



Instytut Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk

Mariana Smoluchowskiego 17, 60-179 Poznań
tel. 61 8695 100, 234, faks 61 8684 524
www.ifmpan.poznan.pl

Poznań, 21 sierpnia 2024 r.

prof. dr hab. Tomasz Toliński
Instytut Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu

Recenzja pracy doktorskiej
mgr. Krzysztofa Szulca
zatytułowanej
„Impact of interactions between ferromagnetic layers
on spin-wave dynamics”

Swoją rozprawę doktorską mgr Krzysztof Szulc wykonał pod opieką prof. dr. hab. Macieja Krawczyka w Instytucie Spintroniki i Informacji Kwantowej Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Tematyka rozprawy dotyczy układów wielowarstwowych, opartych głównie na materiałach ferromagnetycznych, a w szczególności kontrolowanej generacji fal spinowych w takich układach, ich propagacji, zależności dyspersyjnych i wielu innych właściwości, które mogą stanowić podstawę do konstrukcji urządzeń magnonicznych. Zaletą takich nanoskalowych układów wykorzystujących fale spinowe jest niskie zapotrzebowanie na energię, ale wyzwaniem pozostaje szybkość ich działania. Głównym narzędziem pracy Doktoranta są symulacje mikromagnetyczne, ale w wielu przypadkach wsparte badaniami eksperymentalnymi, realizowanymi dzięki szerokiej współpracy z innymi ośrodkami naukowymi.

Mgr Krzysztof Szulc swoją rozprawę doktorską napisał w języku angielskim i już w tym momencie chciałbym podkreślić, że w moim odbiorze uczynił to na wysokim poziomie. Pracę czyta się bardzo dobrze, trudno dopatrzeć się jakichkolwiek istotnych usterek językowych, czy stylistycznych. Cała rozprawa, wraz ze stanowiącymi jej integralną część pięcioma publikacjami i informacjami o autorze liczy 125 stron. W osobnej dokumentacji Doktorant załączył wymagane przepisami oświadczenia współautorów publikacji o ich udziale w powstaniu tych prac. Swoją własny wkład mgr Krzysztof Szulc określa jako udział w większości etapów powstawania publikacji, a więc współtworzeniu idei badań, definiowaniu problemu do rozwiązania, realizacji symulacji numerycznych, interpretacji i dyskusji wyników oraz przygotowaniu manuskryptu. Deklaracje Doktoranta i pozostałych współautorów są zgodne, w zależności od publikacji udziały w poszczególnych etapach się zmieniają,

w szczególności w publikacjach, w których silnie powiązane są badania eksperymentalne i symulacje mikromagnetyczne, w oczywisty sposób wkład partnerów zagranicznych, realizujących część eksperymentalną jest również znaczący. Jednakże potwierdzeniem dużego zaangażowania Doktoranta i jego dominującej roli jest niewątpliwie fakt, że w czterech z pięciu publikacji stanowiących podstawę rozprawy jest pierwszym autorem. W pracy [P2] jest drugim autorem, pełnił jednak rolę współopiekuna głównego autora. We wszystkich pracach jest autorem lub współautorem korespondencyjnym.

Na strukturę rozprawy doktorskiej mgr. Krzysztofa Szulca składa się pięć rozdziałów: Wstęp do magnetyzmu, dwa rozdziały opisujące podstawy teoretyczne mikromagnetyzmu i zagadnienia numeryczne, rozdział czwarty, który stanowią załączone publikacje wraz ze wstępem do nich oraz Podsumowanie w rozdziale piątym.

Jeszcze przed Wstępem Doktorant zamieścił obowiązkowe streszczenie, w którym zwięźle i rzeczowo sygnalizuje zagadnienia, którym poświęcona jest jego rozprawa doktorska. Drobną uwagę może dotyczyć sformułowania „[...] zanik oddziaływania pomiędzy warstwami [...]”. Wydaje się, że należy mówić raczej o jego kompensacji. W sformułowaniu „[...] relacja ma charakter nieodwracalny [...]”, o jaką chodzi relację? Właściwą część rozprawy mgr Krzysztof Szulc rozpoczyna krótką Przedmową, której najważniejszym elementem są postawione jasno przez niego hipotezy badawcze. Warto je w skróconej formie wymienić. Doktorant planował wykazać, że:

1. Oddziaływanie Działoszynskiego-Moryi (DMI) w układzie dwuwarstwowym może indukować jednokierunkowe sprzężenie fal spinowych.
2. Mody w rezonatorze mogą sprzęgać się asymetrycznie z falami spinowymi w warstwie.
3. Powyższe efekty mogą być podstawową urzędzeń magnonicznych.
4. Dwie warstwy magnetyczne z różną anizotropią prostopadłą (PMA – perpendicular magnetic anisotropy) mogą tworzyć układ nieoddziałujących falowodów.
5. Warstwa z PMA oddziałująca z cienką warstwą magnetyczną może formować stabilną i regularną paskową strukturę domenową.
6. Magnetyczne domeny paskowe mogą tworzyć kryształy magnoniczne o różnorodnych relacjach dyspersji.
7. Falowód oraz skyrmion w nanokropce mogą oddziaływać zarówno statycznie, jak i dynamicznie.
8. Periodyczny łańcuch nanokropek ze skyrmionami i falowód mogą tworzyć kryształy magnoniczne ze złożoną strukturą pasmową.

Rozdział 1 stanowi krótkie (cztery strony) wprowadzenie do magnetyzmu, ale w zasadzie wyczerpuje te zagadnienia, które mogą mieć znaczenie dla dalszych etapów rozprawy.

Rozdział 2 wprowadza czytelnika w podstawy mikromagnetyzmu i jest to bardzo dobrze przygotowane kompendium wiedzy na ten temat. Na wyróżnienie zasługują znakomite grafiki, tutaj, jak i w całej rozprawie Doktorant wykazał się dużym talentem w tym zakresie. W rozdziale tym można wskazać kilka drobnych usterek i kwestii wymagających wyjaśnienia:

- Na stronie 7, we wzorze 2.8 na pole dipolowe Autorowi umknął mnożnik 3 w liczniku drugiego wyrazu.
- We wzorze 2.14 pierwsze μ_0 jest prawdopodobnie zbędne.
- Sadzę, że na stronie 11, w pierwszej linii pojęcie chiralności pojawia się po raz pierwszy w rozprawie, powinno więc zostać zdefiniowane.

- Na stronie 13 Doktorant podaje, że tłumienia w ujęciu LL i LLG są równoważne. Jest to jednak prawdą tylko przy określonych założeniach.
- Dalej, na stronie 14 Doktorant wyjaśnia, że DMI prowadzi do wzajemnie prostopadłego ustawienia momentów magnetycznych. Czy w układach takich można pominąć klasyczne oddziaływanie bikwadratowe, znane dla sprzężonych układów wielowarstwowych i często opisywane jako pewne rozwinięcie oddziaływania RKKY? Oddziaływanie takie również preferuje prostopadłe ustawienie momentów magnetycznych.
- Nawet jeśli to oczywiste, na stronie 16 należałoby wskazać, czym jest x w równaniu opisującym ścianę domenową. Podobnie, we wzorze 2.40 nie zdefiniowano parametrów k i d .
- Na Rys. 2.7b przedstawione zostały relacje dyspersji dla układu różnych warstw ferromagnetycznych. Wektor falowy $k = 0$ odpowiada modowi jednorodnemu, czyli zgodnie z formułą 2.41 redukuje się do linii FMR. Jednakże na Rys. 2.7b wszystkie gałęzie wydają się zbiegać do jednej wartości. Czy ze względu na dwie różne warstwy (inne M_s i γ warstw) nie powinno być rozszczepienia nawet dla $k = 0$?

Generalnie w **Rozdziale 2** Doktorant bardzo przejrzysto i ciekawie wprowadza podstawowe pojęcia, takie jak: oddziaływania, anizotropia, domeny i ściany domenowe, skyrmiony, fale spinowe oraz kryształy magnoniczne. Uzasadnia również dlaczego zastosowane przez niego symulacje numeryczne są lepszym podejściem niż bazowanie na skomplikowanych rozwiązaniach analitycznych. W ostatnich punktach tego rozdziału mgr Krzysztof Szulc wyczerpująco dyskutuje zalety i wady zastosowania fal spinowych w przyszłych urządzeniach magnonicznych, wskazując na problemy, których rozwiązanie wymaga dalszych badań.

Rozdział 3 ma charakter techniczny, mianowicie Doktorant wymienia najbardziej popularne pakiety obliczeniowe, a w szczególności bliżej omawia zastosowany przez niego komercyjny program COMSOL Multiphysics. Wskazuje na implementacje zastosowane w badaniach, których dotyczą publikacje [P1-P5]. Opisy te pozwalają stwierdzić, że Doktorant bardzo dobrze opanował metody numeryczne. **Rozdział 3** jest niewątpliwie użytecznym wprowadzeniem dla osób, które chciałyby podjąć podobne badania.

Mam kilka pytań i uwag dotyczących tego rozdziału:

- Czy omawiana na stronie 32 metoda elementów skończonych wymaga pełnego wypełnienia przestrzeni? Czy elementy mogą się przykrywać?
- Z jakiej definicji wynikają znaki minus we wzorze 3.3?
- W ostatnim akapicie strony 35 Doktorant omawia Rys. 3.1 i wymienia szereg kolorów, których trudno się dopatrzeć na tym rysunku.
- Na stronie 36 pojawiają się współczynniki $[g]$ i $[q]$, nie są jednak zdefiniowane, czy mają one również jakieś odniesienie do równania 3.1?

Rozdział 4 to pięć podrozdziałów, z których każdy składa się z załączonej publikacji, poprzedzonej krótkim wprowadzeniem. Publikacja [P1] jest zatytułowana „Spin-Wave Diode and Circulator Based on Unidirectional Coupling”. W pracy tej Doktorant przedstawił pierwszą lub jedną z pierwszych demonstracji cyrkulatora opartego na falach spinowych. Swoją ideę mgr Krzysztof Szulc opiera na oddziaływaniu DMI, a w praktyce IDMI (interfacial DMI) i rozważa konfigurację Damona-Eshbacha. Swoje obliczenia Doktorant przeprowadził dla konkretnie zdefiniowanej wielowarstwy składającej się z dwóch różnych ferromagnetyków

przeznaczonych warstwą niemagnetyczną Py/NM/Co/Pt, przy czym dwuwarstwa Co/Pt jest źródłem IDMI. Tym sposobem do układu zostaje wprowadzona nieodwracalność, tzn. jednokierunkowe, a w zasadzie jednozrotowe sprzężenie. Asymetrię między wektorami falowymi $-k$ i k widać między innymi w zależnościach dyspersyjnych na Rys. 2b w pracy [P1]. W publikacji [P1] Doktorant i współautorzy opisują również tryb pracy modelowanego układu warstw, odpowiadający diodzie. Nasuwa się w tym przypadku pytanie, na ile obliczanie wydajności diody (Rys. 5 w [P1]) jest miarodajne przy przyjętym założeniu, że energia modu rozkłada się równo między warstwy FM? Ponadto, czy zaproponowane rozwiązanie oznacza, że w praktycznej realizacji układu należy zastosować dwie anteny i dwa odbiorniki?

W publikacji [P2] zatytułowanej „Multifunctional operation of the double-layer ferromagnetic structure coupled by a rectangular nanoresonator” symulacje numeryczne mają podobny charakter, ale asymetria wynikała wyłącznie z oddziaływania dipolowego, co uzyskano poprzez zastosowanie grubszych warstw. Warstwy Co pełniły rolę falowodów, a permaloj umieszczony w niemagnetycznej przekładce służył jako rezonator. Doktorant wraz ze współautorami wskazali na możliwe tryby pracy modelowego układu, takie jak cyrkulator, sprzęgacz kierunkowy, czy reflektor. Wybór trybu pracy jest zależny od kierunku propagacji fali spinowej oraz częstotliwości pracy. W ramach tych badań mgr Krzysztof Szulc pełnił rolę współopiekuna studenta z uniwersytetu Rennes 1 we Francji. Czy pokazana w materiałach uzupełniających, strona 63, Rys. S1, dyspersja dla modu 3c ma podobny charakter na Rys. 2 ze strony 60, a została tam tylko przybliżona modelem płaskim?

Kolejna publikacja, oznaczona jako [P3] i zatytułowana „Nonreciprocal spin-wave dynamics in Pt/Co/W/Co/Pt multilayers” jest oparta na szerokiej współpracy zagranicznej i jej dużą zaletą jest silne osadzenie w eksperymencie. Badania te zostały zainspirowane eksperymentami G. Gubiotiego z CNR we Włoszech, który wykonał pomiary spektroskopowe BLS (Brillouin Light Scattering) i wskazał na znacznie większą niż oczekiwana różnicę częstotliwości najniższych modów SW. Ważkim osiągnięciem Doktoranta jest stwierdzenie na podstawie symulacji numerycznych, że oddziaływanie RKKY nie może być tego przyczyną, gdyż musiałoby przyjmować zbyt duże wartości. Dalsze pomiary eksperymentalne i obliczenia numeryczne ujęte w publikacji [P3] pokazały, że źródłem różnicy częstości są różnice w anizotropii. Specyfika wzrostu warstw okazała się w tej kwestii kluczowym czynnikiem. Jako układy odniesienia zostały wykorzystane pojedyncze warstwy Pt/Co/W/Pt o różnej grubości Co. Okazały się one jednak nieadekwatne właśnie ze względu na wspomniany wpływ sekwencji wzrostu na właściwości subwarstw. Czy w związku z tym nie byłoby korzystniejsze potraktowanie jako układu odniesienia pełnego składu wielowarstwy, ale ze zwiększoną grubością wolframu, w celu wykluczenia ewentualnych oddziaływań?

Pozostałe uwagi i pytania do pracy [P3] są następujące:

- Czy wzór 9 ze strony 70 nie powinien sprowadzać się do wzoru 2.42 dla $k \rightarrow 0$?
- W tekście na stronie 70 Doktorant pisze, że pokazana na Rys. 2 pętla histerezy została dopasowana w kierunku trudnym magnesowania. Wydaje się jednak, że w przypadku Rys. 2a dopasowania dokonano w kierunku łatwym.

Artykuł [P4] nosi tytuł „Reconfigurable magnonic crystals based on imprinted magnetization textures in hard and soft dipolar-coupled bilayers”, a badanym układem były próbki typu NdCo/Al/Py. W pracy tej ponownie mamy do czynienia z udanym połączeniem badań eksperymentalnych z symulacjami numerycznymi. W rozważanym układzie NdCo

charakteryzuje się słabą anizotropią prostopadłą, co pozwoliło ustabilizować domeny paskowe. Doktorant badał wpływ domen paskowych na asymetrię dyspersji. Ponadto jego celem było ustalenie pochodzenia dodatkowego modu obserwowanego w eksperymencie. Ciekawym aspektem tej publikacji jest sam pomysł obejścia problemu silnego tłumienia w materiale z anizotropią prostopadłą poprzez jego sprzężenie z materiałem o słabym tłumieniu.

Ostatni z artykułów, oznaczony jako [P5] i jeszcze nie opublikowany nosi tytuł „Reconfigurable spin-wave platform based on interplay between nanodots and waveguide in hybrid magnonic crystal”. W ramach badań przedstawionych w publikacji [P5] mgr Krzysztof Szulc zajmował się symulacją numeryczną zaproponowanego, hybrydowego kryształu magnonicznego. Składał się on z łańcucha nanokropek umieszczonego na falowodzie wykonanym z permalaju. Nanokropki mogły przyjmować dwie konfiguracje: skyrmionową oraz stan jednodomenowy. Zaproponowany układ ma potencjalnie szeroki zakres funkcjonalności w magnonice dzięki możliwości wzbudzenia modów propagujących w falowodzie poprzez generację odpowiednich modów skyrmionowych w nanokropkach. Do potencjalnych zastosowań należy między innymi możliwość tworzenia sztucznych magnonicznych sieci neuronowych. Efekty lokalizacji dyskutowane w pracy [P5] w odniesieniu do Rys. 4 mogą umożliwić konstruowanie wydajnych i precyzyjnych filtrów i oscylatorów. Oczywiście określone właściwości, typy modów i pasm zależą od zakresu częstotliwości. Dla modelowanego kryształu magnonicznego zabrakło mi informacji, jak miałyby przebiegać wzbudzenie w układzie.

Rozdział 5 rozprawy to jednostronicowe podsumowanie najważniejszych wniosków wynikających z publikacji [P1-P5]. Nie mam uwag do tego krótkiego rozdziału, Doktorant zdołał w jego ramach wymienić swoje najbardziej kluczowe osiągnięcia.

Podniesione w recenzji kwestie nie umniejszają w żaden sposób mojej bardzo wysokiej oceny rozprawy doktorskiej mgr. Krzysztofa Szulca, stanowią element tradycyjnej dyskusji naukowej, stymulowanej ciekawym zakresem realizowanych przez niego badań. Stwierdzam, że swoimi badaniami naukowymi Doktorant pozytywnie odpowiedział na hipotezy badawcze, które postawił w Przedmowie do rozprawy.

W podsumowaniu recenzji warto przytoczyć kilka informacji o całokształcie działalności naukowej mgr. Krzysztofa Szulca. Jest on współautorem również innych niż omówione prac, łącznie jest to 11 publikacji. Wszystkie prace z udziałem Doktoranta są cytowane blisko 300 razy (opierając się na Web of Science i tylko pobieżnie filtrując autocytowania). Znaczny wkład w tę liczbę cytowań (ok. 194) ma zbiorowa praca „Advances in Magnetism Roadmap on Spin-Wave Computing”, niemniej nawet z pominięciem tej pracy, liczba cytowań jest znaczna.

Jak wspominałem na wstępie, zagadnienia, którym poświęcił się w swojej pracy naukowej Doktorant są niezwykle aktualne i rezultaty jego badań mają szansę zauważalnie wpłynąć na rozwój dyscypliny naukowej, w której są realizowane. Potwierdzeniem tego jest już znaczna ilość cytowań, pomimo to, że są to publikacje bardzo świeże, ukazały się w latach 2020-2024. Prace zostały opublikowane w renomowanych czasopismach międzynarodowych, wysoko punktowanych wg aktualnej listy czasopism (Phys. Rev. Appl. - 140 pkt., Appl. Phys. Lett. - 100 pkt., Phys. Rev. B - 140 pkt., ACS Nano - 200 pkt.). O znaczeniu tych badań świadczy również to, że były wsparte finansowo przez liczne projekty naukowe. Doktorant uzyskał projekt PRELUDIUM oraz stypendium START, a także uczestniczył w kilku projektach NCN, jak również europejskim Horizon 2020. Wygłosił 11 wykładów, zaprezentował 13 posterów,

otrzymał kilka nagród, w tym nagrody Rektora. Mgr Krzysztof Szulc odbył trzy krótkie wizyty naukowe w zagranicznych ośrodkach.

Uważam, że następujące fakty jednoznacznie uzasadniają wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. Krzysztofa Szulca:

1. Opublikowanie uzyskanych wyników w pięciu artykułach w renomowanych czasopismach międzynarodowych i uznanie dla tych prac poprzez liczne cytowania.
2. Starannie przygotowana rozprawa doktorska, zarówno od strony językowej, edytorskiej, jak i merytorycznej. Daje się zauważyć biegłość Doktoranta w modelowaniu numerycznym oraz duża wiedza z zakresu fizyki ciała stałego.
3. Realizacja ciekawej, aktualnej tematyki i zaproponowanie w jej ramach oryginalnych, nowatorskich rozwiązań w postaci funkcjonalnych urządzeń magnonicznych.
4. Uzyskanie projektu PRELUDIUM, stypendium START oraz udział w innych projektach, co jest dodatkowym potwierdzeniem, że badania i osiągnięcia Doktoranta znalazły duże uznanie w środowisku naukowym.
5. Oświadczenia współautorów oraz opinia promotora wyraźnie potwierdzają, że mgr Krzysztof Szulc miał bardzo znaczny lub dominujący wkład w powstanie omawianych publikacji, wykazuje się dużą samodzielnością i jest bardzo aktywny naukowo, o czym z kolei świadczy jego udział w wielu innych badaniach, które zostały opublikowane w pracach nie będących przedmiotem rozprawy doktorskiej.

W związku z powyższym, stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. Krzysztofa Szulca spełnia wszelkie warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie mgr. Krzysztofa Szulca do dalszych etapów przewodu doktorskiego, równocześnie wnosząc o wyróżnienie tej rozprawy.

