

INSTYTUT ELEKTRONIKI

Dr hab. inż. Witold Skowroński, prof. AGH
e-mail: skowron@agh.edu.pl

Kraków, dn. 02.09.2024

Recenzja pracy doktorskiej Krzysztofa Szulca z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu zatytułowanej: „Impact of interactions between ferromagnetic layers on spin-wave dynamics” napisanej pod opieką prof. dr hab. Macieja Krawczyka wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Fizyki UAM dr hab. Romana Gołbiewskiego zgodnie z pismem z 27.06.2024 r.

Praca doktorska mgr. Krzysztofa Szulca pt. „Impact of interactions between ferromagnetic layers on spin-wave dynamics” została napisana pod opieką prof. dr hab. Macieja Krawczyka w Instytucie Spintroniki i Informatyki Kwantowej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu. Rozprawa została napisana w języku angielskim na podstawie pięciu publikacji, z czego cztery zostały po recenzjach opublikowane w uznanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym a piąta z nich została umieszczona w bazie danych arxiv.org.

1. Układ pracy

Praca składa się z następujących części: streszczenie, spis treści, wstęp oraz kilkudziesięciostronnicowe wprowadzenie teoretyczne oraz opis wykorzystanych metod. Następnie autor zamieszcza kolejno publikacje, powiązane tematycznie dotyczące problematyki pracy, czyli badań nad dynamiką fal spinowych w heterostrukturach spintronicznych. Każda z włączonych publikacji zawiera krótki wstęp z komentarzem, w którym autor szczegółowo umieszcza swój wkład oraz historię powstania publikacji. Prawie każda z prac zawiera dodatek. Następnie, autor podaje listę prac które nie zostały włączone do doktoratu, a stanowią jego istotny dorobek oraz podsumowuje wyniki przedstawionych badań. Lista referencji zawiera 215 pozycji, całość zakończona jest krótką notką biograficzną autora.

2. Ocena formy oraz języka pracy

Forma przedstawionej pracy jest klarowna, pierwsza część rozprawy wprowadza czytelnika do tematyki, zawiera niezbędne informacje

teoretyczne, takie jak krótkie przedstawienie zjawiska ferromagnetyzmu, hamiltonian energii umożliwiający określenie kierunku namagnesowania cienkich warstw magnetycznych i układów wielowarstwowych, ze szczególnym uwzględnieniem energii anizotropii magnetycznej oraz oddziaływania Działożyńskiego-Morii. Następnie mgr. Szulc opisuje najczęściej spotykane tekstury magnetyczne, takie jak układy jednodomenowe, wielodomenowe, worteksy i skyrmiony. Kolejny rozdział zawiera opis zjawisk dynamiki magnetyzacji z uwzględnieniem równania LLG, fal spinowych oraz opis modów drgań w układach jedno i wielowarstwowych, ze szczególnym naciskiem na oddziaływanie wymienne i magnetostatyczne, które jest przedmiotem szczegółowych badań w publikacjach. Rozdział drugi kończy krótki opis możliwych zastosowań fal spinowych do obliczeń co wg mojej oceny, może stanowić najciekawsze zastosowanie diskutowanych badań w przyszłości i zasługuje na bardziej dogłębną analizę.

Rozdział trzeci zawiera dokładne wprowadzenie do zastosowanych metod, w szczególności do symulacji mikromagnetycznych z wykorzystaniem środowiska COMSOL, do którego autor włączył szereg dodatkowych trybów. Ten fragment stanowi główne narzędzie badawcze doktoranta.

Rozdział czwarty zawiera wcześniej wspomniane publikacje wraz z krótkim wprowadzeniem. Ostatni, piąty rozdział zawiera krótkie podsumowanie po czym następuje spis treści zawierający ponad 200 pozycji oraz opis pozostałego dorobku naukowego autora. Język angielski stosowany w pracy jest poprawny i profesjonalny.

3. Cel pracy oraz ocena dorobku

Celem pracy jest zbadanie wpływu różnego rodzaju oddziaływań występujących w magnetycznych układach cienkowarstwowych na dynamikę fal spinowych, które w dalszej perspektywie pozwolą na konstrukcję platformy magnonicznej lub spintronicznej, która mogłaby rozwiązać problemy, przed którymi obecnie stają konwencjonalne układy bazujące na logice CMOS (głównie gęstość energii oraz tradycyjna von-Neumannowska architektura). W kolejnych pracach, które zostały napisane na przestrzeni kilku lat od 2020 do 2024 autor wraz z zespołem proponuje kilka rozwiązań układów magnetycznych, które mogą stanowić budulec przyszłych układów logiki post-CMOS'owych, takich jak dioda lub cyrkulator fal spinowych (praca P1), wielowrotnik rezonansowy w pracy P2. W kolejnych dwóch pracach mgr Szulc podejmuje współpracę z zespołami eksperymentalnymi (w pracy P3 bez swojego promotora, co dodatkowo świadczy o jego dojrzałości i samodzielności), gdzie doświadczenie w obliczaniu relacji dyspersji z wykorzystaniem wszystkich diskutowanych oddziaływań (głównie DMI) prowadzi do poprawnej interpretacji danych. W pracy P4 autorzy proponują rozwiązanie kryształu magnonicznego, czyli struktury o periodycznych zmianach namagnesowania, w których można zaobserwować przerwy w paśmie fal spinowych. Podobne badania, tym razem jedynie teoretyczne

podejmowane są w pracy P5, gdzie relacje dyspersji obliczane są w hybrydowym kryształ magnonicznym, w którym dodatkowo (podobnie jak w pracy P4) można zmieniać charakter namagnesowania w warstwie ferromagnetyka w postaci kropek, umieszczonego na falowodzie z materiału magnetycznego o niskim tłumieniu.

Sumarycznie, dorobek Pana Szulca oceniam bardzo wysoko, we wszystkich przedstawionych pracach jest on autorem korespondencyjnym i wykonał kluczowe badania. Prace zostały opublikowane w renomowanych czasopismach takich jak Physical Review Applied, Applied Physics Letters, Physical Review B czy ACS Nano. Na uwagę zasługuje fakt, że praca P2 została wykonana we współpracy ze studentem z Francji, nad którym autor sprawował opiekę.

4. Ocena zastosowania metod badawczych

Autor zastosował odpowiednie metody badawcze, wykorzystujące symulacje mikromagnetyczne bazujące na pakiecie COMSOL, które dość szczegółowo wprowadził w rozdziale trzecim. Na uwagę zasługuje możliwość szczegółowego obliczenia relacji dyspersji, które pod pewnym względem jest odpowiednikiem eksperymentalnych Brillouinowskiego rozpraszania światła. W pracy P1 z kolei, symulacje mikromagnetyczne umożliwiają badania propagacji fal spinowych w różnych warstwach magnetycznych układu wielowarstwowego, które pokazują wąskopasmowe działanie diody lub cyrkulatora. Jak wspomniano powyżej, narzędzia symulacyjne opanowane przez doktoranta zostały wykorzystane do interpretacji danych eksperymentalnych, co stanowiło istotną wartość dodaną i umożliwiło określenie parametrów próbek cienkowarstwowch, które nie są bezpośrednio mierzalne. Wg recenzenta, taka współpraca zawsze pozytywnie wpływa na weryfikację stawianych tez w pracach symulacyjnych lub teoretycznych.

5. Ocena wyników badań oraz ich zastosowania

Jak wspomniano powyżej pierwsze dwie pracy stanowiące część rozprawy mają charakter teoretyczny, jednak w sposób jasny dla eksperymentatora proponują konkretne rozwiązanie z wykorzystaniem realistycznych parametrów, które umożliwi konstrukcję mikrofalowego obwodu wykorzystującego fale spinowe i sprzężenia magnetyczne do działania. W szczególności praca P1 jest szeroko cytowana w środowisku o doczekała się fizycznych realizacji. To jednoznacznie świadczy o wysokich kompetencjach autorów pracy i bardzo dobrego warsztatu. Z kolei prace P3 i P4 powstały we współpracy z zespołami eksperymentalnymi, w którym autor miał kluczową rolę w interpretacji danych. W szczególności, w pracy P4 autorzy zaproponowali hybrydową strukturę kryształu magnonicznego, w którym twarda magnetycznie warstwa NdCo o prostopadłej anizotropii magnetycznej i dużym tłumieniu wymusza periodyczne namagnesowania miękkiego

ferromagnetyka – permaloju, który niewielkim zewnętrznym polem magnetycznym można przemagnesować. Możliwość kontrolowania kryształu magnonicznego stanowi istotny wkład w branżę magnoniki i przybliża realizację rzeczywistych urządzeń. Możliwość planarnego kontrolowania stanu namagnesowania w układach wielowarstwowych, np. poprzez sprzężenie umożliwia projektowanie falowodów dla spintroniki, z czego już środowisko poznańskie jest znane na całym świecie.

6. Uwagi krytyczne

Jak piszę powyżej, oceniam zarówno pracę doktorską jak i dorobek mgr Krzysztofa Szulca bardzo wysoko. Nie znalazłem większych nieprawidłowości w pracy. Poniżej pozwalam sobie na wypisanie kilku uwag krytycznych:

- a) Współczynnik dobroci (Q) w układach dynamicznych zazwyczaj określa stosunek szerokości linii rezonansowej do jej częstotliwości, jednak autor wykorzystuje go do określenia kierunku namagnesowania efektywnego (w płaszczyźnie lub prostopadle do warstwy). We wstępie autor użył określeń, że we współczesnej elektronice to duże gęstości mocy (zgoda) i wysokie napięcia (brak zgody) ograniczają dalszy rozwój.
- b) Dodatkowo, w elektronice również powszechnie wykorzystuje się interpretację falową zjawisk, więc sformułowanie 'different physics' niekoniecznie ma zastosowanie.
- c) Na stronie 20 autor pisze, że duże pole prostopadłe do warstwy jest konieczne do uzyskania prostopadłej orientacji namagnesowania, jednak obecnie dość powszechne są cienkie układy magnetyczne, które poprzez duży przycynek międzypowierzchni mają namagnesowanie prostopadłe również bez pola.

Jednocześnie, podczas publicznej obrony prosiłbym autora o ustosunkowanie się do następujących kwestii:

- a) Autor w kilku miejscach pomija tłumienie warstwy ferromagnetycznej do obliczeń współczynnika propagacji pomiędzy portami. Jak realistycznie przyjęte tłumienia (np. dla Py, YIG lub CoFeB) będzie wpływało na zaproponowane urządzenia przy rzeczywistych rozmiarach?
- b) W pracy P4 autor pokazuje możliwość kontrolowania stanu kryształu magnonicznego polem magnetycznym. Czy autor jest w stanie zaproponować bardziej skalowalną metodę sterowania namagnesowaniem (polem elektrycznym lub prądem?)
- c) W większości przypadków proponowane rozwiązania mają charakter wąskopasmowy czyli np. dioda z pracy P1 działa tylko dla określonej

częstotliwości. Co zrobić, żeby zwiększyć pasmo działania tych prototypów?

- d) Spośród wszystkich zastosowań fal spinowych, wg mnie potencjalne wykonywanie obliczeń niesie ze sobą największe korzyści w stosunku do obecnych, bardziej dojrzałych technologii. Czy bazując np. na pracy P5 czy autor jest w stanie zaproponować platformę do obliczeń z wykorzystaniem miękkiego ferromagnetyka i kropek, które mogą zmieniać swój stan (np. z jednodomenowego na skyrmionowy) pod wpływem sygnału sterującego? W jaki sposób zrealizować odczyt z takiego urządzenia?

W podsumowaniu, stwierdzam, że mgr Krzysztof Szulc przedłożył bardzo dobrą pracę doktorską, która zawiera oryginalne wyniki badań zawarte w pięciu publikacjach. Publikacje, które stanowią rdzeń rozprawy zostały dostrzeżone przez środowisko naukowe i przybliżają fizyczną realizację energooszczędnych układów magnonicznych stanowiących alternatywę dla tradycyjnych elektronicznych rozwiązań. Doktorant wykazał się umiejętnością rozwiązywania złożonych problemów, bardzo dobrym rozeznaniem oraz solidnym warszatem teoretycznym. Tym samym stwierdzam, że zgodnie z art. 13, ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789) w związku z art. 179. ust. 1. i ust. 2 ustawy z dnia 3. lipca 2018 roku Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. Zm.) rozprawa spełnia wymagane do uzyskania do stopnia doktora w dyscyplinie Nauk Fizycznych.

Jednocześnie biorąc pod uwagę zarówno jakość pracy doktorskiej, publikacji stanowiących jej trzon oraz pozostały dorobek autora (m.in. kierowanie grantem Preludium NCN, opieka nad dyplomantem podczas wymiany na UAM, liczne wystąpienia konferencyjne, udział w prestiżowym artykule przeglądowym) wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana Krzysztofa Szulca.



Dr hab. inż. Witold Skowroński, prof. AGH