

Prof. dr hab. Tomasz Błachowicz
Politechnika Śląska
Instytut Fizyki – Centrum Naukowo-Dydaktyczne
ul. S. Konarskiego 22B, 44-100 Gliwice
tel. 32 237-20-71

Recenzja pracy doktorskiej mgr Krzysztofa Szulca

pt. „Impact of interactions between ferromagnetic layers on spin-wave dynamics”

Wprowadzenie

Pan mgr Krzysztof Szulc, absolwent Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, prowadził prace badawcze korzystając z zasobów Instytutu Spintroniki i Informatyki Kwantowej oraz Zakładu Fizyki Nanostruktur na tymże Wydziale, pod opieką Prof. dr hab. Macieja Krawczyka, przedkładając do publicznej obrony rozprawę p.t. „Impact of interactions between ferromagnetic layers on spin-wave dynamics”.

Struktura pracy

Praca składa się z pięciu głównych rozdziałów: ogólnego wprowadzenia do magnetyzmu, szerokiego omówienia mikromagnetycznych metod obliczeniowych związanych z propagacją fal spinowych i tworzeniem różnego rodzaju egzotycznych stanów namagnesowania, omówienia samych metod numerycznych z wykorzystaniem pakietu COMSOL Multiphysics, prezentacji własnych osiągnięć badawczych w oparciu o pięć publikacji wybranych z całego dorobku kandydata oraz podsumowania. Dodatkowo, na końcu pracy znajduje się spis literatury, który zawiera 215 pozycji obejmujących w większości odnośniki do artykułów naukowych, kilku pozycji książkowych oraz odnośniki do źródeł internetowych. Praca posiada 125 numerowanych stron. W spisie literatury autor rozprawy cytuje pięć swoich artykułów, z czego w trzech z nich jest pierwszym autorem.

Przedstawiony za spisem literatury dorobek Kandydata zawiera zestawienie udziału w konferencjach naukowych, w tym wykaz jedenastu prezentacji słownych, trzynastu prezentacji posterowych oraz

wykaz jedenastu publikacji w wysoko punktowanych czasopismach indeksowanych o zasięgu międzynarodowym, w większości opublikowanych w renomowanych periodykach Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego (APS, American Physical Society).

Dorobek Kandydata należy uznać za znacząco wystarczający dla zwyczajowo przyjętych wymogów stawianych kandydatom do stopnia doktora. W początkowej części pracy, opisującej podstawy fizyki magnetyzmu – poza standardowymi informacjami - autor w sposób klarowny zawarł krótkie omówienie aktualnych zagadnień badawczych, takich jak: oddziaływanie Działożyńskiego-Moriji (DMI), tworzenie się periodycznych stanów domenowych oraz opis zjawisk występujących w tzw. kryształach magnonowych. Wszystko to wskazuje na bardzo dobrą orientację autora w zakresie współczesnych problemów fizyki nano-magnetyzmu, co znajduje również swoje odbicie w osiągnięciach o charakterze nie tylko podstawowym ale i aplikacyjnym. Ten ostatni fakt zasługuje na podkreślenie, ponieważ nie jest on typowy dla osób posiadających standardowe wykształcenie uniwersyteckie.

Cel pracy

Deklarowanym celem pracy, wynikającym z prowadzonych na przestrzeni kilku lat prac badawczych, była analiza zależności dyspersyjnych fal spinowych w niskowymiarowych strukturach warstwowych i kryształach magnonicznych w perspektywie ich potencjalnych zastosowań, w szczególności w układach przetwarzania informacji opartych o sprzęgacze jednokierunkowe, w układach spintronicznych z anizotropią kontrolowaną oddziaływaniem DMI oraz w kontroli powstawania niekolinearnych tekstur magnetycznych w kryształach magnonicznych.

Tezy pracy

Autor stawia bardzo rozbudowaną tezę, że wytworzenie i kontrola odpowiednich anizotropii magnetycznych w systemach typu cienkich warstw – poprzez wprowadzenie oddziaływania DMI, sprzężenie jednokierunkowe, oraz zaprojektowanie odpowiednich struktur falowodowych - prowadzi do otrzymania nowych relacji dyspersyjnych dla fal spinowych oraz propagujących się, periodycznych przestrzennie, lokalnych stanów namagnesowania. Przedstawioną w pracy tezę, zbyt szeroko rozbudowaną do ośmiu podpunktów, można sprowadzić do trzech głównych elementów: (1) mody fal spinowych (pierwsze cztery podpunkty), (2) tekstury przestrzenne namagnesowania (kolejne dwa podpunkty), (3) falowody spintroniczne (ostatnie dwa podpunkty). Wszystko to można zatem sprowadzić do jednego, wspólnego stwierdzenia, tezy, że zaobserwowane zależności dyspersyjne pozwalają na stworzenie platformy - służącej do przetwarzania informacji na bazie propagacji fal

spinowych w falowodach i nanokropkach – platformy wykazującej cechy kryształu magnonicznego o złożonej strukturze pasmowej.

Analiza tekstu rozprawy, w tym miejscu, wymaga postawienia pytania, będącego zachętą do dyskusji w trakcie publicznej obrony, to jest; w jaki sposób metodologicznie można prowadzić badania z tego zakresu, lub co powinno być „pierwsze”, analiza zależności dyspersyjnych w materiałach wykazujących cechy kryształu magnonicznego, czy technologia wytwarzania odpowiednich struktur z doбором ich parametrów materiałowych i wymiarowych, prowadząca do otrzymania nowych zależności dyspersyjnych?

Omówienie wyników badań kandydata przedstawione w pięciu, wybranych z dorobku, publikacjach

[P1]; W wypracowaniu wyników zawartych w tym artykule Kandydat brał udział we wszystkich etapach prowadzonych prac badawczych i był głównym wykonawcą tego złożonego projektu, obejmującego prace koncepcyjne, symulacje oraz opracowanie wyników badań wraz z przygotowaniem publikacji. Praca zawiera oryginalne wyniki badań nad tzw. jednokierunkowym sprzężeniem pomiędzy cienkimi warstwami ferromagnetyka, wywołanym oddziaływaniem DMI. Co ważne, wyniki te zawierają wyliczenia zależności dyspersyjnych ale przede wszystkim posiadają walor aplikacyjny. W pracy przedstawiono bowiem koncepcję pracy dwóch urządzeń magnonicznych; diody i cyrkulatora 4-ro portowego. W oparciu o otrzymane wyniki rozważano również koncepcję pracy tranzystora magnonicznego.

[P2]; Praca stanowi kontynuację pracy [P1] z dominującym wkładem Kandydata do stopnia doktora w zakresie symulacji urządzeń magnonicznych typu: cyrkulator 4-ro portowy, sprzęgacz, reflektor. Zwiększenie grubości warstw spowodowało wzrost sprzężenia międzywarstwowego i przybliżyło przez to przedstawioną koncepcję w kierunku realnej implementacji technologicznej. W opisie pracy, na stronie 57 znajduje się odwołanie do Rys. 2.7 wraz z informacją o asymetrii w propagacji fal spinowych wywołanych sprzężeniem dipolarnym pomiędzy warstwami ferromagnetycznymi (fale Damon-Eshbacha, fale D-E). W pracy [P2], jak i w [P1], nie ma rysunku 2.7 i nie można znaleźć informacji o nadmienionych zależnościach dyspersyjnych dla fal D-E. Autor powinien ustosunkować się do tej uwagi podczas publicznej obrony.

[P3]; praca posiada charakter symulacyjno-eksperymentalny, z głównym wkładem autora w zakresie interpretacji otrzymanych zależności dyspersyjnych dla fal spinowych. Część eksperymentalna obejmowała pomiary częstotliwości fal spinowych z wykorzystaniem Brillouinowskiego rozpraszania laserowego (BLS), wykonane w ośrodku zagranicznym. Metoda BLS jest bardzo wyrafinowaną techniką

eksperymentalną, realizowaną przez nieliczne ośrodki naukowe na świecie. Ponieważ opisane badania BLS obejmowały również obserwację wzbudzeń magnonowych, będących wynikiem międzywarstwowego sprzężenia DMI, to otrzymane wyniki należy uznać za bardzo oryginalne.

[P4]; Praca o dominującym charakterze eksperymentalnym, z dominującym wkładem Kandydata w opracowaniu i interpretacji pomiarów częstotliwości fal spinowych również z wykorzystaniem brillouinowskiego rozpraszania światła laserowego. Nowością pracy jest zastosowanie sprzężenia międzywarstwowego, poprzez przekładkę niemagnetyczną, pomiędzy miękkim i twardym ferromagnetykiem, z dominującym sprzężeniem dipolarnym. Krok ten pozwolił na zmniejszenie współczynnika tłumienia fal spinowych, który może posiadać duże wartości w materiale twardym z małą wartością anizotropii prostopadłej. Dzięki takiemu podejściu otrzymano dużą asymetrię w wartościach częstotliwości sygnałów stokesowskich i anty-stokesowskich. Z praktycznego punktu widzenia, był to dobry krok w kierunku wytworzenia asymetrycznego urządzenia magnonicznego, typu dioda lub podobnego. Na podkreślenie zasługuje wkład Kandydata do pełnej interpretacji otrzymanych zależności dyspersyjnych dla fal spinowych.

[P5]; Pomimo tego, że przedstawiona w dysertacji praca ma charakter preprintu, to jednak zawarte w niej wyniki można uznać za w pełni dojrzałe i należące do zupełnie aktualnych zagadnień magnoniki, w tym do analizy sygnałów spintronicznych inspirowanych działaniem neuronów. Autorzy, z dominującym wkładem Kandydata, przedstawili koncepcję urządzenia, w którym dochodzi do sprzężenia pomiędzy falowodem ferromagnetycznym a liniowym łańcuchem kropek wykonanych z litego materiału ferromagnetycznego lub posiadających strukturę wielowarstwową Ir/Co/Pt, co powoduje wystąpienie silnej anizotropii prostopadłej oraz sprzężenia DMI. Autorzy pracy otrzymali dwa rodzaje konfiguracji stanów namagnesowania w kropkach: jednodomenowe lub skyrmionowe a dla wszystkich konfiguracji wyznaczyli zależności dyspersyjne. Przedstawiony hybrydowy system magnonowy stanowi bardzo obiecujące rozwiązanie koncepcyjne dla urządzeń przetwarzania i gromadzenia informacji.

Uwagi do tekstu dysertacji

Dorobek kandydata, będący przedmiotem oceny, opiera się na pięciu publikacjach w recenzowanych, renomowanych pismach naukowych. Spostrzeżenia dotyczące opublikowanych wyników pracy badawczej autora zostały zawarte w poprzedniej części recenzji. Moje uwagi w tej części odnoszą się zatem do samego tekstu dysertacji, w zasadzie do części dotyczącej podstaw fizyki magnetyzmu. W tej części (paragraf 1.1), autor pisze ogólnie o atomowym pochodzeniu ferromagnetyzmu, dopatrując się słusznie wpływu zewnętrznych powłok elektronowych na powstanie odpowiednich efektów. Jaka jest opinia autora na temat wpływu elektronów 3d na powstanie ferromagnetyzmu? We wzorze 1.1, na

stronie 3, mamy przedstawioną taką oto algebrę, że wektor namagnesowania równy jest ilorazowi wartości średniej momentu magnetycznego, podzielonej przez różniczkę niezupełną objętości. Prosiłbym o wyjaśnienie, w jaki sposób można przeprowadzić tego typu obliczenia. Na tej samej stronie, autor pisze, że w paramagnetykach namagnesowanie jest liniową funkcją zewnętrznego przyłożonego pola. Czy istnieją odstępstwa od tego prawa, dla odpowiednio silnych pól? W części drugiej rozprawy, na stronie 5-tej, autor pisze, że podejście mikromagnetyczne, jako rozwiązanie z zakresu fizyki klasycznej, może być stosowane, jeśli przestrzenne długości charakterystyczne są dużo większe od odległości międzyatomowych. Autor nie precyzuje jednak, jakie długości charakterystyczne ma na myśli. Na stronie 7 podany jest co prawda wzór na odległość oddziaływania wymiennego (2.7), jednak nie jest to jedyna odległość charakterystyczna stosowana w podejściu mikromagnetycznym. Prosiłbym o uzupełnienie tych informacji.

Pozostałe części rozdziału drugiego oceniam bardzo wysoko. Przykładowo, na stronie 15-tej znajduje się bardzo dobre, dydaktyczne wyjaśnienie mechanizmu powstawania periodycznych stanów namagnesowania w cienkich, długich liniach. Ponadto, od strony 22 poczynając, zawarto własne wyniki zależności dyspersyjnych otrzymanych w programie COMSOL. Część trzecia, omawiająca bardziej szczegółowo implementację numeryczną obliczeń Kandydata i współpracowników, zawiera szereg elementów nowości w zakresie mikromagnetyzmu. To bardzo ważny wkład autora w zakresie symulacji mikromagnetycznych, które stawia je obok innych ogólnie dostępnych symulatorów, takich jak OOMMF lub podobnych.

Dodatkowe pytania do kandydata, związane z przeprowadzonymi badaniami naukowymi

W odniesieniu do pracy [P1]: czy Kandydat może oszacować prędkości propagacji fal spinowych w symulowanych strukturach? Czy autor mógłby przedstawić mechanizm wzbudzenia fali spinowej przez antenę badawczą; czy obserwował stany przejściowe lub/i niestabilności/nieregularności w otrzymanym rozkładzie namagnesowania; czy niestabilności te miały charakter ściśle numeryczny/niefizyczny, czy może miały pochodzenie fizyczne? Jaka jest rozdzielczość czasowa przeprowadzonych symulacji?

W odniesieniu do pracy [P3]; dlaczego autor nazywa przedstawioną na Rys. 1. konfigurację rozpraszania konfiguracją Damona-Eshbacha (D-E), a nie po prostu konfiguracją rozpraszania wstecz? Autor utrzymuje, że mody D-E występują wtedy, kiedy różnica częstotliwości pomiędzy sygnałem stokesowskim (S) i anty-stokesowskim (AS) osiąga maksimum. Jakie były te różnice w skali [GHz]? Jaka może być teoretycznie największa różnica pomiędzy częstotliwościami i jakim mechanizmem sprzężenia międzywarstwowego może być to wywołane? Czy tylko różnica w częstotliwościach sygnałów S i AS

świadczy o występowaniu fal D-E, lub inaczej, jak zinterpretować wyraźną różnicę w amplitudach sygnałów S i AS pokazaną na Rys. 4?

Podsumowanie i ocena końcowa pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska zawiera oryginalne wyniki prac badawczych prowadzonych z wykorzystaniem mikromagnetycznych symulacji komputerowych oraz kilku technik eksperymentalnych, typowych dla fizyki nanomagnetyzmu, w szczególności wyniki pomiarów częstotliwości fal spinowych z użyciem brillouinowskiego rozpraszania światła laserowego. Przez wszystkie przedstawione w dorobku prace przewija się realistyczny wątek aplikacyjny służący przetwarzaniu i gromadzeniu danych. Tematyka ta jest obecnie jedną z najszybciej rozwijających się w obszarze nauk podstawowych i stosowanych. Wyniki zawarte w przedstawionym dorobku, udowadniając postawioną, rozbudowaną tezę, nawiązują do prac prowadzonych przez wiodące ośrodki na świecie. Ogólnie zatem, oceniam pracę bardzo pozytywnie.

Biorąc od uwagę bardzo bogaty dorobek publikacyjny oraz wkład autora w rozwój mikromagnetycznych metod obliczeniowych, analizę danych otrzymanych w pomiarze nieelastycznego rozpraszania światła laserowego (BLS) w nie badanych to tej pory strukturach wykazujących sprzężenie DMI oraz taki zakres zagadnień obejmujących nowatorskie struktury magnoniki, dla zastosowań w urządzeniach przetwarzania informacji, wnoszę o wyróżnienie doktoratu.

W konkluzji stwierdzam, że rozprawa Pana mgr Krzysztofa Szulca p.t. „Impact of interactions between ferromagnetic layers on spin-wave dynamics” spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, na podstawie art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. i wnioskuję o dopuszczenie Kandydata do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauki fizyczne.