



Kraków, 20.08.2025

Dr hab. inż. Michał Krupiński
Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
w Krakowie

**Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr. Mateusza Gołębiewskiego
pt. „Novel approaches to control spin waves using structuring
and complex geometry of ferromagnetic nanostructures”**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. Mateusza Gołębiewskiego została przygotowana na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu pod kierunkiem prof. dr hab. Macieja Krawczyka oraz dr hab. Pawła Gruszeckiego, prof. UAM. Praca ma charakter teoretyczny z zakresu fizyki ciała stałego i dotyczy badania fal spinowych w nanostrukturyzowanych układach o złożonej geometrii za pomocą metod symulacji mikromagnetycznych. W szczególności praca analizuje możliwości kontroli fal spinowych za pomocą parametrów geometrycznych w układach jedno-, dwu- i trójwymiarowych, co ma duże znaczenie w kontekście potencjalnych zastosowań w urządzeniach spintronicznych i magnonicznych. Najważniejsze wyniki przedstawione w dysertacji zostały uzyskane za pomocą symulacji komputerowych metodami różnic skończonych i elementów skończonych z wykorzystaniem środowisk MuMax3, tetmag i COMSOL Multiphysics.

Układ i zawartość pracy

Rozprawa doktorska mgr. Mateusza Gołębiewskiego liczy 266 stron, została przygotowana w języku angielskim i zredagowana jest jako zestawienie dziewięciu publikacji. Jej układ jest klarowny, poprawny i logiczny. Pierwsza część rozprawy obejmuje wprowadzenie do magnetyzmu, tematu fal spinowych oraz kryształów magnonicznych. Zawiera również omówienie najważniejszych relacji i modeli mikromagnetycznych służących do opisu dynamiki nanostrukturyzowanych materiałów magnetycznych. Druga, najobszerniejsza część recenzowanej pracy, obejmuje dziewięć artykułów tworzących cykl będący podstawą rozprawy. Osiem z nich zostało opublikowanych w recenzowanych czasopismach z Wykazu Czasopism Naukowych Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego ogłoszonego dnia 5.01.2024 (Physical Review B, IEEE Transactions on Magnetics, Advanced Electronic Materials, Physics Review Applied, Advanced Quantum Technologies, Applied Physics Letters, ACS Applied Materials & Interfaces, Acta Materialia), natomiast jeden artykuł stanowi preprint umieszczony w bazie arXiv. Każdy z artykułów jest publikacją wieloautorską i opatrzony został krótkim omówieniem najważniejszych wyników oraz określeniem wkładu



merytorycznego Doktoranta. Zdecydowana większość prac cyklu ma charakter badań teoretycznych, a Doktorant jest pierwszym autorem w siedmiu z nich. Ponadto rozprawa zawiera zwięzłe omówienie perspektyw kontynuacji badań, podsumowanie, bibliografię składającą się ze 179 pozycji istotnych dla rozpatrywanych w rozprawie zagadnień, informację o dorobku naukowym Doktoranta oraz zbiór deklaracji współautorów dotyczących ich udziału w badaniach. Pomimo że zbiór deklaracji współautorów nie jest kompletny, w mojej opinii można na jego podstawie określić, że Doktorant odegrał wiodącą rolę w przedstawionych publikacjach i **posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej polegającej na modelowaniu nanostrukturyzowanych materiałów magnetycznych, analizie i interpretacji wyników, ich dyskusji oraz wyciąganiu wniosków.**

We wstępie pracy (rozdział 1) zdefiniowane są cele prowadzonych badań wraz z określeniem stojącej za nimi motywacji, jak również pokrótce przedstawione są omawiane w dalszych częściach rozprawy ferromagnetyczne nanostrukturyzowane układy jedno-, dwu- i trójwymiarowe. W szczególnych przypadkach dynamika magnetyzacji w tego typu układach wykazuje potencjał do przetwarzania, przechowywania i przesyłania informacji przy bardzo niskim zużyciu energii. Aby jednak możliwe było skonstruowanie magnonicznych urządzeń posiadających takie możliwości, należy określić w jaki sposób wymiarowość i geometria nośników mogą być wykorzystane do uzyskania wymaganych funkcjonalności fal spinowych. Zagadnienia te są aktualnym tematem magnoniki i stanowią główną motywację badań Autora.

Kolejny rozdział dotyczy podstaw nanomagnetyzmu i rozpoczyna się od czterostronicowego omówienia badań o znaczeniu historycznym. Następnie Doktorant wprowadza najważniejsze pojęcia, używane w dalszych częściach rozprawy doktorskiej, poczynawszy od opisu źródła i cech pola magnetycznego, poprzez typy materiałów magnetycznych oraz wybrane zjawiska występujące w ferro- i ferrimagnetykach. Uważam, że bardzo cennym uzupełnieniem jest, zawarta na stronach 14-15, wzmianka dotycząca altermagnetyków, które wzbudzają duże zainteresowanie i są obiecującym materiałem dla spintroniki. Warto jednak mieć na uwadze, że niektóre nowe doniesienia kwestionują altermagnetyczne własności RuO_2 [np. Jiayu Liu et al. Phys. Rev. Lett. 133, 176401 (2024)], przez co należałoby z ostrożnością podchodzić do jednoznacznych stwierdzeń dotyczących eksperymentalnych dowodów na altermagnetyzm tego materiału.

Rozdział 3 jest wprowadzeniem do metod mikromagnetycznych, opisu dynamiki momentów magnetycznych oraz magnoniki. Zawarte jest w nim również centralne dla tego rozdziału omówienie równania Landaua-Lifshitz-Gilberta (LLG) będącego podstawą stosowanych przez doktoranta metod. W szczególności na uwagę zasługuje klarowne omówienie linearyzacji równania LLG. Nie mniej istotnym fragmentem tej części pracy jest analityczny opis relacji dyspersji fal spinowych dla trzech standardowych konfiguracji (*Damon-Eshbach*, *Backward Volume* oraz *Forward Volume*).

Kolejny, czwarty, rozdział opisuje metody numeryczne użyte do uzyskania wyników zaprezentowanych w dalszych częściach rozprawy. W szczególności opisane zostały metody



różnic skończonych (wykorzystywane w środowisku MuMax3) oraz metody elementów skończonych (wykorzystywane w środowiskach COMSOL i tetmag) wraz z przeglądem algorytmów iteracyjnego rozwiązywania równań LLG. W ramach tego rozdziału zawarty został także przegląd trzech narzędzi i środowisk do symulacji mikromagnetycznych wykorzystanych przez doktoranta, omawiający najważniejsze cechy, możliwości i ograniczenia każdego z nich. Na uwagę zasługuje praktyczne porównanie używanych narzędzi, wskazujące do jakiej kategorii problemów mikromagnetycznych najlepiej nadaje się każde z nich.

Omawiane wyżej rozdziały 1 – 4 zostały w mojej opinii przygotowane z najwyższą starannością. Znalazły się w nich zarówno odniesienia do najważniejszych historycznych publikacji jak i aktualnych doniesień literaturowych prezentujących obecny stan wiedzy. Ta część rozprawy została z jednej strony napisana zwięźle i zawiera wybór najważniejszych pojęć i zjawisk, z drugiej strony nie przedstawia zagadnień w sposób zbyt uproszczony niż jest to konieczne. Dzięki temu posiada ona w mojej opinii wysoki walor dydaktyczny. Uważam, że najcenniejszymi jej fragmentami są opisy metod symulacji mikromagnetycznych, klarownie wyjaśniające ich podstawy numeryczne wraz z odniesieniem do praktycznej ich implementacji. Ta część rozprawy wskazuje również jednoznacznie, że Doktorant **posiada ogólną wiedzę teoretyczną w zakresie magnetyzmu oraz metod symulacji mikromagnetycznych.**

Przedruki dziewięciu publikacji będących podstawą rozprawy zwarte są w najbardziej obszernym 5 rozdziale. Każda z publikacji poprzedzona jest zwięzłym określeniem wkładu Doktoranta oraz omówieniem najważniejszych wyników.

Ocena i zawartość cyklu publikacji

Publikacja [P1] ma w całości charakter teoretyczny i dotyczy efektu Talbota dla fal spinowych rozchodzących się w cienkich warstwach permaloju z wprowadzoną jednowymiarową siatką dyfrakcyjną. Warto zaznaczyć, że omawiana publikacja po raz pierwszy analizuje ten efekt dla fal spinowych, gdyż wcześniejsze doniesienia demonstrowały jego występowanie dla światła, fal w cieczech oraz dla plazmonów. Istotną częścią pracy jest pokazanie perspektyw doświadczalnego potwierdzenia opisanego zjawiska za pomocą standardowego spektrometru rozpraszania światła Brillouina z rozdzielczością na poziomie mikrometrów (mikro BLS) oraz przedstawienie przewidywań wyników przyszłych eksperymentów. Jest to w mojej opinii jedna z najważniejszych publikacji omawianych w rozprawie, jako że zagadnienia w niej poruszane rozwijane są bezpośrednio w artykułach [P2, P3 i P6]. Obecnie jest to również najlepiej cytowana praca z całego cyklu.

Publikacja [P2] jest kontynuacją zagadnień poruszanych w pracy [P1] i dotyczy efektu Talbota w falowodach wielomodowych, do których fale spinowe dostarczane są za pomocą zespołu falowodów jednomodowych. Głównym celem publikacji było określenie jak efekt Talbota zależy od geometrii układu, liczby falowodów jednomodowych oraz odległości między nimi. Dalsze rozwinięcie tego zagadnienia zaprezentowane jest w publikacji [P3], gdzie przedstawiona została oryginalna propozycja wykorzystania wielomodowych



falowodów i występującego w nich efektu Talbota do przeprowadzania operacji logicznych. Uzyskane wyniki demonstrują duży potencjał wspomnianego efektu dla urządzeń magnonicznych, w szczególności w kontekście systemów obliczeniowych opartych na falach spinowych. Zaproponowane rozwiązanie jest skalowalne i względnie proste, przez co może być rozważane jako alternatywa dla układów elektronicznych bazujących na tranzystorach. Mocnego dowodu na możliwość praktycznego zastosowania efektu Talbota dostarcza kolejna publikacja [P6], w której po raz pierwszy eksperymentalnie zademonstrowano jego występowanie w warstwie granatu itrowo-żelazowego (YIG). Fale spinowe zostały wytworzone za pomocą cienkowarstwowych anten znajdujących się pod warstwą YIG, a oddziaływanie fal spinowych z jednowymiarowymi siatkami dyfrakcyjnymi w postaci okrągłych i kwadratowych antykropek badano za pomocą spektrometrii mikro BLS. Eksperyment został wykonany we współpracy z Uniwersytetem w Białymstoku, a udział Doktoranta polegał m.in. na analizie wyników doświadczeń oraz interpretacji wyników symulacji mikromagnetycznych.

Następne publikacje dotyczą propagacji fal spinowych w układach dwu- i trójwymiarowych o złożonej geometrii. W pracy [P4] analizowane są nieskończenie długie falowody o przekroju poprzecznym w kształcie półksiężyca. Centralnym zagadnieniem publikacji są rozważania dotyczące lokalizacji fal spinowych, którą badano w zależności od kształtu przekroju poprzecznego falowodu oraz kierunku zewnętrznego pola magnetycznego. Zidentyfikowano warunki występowania modów krawędziowych oraz pokazano, że jednym z kluczowych czynników jest wartość współczynników odmagnesowania związana z anizotropią kształtu.

Publikacja [P5] analizuje możliwość kontroli fal spinowych o wysokiej częstotliwości w dwuwymiarowych sieciach antykropek wytworzonych w cienkiej warstwie permaloju o grubości 5 nm. Autorzy zamodelowali układ okrągłych antykropek o średnicy 80 nm uporządkowanych w kwadratową sieć o okresie 150 nm. Główne wyniki zawarte w pracy dotyczą urządzenia, w którym w/w sieć posiada defekt w postaci występującego w centrum obszaru bez antykropek. Pokazano, że poprzez występowanie modów uwięzionych w defekcie sieci, możliwe jest generowanie fal spinowych o częstotliwościach dziesiątek GHz i długościach fal poniżej 50 nm. Wyniki w tej publikacji zostały uzyskane za pomocą symulacji w środowiskach MuMax3 i Comsol, przy czym Doktorant odpowiedzialny jest za wykorzystanie drugiego z tych narzędzi.

Najbardziej zaawansowane symulacje dostarczające równocześnie najciekawszych wyników zostały uzyskane dla układów trójwymiarowych. Publikacja [P7] przedstawia badania sieci gyroidalnych wytworzonych poprzez elektrodępozycję niklu na rusztowaniach samoporządkujących się kopolimerów blokowych. Praca analizuje jak orientacja krystalograficzna struktur gyroidalnych oraz kierunek zewnętrznego pola magnetycznego wpływają na dynamikę momentów magnetycznych. Uzyskane wyniki sugerują, że w tego typu strukturach możliwa jest przestrzenna kontrola wzbudzeń i lokalizacji fal spinowych, co może mieć znaczenie w kontekście konstrukcji nowego typu rekonfigurowalnych anten dla zakresu mikrofalowego. Warto zaznaczyć, że publikacja [P7] zawiera nie tylko ciekawe wyniki symulacji mikromagnetycznych, ale również wyniki eksperymentalne uzyskane



w szerokiej współpracy międzynarodowej. W mojej opinii artykuł ten, razem z publikacją [P8] poszerzającą omówienie własności struktur gyroidalnych, jest najciekawszą częścią cyklu będącego podstawą rozprawy. Cechuje się on wysokim stopniem zaawansowania zastosowanych metod, bogatym materiałem badawczym oraz podjęciem ambitnego i oryginalnego problemu naukowego. Wspomniana publikacja [P8] jest rozdziałem zgłoszonym do książki będącej zbiorowym opracowaniem pod redakcją J.-C.S. Lévy'ego i zawiera przegląd statycznych i dynamicznych własności magnetycznych struktur gyroidalnych omawiając najważniejsze artykuły dotyczące tej tematyki. Odnosi się również do wybranych wyników pracy [P8]. W mojej opinii jej istotnym fragmentem jest podrozdział dotyczący metod wytwarzania pokazujący obecny stan oraz ograniczenia eksperymentalne.

Ostatnią publikacją wchodzącą w skład cyklu jest praca [P9], w której analizowane są nie tylko struktury gyroidalne, ale także kaskadowe matryce nanoprętów. Głównym wynikiem publikacji jest pokazanie, że dla tego typu złożonych trójwymiarowych struktur można zaobserwować nowy typ powierzchniowej lokalizacji fal spinowych. Dodatkowo może być ona kontrolowana przez zmianę kierunku zewnętrznego pola magnetycznego.

Przedstawiona powyżej analiza publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej pozwala stwierdzić, że stanowią one grupę powiązanych tematycznie artykułów naukowych, które przedstawiają oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Przedstawiony materiał należy uznać za bogaty i ciekawy. Wszystkie publikacje prezentują wysokie kompetencje obliczeniowe Doktoranta w badaniach nanomateriałów magnetycznych, a wyniki i analizy zaprezentowane są w sposób rzetelny i zgodny ze standardami pracy naukowej.

Podczas czytania omawianych publikacji nasunęły mi się również dodatkowe pytania i zwracam się z prośbą do Doktoranta o odpowiedź na nie podczas obrony.

1. W rozprawie zawarte jest stwierdzenie, że rozważane struktury mają potencjał eksperymentalnej realizacji i rzeczywiście w publikacjach Autora znaleźć możemy dowody na realizację niektórych z nich takich jak warstwy z antykropkami lub struktury gyroidalne. Jakie metody produkcji nanostruktur uważane są przez Doktoranta za najbardziej obiecujące w kontekście wytwarzania kaskadowych matryc nanoprętów rozważanych w publikacji [P9] i zaprezentowanych na rys. 1.1.d lub stosów nanodrutów zobrazowanych na rys. 5.1?
2. W większości omówionych przypadków Doktorant rozważa struktury idealne pozbawione defektów. W praktyce uzyskanie nanostruktur całkowicie pozbawionych defektów jest niemalże niemożliwe. Jaki typ defektów lub niejednorodności materiału uważa Autor za najbardziej ingerujący we własności dynamiczne rozważanych w rozprawie nanostruktur? Jak tego typu defekty uwzględnić w symulacjach mikromagnetycznych?
3. Jak uwzględnić wpływ temperatury w używanych przez Doktoranta modelach mikromagnetycznych? Czy taki wpływ był rozważany w kontekście wykonywanych



eksperymentów i jakie może mieć on znaczenie dla zaprezentowanych w rozprawie wyników?

4. Jak modele atomistyczne mogłyby pomóc w analizie problemów przedstawianych w rozprawie? Czy Doktorant mógłby podać przykłady zagadnień z zakresu magnoniki, gdzie użycie takich modeli byłoby cennym uzupełnieniem modelowania mikromagnetycznego?

Podsumowanie i ocena końcowa

Przedstawione w pracy wyniki i analizy dobrze wpisują się w obecne trendy badań w zakresie magnoniki i nanostrukturyzowanych materiałów magnetycznych. Podjęty został aktualny temat badawczy, a mgr Mateusz Gołębiewski uzyskał szereg interesujących wyników. Pomimo że dysertacja ma charakter teoretyczny, pozostaje w bliskiej relacji z doświadczeniem i w wielu miejscach wytycza nowe ścieżki dla fizyków doświadczalnych. Docenić należy również wykorzystanie przez Doktoranta różnych środowisk symulacyjnych, charakteryzujących się odmiennymi cechami i możliwościami, co znacząco poszerzyło zakres materiałów i struktur geometrycznych dostępnych badaniom. W mojej opinii szczególnie interesującym fragmentem dysertacji jest publikacja [P1] omawiająca po raz pierwszy efekt Talbota dla fal spinowych oraz publikacja [P7] dotycząca struktur gyroidalnych, na podstawie których możliwe jest prowadzenie dalszych badań teoretycznych i doświadczalnych.

Wysoki poziom merytoryczny rozprawy i jej staranne przygotowanie pod kątem redakcyjnym świadczą o wysokiej rzetelności Autora. Dysertacja napisana jest naukowym językiem i prezentuje dużą wiedzę teoretyczną Doktoranta w zakresie poruszanej tematyki. Przedstawione wyniki świadczą o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej polegającej na modelowaniu materiałów magnetycznych, analizie wyników, ich dyskusji oraz wyciąganiu wniosków. Konkludując uważam, że rozprawa doktorska mgr. Mateusza Gołębiewskiego pt. „Novel approaches to control spin waves using structuring and complex geometry of ferromagnetic nanostructures” zawiera wartościowe wyniki, prezentuje oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wnosi istotny wkład w rozwój nanomagnetyzmu, a w szczególności w badania możliwości kontroli fal spinowych w materiałach nanostrukturyzowanych. Rozprawa spełnia wszystkie kryteria stawiane kandydatom do stopnia doktora w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U. 2023 poz. 742 z późn. zm.) i **wnoszę o dopuszczenie pracy do obrony, a Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Równocześnie, biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny dysertacji, obszerność zgromadzonego materiału badawczego, znaczny dorobek naukowy Doktoranta oraz jego duży wkład w przedstawione w doktoracie publikacje, **wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.**

Michał Krapiński