

Warszawa, 27 października 2022 r.

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

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Szymona Mieszczaka pt.:  
*Spin waves in magnonic systems: localization and propagation***

Niniejsza rozprawa doktorska została przygotowana przez mgra Szymona Mieszczaka na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu we wrześniu 2022 roku w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauk fizycznych pod opieką naukową dra hab. Jarosława Kłosa, prof. UAM, który pełnił rolę promotora. Poświęcona jest ona numerycznej analizie rozchodzenia się i lokalizacji fal spinowych w złożonych układach magnonicznych, takich jak: kryształy magnoniczne i falowody.

Fale spinowe (magnony) są jednymi z najintensywniej badanych zjawisk dynamiki namagnesowania. Są one falowym zaburzeniem jednorodnego namagnesowania, rozchodzącym się zarówno w ferromagnetycznych materiałach przewodzących prąd elektryczny, jak i izolatorach. Dzięki możliwości detekcji ich fazy i amplitudy można je traktować jako nośniki służące do przesyłu informacji. Fale spinowe są zatem bardzo obiecujące w kontekście rozwoju nowych technologii IT. Należy podkreślić, że fale spinowe propagują się bez transportu ładunku elektrycznego, i tym samym eliminują wytwarzanie ciepła Joule'a, znacznie obniżając zapotrzebowanie na energię niezbędną do przesyłu informacji. Zastosowania praktyczne wymagają, aby fale spinowe cechowały się np. odpowiednim zakresem częstotliwości. Właściwości te można uzyskać w specjalnie zaprojektowanych materiałach magnetycznych o złożonej strukturze periodycznej, zwanych kryształami magnonicznymi (lub kwazikryształami, gdy ich uporządkowanie jest nieperiodyczne). W takich materiałach tworzą się pasma dozwolonych częstotliwości magnonów i przerw energetycznych. Występuje tu duża analogia pomiędzy kryształami magnonicznymi a heterostrukturami półprzewodnikowymi (pasma elektronowe) oraz kryształami fonicznymi (modyfikowana propagacja światła). Innym istotnym wymogiem dla zastosowań praktycznych jest niezaburzone rozchodzenie się fal spinowych w falowodach o złożonej geometrii.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest poświęcona powyższym zagadnieniom i stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy dotyczącej magnoniki. Zasadnicze zadania, które doktorant postawił sobie do rozwiązania, obejmowały zbadanie propagacji i lokalizacji fal spinowych we wspomnianych wyżej materiałach.

W rozprawie doktorskiej można wyróżnić dwie podstawowe części. Pierwsza z nich zawiera krótko scharakteryzowane podstawy teoretyczne fal spinowych oraz

związły opis zastosowanych metod i narzędzi numerycznych. Część ta bardzo ułatwia zrozumienie uzyskanych wyników i ich interpretację. Drugą część stanowią powiązane tematycznie cztery prace naukowe, będące podstawą merytoryczną rozprawy, opublikowane w uznanych czasopismach z listy JCR: *Physical Review Applied* {*impact factor*: 5,039}, *Scientific Reports* {5,516} i *Physical Review B* {3,808}.

Rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim. Rozpoczyna się od deklaracji autora dotyczącej oryginalności przedstawionej pracy. Po podziękowaniach zamieszczone jest streszczenie w języku angielskim i polskim. W dalszej kolejności pojawia się spis treści i przedmowa stanowiąca rozdział 1. W rozdziale 2 pokrótce opisane są zagadnienia związane z rozchodzeniem się fal spinowych: równanie Landaua–Lifshita, pola efektywne, struktury magnoniczne wraz z relacjami dyspersji magnonów, lokalizacja fal spinowych i czynniki ją powodujące. Rozdział 3 zawiera omówienie zastosowanych narzędzi numerycznych: metody rozwinięcia fal płaskich oraz symulacji mikromagnetycznych. W rozdziale 4 zamieszczone są cztery artykuły (prace doktorskie P1 – P4), których zawartość opisana jest w następnych akapitach niniejszej recenzji. Każda z nich jest poprzedzona streszczeniem. Ostatni rozdział, nr 5, jest krótkim podsumowaniem uzyskanych wyników. Po nim znajdują się: lista prac cytowanych w rozprawie, dodatek A z listą wszystkich publikacji Doktoranta oraz dodatek B zawierający oświadczenia współautorów wszystkich prac, które dotyczą wniesionego przez nich wkładu.

W pracy P1 został opisany eksperyment pokazujący ciekawą możliwość tworzenia kryształu magnonicznego o parametrach „na żądanie”. Badania przeprowadzono dla dwóch rodzajów materiałów ferromagnetycznych: Ni i CoFeB, różniących się zarówno temperaturą Curie, jak i współczynnikiem tłumienia Gilberta. W tym celu oświetlono powierzchnię cienkiej, jednorodnie magnetycznej warstwy magnetycznej za pomocą impulsów dwóch interferujących ze sobą wiązek laserowych, powodując wzbudzenie elastycznych powierzchniowych fal akustycznych oraz przestrzenną modulację namagnesowania. Wskutek koherentnego i rezonansowego sprzężenia fale sprężyste generowały fale spinowe. Oba materiały wykazały zróżnicowaną odpowiedź w zależności od kąta pomiędzy kierunkiem przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego i kierunkiem propagacji wzbudzenia sprężystego. W przypadku warstw Ni osadzonych na MgO zaobserwowano dwa zakresy kątowe o odmiennym zachowaniu (przeciwnie fazy precesji), rozdzielone obszarem o stłumionej amplitudzie. W zakresie niskich kątów linia rezonansowa była pojedyncza, a dla wysokich kątów przyjmowała kształt podwójnej. Dla warstw CoFeB sygnał zarejestrowano jedynie dla zakresu małych kątów. Obserwacje eksperymentalne zostały potwierdzone w modelowaniu numerycznym, wykonanym przez Doktoranta. Przeprowadzone zostały obliczenia widm fal spinowych dla układów poddanych eksperymentowi z wykorzystaniem metody propagacji fal płaskich przy zastosowaniu kodu rozwiniętego we własnym zakresie. Wyznaczono profile modów fal spinowych, co

pozwoili na okrelenie ewolucji ich lokalizacji ze zmieniajnym si ktem przyozonego pola magnetycznego. Zasugerowano rwnie istotn rol temperatury Curie w obserwowanych wzbudzeniach, majcej wplyw na si sprężenia magnetosprężystego. Wyniki uzyskane w obliczeniach fal płaskich zostały rwnie potwierdzone przez symulacje mikromagnetyczne.

Praca P2 dotyczy zagadnienia przejcia fali spinowej przez oórodek, którego fragment ma zmieniajce si parametry magnetyczne, takie jak namagnesowanie nasycenia i anizotropia. Gradientowa zmiana tych parametrów prowadzi do zakrzywienia si kierunku rozchodzenia si fali z zachowaniem dobrze zdefiniowanej fazy. Pomimo że praca jest czysto rachunkowa (obliczenia analityczne i symulacje mikromagnetyczne), autorzy zaproponowali potencjalny materiał do przeprowadzenia eksperymentu i dla tych parametrów magnetycznych wykonano obliczenia. Podjeta analiza była bardzo systematyczna. W pierwszej kolejności badano transmisję i fazę fali przechodzcej przez obszar o odmiennych, ale jednorodnych przestrzennie wlaściwościach. Wprowadzenie gradientu (namagnesowania lub anizotropii) prowadziło do zmiany kierunku rozchodzenia si fal spinowych. W ostatnim etapie analizowano rozchodzenie si fal spinowych w zagiętym falowodzie, który w obszarze zagięcia charakteryzował si gradientowymi parametrami magnetycznymi, analogicznymi do wczeniej rozważanych przypadków. Pokazano, że przy odpowiedniej przestrzennej zmianie zarówno namagnesowania nasycenia, jak i anizotropii możliwa jest propagacja fal spinowych w zakrzywionych falowodach o niezminionej amplitudzie i dobrze zdefiniowanej fazie.

Praca P3 przedstawia szczególowe badania fal spinowych zlokalizowanych na interfejsie dwóch okresowych jednowymiarowych kryształów magnonicznych o zróżnicowanej strukturze. Kryształy te miały postać cienkich warstw, składowanych si z naprzemiennie ułożonych pasków rżnych materiałów. Dla celów obliczeń ilościowych przyjęto parametry magnetyczne dla kobaltu (Co) i permaloju (Py). Relację pomiędzy szerokością paska Co i okresowością określał parametr wypełnienia (*filling fraction*). Lokalizacja komórki elementarnej była określona parametrem jej połozenia  $\delta$ . Parametry kryształów zostały dobrane w taki sposób, aby pasma magnonowe częściowo si przekrywały. Umożliwiało to powstanie modów interfejsowych fal. Wyniki ilustrują generowanie si zlokalizowanych fal spinowych w zależności od wymienionych powyżej parametrów strukturalnych kryształów i parametrów interfejsu. Powiązane zostały ze sobą wlaściwości pasm magnonicznych w obu kryształach, scharakteryzowanych fazą Zaka, z warunkami brzegowymi fal wyrażonymi przez pochodną logarytmiczną funkcji Blocha. Rozważone zostały dwa przypadki oddziaływań: wymiennych – dla kryształów o małej okresowości oraz wymiennie-dipolowych występujących w kryształach o okresowości o rząd większej. Rozszerzone oddziaływanie prowadziły do bardziej złożonej struktury pasmowej magnonów. Zaobserwowano rzadsze przecinanie si krawędzi pasm oraz że w zakresie niskich częstotliwości obserwowane mody

interfejsowe fale nie przechodzą przez krawędzie pasma wzbronionego wraz ze zmieniającym się położeniem komórki elementarnej w kryształach magnonicznych.

Określenie wpływu nieporządku, wprowadzonego do kwaziperiodycznych kryształów magnonicznych, na rozchodzenie się fal spinowych jest przedmiotem pracy P4. Kryształy te mają postać cienkich warstw, składających się z komponentów w postaci ferromagnetycznych pasków dwóch różnych materiałów, podobnie jak miało to miejsce w pracy P3 (do obliczeń ilościowych również przyjęto parametry magnetyczne jak dla Co i Py). Jako wzorzec wyjściowy przyjęto tzw. kwazikryształ Fibonacciego. Wprowadzane defekty, określane mianem fazonów, miały postać zmian sekwencji ułożenia pasków składowych. Zmieniający się stopień zdefektowania został opisany parametrem  $\lambda$ , określonym jako globalna miara lokalizacji. Zadanie to jest istotnie nietrywialne, ponieważ kryształ kwaziperiodyczny można zbudować, a defekty wprowadzić na wiele równoważnych sposobów. Pokazano, że efekty lokalizacji fal spinowych występują również w niezaburzonych kwazikryształach. Rozpatrzono kilka poziomów zdefektowania. Otrzymane wyniki dowodzą, że ze wzrostem stopnia nieuporządkowania następuje degradacja struktury pasmowej i zamykanie się węższych pasm wzbronionych w połączeniu z pojawianiem się tam modów zlokalizowanych. Dla wybranych modów fal zademonstrowano również, jak ewoluują one przestrzennie (lokalizacja, częstotliwość, faza) w kryształach wraz z rosnącym stopniem zdefektowania.

Przedstawione w rozprawie wyniki są oryginalne i stanowią nowatorskie rozwiązanie problemów z zakresu magnoniki. Publikacje dotyczą tematyki nieporuszanej do tej pory przez innych badaczy. Dwie prace doktorskie (opublikowane w *PRAppl.*) mają wysoką cytowalność, biorąc pod uwagę krótki czas od daty ich publikacji. Świadczy to o pozytywnym ich przyjęciu w środowisku naukowym.

Uzyskane rezultaty są logicznie ze sobą powiązane i tworzą spójną całość. Doktorant analizował różne obiekty magnoniczne o coraz bardziej złożonej strukturze pod kątem rozchodzenia się i lokalizacji fal spinowych. Jednym z nich jest „chwilowy” kryształ magnoniczny indukowany w jednorodnej warstwie za pomocą odpowiedniego jej naświetlania wiązkami lasera (P1). Analiza fal spinowych została dokonana w zależności od orientacji pola magnetycznego wyznaczającej kierunek ich propagacji. Jest to równoległy sposób wytwarzania kryształów magnonicznych w stosunku do złożonych struktur o trwałej modulacji właściwości magnetycznych. Dwie pozostałe prace, czysto obliczeniowe (P3 i P4), dotyczą efektów lokalizacyjnych fal spinowych w kryształach o trwałej strukturze modulowanej i rosnącym stopniu złożoności. W pracy P3 badany obiekt składał się z dwóch periodycznych struktur o regulowanych parametrach połączonych wspólnym interfejsem. Główny wynik opisywał wpływ periodyczności na lokalizację fali na interfejsie. Analizowana struktura materiału z pracy P4 miała jeszcze bardziej złożoną budowę w postaci aperiodycznego kryształu Fibonacciego, do którego dodatkowo wprowadzano defekty (fazony) w postaci błędów ułożenia. Opisano, w jaki sposób zmiany strukturalne modyfikują strukturę pasmową

magnonów i generują mody silnie zlokalizowane. W ostatniej omawianej pracy (P2) pokazano, że dzięki gradientowej zmianie parametrów magnetycznych materiału można zmienić kierunek rozchodzenia się w nim fal spinowych z zachowaniem dobrze zdefiniowanej fazy. Wynik ten jest bardzo istotny dla praktycznych zastosowań, w których wskutek wymagań miniaturyzacji falowód magnoniczny musi mieć bardziej złożoną niż prostoliniową geometrię.

Należy zauważyć, że w trzech pracach, czysto teoretycznych (P2 – P4), doktorant jest pierwszym oraz korespondencyjnym współautorem. Klarowne wprowadzenie teoretyczne do zagadnień poruszanych w rozprawie oraz licznie cytowane prace, obejmujące szeroką przestrzeń czasową, świadczą o posiadaniu przez Doktoranta obszernej wiedzy z zakresu przynależnej dyscypliny. Praca, która powstała we współpracy z grupą eksperymentalną, ma dłuższą listę autorską. Jest to standardowa sytuacja. W świetle przedstawionych oświadczeń pozostałych współautorów, dotyczących ich wkładu, nie ulega wątpliwości, że udział Doktoranta w powstaniu tych prac jest kluczowy. Powyższe informacje dowodzą, że Doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Należy też podkreślić, że część prac powstała z udziałem zagranicznych grup badawczych z Holandii, Niemiec, Francji i Ukrainy, co świadczy o efektywnej współpracy. W dorobku Doktoranta, oprócz czterech omówionych powyżej prac, znajduje się również pięć innych publikacji w postaci artykułów (w tym opublikowany w *Nano Letters* {12,709} oraz praca typu mapa drogowa dla magnoniki) i rozdziału w książce (wydawnictwo *World Scientific*). Warta podkreślenia jest również bardzo staranna szata edytorska rozprawy.

Jak już wspomniałem, prace doktorskie zostały opublikowane w renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym. W związku z tym przeszły one proces szczegółowych recenzji, w czasie którego zostały wyeliminowane ewentualne niejasności i niedociągnięcia. Dlatego też pole do krytycznej ich oceny zostało istotnie zredukowane. Tym niemniej poproszę Doktoranta o odniesienie się w czasie obrony do poniższych zagadnień:

1. W pracy P1 badano eksperymentalnie i teoretycznie kryształ magnoniczny wytworzony poprzez naświetlanie wiązką laserową. Zarejestrowane sygnały mają czasową długość kilku ns (Rys. 2), a czas trwania pojedynczego impulsu jest zapewne o kilka rzędów wielkości krótszy. Czy wiadomo, jaka jest stabilność takiego kryształu w dłuższej skali czasowej (np. w kontekście rozchodzenia się dostarczonej energii)? Czy przeprowadzono badania dla różnych periodyczności kryształu?
2. Jakie fizyczne czynniki wpływają na anizotropowe sprzężenie fal spinowych z akustycznymi powierzchniowymi, zilustrowane kątowym profilem amplitudy (praca P1, Rys. 8)?
3. W zagiętym falowodzie, opisanym w pracy P2 (Rys. 7a), prawa granica obszaru o gradientowej zmianie  $M_s$  jest pionowa i tworzy pewien kąt z czołem ugiętej fali

spinowej. Czy jest to prawidłowa jej orientacja? Jeśli tak, to czy i jak zmieniłaby się ugięta fala, gdyby wspomniana granica była prostopadła do osi prawej części falowodu? Zagięcie falowodu jest ostre (linia łamana). Czy i ewentualnie jakich zmian należałoby się spodziewać w przypadku zagięcia łukowego?

4. W pracy P4 analizowany jest aperiodyczny kryształ magnoniczny. Dodatkowo wprowadzone jest jego zdefektowanie. Zestaw taki (kwazikryształ + defekty) można wytworzyć na wiele sposobów. W jakim stopniu uzyskane w tej pracy wyniki mają charakter uniwersalny (np. po zamianie miejscami elementów Py i Co w tym przypadku, dla innych kwazikryształów i sposobów zdefektowania) i są reprezentatywne dla szerokiej grupy materiałów, a w jakim specyficzny, tzn. tylko dla wybranej struktury?

Rozprawa doktorska mgra Szymona Mieszczaka pt.: *Spin waves in magnonic systems: localization and propagation*, wykonana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych i w dyscyplinie nauk fizycznych, spełnia wszystkie wymogi formalne zapisane w Ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z 20 lipca 2018 r.

Na podstawie oceny przedstawionej rozprawy wnioskuję o **dopuszczenie mgra Szymona Mieszczaka do kolejnych etapów przewodu doktorskiego**. Sugeruję również rozważenie nadania **wyróżnienia** tej pracy. Przemawia za tym: bardzo aktualna podjęta tematyka, zawierająca nowatorski aspekt poznawczy i aplikacyjny, ciekawe i wartościowe wyniki opublikowane w czterech pracach zamieszczonych w renomowanych czasopismach z listy JCR, pierwsza pozycja doktoranta na liście autorskiej oraz status autora korespondencyjnego w trzech pracach, pozytywne przyjęcie opublikowanych wyników wyrażone w wysokiej cytowalności części prac, a także staranna szata edytorska rozprawy.

Andrzej  
Waldemar  
Wawro

Elektronicznie  
podpisany przez  
Andrzej Waldemar  
Wawro  
Data: 2022.10.27  
13:51:11 +02'00'