

Warszawa, 7 września 2019 r.

prof. dr hab. Andrzej Wawro
Instytut Fizyki PAN w Warszawie

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Filipa Lisieckiego pt.:

Fale spinowe w strukturyzowanych warstwach permaloju tworzących periodyczne, kwazi-periodyczne nanostruktury magnoniczne oraz falowody

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została przygotowana przez mgr inż. Filipa Lisieckiego w Instytucie Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu pod opieką naukową prof. dra hab. Janusza Dubowika jako promotora oraz dra inż. Huberta Głowińskiego, pełniącego funkcję promotora pomocniczego.

Fale spinowe, którym poświęcona jest oceniana rozprawa doktorska, są coraz intensywniej badanymi dynamicznymi cechami materiałów magnetycznych. Są one formą zaburzenia kolektywnego namagnesowania, które może rozchodzić się w materiale nawet na odległości makroskopowe. Również coraz częściej wspomina się, że mogą być one nośnikiem przesyłanej informacji, mającym wiele zalet w stosunku do współczesnej elektroniki, osiągającej w niektórych aspektach kres stosowalności. Ich bezmasowa propagacja powoduje wyeliminowanie strat cieplnych, a w konsekwencji obniżenie wielkości energii potrzebnej do zasilania nowego typu urządzeń. Układy pracujące w typowych zakresach częstotliwości fal spinowych (GHz-THz) charakteryzować się będą większą efektywnością. Wspomniany zakres częstotliwości pozwala na integrację urządzeń elektronicznych i fotonicznych z działającymi w oparciu o propagację fal spinowych. Ponieważ ich długość jest o kilka rzędów wielkości mniejsza niż fal elektromagnetycznych o tej samej częstotliwości, możliwa jest znaczna miniaturyzacja nowych układów – do rozmiarów rzędu nanometrów. Wykorzystanie fazy fali spinowej daje dodatkowy stopień swobody w przesyle i odczycie przekazywanej informacji. Zastosowanie przestrzennych modyfikacji właściwości magnetycznych układów, w których rozchodzą się fale spinowe, pozwala na kontrolowaną ich propagację, podobnie jak to ma miejsce w strukturach półprzewodnikowych (elektrony) czy kryształach fotonicznych (światło).

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska porusza zagadnienia z wyżej wspomnianej dziedziny. Zostały opisane w niej statyczne i dynamiczne właściwości dwóch rodzajów układów periodycznych i kwazi-periodycznych (struktur Fibonacciego). Wyznaczono zależności dyspersyjne w obu typach struktur z równoległą i antyrównoległą konfiguracją namagnesowania. Pokazano, jak rodzaj struktury oraz jej uporządkowanie magnetyczne wpływają na propagację fal spinowych. Porównanie wyników eksperymentalnych z symulacjami numerycznymi pozwoliło potwierdzić występowanie struktury pasmowej magnonów w badanych układach. Pokazano również, że źródłem fal spinowych o małych długościach mogą być krawędzie lub naroża pasków materiału magnetycznego oraz intencjonalnie wprowadzane defekty w postaci pojedynczych antykropek lub ich matryc, rozmieszczonych w jednorodnej warstwie magnetycznej.

Ciągłe warstwy permalojowe były wytworzone z wykorzystaniem działu jonowego lub techniką sputteringu magnetronowego. Strukturyzacja warstw była wykonana metodami litograficznymi (wytworzenie struktury paskowej i wstążek) oraz trawienia materiału zogniskowaną wiązką jonów (antykropki). Procesy przemagnesowania badane były za pomocą magneto-optycznego układu działającego w oparciu o efekt Kerra, pracującego w konfiguracji podłużnej (LMOKE). Dynamiczne właściwości próbkowane były z wykorzystaniem różnorodnych technik: szerokopasmowego rezonansu ferromagnetycznego (VNA-FMR), rozpraszania Brillouina oraz skaningowej transmisyjnej mikroskopii rentgenowskiej (STXM) sprzężonej z rentgenowskim magnetycznym dichroizmem kołowym (XMCD).

Ze względu na rozległość metod wytwarzania próbek oraz ich badań, prowadzonych dość wysublimowanymi technikami, zaprezentowane wyniki były rezultatem współpracy Doktoranta z kilkoma zespołami. W macierzystym Instytucie Fizyki Molekularnej PAN wykonane zostały próbki oraz badania dynamiki metodą VNA-FMR. Na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku przeprowadzono pomiary statycznych właściwości magnetycznych struktur techniką LMOKE oraz dynamicznych za pomocą mikro-BLS. Propagacja fal spinowych była mierzona techniką STXM w ośrodku BESSY-II w Berlinie. Bez udziału Autora rozprawy w IOM-CNR w Peruggi zmierzono właściwości dyspersyjne sieci Fibonacciego za pomocą BLS oraz część pętli histerezy w układzie LMOKE. Również bez udziału Autora uzupełniające symulacje numeryczne, istotnie pomocne w interpretacji wyników eksperymentalnych, zostały przeprowadzone na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Poznaniu (obliczenia mikromagnetyczne) i w Instytucie Matematyki Stosowanej Rosyjskiej Akademii Nauk (symulacje Monte Carlo).

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska, napisana w języku polskim, ma formę klasycznego manuskryptu. Składa się ze streszczenia (również w języku angielskim), spisu publikacji współautorstwa Doktoranta, spisu treści i opisu zakresu współpracy naukowej. Dalsza część rozprawy podzielona jest na rozdziały. Pierwszy z nich przedstawia motywację podjętych zadań. W drugim dokonano krótkiego wprowadzenia teoretycznego obejmującego podstawowe definicje parametrów magnetycznych, opisujących właściwości zarówno statyczne, jak i dynamiczne. Omówiono rodzaje fal spinowych, sposoby ich wzbudzania oraz czynniki strukturalne z tym związane. Zdefiniowano również pojęcia kryształów i kwazikryształów magnonicznych. W rozdziale 3 opisane zostały: techniki wykonania próbek, zastosowane pomiarowe metody eksperymentalne oraz sposoby przeprowadzenia obliczeń i symulacji mikromagnetycznych. Czwarty rozdział zawiera dokładny opis konfiguracji analizowanych próbek oraz szczegółowe recepty na ich wykonanie. Zasadnicze wyniki eksperymentalne, stanowiące meritum rozprawy, zostały opisane w dłuższym rozdziale 5 i krótszym rozdziale 6. Na końcu każdego z nich zamieszczone jest podsumowanie. Krótka analiza zawartości tych rozdziałów jest przedstawiona w następnych akapitach mojej recenzji. Rozprawę kończy rozdział 7, będący jej podsumowaniem, oraz bibliografia.

W rozdziale 5 opisano i przedyskutowano właściwości statyczne i dynamiczne pojedynczych wstążek i ich układów wykonanych w formie periodycznej oraz kwaziperiodycznej sekwencji pasków składowych o różnych rozmiarach i grubościach.

Zarówno w sieciach periodycznych, jak i kwaziperiodycznych, w pętlach histerezy magnetycznej widoczne są dwa obszary przemagnesowania oddzielone widocznym plateau. Są one związane z przemagnesowaniem pasków węższych i szerszych, tworzących strukturę. Płaski fragment histerezy ilustruje zakres pola magnetycznego, w którym zwrot namagnesowania pasków wąskich i szerokich jest przeciwny. Obie konfiguracje, antyrównoległa (AR) i równoległa (R), namagnesowania pasków składowych są szczegółowo analizowane w dalszej części rozprawy w kontekście właściwości dynamicznych badanych systemów. Występujące pomiędzy paskami sprzężenie dipolowe jest odpowiedzialne dodatkowo za antyrównoległe namagnesowanie sąsiednich pasków. Powoduje ono większą sztywność magnetyczną wstążek, powiększając nieco długość plateau. Niezbyt wyraźnie zaakcentowana różnica w polowym zakresie plateau została zinterpretowana, w oparciu o przeanalizowaną statystykę przemagnesowania poszczególnych rodzajów pasków, jako wpływ odmiennego rozkładu rozproszonego pola, sprzęgającego sąsiednie paski w ich periodycznych i kwaziperiodycznych sekwencjach. Wymulowana metodą Monte Carlo pętla histerezy dla analogicznych układów odzwierciedla jakościowo kształty pętli otrzymanych w eksperymencie. Pokazuje jednak znacznie więcej szczegółów związanych z poszczególnymi etapami przemagnesowania. Ich brak w eksperymentalnym wyniku został zinterpretowany jako wpływ defektów i niedoskonałości w rzeczywistej strukturze.

Zmiana odległości pomiędzy wstążkami modyfikuje proces przemagnesowania całego ich układu wskutek zmiany oddziaływania magnetostatycznego pomiędzy elementami sąsiednich wstążek. Pokazano, że wraz ze zmniejszaniem się dystansu pomiędzy wstążkami szerokie paski przełączają swoje namagnesowanie w wyższych polach, a węższe w niższych. Oddziaływania między wstążkami są efektywne nawet dla odległości 10 μm . Analiza statystyczna pokazuje różnicę pól przemagnesowania szerokich pasków w kwaziperiodycznych wstążkach, wynikającą z ich otoczenia i kierunku namagnesowania pasków wąskich.

Otrzymane wyniki eksperymentalne zostały również wyjaśnione w oparciu o symulacje Monte Carlo. Podobnie jak w poprzednim przypadku zasadnicze cechy pętli histerezy magnetycznej zostały odzwierciedlone. Drobniejsze jej szczegóły widoczne w symulacjach nie są jednak dobrze rozróżnialne w eksperymencie.

Omówienie w rozprawie właściwości dynamicznych badanych układów rozpoczęto od przedstawienia wyników VNA-FMR. Zależności dyspersyjne ($\omega(H)$), pochodzące od jednorodnych wzbudzeń, są zbliżone dla obu typów struktur. Widoczny jest również sporo słabszy sygnał w zakresie wyższych częstotliwości. Przy zmianie uporządkowania magnetycznego (R, AR) widoczne są nieciągłości widma. To skokowe przesunięcie częstotliwości sugeruje możliwość programowania właściwości dynamicznych struktur za pomocą pola magnetycznego.

Zależność częstotliwości (energii) magnonów od ich wektora falowego ($\omega(k)$) w kwazikryształach dla konfiguracji Damona-Eshbacha, pozwalająca na wgląd w strukturę pasmową magnonów, wyznaczona została za pomocą techniki wykorzystującej rozpraszanie Brillouina (BLS). Dla uporządkowania magnetycznego R i AR widoczna jest podobna propagacja fal długich. Istotne różnice pojawiają się dla wyższych pasm. Są one dość wąskie (płaskie zależności dyspersyjne w określonych zakresach wektora k), pooddzielane wyraźnymi przerwami. Ponadto ich pozycja względem częstotliwości istotnie zależy od rodzaju uporządkowania magnetycznego. Obliczenia numeryczne struktury pasmowej magnonów pokazują bardzo dobrą zgodność z wynikami eksperymentalnymi dla obu uporządkowań magnetycznych – zmierzone częstotliwości dokładnie opowiadają wyliczonym pasmom.

Czasowo rozdzielcze pomiary STXM pozwoliły na rejestrację przestrzennego rozkładu amplitudy i fazy fal spinowych wzbudzanych w sposób ciągły w strukturach periodycznych i kwaziperiodycznych. W niższym zakresie częstotliwości przeprowadzono pomiary dla siedmiu jej wartości. Uzyskane wyniki dowodzą rozchodzenia się fal spinowych w obu typach struktur. Jednak intensywność wzbudzeń różniła się dla obu struktur dla niektórych wartości częstotliwości. Zmierzono również chwilowe profile modów w strukturze Fibonacciego. Eksperymentalne wartości bardzo dobrze zgadzają się z wynikami obliczeń numerycznych. Zakres propagacji fal spinowych w tych strukturach oszacowano na ok. 14 μm . Wartość ta wskazuje, że badane struktury mogą być zastosowane do wytwarzania urządzeń, w których wykorzystane jest rozchodzenie się fal spinowych.

W celu pełniejszej interpretacji uzyskane wyniki eksperymentalne porównano z obliczeniami numerycznymi wykonanymi dla 100 pierwszych modów w analogicznych strukturach periodycznych i kwaziperiodycznych. W ten sposób wyznaczono teoretycznie sposób wzbudzeń magnetycznych poszczególnych pasków oraz strukturę pasmową obu rodzajów wstążek. W stosunku do periodycznych układy kwaziperiodyczne mają nieco przesuniętą oraz bardziej złożoną strukturę pasm, zawierającą dodatkowe wąskie pasma rozdzielone obszarami wzbronionymi. Nałożenie częstotliwości eksperymentalnych na uzyskane diagramy pozwoliło na stwierdzenie, że niższa intensywność sygnału z pomiarów STXM jest skorelowana z położeniem tych modów w obszarach przerwy wzbronionej. Inną właściwością różniącą oba typy struktur jest występowanie zlokalizowanych przestrzennie wzbudzeń w układach Fibonacciego.

Odmianą propagację fal spinowych w strukturach Fibonacciego pokazano również (STXM) w zależności od ich uporządkowania magnetycznego: R i AR. Podobnie jak dla struktur periodycznych i kwaziperiodycznych i w tym przypadku sygnały dla niektórych częstotliwości różniły się intensywnością. Ich porównanie z obliczoną strukturą pasmową pokazało korelację obniżonej intensywności z pozycją przerwy wzbronionej. Zaproponowano, że cecha ta pozwala na kontrolowanie rozchodzenia się fal spinowych w sprzężonych układach Fibonacciego poprzez programowanie uporządkowania magnetycznego za pomocą przyłożonego pola.

Pomimo znacznie słabszego sygnału podobną analizę przeprowadzono dla fal o wyższych częstotliwościach, sięgających do piątego pasma. Mody uzyskane z pomiarów STXM zostały skorelowane pośrednio z wynikami obliczeń numerycznych. Ponadto w zależności dyspersyjnej, mierzonej za pomocą VNA-FMR, zauważono nieciągłości w czasie zmiany namagnesowania pasków składowych. Analiza dla poszczególnych wartości pól pozwoliła na określenie rodzaju pasków, od których pochodzi mierzony sygnał w poszczególnych pasmach.

Rozdział 6 poświęcony jest wzbudzeniom krótkich fal spinowych o długościach poniżej 100 nm, generowanych w falowodach i na defektach występujących w jednorodnych warstwach. Wyniki uzyskane z pomiarów STXM dla kilku modów wzbudzeń zostały porównane z symulacjami numerycznymi. Dla fal rozchodzących się w falowodach określono strukturę wzbudzeń dla wyodrębnionych modów. Pokazano też, że generowanie fal spinowych ma miejsce w obszarach zakrzywienia magnetyzacji. Głównymi obszarami niejednorodności magnetyzacji są krawędzie i naroża pasków, w których silnie zaznacza się efekt odmagnesowania oraz ściany domenowe.

Oprócz warstw ciągłych, zawierających naturalne niedoskonałości strukturalne, poddano analizie również warstwy z intencjonalnie wprowadzonymi defektami w postaci pojedynczej antykropki, a także rzędu antykropek i ich dwuwymiarowej matrycy. W okolicy krawędzi antykropek kierunek namagnesowania warstw ulega odchyleniu wskutek efektów odmagnesowania. Rodzaje wzbudzeń zmierzono techniką STXM, a zależność dyspersyjną za pomocą VNA-FMR. Dla każdej struktury obserwowano wzbudzenia generowane w okolicach układu kropek, przy czym najsilniejsze otrzymano dla pojedynczej kropki (STXM). Oprócz wzbudzenia typowego dla rezonansu ferromagnetycznego widoczne są inne, słabsze, wywołane nieciągłością struktury. Symulacje mikromagnetyczne pokazują wyraźne złożone mody wzbudzeń dla wszystkich trzech układów defektów strukturalnych.

Opisane w rozprawie doktorskiej wyniki stanowią spójną i logiczną całość. Doktorant zaprojektował i wykonał próbki z warstw ciągłych, periodycznych i kwaziperiodycznych wstążek – kryształów magnonicznych oraz intencjonalnie zdefektowanych warstw poprzez wytworzenie w nich antykropek. Dla różnych konfiguracji namagnesowania, wyznaczonych na podstawie pomiarów magnetostacyjnych, przeprowadził badania właściwości dynamicznych. Eksperymentalnie zmierzone wzbudzenia namagnesowania zostały skonfrontowane z wynikami obliczeń numerycznych. Na tej podstawie zostały dość szczegółowo scharakteryzowane mody tych wzbudzeń, pozwalające na pełniejsze zrozumienie natury rozchodzenia się fal spinowych w nieciągłych strukturach magnetycznych. Pokazano również, że poprzez uzyskanie odpowiednich stanów magnetycznych struktur można kontrolować w nich propagację fal spinowych, co pozwala myśleć o ich zastosowaniach w konkurencyjnych dla współczesnej elektroniki układach magnonicznych.

Część wyników przedstawionych rozdziale 5 rozprawy została zaprezentowana w już opublikowanych pracach współautorstwa mgr inż. Filipa Lisieckiego. Jedna z nich ukazała się w *Physical Review B* (if = 3,739), a dwie następne w *Physical Review Applied* (if = 4,952). W dziedzinie fizyki są to wysoko uznane czasopisma. Wg deklaracji zawartej w rozprawie część pozostałych wyników będzie przedstawiona w dwóch następnych publikacjach, będących w przygotowaniu. Jednak w czasie pisania niniejszej recenzji nie znalazłem ich w bazie *Web of Science*.

Podczas czytania rozprawy zauważyłem kilka kwestii wymagających wyjaśnienia.

1. Z treści rozdziału 5.1.1 wynika, że statystyka przemagnesowania pasków szerokich, pokazana na rys. 5.3, dotyczy struktury 350/700 nm. Proszę o nieco dokładniejsze wyjaśnienie w jaki sposób zebrano dane. Czy rzeczywiście sygnał pochodził z pojedynczego paska o szerokości 700 nm? Pytanie to dotyczy również danych pokazanych na rys. 5.6.
2. Czy parametr k z równania (5.1) można w jakiś sposób wyskalować względem wielkości opisujących strukturę (geometrię) wstążki?
3. Jedną z zastosowanych w badaniach technik jest mikro-BLS. W porównaniu z innymi rezultatami wyniki z tej techniki są bardzo skąpo opisane w ostatnim fragmencie rozdziału 5.3. Jaka jest zaleta tej metody w porównaniu z klasycznym BLS? Czy są to dokładnie takie wyniki, jakich oczekiwał Doktorant?
4. Jakie są rozmiary struktury, dla której wyniki przedstawiono na rys. 5.13? Czy odpowiadają one parametrom przyjętym w symulacji FEM, której rezultaty pokazane są na rys. 5.15?
5. Czy pole o wartości ± 5 mT rzeczywiście zapewnia istnienie stabilnej struktury R (FO) i AR (AFO) – rys. 5.18? Na podstawie wcześniej prezentowanych pętli histerezy wydaje się, że te pola są zbyt małe.

Tytułem komentarza chciałbym również zwrócić uwagę na poniższe aspekty, choć nie są one bardzo istotne dla ocenianej rozprawy :

1. Równanie (2.11) w przedstawionej postaci zawiera w sobie czynniki odmagnesowania. Taka forma występuje również w kilku podręcznikach (np. Magnetism and Magnetic Materials, JMD Coey, Cambridge University Press, 2010). Moim zdaniem lepszym podejściem byłoby w pierwszej kolejności wyeliminowanie wkładu energetycznego, związanego z geometrią cienkich warstw, a dopiero potem wyznaczenie wielkości K_V i K_S . Wtedy przyjęłyby one postać czystych parametrów materiałowych związanych np. z rodzajem wzrostu warstw magnetycznych czy charakterem interfejsów. Ponadto innym istotnym, a niewspomnianym czynnikiem, wpływającym na anizotropię struktur cienkowarstwowych, jest wkład magnetoelastyczny.
2. W dyskusji wartości elementów tensora (2.8) dla struktur cienkowarstwowych przyjęto $N_x = 1$ bez podania orientacji układu odniesienia. W dalszej części (str. 13) pracy założono, że $N_z = 1$.

W tekście rozprawy znajduje się pewna ilość nieścisłości natury technicznej lub edytorskiej. Poniżej przedstawiłem listę niektórych z nich:

1. W równaniach magnetyzmu nadal używane są ich formy z systemów SI i CGS. W rozprawie równania napisane są w formule SI, natomiast równie na I_{ex} (str. 7) ma formę układu CGS, wprowadzając pewną niekonsekwencję.
2. Dla tych samych parametrów w rozprawie używane są różne symbole: dla odmagnesowania – E_{dem} , E_{odm} , H_d (str. 7), dla anizotropii powierzchni – K_S (równanie 2.11) i K_P (Rys. 2.1), dla częstotliwości rezonansowej – f_{rez} (równanie 2.20) i f_{FMR} (str. 20).
3. Przyjęto takie samo literowe nazewnictwo (A, B, C,...) różnych modów fal spinowych pokazanych na rys. 5.13, 5.18 i 5.20, co wprowadza nieco zamieszania.
4. W tekście rozprawy znalazłem pewną ilość błędów interpunkcyjnych i stylistycznych oraz niefortunnych sformułowań, takich jak: „przesunięcie minimum pierwszego maksimum rozkładu” i „fale spinowe o krótkiej długości” (str. 19), „Druga używana w tej rozprawie metoda nanoszenia warstw” (str. 26) i podobne w innych miejscach tekstu, „Jednymi słowy” (str. 41), „fale mają dłuższą długość fali” (str. 97).

Powyższe niedociągnięcia nie mają jednak istotnego wpływu na zawartość merytoryczną rozprawy, którą uważam za wartościową. Opisane w rozprawie badania mają charakter całościowy. Autor zaprojektował i wykonał próbki, ich strukturę scharakteryzował niezbędnymi technikami. Samodzielnie lub we współpracy z innymi zespołami przeprowadził większość pomiarów komplementarnymi technikami i zinterpretował uzyskane wyniki, również w oparciu o symulacje numeryczne, wykonane przez osoby trzecie, bez jego udziału. W moim odczuciu najbardziej spektakularnym osiągnięciem było pokazanie przestrzennego rozkładu wzbudzenia fal spinowych dla różnych modów, uzyskane za pomocą techniki STXM. W związku ze złożonością badanych zagadnień opublikowane prace były wieloautorskie, ale w dwóch z nich, najwyżej notowanych, Doktorant był pierwszym współautorem, a w jednej – również autorem korespondującym. Taka pozycja na autorskiej liście jednoznacznie wskazuje na wiodącą rolę Doktoranta w uzyskaniu i analizie prezentowanych wyników.

Oprócz zagadnienia opisanego w rozprawie Doktorant zajmował się też innymi tematami, czego dowodzi 6 innych prac jego współautorstwa, opublikowanych w równie wysoko notowanych czasopismach. Był także współautorem ok. 25 prezentacji konferencyjnych. Swoje naukowe doświadczenie pogłębiał w czasie kilku krótkotrwałych (do 3 miesięcy) zagranicznych staży odbytych w ośrodkach niemieckich. Był lub jest wykonawcą pięciu projektów finansowanych przez DAAD, NCN, FNP, MNiSW oraz Komisję Europejską. Był zdobywcą kilku stypendiów przyznanych za aktywność i osiągnięcia naukowe, finansowane przez różne instytucje. Powyższa charakterystyka dowodzi, że na obecnym etapie kariery naukowej Doktorant może pochwalić się solidnym dorobkiem.

Rozprawa doktorska mgra inż. Filipa Lisieckiego pt.: *Fale spinowe w strukturyzowanych warstwach permaloju tworzących periodyczne, kwaziperiodyczne nanostruktury magnoniczne oraz falowody* spełnia również wymogi formalne, zapisane w Art. 13 *Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* z dnia 14 marca 2003 r. Stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, poparte publikacjami w uznanych recenzowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Ma formę maszynopisu książki. Została napisana w języku polskim. Zawiera streszczenie w języku angielskim.

Na podstawie oceny zawartości przedstawionej rozprawy wnioskuję o dopuszczenie mgra inż. Filipa Lisieckiego do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.