

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgra Mateusza Gołębiowskiego

pt. „Novel approaches to control spin waves using structuring and complex geometry of ferromagnetic nanostructures”

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgra Mateusza Gołębiowskiego zatytułowana „Novel approaches to control spin waves using structuring and complex geometry of ferromagnetic nanostructures” (Nowe podejścia do kontrolowania fal spinowych wykorzystując strukturalizację i złożoną geometrię nanostruktur ferromagnetycznych) została napisana na podstawie badań realizowanych na Wydziale Fizyki i Astronomii UAM, w Instytucie Spintroniki i Informacji Kwantowej. Promotorem tej pracy jest Prof. dr hab. Maciej Krawczyk, a promotorem pomocniczym dr hab. Paweł Gruszecki prof. UAM.

Tematyka rozprawy jest bardzo ważna ze względu na perspektywiczne zastosowania w technologiach informatycznych i bardzo aktualna. Praca jest napisana w języku angielskim. Składa się ona z pięciu rozdziałów, z których cztery pierwsze zawierają materiał wprowadzający czytelnika w tematykę rozprawy. Rozdział piąty, najważniejszy, stanowi prezentacja wyników własnych. Rozprawę poprzedzają streszczenia w języku polskim i angielskim, podziękowania, wstęp oraz lista publikacji stanowiących dorobek Doktoranta włączony do dysertacji. Rozprawę kończy przedstawienie perspektyw związanych z wykorzystaniem uzyskanych wyników, podsumowanie, bibliografia i podstawowe informacje o karierze naukowej autora rozprawy. Praca liczy ponad 250 stron.

W krótkim wstępie mgr Mateusz Gołębiowski wyjaśnia czego dotyczy tematyka rozprawy zwracając przy tym uwagę na jej znaczenie związane z potencjalnymi zastosowaniami.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie w tematykę rozprawy dotyczącą zagadnień związanych z magnoniką, a konkretnie zagadnień odnoszących się do geometrii ferromagnetycznych struktur, w których zachodzi propagacja fal spinowych. Doktorant podaje i uzasadnia jakie struktury wybrał do swoich badań. Zwraca również uwagę na korzyści jakie mogą być wynikiem realizacji takiego programu badań.

Kolejne trzy rozdziały stanowią opis stanu wiedzy w zakresie tematyki doktoratu. Pierwszy z nich dotyczy podstawowych zagadnień związanych z magnetyzmem. Wstępna część tego rozdziału to zwięzła, ale bardzo ciekawie przedstawiona historia magnetyzmu obejmująca okres od starożytności do czasów współczesnych. Doktorant wykazał umiejętność wyboru najważniejszych dokonań zarówno w zakresie badań teoretycznych jak i eksperymentalnych związanych z magnetyzmem. Drugi podrozdział zawiera definicje najważniejszych pojęć związanych z magnetyzmem, a w szczególności: orbitalnego i spinowego momentu magnetycznego, magnetyzacji, gęstości strumienia magnetycznego, intensywności pola magnetycznego, przenikalności i podatności magnetycznej. Następny podrozdział dotyczy klasyfikacji materiałów magnetycznych. Poza klasycznym podziałem obejmującym materiały diamagnetyczne, paramagnetyczne, ferromagnetyczne, antyferromagnetyczne i ferrimagnetyczne Doktorant uwzględnił również stosunkowo niedawno wyróżnioną grupę materiałów, jakimi są altermagnetyki. Ze względu na to, że badania prowadzone w ramach pracy doktorskiej odnoszą się do materiałów ferromagnetycznych, w dalszej części rozdziału drugiego mgr Mateusz Gołębiowski przedstawił ich podział ze względu na proces przemagnesowania, wyróżniając przy tym materiały magnetycznie miękkie i twarde. Przy tej okazji wprowadza takie ważne pojęcia jak pole koercji, anizotropia, namagnesowanie nasycenia. Nie zgadzam się jednak ze stwierdzeniem zawartym, w ostatnim zdaniu na stronie 16, które sugeruje, że najważniejszym parametrem decydującym

o szybkości przemagnesowania jest pole koercji. Dlatego chciałbym, aby w czasie obrony Doktorant wyjaśnił w sposób bardziej dokładny od czego zależy szybkość procesu przemagnesowania w polu magnetycznym zorientowanym wzdłuż osi łatwej.

Kwantowa teoria magnetyzmu jest przedmiotem następnego podrozdziału, w którym mgr Mateusz Gołębiewski wyjaśnia w jakich przypadkach konieczne jest korzystanie z tej teorii. W szczególności dotyczy to roli spinu elektronowego i oddziaływań wymiennych, które w przybliżeniu średniego pola pozwala na powiązanie stałej wymiany z temperaturą uporządkowania magnetycznego ferromagnetyków i antyferromagnetyków. Innym ważnym zagadnieniem w obrębie magnetyzmu kwantowego, poruszonym w tym podrozdziale, jest sprzężenie spin-orbita, które jest odpowiedzialne za anizotropię magnetyczną.

Domenowa struktura magnetyczna i obecność ścian domenowych może w znacznym stopniu modyfikować propagację fal spinowych. Dlatego zagadnieniu temu Doktorant również poświęcił część rozdziału drugiego. Wyjaśnił w nim przyczyny pojawiania się domen oraz obecności ścian domenowych na granicy pomiędzy domenami. W podrozdziale tym określa też różnice pomiędzy strukturą ścian Blocha i Néela oraz definiuje szerokość i energię ściany domenowej w zależności od stałej anizotropii i wymiany. Ponadto omawia zagadnienia związane z procesem przemagnesowania kontrolowanym nukleacją domen i propagacją ścian domenowych pod wpływem pola magnetycznego.

Następnym zagadnieniem prezentowanym przez Doktoranta w rozdziale drugim jest anizotropia magnetyczna, czyli parametr decydujący o różnicach w procesie przemagnesowania ferromagnetyków w zależności od kierunku pola magnetycznego. Anizotropia ma również wpływ na rozmiar domen oraz rodzaj i szerokość ścian domenowych, jak również na dynamikę magnetyzacji. Omawiając przyczynki mające wpływ na anizotropię magnetyczną, mgr Mateusz Gołębiewski ograniczył się do anizotropii magnetokrystalicznej, anizotropii kształtu i anizotropii indukowanej naprężeniem. Szkoda, że w tych rozważaniach nie uwzględnił anizotropii powierzchniowej (czasami nazywanej anizotropią Néela) wynikającej ze złamania symetrii otoczenia atomów warstwy ferromagnetyka w pobliżu powierzchni lub międzywarstwy w przypadku układów wielowarstwowych.

Ostatnią część rozdziału dotyczącego podstaw magnetyzmu mgr Mateusz Gołębiewski poświęcił zagadnieniom dotyczącym magnetostatyki i polu demagnetyzacji. Zagadnienia te są bardzo ważne z punktu widzenia symulacji mikromagnetycznych stosowanych przez Doktoranta w badaniach.

Podsumowując, uważam, że zakres materiału przedstawiony w rozdziale drugim został poprawnie dobrany i wskazuje na to, że Doktorant bardzo dobrze rozumie i potrafi wyjaśnić zagadnienia związane z magnetyzmem.

Przedmiotem rozdziału trzeciego są zagadnienia związane z mikromagnetyzmem. We wprowadzeniu do tego rozdziału mgr Mateusz Gołębiewski wyjaśnia zalety symulacji mikromagnetycznych, a tym samym ich przydatność w badaniach dotyczących spintroniki i magnoniki.

Omawiany rozdział składa się z sześciu podrozdziałów.

Pierwszy z nich dotyczy energii swobodnej Gibbsa ferromagnetyka, która pozwala określić statyczną konfigurację namagnesowania. Energia ta jest sumą kilku czynników. Najważniejsze z nich, czyli energię wymiany, energię związaną z oddziaływaniem dipolowym (magnetostatycznym), energię anizotropii (z uwzględnieniem anizotropii kształtu), energię Zeemana i energię związaną z oddziaływaniem Dzyaloshinskii-Moriya Doktorant opisuje w ramach tego podrozdziału. Ostatnia jego część to wprowadzenie pojęcia pola efektywnego, którego wartość można określić znając energię swobodną Gibbsa.

Drugi podrozdział trzeciego rozdziału poświęcony jest zagadnieniom związanym z dynamiką magnetyzacji i falom spinowym. We wprowadzeniu do tej części rozprawy Doktorant określa czym są fale spinowe w ujęciu klasycznym i kwantowym. Następnie przechodzi do omówienia precesji Larmora i równania Landaua-Lifshitz-Gilberta (LLG), pozwalającego opisać dynamikę magnetyzacji

zachodzącą pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego przy uwzględnieniu tłumienia. Wprowadza również znormalizowaną postać tego równania, która często jest wykorzystywana w obliczeniach numerycznych. Wyjaśnia też warunki, w jakich można pominąć nieliniowe człony równania LLG.

W dalszej części podrozdziału 3.2 Doktorant przybliża zjawisko rezonansu ferromagnetycznego (FMR) zwracając przy tym uwagę, że jest ono wykorzystywane do wyznaczenia ważnych parametrów materiałów magnetycznych jak czynnik żyromagnetyczny i stałe anizotropii. Pozwala również wyjaśnić takie efekty jak pompowanie spinowe czy wzbudzanie fal spinowych.

Następnie mgr Mateusz Gołębiwski omawia spektra fal spinowych w cienkich warstwach magnetycznych, zwracając przy tym uwagę na zmianę wpływu oddziaływań dipolowych i wymiennych w zależności od iloczynu grubości warstwy i wartości wektora falowego. Definiuje trzy wzajemne orientacje magnetyzacji i wektora falowego, dla których dyspersja fal spinowych zachodzi odmiennie. Dla tych orientacji określa częstotliwość fali spinowej opisaną z wykorzystaniem teorii Kalinikosa-Slavina.

Kolejne podrozdziały rozdziału trzeciego poświęcone są zagadnieniom dotyczącym: chiralności magnetyzacji (rozdział 3.3), magnonicznym kryształom (rozdział 3.4), lokalizacji fal spinowych (rozdział 3.5) i optyce fal spinowych (rozdział 3.6). W szczególności w rozdziale 3.3 Doktorant wymienia efekty decydujące o chiralności, zwraca przy tym uwagę na to, że jej występowanie decyduje nie tylko o statycznej konfiguracji magnetycznej, ale ma również istotny wpływ na dynamikę procesu magnetyzacji. W rozdziale 3.4 określa co należy rozumieć pod pojęciem kryształu magnonicznego. Wprowadza podział na kryształy jedno-, dwu- i trój-wymiarowe, które mogą być uzyskane poprzez strukturyzację materiału magnetycznego, lokalne zmiany właściwości magnetycznych, lub z wykorzystaniem periodycznej modulacji tekstury magnetycznej. W sposób syntetyczny wyjaśnia wpływ wymiarowości kryształu magnonicznego na pasmową strukturę fal spinowych.

Omawiając lokalizację fal spinowych mgr Mateusz Gołębiwski wymienia mechanizmy, które mogą do niej prowadzić. Jako ważną klasę układów w jakich jest ona obserwowana wymienia periodyczne sieci otworów w magnetycznej warstwie. Określa przy tym rolę defektów w strukturze wielowarstwowej, których obecność może silnie modyfikować propagację fal spinowych.

W rozdziale 3.6. Doktorant zwraca uwagę na pewne podobieństwa w propagacji światła i fal spinowych, co zainicjowało konstruowanie magnonicznych analogów urządzeń optycznych.

Rozdział trzeci kończy podsumowanie z konkluzją, że materiał w nim prezentowany pozwala zrozumieć bogactwo zjawisk obserwowanych w magnetycznych nanostrukturach, a równocześnie pokazać, jak poprzez geometrię ferromagnetycznych układów można kontrolować dynamikę magnetyzacji.

Czwarty rozdział pracy mgr Mateusz Gołębiwski poświęcił metodom numerycznym i symulacjom mikromagnetycznym ze szczególnym uwzględnieniem programów MuMax3, tetmag i COMSOL. Ich omówienie poprzedzone jest wyjaśnieniem zagadnień związanych z przestrzenną i czasową dyskretyzacją badanych układów. W kolejnych podrozdziałach Doktorant tłumaczy najważniejsze aspekty poszczególnych metod dyskretyzacji przestrzennej. Omawiane przez niego metody obejmują: metodę różnic skończonych (FDM) wykorzystywaną w programie MuMax3, metodę elementów skończonych (FEM) i metodę elementów brzegowych (BEM). Dla każdej z tych metod Doktorant określił jej zalety oraz ograniczenia. Kończąc omawianie zagadnienia związanego z dyskretyzacją przestrzenną zauważa, że często w oprogramowaniu wykorzystywanym w obliczeniach mikromagnetycznych stosowane są hybrydowe techniki dyskretyzacji.

W dalszej części rozdziału czwartego mgr. Mateusz Gołębiwski omawia metody wyboru kroku czasowego, co jest niezwykle ważne w badaniach dynamiki magnetyzacji, w tym fal spinowych. Podczas prezentowania tego zagadnienia, podobnie jak przy omawianiu podziału geometrycznego,

przybliżyć kilka różnych metod, podając ich zalety. Zwraca przy tym uwagę na ważne zagadnienie jakim są ograniczenia czasowe prowadzonych symulacji.

Omówienie różnego typu warunków brzegowych stanowi ostatnią część zagadnień poruszanych przed przejściem do opisu poszczególnych programów stosowanych w badaniach Doktoranta.

Mgr Mateusz Gołębiowski w swoich badaniach wykorzystywał oprogramowanie MuMax3, tetmag i COMSOL. Kolejne omówienie tych pakietów oprogramowania przedstawione jest w końcowej części rozdziału czwartego. W tej części rozprawy Doktorant określa z jakich programów korzystał podczas realizacji badań prezentowanych w poszczególnych publikacjach.

Podsumowując ocenę rozprawy w części dotyczącej opisu stanu wiedzy (rozdziały 2-4) uważam, że jest to bardzo dobre opracowanie, które ułatwia zrozumienie i docenienie osiągnięć Doktoranta przedstawionych w rozdziale piątym. Materiał zawarty w tych rozdziałach stanowi, moim zdaniem, kompendium wiedzy w zakresie dynamiki procesów magnetyzacji. Jestem przekonany, że z opracowania tego będą chętnie korzystać osoby wkraczające w tematykę związaną z magnoniką. Opracowanie to świadczy również o zdolnościach dydaktycznych Doktoranta.

Najważniejszą część recenzowanej pracy doktorskiej mgra Mateusza Gołębiowskiego stanowi rozdział piąty. Zawiera on dziewięć artykułów, z których jeden ma charakter przeglądowy i stanowi rozdział w książce. Numeracja prac od P1-P9 jest w układzie chronologicznym i obejmuje lata od 2020 do 2025. Natomiast w rozdziale piątym są one prezentowane w trzech grupach odnoszących się do różnej wymiarowości omawianych struktur magnonicznych, poczynając od jedno- poprzez dwu- i kończąc na trój-wymiarowych.

Pierwszą grupę, obejmującą cztery publikacje (P1-P3 i P6), stanowią struktury jednowymiarowe nanostruktury. Prace te to:

[P1] Gołębiowski, M.; Gruszecki, P.; Krawczyk, M.; Serebryannikov, A. E.

Spin-wave Talbot effect in a thin ferromagnetic film

Physical Review B 102, 13, 134402 (2020)

[P2] Gołębiowski, M.; Gruszecki, P.; Krawczyk, M.

Self-imaging of spin waves in thin, multimode ferromagnetic waveguides

IEEE Transactions on Magnetics 58, 8, 1–5 (2022)

[P3] Gołębiowski, M.; Gruszecki, P.; Krawczyk, M.

Self-imaging based programmable spin-wave lookup tables

Advanced Electronic Materials 8, 10, 2200373 (2022)

[P6] Makartsou, U.; Gołębiowski, M.; Guzowska, U.; Stognij, A.; Gieniusz, R.; Krawczyk, M.

Spin-Wave Self-Imaging: Experimental and Numerical Demonstration of Caustic and Talbot-like Diffraction Patterns

Applied Physics Letters 124, 19, 192406 (2024)

Praca P4 powstała przy współpracy z grupami badaczy z Wielkiej Brytanii i Indii, które realizują nie tylko badania o charakterze teoretycznym ale również eksperymentalnym.

Dwie pierwsze prace dotyczą efektu analogicznego do efektu Talbota znanego z fotoniki, z tym, że w tym przypadku jest on obserwowany dla fal spinowych. Zasadnicza różnica pomiędzy pracami P1 i P2 sprowadza się do tego, że w pracy P1 mgr. Mateusz Gołębiowski wraz z współautorami analizował rozkład intensywności fal spinowych, które ulegają dyfrakcji na periodycznej jednowymiarowej sieci dyfrakcyjnej złożonej z otworów w warstwie ferromagnetycznej. Natomiast w pracy P2 fale spinowe były wprowadzane do falowodu przez szereg jednomodowych źródeł fal spinowych. W obu przypadkach na podstawie symulacji mikromagnetycznych realizowanych z wykorzystaniem oprogramowania MuMax3 autorzy określili mapy rozkładu intensywności fal spinowych wskazujące na występowanie efektu Talbota. Obliczenia zostały przeprowadzone dla różnych wartości tłumienia,

geometrii badanych układów oraz orientacji namagnesowania względem płaszczyzny warstwy. Jest to o tyle ważne, że pozwala określić czy i w jakich warunkach możliwa będzie eksperymentalna weryfikacja obliczonych rozkładów.

Praca P3, podobnie jak omówione wcześniej prace P1 i P2, nawiązuje do efektu Talbota w strukturach magnonicznych. Jednak jej cel jest odmienny. Skupia się ona na udokumentowaniu możliwości wykorzystania zjawiska samoobrazowania, zachodzącego w ferromagnetycznych falowodach wielomodowych, do tworzenia programowanych bramek stosowanych w operacjach logicznych, a konkretnie do tworzenia tzw. tablic odnośników (ang. nazwa *lookup table* (LUT)). Jak wykazali autorzy, podstawową zaletą tych struktur jest szeroka możliwość rekonfiguracji za pomocą parametrów dynamicznych, bez konieczności zmiany fizycznej struktury układu. W celu wykazania funkcjonalności i zalet takich systemów przedstawione zostały dwa przykładowe schematy (z symetrycznie i asymetrycznie umieszczonymi wejściami logicznymi). Ponadto omówione zostało zagadnienie dotyczące prędkości operacji, jak również referencyjnego poziomu intensywności sygnału fal spinowych, który pozwala określić czy sygnał w miejscu detekcji odpowiada logicznemu „0” czy „1”. Badania w tym zakresie, realizowane z uwzględnieniem realnych wartości parametrów magnetycznych trzech wybranych typów warstw (Py, YIG i Ga:YIG) oraz możliwości strukturyzacji, wskazują na realną możliwość zastosowania proponowanych w pracy rozwiązań.

Praca P6 dotyczy eksperymentalnej weryfikacji efektu Talbota realizowanej z wykorzystaniem wysokorozdzielczej spektroskopii BLS. Część doświadczalna wykonana została przez grupę badaczy z zespołu Prof. Andrzeja Maziewskiego z Uniwersytetu w Białymstoku. Badany układ był zbliżony do tego jaki był przedstawiony w pracy P1. Z tym jednak, że w tym przypadku dyfrakcja płaskiej fali spinowej zachodziła na dwóch różnych jednowymiarowych matrycach otworów. Jedną z nich tworzyły otwory w kształcie okręgów, a drugą w kształcie kwadratów. Materiałem, w którym zachodziła propagacja fal spinowych był monokryształ YIG na podłożu GGG. Inną bardzo ważną różnicą względem pracy P1 była orientacja pola magnetycznego. W tym przypadku, ze względu na stosowaną w eksperymencie BLS konfigurację Damona-Eshabaha, było ono zorientowane równoległe do płaszczyzny warstwy i prostopadłe do kierunku propagacji fal spinowych. Przy takiej konfiguracji propagacja zachodzi anizotropowo, co powoduje pojawienie się efektów kaustycznych, które mają istotny wpływ na rozkład intensywności fal spinowych. W pracy wykazano, że dla niskich częstotliwości i małych wartości pola magnetycznego dominują efekty związane anizotropową propagacją fal spinowych, natomiast dla większych częstotliwości i wartości pola można zaobserwować efekt Talbota.

Mgr Mateusz Gołębiwski do drugiej grupy, określanej jako struktury dwuwymiarowe, zaliczył dwie prace. Są to:

[P4] Gołębiwski, M.; Reshetniak, H.; Makartsou, U.; Krawczyk, M.; van den Berg, A.; Ladak, S.; Barman, A.

Spin-Wave Spectral Analysis in Crescent-Shaped Ferromagnetic Nanorods
Physical Review Applied 19, 6, 2200373 (2023)

[P5] Kumar, N.; Gruszecki, P.; Gołębiwski, M.; Kłos, J. W.; Krawczyk, M.
Exciting High-Frequency Short-Wavelength Spin Waves using High Harmonics of a Magnonic Cavity Mode
Advanced Quantum Technologies 2400015 (2024)

Praca P4 była zrealizowana przy współpracy z grupami badawczymi z Wielkiej Brytanii i Indii. Pomimo, że zespoły te mają duże doświadczenie również w badaniach o charakterze doświadczalnym, ta praca zawiera jedynie wyniki badań teoretycznych. Badania obejmowały analizę właściwości fal spinowych w nieskończenie długich falowodach o przekroju w kształcie półksiężyca. Zmiennymi parametrami badanych układów były: orientacja i wartość pola magnetycznego, ewolucja kształtu przekroju poprzecznego pręta i ostrość krawędzi. Wykazano, że poprzez zmiany kierunku pola

magnetycznego można, w znaczący sposób, zmieniać częstotliwość własną i charakter modów własnych przechodząc od lokalizacji krawędziowej do objętościowej. Zademonstrowano również możliwość modyfikacji częstotliwości własnych układu poprzez zmianę kształtu przekroju poprzecznego falowodu od elipsy do półksiężyca. Ponadto autorzy wykazali, że w przypadku, gdy pole magnetyczne nie jest dostatecznie duże, rozkład namagnesowania w płaszczyźnie prostopadłej do osi nanopręta jest niejednorodny (ma chiralną teksturę), co skutkuje asymetryczną relacją dyspersji.

Autorzy pracy P5 wykorzystując symulacje mikromagnetyczne pokazali, że kryształ magnoniczny utworzony z dwuwymiarowej sieci otworów z defektem polegającym na tym, że w określonych pozycjach sieci otwory zastąpione są ciągłą warstwą, może być wykorzystany do generowania fal spinowych o wysokich częstotliwościach. Wykazali, że efekt ten można uzyskać poprzez pompowanie mikrofalami wnęki cienkowarstwowego kryształu magnonicznego pod warunkiem, że częstotliwość podstawowego modu wnęki odpowiadająca częstotliwości FMR warstwy permaloju leży w obszarze przerwy widma magnonicznego.

Ostatnią grupę prac Doktoranta stanowią trzy prace dotyczące trójwymiarowych układów magnonicznych.

[P7] Gołębiewski, M.; Hertel, R.; d'Aquino, M.; Vasyuchka, V.; Weiler, M.; Pirro, P.; Krawczyk, M.; Fukami, S.; Ohno, H.; Llandro, J.

Collective Spin-Wave Dynamics in Gyroid Ferromagnetic Nanostructures

ACS Applied Materials & Interfaces 16, 17, 22177–22188 (2024)

[P8] Gołębiewski, M.; Krawczyk, M.

Gyroid ferromagnetic nanostructures in 3D magnonics

arXiv preprint arXiv:2407.05851 (2024)

[P9] Gołębiewski, M.; Szulc, K.; Krawczyk, M.

Magnetic field controlled surface localization of ferromagnetic resonance modes in 3D nanostructures

Acta Materialia 283, 120499 (2025)

Praca P7 powstała przy szerokiej współpracy międzynarodowej grup zajmujących się badaniami teoretycznymi i doświadczalnymi. Zasadniczą część pracy stanowią symulacje realizowane z wykorzystaniem oprogramowania tetmag. Przedmiotem badań są żyroidalne struktury magnetyczne złożone z chiralnych potrójnych złącz tworzących periodyczną strukturę o stałej sieci w zakresie nanometrycznym. Najważniejszym wynikiem przeprowadzonych symulacji jest wykazanie, że częstotliwość rezonansowa takich struktur silnie zależy od orientacji statycznego pola magnetycznego względem orientacji krystalograficznej żyroidalnego kryształu. Tej cechy nie można było potwierdzić w badaniach eksperymentalnych, głównie dlatego, że uzyskane próbki miały strukturę złożoną z obszarów (domen) o zróżnicowanej orientacji krystalograficznej. Niemniej, na ich podstawie oraz symulacji wykazano, że w przypadku rezonansu ferromagnetycznego wielodomowe struktury żyroidalne można traktować jako materiał magnoniczny z efektywnym namagnesowaniem skalowanym poprzez współczynnik wypełnienia.

W omawianej pracy na stronie 228182, w drugim akapicie prawej kolumny, w zdaniu zaczynającym się od słów „The resultant magnetization intensity distribution...” powiązanie określonych modów z płaszczyznami krystalograficznymi nie jest, moim zdaniem, zgodne z tym, co jest pokazane na rysunku 6.

W pracy nie znalazłem również wyjaśnienia dlaczego struktury żyroidalne zostały wykonane z niklu, który charakteryzuje się znacznym ujemnym współczynnikiem magnetostrykcji, a nie z permaloju, którego magnetostrykcja jest bliska zera. Dodam tylko, że badania struktury magnetycznej żyroidalnych układów utworzonych na bazie permaloju były już wcześniej znane (Ref. 16 z pracy P7).

Praca P8 została przygotowana jako rozdział do książki *dotyczącej dwu- i trój-wymiarowych nanostruktur, ich struktury właściwości i zastosowań*, której redaktorem jest J. -C. S. Lévy. Opracowanie to stanowi kompleksowy przegląd właściwości magnetycznych ferromagnetycznych

nanostruktur żyroidalnych opracowany na podstawie bardzo dogłębnych studiów literaturowych (164 pozycje bibliograficzne) oraz badań własnych Doktoranta i współpracowników promotora rozprawy doktorskiej. Poza wprowadzeniem w tematykę dotyczącą magnonicznych struktur 3D, autorzy omawiają geometrię struktur żyroidalnych i opisują sposób ich wytwarzania. Przechodzą następnie do części najważniejszej, dotyczącej ich właściwości magnetycznych. W szczególności dotyczy to: statycznej konfiguracji magnetycznej i dynamiki magnetyzacji. W tej ostatniej części omówione zostały zagadnienia prezentowane w pracy P7 oraz zagadnienia dotyczące lokalizacji fal spinowych, które są również przedmiotem badań prezentowanych w pracy P9.

Przedmiotem badań pracy P9 były nanostruktury żyroidalne oraz struktury utworzone z nanoprętów tworzących sieć kubiczną (w pracy jest ona nazywana strukturą przypominającą stos drewna). Głównym celem było określenie, dla tych struktur, roli pól rozmagnesowujących (oddziaływań magnetostatycznych) i oddziaływań wymiany na widmo rezonansu ferromagnetycznego oraz na rozkłady składowej dynamicznej namagnesowania zorientowanej wzdłuż współrzędnej z. Symulacje przeprowadzono dla różnych rozmiarów sieci struktur. Główny nurt badawczy tej pracy to przeprowadzenie porównawczej analizy dla obu typu struktur z symetrycznym i asymetrycznym ułożeniem elementów sieci w górnej i dolnej warstwie struktury. W efekcie przeprowadzone symulacje dla czterech typów struktur oraz różnych orientacji zewnętrznego stałego pola magnetycznego w pomiarach FMR w płaszczyźnie próbki pokazały, że pole to pozwala kontrolować intensywność, częstotliwość i rozkład amplitudy zlokalizowanych modów FMR.

Przechodząc do oceny osiągnięć Doktoranta przedstawionych w rozdziale piątym stwierdzam, że jest to dorobek wyjątkowy nie tylko pod względem ilościowym (dziewięć prac), ale również jakościowym. Osiem prac zostało opublikowanych w międzynarodowych czasopismach o wysokiej randze. Czynniki IF dla tych czasopism w bieżącym roku był pomiędzy 2,1 a 9,3 (średnia wartość dla ośmiu prac 5,5). Praca P1, opublikowana w 2020 ma już 15 cytowań, pojawiają się również pierwsze cytowania pozostałych prac. Należy przy tym podkreślić, że w kilku przypadkach autorzy tych prac pochodzą z placówek badawczych o najwyższej randze w dziedzinie magnetyzmu niskowymiarowego, magnoniki i spintroniki.

Spośród dziewięciu prac, w siedmiu mgr Mateusz Gołębiwski jest pierwszym autorem. W siedmiu, spośród ośmiu publikacji, jest autorem wyznaczonym do korespondencji. Te fakty, w połączeniu z oświadczeniami współautorów oraz oświadczeniami Doktoranta o jego udziale w każdej pracy, jednoznacznie pokazują zdecydowanie dominujący udział mgra Mateusza Gołębiewskiego w postaniu omawianego dorobku.

Przedstawiony w rozprawie doktorskiej cykl dziewięciu prac jest tematycznie spójny, gdyż w całości dotyczy zagadnień związanych z rozchodzeniem się fal spinowych w strukturach ferromagnetycznych o różnym stopniu złożoności. W prowadzonych badaniach Doktorant korzystał z różnych programów, które potrafił zaadaptować również poprzez ich rozwinięcie.

Uzupełnieniem dorobku naukowego mgra Mateusza Gołębiewskiego, który został włączony do rozprawy doktorskiej jest jeszcze jedna praca opublikowana w arXiv w 2024 roku, której pierwszym autorem jest S. Memarzadeh oraz dwadzieścia jeden prezentacji konferencyjnych w tym dziesięć ustnych i jeden wykład na zaproszenie organizatorów.

Na początku mojej recenzji zaznaczyłem, że tematyka rozprawy, ze względu na zastosowania efektów magnonicznych w technologiach informatycznych, jest bardzo aktualna. Teraz chciałbym do tego dodać, że na aktualnym etapie rozwoju badań w tej dziedzinie niezwykle postęp w technologii wytwarzania skomplikowanych nanostruktur spotkał się z możliwościami ich badania doświadczalnego i z wykorzystaniem nowych metod symulacji mikromagnetycznych. Jestem w pełni przekonany, że właśnie w zakresie symulacji dynamicznych efektów magnetycznych mgr. Mateusz Gołębiwski wniósł swój istotny wkład.

Podsumowując uważam, że zarówno opis stanu wiedzy przedstawiony w pierwszych rozdziałach, jak i wyniki własnych badań mgra Mateusza Gołębiowskiego prezentowane w rozdziale piątym rozprawy są na wyjątkowo wysokim poziomie - znacznie przewyższającym średni poziom prac doktorskich, dlatego z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczenie mgra Mateusza Gołębiowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz o wyróżnienie jego pracy doktorskiej.

G. Jachnicki