

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Adama Krysztofika
„Dynamika namagnesowania cienkich warstw granatu
itrowo-żelazowego $\text{Y}_3\text{Fe}_3\text{O}_{12}$

Rozprawa doktorska Pana mgra Adama Krysztofika jest poświęcona badaniom dynamiki momentu magnetycznego i propagacji fal spinowych w ultracienkich warstwach granatu itrowo-żelazowego. Zagadnienia dotyczące generacji i detekcji fal spinowych, a przede wszystkim kontroli ich propagacji są bardzo ważne dla magnoniki, nowej dziedziny magnetyzmu, której głównym celem jest wykorzystanie magnonów jako nośnika informacji. Oczekuje się, iż urządzenia magnoniczne pozwolą znacząco zwiększyć prędkość przenoszenia informacji, a ponadto byłyby wydajniejsze i bardziej energooszczędne niż obecne urządzenia elektroniczne. Badania Pana Krysztofika wpisują się w główny nurt tej nowej dziedziny, a otrzymane rezultaty i wnioski mogą być pomocne przy projektowaniu zintegrowanych układów magnonicznych. Obiecującym materiałem dla magnoniki jest granat itrowo-żelazowy, a dokładniej ultracienkie warstwy granatu, charakteryzujące się małymi stratami magnetycznymi. Niewielkie tłumienie Gilberta α oraz niewielka anizotropia mają istotny wpływ na propagację i stosunkowo długi zasięg fal spinowych w tym materiale.

Dysertacja Pana Krysztofika poprzedzona jest wprowadzeniem, w którym Autor niezwykle krótko, wręcz encyklopedycznie, definiuje podstawowe wielkości pojawiające się w dalszej części pracy. Następnie omówiono podstawowe techniki eksperymentalne, w tym wytwarzania warstw metodą ablacji laserowej, charakteryzacji, głównie metodami rentgenowskimi oraz badania topografii powierzchni za pomocą mikroskopii sił atomowych. Więcej uwagi Autor poświęcił metodom pomiarowym dynamiki namagnesowania, omówił szerokopasmowy rezonans ferromagnetyczny oraz, stosunkowo dokładnie, spektroskopię fal spinowych za pomocą wektorowego analizatora obwodów.

Zasadniczą dysertację stanowi cykl pięciu, powiązanych tematycznie artykułów, opublikowanych w renomowanych czasopismach. Wszystkie prace są współautorskie, jednakże Pan Krysztofik jest ich

pierwszym autorem. Oczywiście jest, iż szeroko zakrojone badania z wykorzystaniem szeregu zaawansowanych technik eksperymentalnych i symulacji numerycznych, nie mogą być dziełem jednego autora. Załączone do rozprawy oświadczenia współautorów wskazują na znaczący wkład mgra Adama Krysztofika w organizację badań, samodzielność Doktoranta w prowadzeniu badań oraz opracowywaniu wyników i manuskryptów. W dwu artykułach szczegółowo przedyskutowano propagację fal spinowych w warstwach granatu oraz możliwość kontroli propagacji i skutecznego tłumienia. Są to zagadnienia bezpośrednio związane z magnoniką. Typowe układy magnoniczne to ultra cienkie warstwy z naniesionymi, koplanarnymi falowodami lub antenami. Właściwości takich układów, w tym dynamika namagnesowania, zależą od technologii nanoszenia warstw, od typu podłoża oraz strukturyzacji powierzchni. Toteż Autor trzy kolejne prace poświęcił w dużej mierze zagadnieniom technologicznym i zbadał właściwości strukturalne warstw na różnych podłożach oraz przedyskutował wpływ defektów i naprężeń epitaksjalnych na dynamikę magnetyzacji, a w szczególności na wartość współczynnika tłumienia Gilberta i anizotropię, które to wielkości determinują propagację fal spinowych.

Idealnym podłożem ze względu na dopasowanie sieciowe, tak istotne w procesie epitaksji, jest granat gadolinowo-galowy (GGG), na który warstwy granatu itrowo-żelazowego (YIG) mogą być nanoszone metodą ablacji laserowej, stosowaną przez Pana Krysztofika. Doktorant dobrze opanował tę technikę nanoszenia warstw, otrzymując warstwy wysokiej jakości, charakteryzujące się bardzo dobrymi parametrami opisującymi właściwości strukturalne, jak i magnetyczne. Wysoka jakość wytworzonych układów pozwoliła na zbadanie propagacji powierzchniowych fal spinowych typu Damona-Eshbacha za pomocą wektorowego analizatora obwodów (publikacja 1). W tym celu na powierzchni warstwy, metodami litograficznymi, wytworzono dwa koplanarne falowody, transmiter oraz detektor i w funkcji częstotliwości rejestrowano sygnały pochodzące od obu portów. Wykorzystując znaną relację dyspersji, opisującą mody Damona-Eshbacha oraz określając eksperymentalnie częstotliwość sygnału o najwyższej amplitudzie wyznaczono wartość liczby falowej k wzbudzonej fali spinowej. Szczegółowa analiza wyników eksperymentalnych oraz rezultatów obliczeń numerycznych wskazuje, iż w badanych układach znaczącą rolę odgrywa indukowana wzrostem anizotropia prostopadła do powierzchni warstwy. Anizotropia istotnie wpływa na otrzymaną relację dyspersji, prowadząc do wzrostu prędkości fal spinowych, a zatem w układach o silnej anizotropii można oczekiwać szybszej transmisji danych. Dodatkowe badania przeprowadzone za pomocą kątownego rezonansu ferromagnetycznego wskazują natomiast, iż warstwa granatu jest izotropowa, co jest konsekwencją małej anizotropii magnetokrystalicznej. Moim zdaniem, rezultaty otrzymane w publikacji 1 są interesujące i mogą mieć znaczenie aplikacyjne.

Te ciekawe rezultaty skłoniły Pana Krysztofika do dalszych, bardziej szczegółowych badań warstw granatu itrowo-żelazowego na podłożu z granatu gadolinowo-galowego. W kolejnej pracy (publikacja 2) Autor starał się odpowiedzieć na pytanie, w jakim stopniu strukturyzacja powierzchni, wiążąca się z wykonaniem koplanarnych falowodów zintegrowanych z warstwą, wpływa na właściwości tej warstwy i propagację fal spinowych. W tym celu przeprowadzono zaawansowane badania właściwości strukturalnych i magnetycznych warstwy o modyfikowanej

powierzchni, a rezultaty porównano z otrzymanymi dla „idealnej” warstwy referencyjnej. Obie warstwy były nanoszone metodą ablacji laserowej w temperaturze pokojowej, a następnie wygrzewane w celu rekrytalizacji. Powierzchnię jednej próbki poddano modyfikacjom przy użyciu techniki bezmaskowej litografii optycznej, a topologię powierzchni zbadano za pomocą mikroskopu sił atomowych. Bardzo ważnym wnioskiem, wynikającym z szeregu przeprowadzonych badań jest stwierdzenie, iż strukturyzacja powierzchni nie ma istotnego wpływu na właściwości magnetyczne układu, nie prowadzi do znaczących zmian indukowanej anizotropii prostopadłej ani parametru tłumienia, który pozostaje niski, podobnie jak w warstwach YIG/GGG. A zatem można oczekiwać, iż w zintegrowanych urządzeniach magnonicznych modyfikacja powierzchni, wykonana metodą bezmaskowej litografii, nie będzie miała znaczącego wpływu na propagację fal spinowych.

Znacznie mniej obiecujące wyniki, jednakże o dość istotnym znaczeniu, otrzymano dla warstwy granatu itrowo-żelazowego na podłożu z tlenku krzemu (publikacja 3). Układy takie są bardzo interesujące dla magnoniki ze względu na możliwość integracji z obecnymi urządzeniami elektronicznymi opartymi na krzemie. Jednakże, w tym przypadku, jakość otrzymanych warstw jest znacznie niższa, wykazują one strukturę nanokrystaliczną ze znacznymi naprężeniami indukowanymi termicznie oraz licznymi defektami strukturalnymi. Wprawdzie namagnesowanie nasycenia otrzymanych warstw jest zbliżone do wartości typowej dla masywnego granatu, jednakże, naprężenia na granicy-podłożu warstwa prowadzą do znacznego wzrostu indukowanej anizotropii prostopadłej, obniżając istotnie wartość magnetyzacji efektywnej. Badania przeprowadzone za pomocą szeroko pasmowego rezonansu ferromagnetycznego wskazują na znaczne poszerzenie linii rezonansowej, obserwowane również w pracach innych autorów. Panu Krysztofowi udało się opisać szerokość linii za pomocą relacji Heinricha i rozdzielić wkłady pochodzące od procesów wewnętrznych, związanych z tłumieniem Gilberta i procesów zewnętrznych. Wyniki wskazują, iż parametr Gilberta rośnie tylko nieznacznie w porównaniu z idealnymi warstwami granatu, natomiast podstawowy wkład do szerokości linii generowany jest procesami zewnętrznymi, w tym przypadku strukturalnymi i magnetycznymi niejednorodnościami, pochodzącymi od licznych defektów. Autorzy wniosku, iż propagacja fal spinowych w takim układzie może silnie zależeć od długości fali w porównaniu z rozmiarami defektów. Zagadnienie to wymaga dalszych badań zarówno eksperymentalnych, jak i teoretycznych.

Wpływ niedopasowania sieciowego warstw oraz procesów rekrytalizacji na właściwości strukturalne i magnetyczne zbadano w pracy 4 dla cienkich warstw granatu itrowo-żelazowego osadzanych na monokrystalicznym granacie itrowo-glinowym (YIG/YAG). Niedopasowanie parametru sieciowego pomiędzy warstwą a podłożem jest w tym przypadku wysokie i sięga 3%, co prowadzi do silnych rozciągających naprężeń i dystorsji komórki elementarnej. Anizotropia indukowana obecnością naprężeń zależy, jak wykazano, od grubości warstwy oraz warunków wzrostu. Pomiar rezonansu ferromagnetycznego wskazują na istotne poszerzenie linii rezonansowej, zwłaszcza w porównaniu z warstwami osadzonymi na granacie itrowo-galowym. Ponadto, szerokość linii zależy od konfiguracji zewnętrznego pola magnetycznego. Bardzo interesujące wyniki otrzymano badając szerokość linii w funkcji częstotliwości. W tym przypadku,

szerokość linii wykazuje zależność nieliniową, a zatem nie można określić parametru tłumienia α w oparciu o relację Heinricha, która nie jest spełniona. Typowym mechanizmem prowadzącym do poszerzenia linii rezonansowej jest rozpraszanie dwumagnonowe. Jednakże, obliczenia przeprowadzone z wykorzystaniem parametrów wyznaczonych eksperymentalnie dla badanego układu prowadzą do wyników niezgodnych z eksperymentem, co wskazuje na zupełnie inny mechanizm. W celu zinterpretowania otrzymanego wyniku zaproponowano model oparty na założeniu, iż warstwa granatu może być potraktowana jako układ nieoddziałujących obszarów, a niejednorodne naprężenia prowadzą do dyspersji jednoosiowej anizotropii, tak że kierunek anizotropii odchyła się od normalnej do płaszczyzny warstwy. Symulacje komputerowe dają w tym przypadku wyniki zgodne z eksperymentem. Jest to niewątpliwie duże osiągnięcie Autorów, a badania przeprowadzone w pracy 4 są cenne z poznawczego punktu widzenia. Opisanie mechanizmów prowadzących do poszerzenia linii rezonansowej w warstwach o znacznym niedopasowaniu sieciowym i powiązanie z dyspersją anizotropii indukowanej naprężeniami może mieć znaczenie dla kontroli anizotropii w takich układach i być pomocne przy projektowaniu urządzeń wykorzystywanych w spintronice i magnonice.

Kolejnym istotnym zagadnieniem jest kontrola propagacji fal spinowych w zintegrowanych urządzeniach magnonicznych. Ze względu na fakt, iż czas relaksacji fal spinowych w warstwach granatu jest stosunkowo długi, kluczowe znaczenie ma kontrola propagacji oraz skutecznego rozpraszania, tłumienia fal spinowych. Ten ważny z punktu widzenia zastosowań problem Autor podejmuje w pracy 5, proponując wykorzystanie układów złożonych z warstw granatu itrowo-żelazowego osadzanych na klinowych warstwach metali (złota, platyny) jako zakończenia falowodów magnonicznych o niskim współczynniku odbicia ze względu na silne tłumienie fal spinowych. Przedstawiono systematyczne badania warstw podwójnych typu YIG/metal(Au,Pt,Ir)/GGG otrzymanych metodą ablacji laserowej. Warstwy poddano szczegółowej charakteryzacji w celu określenia defektów strukturalnych, a następnie zbadano dynamikę namagnesowania. Wyniki wskazują, iż fale spinowe nie propagują w warstwie podwójnej, co zdaniem Autora jest konsekwencją znacznego wzrostu efektywnego współczynnika tłumienia, który jest bezpośrednio związany z czasem relaksacji i determinuje zasięg fal spinowych w materiale. Na wartość tego współczynnika wpływają zarówno efekty wewnętrzne opisane parametrem Gilberta, jak również poszerzenie linii rezonansowej wynikające z niejednorodności magnetycznych. W przypadku warstw osadzanych na złocie parametr Gilberta jest stosunkowo mały, natomiast znacząco wzrasta pole ΔH_0 w relacji Heinricha wskutek licznych defektów strukturalnych, prowadząc do tłumienia fal spinowych. Ten istotny wniosek, wynikający z danych eksperymentalnych, został poparty szczegółową analizą teoretyczną oraz symulacjami mikromagnetycznymi. Symulacje propagacji pakietu falowego w obecności granicy ośrodków o różnych efektywnych parametrach tłumienia wykazały, iż wzrost tego współczynnika prowadzi do skutecznego tłumienia, fale spinowe nie propagują w tym ośrodku, nie ulegają też odbiciu na granicy. Symulacje, które przeprowadzono z wykorzystaniem parametrów określonych eksperymentalnie dla warstw granatu osadzanych na warstwach złota i platyny wykazały, iż układy takie mogą być wykorzystane w celu skutecznego tłumienia fal spinowych w urządzeniach magnonicznych. Jest to ważne osiągnięcie.

Przedstawioną do oceny dysertację oceniam bardzo wysoko. Mgr Adam Krysztofik zrealizował ambitny program badań, przedstawione zagadnienia są aktualne, a otrzymane wyniki mają duże znaczenie zarówno poznawcze, jak i aplikacyjne. Publikacje składające się na dysertację są ściśle powiązane tematycznie i wnoszą szereg cennych informacji dotyczących propagacji fal spinowych, które mogą mieć znaczenie przy projektowaniu odpowiednich urządzeń magnonicznych. Za najbardziej interesujące i o dużym potencjale aplikacyjnym uznałabym artykuły 4 i 5 poświęcone kontroli propagacji fal spinowych i kontroli anizotropii indukowanej naprężeniami. Systematyczne badania pozwoliły na określenie optymalnych warunków propagacji fal spinowych, a w pracy 5 zaproponowano układ, w którym warstwa granatu osadzona na warstwie metalu o zmiennej grubości może być wykorzystana jako zakończenie falowodów magnonicznych o niskim współczynniku odbicia.

Należy również zwrócić uwagę na bardzo bogatą, liczącą ponad 200 pozycji bibliografię, którą opracowano niezwykle starannie. Wskazuje to na bardzo solidne przygotowanie Doktoranta i dobrą znajomość literatury, którą Pan Krysztofik śledzi na bieżąco.

Mam jednakże, pewne zastrzeżenia natury redakcyjnej. W zasadzie Autor ograniczył się do zszycia opublikowanych artykułów, ewentualnie zaopatrując je w suplementy w formie luźnych uwag i rysunków, często podawanych bez komentarza (patrz rysunki na stronach 92-98 oraz 104). Autor nie pokusił się o jednolity opis i szerszą analizę tych interesujących wyników.

Dorobek mgra Adama Krysztofika jest znaczący, zwłaszcza w przypadku młodego naukowca ubiegającego się dopiero o stopień doktora. Obejmuje on 8 publikacji w recenzowanych czasopiśmie oraz 12 prac prezentowanych na konferencjach, w tym aż 4 komunikaty w bieżącym roku. Mgr Krysztofik uczestniczył również w 3 projektach naukowych, a na uwagę zasługuje udział w europejskim projekcie w ramach programu Marie Curie. Ponadto Doktorant odbył 3 krótkoterminowe staże naukowe w Niemczech i w Finlandii. Wszystko to świadczy o wysokiej aktywności młodego Doktoranta.

Podsumowując stwierdzam, iż rozprawa doktorska mgra Adama Krysztofika spełnia wszystkie ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie Pana Adama Krysztofika do dalszych etapów postępowania mającego na celu nadanie mu stopnia doktora nauk fizycznych. Biorąc pod uwagę potencjalne znaczenie otrzymanych rezultatów dla magnoniki, znaczący dorobek Pana Krysztofika oraz wysoką aktywność naukową wnioskuję o wyróżnienie pracy.



Renata Swirkowicz