

Warszawa, 29 IX, 2025

Prof. dr hab. Marek Potemski
Politechnika Warszawska
Centrum Zaawansowanych Materiałów i Technologii, CEZAMAT
Center for Terahertz Research and Applications, CENTERA2
ul. Poleczki 19
02-822 Warszawa

Recenzja pracy doktorskiej
Mgr. Krzysztofa Wojciecha Sobuckiego
zatytułowanej
„Resonance effects in linear and nonlinear spin wave dynamics for control of propagating spin waves”

Praca wykonana została w Instytucie Spintroniki i Informacji Kwantowej,
na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
pod kierunkiem promotora dr. hab. Pawła Gruszeckiego.

Praca doktorska mgr. Krzysztofa Sobuckiego dotyczy ważnych badań nad kontrolą propagacji fal spinowych. Podejmuje ona jedno z kluczowych zagadnień, które powinny być rozwiązane, zanim magnonika stanie się w pełni operacyjna i będzie mogła spełnić pokładane w niej nadzieje. Trzon rozprawy stanowi pięć artykułów naukowych przedstawionych w Rozdziale 5. Warto podkreślić, że we wszystkich tych publikacjach mgr Sobucki występuje jako autor korespondujący, a w czterech z nich jest pierwszym autorem. Dwie inne publikacje, również istotne w obszarze magnoniki, choć wybiegające poza główny nurt rozprawy, zostały krótko przedstawione w Rozdziale 6. Motywacja do przeprowadzonych badań oraz przegląd treści naukowej wszystkich siedmiu prac opublikowanych w trakcie studiów doktoranckich K. Sobuckiego zostały przedstawione w Rozdziale 4. Rozdział 1 stanowi szczegółowe wprowadzenie do magnetyzmu i magnoniki, z odpowiednim doбором zagadnień ogólnych oraz bardziej szczegółowych, istotnych dla głównego tematu pracy. Rozdziały 2 i 3 mają na celu – i skutecznie realizują to zadanie – ułatwienie zrozumienia problemów, systemów, metod i celów zaprezentowanych w tej dysertacji. Imponująca, jak na doktoranta, lista publikacji, udziału w konferencjach naukowych oraz wkładu w realizację projektów badawczych została

zestawiona w Rozdziale 7. Co istotne, wskazano także perspektywy badawcze wynikające z wyników badań przedstawionych w pracy, co należy uznać za wyjątkowe, gdyż nie zawsze można się tego spodziewać od młodych naukowców.

Wracając do głównej części pracy (Rozdział 5), chciałbym ponownie podkreślić, że uważam ją za niezwykle istotną dla rozwoju urządzeń magnonicznych, ponieważ w odpowiedni sposób wykorzystuje metody teoretyczne ukierunkowane na kontrolę propagacji fal spinowych. Pięć artykułów przedstawionych w Rozdziale 5 odzwierciedla konsekwentnie rozwijaną ścieżkę badawczą dotyczącą własności rezonansowych w dynamice fal spinowych – począwszy od efektów liniowych, aż po zjawiska nieliniowe.

W pierwszym artykule pt. *Resonant subwavelength control of the phase of spin waves reflected from a Gires–Tournois interferometer* zaprezentowano magnoniczny analog optycznego interferometru Gires–Tournois. Dokonano tego poprzez zbadanie oddziaływania wąskiego paska ferromagnetycznego umieszczonego nad krawędzią jednorodnie namagnesowanej warstwy permalaju z propagującymi falami spinowymi. Przedstawione wyniki wskazują, że magnoniczny interferometr Gires–Tournois może być wykorzystany do modyfikacji fazy odbitych fal spinowych w szerokim zakresie, dzięki niewielkim zmianom szerokości paska lub odległości pasek–warstwa

Badania przedstawione w drugim artykule pt. *Control of the Phase of Reflected Spin Waves from a Magnonic Gires–Tournois Interferometer of Subwavelength Width* stanowią rozszerzenie pracy zaprezentowanej w poprzednim artykule. Rozważane są różne geometrie interferometru, które oferują dodatkowe możliwości efektywnej regulacji fazy odbitych fal spinowych.

Badania przedstawione w dwóch omówionych wyżej artykułach koncentrują się głównie na symulacjach numerycznych przeprowadzonych za pomocą oprogramowania COMSOL Multiphysics, choć wprowadzono również model pół-analityczny do rozwiązania równania Landaua–Lifshitz. Model ten, opracowany w celu opisu dynamiki fal spinowych w interferometrach magnonicznych, został szerzej rozwinięty w trzeciej pracy opublikowanej w *PRB* pt. *Modal approach to modeling spin-wave scattering*. Istotny wkład Sobuckiego w tę pracę polega na potwierdzeniu wcześniej zaproponowanego podejścia pół-klasycznego poprzez porównanie go z symulacjami numerycznymi wykonanymi przy użyciu bardziej zaawansowanego narzędzia MuMax3.

Znaczący krok naprzód w kontroli fal spinowych w rezonatorach magnonicznych został zaprezentowany w artykule opublikowanym w *Nano Letters* pt. *Magnon-Optic Effects with Spin-Wave Leaky Modes: Tunable Goos-Hänchen Shift and Wood's Anomaly*. W pracy tej, na podstawie symulacji MuMax3 (rozwiązania równania Landau-Lifshitz-Gilbert) dotyczących skośnego odbicia wiązki fal spinowych od krawędzi warstwy ferromagnetycznej zakończonej rezonansowym paskiem, wykazano pojawienie się modów przeciekających („leaky modes”) w warunkach rezonansowych. Proponowane jest wykorzystanie w magnonice pewnych efektów składających się z dobrze znanych w technologiach fotonicznych. Co ważne, szczegółowo przedyskutowano również możliwość eksperymentalnej realizacji przedstawionych przewidywań teoretycznych.

W ostatniej pracy omówionej w Rozdziale 5 analizowanym układem nie był interferometr magnoniczny, lecz cienka warstwa ferromagnetyczna, w której propagujące fale spinowe rozpraszają się nieelastycznie na zlokalizowanym modzie brzegowym. Co ciekawe, w określonych warunkach zaobserwowano zaskakująco duże przesunięcie boczne nieelastycznie rozproszonej wiązki fal spinowych. Efekt ten został zinterpretowany jako konsekwencja kaskadowych procesów nieliniowych zachodzących na krawędzi warstwy i obejmujących podstawowy brzegowy mod fal spinowych. Co istotne, ta kaskada procesów nieliniowych prowadzi do wzbudzenia nowych modów brzegowych, o wyższych częstościach. Zastosowanie zaawansowanego narzędzia numerycznego MuMax3 okazało się istotnym elementem dla przedstawienia tych wyników.

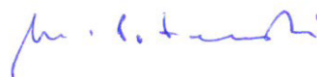
W dużym skrócie, główne wyniki przedstawione w rozprawie dotyczą identyfikacji i szczegółowego opisu szeregu efektów w strukturach magnonicznych. Zjawiska te, pierwotnie odkryte podczas badań nad propagacją fal optycznych (fotonów) i obecnie wykorzystywane w rozwoju struktur fotonicznych, zostały zademonstrowane również w odniesieniu do dynamiki fal spinowych (magnonów). Zaprezentowane wyniki mogą w szczególności wnieść istotny wkład w przyszłą implementację rezonatorów magnonicznych w nowych urządzeniach funkcjonalnych.

O wysokiej jakości rozprawy doktorskiej Sobuckiego jednoznacznie świadczy zarówno liczba, jak i poziom naukowy jego prac opublikowanych w prestiżowych czasopismach. Tak imponujący dorobek publikacyjny, szczególnie na etapie doktoratu, potwierdza nie tylko oryginalność i znaczenie podejmowanych badań, ale również zdolność doktoranta do rozwiązywania złożonych problemów naukowych oraz skutecznego prezentowania wyników.

Niemniej muszę przyznać, że jestem nieco zaskoczony, iż prace K. Sobuckiego jak dotąd spotkały się ze stosunkowo niewielkim zainteresowaniem w środowisku naukowym (nieliczna liczba cytowań). Mam jednak szczerą nadzieję, że w przyszłości się to zmieni, na przykład dzięki zaangażowaniu doktoranta w projekt UE MANNGA. W każdym razie zdecydowanie zachęcałbym go do nawiązywania bezpośrednich kontaktów z grupami eksperymentalnymi, aby aktywnie promować swoje teoretycznie opracowane koncepcje.

Podsumowując, rozprawa doktorska mgr. Krzysztofa Sobuckiego zasługuje na wysoką ocenę. Uzyskane wyniki badań mają istotny i znaczący charakter, a sama praca wnosi oryginalny wkład w rozwój wiedzy w dziedzinie magnoniki. Autor w znacznym stopniu samodzielnie zrealizował postawione sobie cele naukowe, wykazując się szeroką wiedzą specjalistyczną oraz umiejętnościami niezbędnymi do prowadzenia badań naukowych na wysokim poziomie. Rozprawa świadczy zarówno o ogólnej wiedzy kandydata w danej dyscyplinie, jak i o jego umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych

Uważam, że rozprawa doktorska mgr Krzysztofa Sobuckiego spełnia wymogi określone w obowiązujących przepisach prawa i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Marek Potemski