eksperymentalnymi, co jest istotne przy prowadzeniu badań w spintronice.

Ostatni rozdział w pracy doktorskiej stanowi bibliografia. Pozycje bibliograficzne zostały dobrane adekwatnie do omawianej tematyki, i jej dobór pokazuje bardzo dobre zaznajomienie doktoranta w aktualnej literaturze przedmiotu, jak i znajomość najważniejszych pozycji z spintroniki. Zidentyfikowałem jedynie dwa drobne błędy edytorskie, w pozycji 24 i 25, nie jest jasne do czego odnosi się numer tomu czy numeru, podany przy pozycjach książkowych. Zwraca uwagę również brak konsekwencji w pisowni tytułów czasopism w pełnej formie lub skróconej, z wielkich czy małych liter, czy też inicjałów (z kropkami lub bez), pełnych imion współautorów.

Podsumowując, stwierdzam, że wkład mgr Jakuba Chęcińskiego w modelowanie dynamiki magnetyzacji w oscylatorach spintronicznych przedstawionych w pracy doktorskiej jest dominujący. Doktorant uzyskał szereg interesujących rezultatów, w bliskim związku do praktycznych zastosowań, które zostały opublikowane w dobrych czasopismach naukowych. Przypuszczam, że przedstawione badania będą stanowiły istotny wkład w rozwoju tej tematyki badawczej. Przedstawione badania prowadzone były w ramach kilku projektów naukowych w których doktorant był wykonawcą, a także dwóch projektów koordynowanych przez mgra Jakuba Chęcińskiego, z programu Preludium i Etiuda. Ponadto, doktorant jest współautorem 13 prac opublikowanych w międzynarodowych czasopismach, wyniki swoich badań prezentował na 5

wystąpieniach ustnych i 4 prezentacjach posterowych na konferencjach międzynarodowych. Cały dorobek wskazuje, że mgr Jakub Chęciński jest dojrzałym naukowcem, o bogatym dorobku naukowym i doświadczeniu grantowym.

Podsumowując, uważam, że przedstawiona rozprawa z nawiązką spełnia wymogi Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr Jakuba Chęcińskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Ze względu na bardzo wysoką wartość naukową zaprezentowanych prac naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej, ich szeroki wachlarz tematyczny i wyniki wprowadzające w nowe tematyki badań w spintronice, opracowanie kodów komputerowych wspomagających symulacje mikromagnetyczne udostępnionych na zasadzie otwartych kodów źródłowych i bardzo dobre opracowanie wyników badań, wnoszę również o wyróżnienie pracy doktorskiej pana mgra Jakuba Chęcińskiego.

Prof. Maciej Krawczyk

