

Dr hab. Lesław Smardz  
Instytut Fizyki Molekularnej  
Polska Akademia Nauk  
Ul. Smoluchowskiego 17  
60-179 Poznań

Poznań, 21-11-2022

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr Anuja Kumara Dhimana

pt.: „**Magnetization statics and dynamics in selected ultrathin films and multilayers with Dzyaloshinskii-Moriya interaction**” napisanej pod kierunkiem dr hab. Ryszarda Gieniusza, prof. UwB, (wykonana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizycznej Wydziału Fizyki UwB, zgodnie z rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 oraz ustawy z dnia 20 lipca 2018 w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o stopień doktora)

Praca doktorska mgr Kumara Dhimana wykonana została w Katedrze Fizyki Magnetyków Wydziału Fizyki UwB pod kierunkiem dr hab. Ryszarda Gieniusza w ramach projektu NCN „Domain wall dynamics and magnetic texture behavior in magnetic films with Dzyaloshinskii-Moriya interaction”, oraz projektu studenckiego 2020 Towarzystwa Magnetycznego IEEE “Study of magnetization dynamics in sample with interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction”.

Praca doktorska ma formę manuskryptu napisanego w języku angielskim i zawiera 140 stron, na które składa się 6 rozdziałów, 315 pozycji literaturowych, lista publikacji własnych i używanych skrótów. Dodatkowo zamieszczono streszczenie w języku polskim i angielskim.

W pierwszym rozdziale zatytułowanym „Wstęp” przedstawiono cel pracy oraz omówiono podstawowe zagadnienia magnetyzmu, ze szczególnym uwzględnieniem właściwości cienkich i ultra cienkich warstw, spintroniki i magnoniki, oraz powierzchniowego oddziaływania Dzyaloshinskii-Moriya (IDMI).

Celem pracy doktorskiej było zbadanie statycznych i dynamicznych właściwości ultra cienkich warstw i wielowarstw wykazujących oddziaływanie IDMI. Badania wykonano dla ultra cienkich warstw Co i CoFeB sąsiadujących z warstwami metali ciężkich irydu, platyny, złota, renu i tantalu.

W rozdziale drugim mgr Dihman przedstawia najważniejsze wiadomości literaturowe dotyczące najbardziej istotnych statycznych i dynamicznych właściwości magnetycznych ultra cienkich warstw, takich jak:

- anizotropię objętościową i powierzchniową,
- magnetyczne oddziaływanie dipolowe, Zeemana, wymienne i Działoszyński-Moriya,
- magnetyczną strukturę domenową i proces przemagnesowania,
- dynamikę namagnesowania.

W rozdziale trzecim omówiono metody nanoszenia cienkich warstw, ze szczególnym uwzględnieniem rozpylania magnetronowego i epitaksji molekularnej. Ponadto, przedstawiono metody pomiarowe, które zostały wykorzystane do charakteryzacji otrzymanych warstw. W szczególności omówiono zastosowanie Magnetoptycznego efektu Kerra (MOKE) w różnych konfiguracjach. Następnie przedstawiono zasadę działania magnetometru wibracyjnego (VSM), mikroskopu Kerra i sił atomowych (AFM), oraz magnetycznego mikroskopu sił atomowych (MFM). Jako metodę pomiarową do charakteryzacji dynamicznych właściwości magnetycznych szczegółowo omówiono spektroskopię Brilluena (BLS), rezonans ferromagnetyczny (FMR) i rezonans ferromagnetyczny z analizatorem wektorowym (VNA-FMR).

Uzyskane wyniki badań własnych zostały przedstawione w rozdziałach 4, 5 i 6. Na końcu dysertacji przedstawiono uwagi końcowe i perspektywy na przyszłość wynikające z przeprowadzonych badań.

Rozdział 4 został poświęcony badaniom właściwości magnetycznych pojedynczej ultra cienkiej warstwy kobaltu. Najpierw zbadano właściwości magnetyczne klinowych warstw Co ( $0 \leq d_{Co} \leq 3.6$  nm) w sąsiedztwie z warstwami o grubości 2 nm Ir i Pt, Pt i Ir, Pt i Au, oraz Au i Pt. Warstwy naniesiono w temperaturze pokojowej metodą rozpylania magnetronowego na podłoża krzemowe z warstwą buforową, którą stanowiła warstwa podwójna Au/Ta. Wyniki pokazały, że grubość warstwy Co, dla której zachodzi reorientacja spinów ze stanu namagnesowania poza płaszczyznę do stanu w płaszczyźnie, zmienia się w zakresie 0,95 – 1,8 nm, w zależności od wyboru odpowiedniej górnej i dolnej warstwy metalu ciężkiego.

Z pomiarów BLS wyznaczona wartość powierzchniowej gęstości energii IDMI ( $D_S$ ) była około 2 razy większa dla trójwarstw Ir/Co/Pt w porównaniu z trójwarstwami Pt/Co/Ir. Wartość  $D_S$  dla trójwarstw Au/Co/Pt i Pt/Co/Au nie zmieniała się wraz z odwróceniem kolejności warstw i była porównywalna z wartością uzyskaną dla trójwarstwy Pt/Co/Ir. Uzyskane wyniki mogą odegrać istotną rolę w projektowaniu nowych układów, dla których można zmieniać sprzężenie spin orbita poprzez zmianę grubości warstwy ferromagnetycznej i/lub sąsiadujących materiałów.

W następnym kroku zbadano właściwości magnetyczne trójwarstw  $d_{Re} - Re/Co$  (klin 0-3 nm)/Pt (4 nm) i  $Co$  (klin 0-3 nm)/ $d_{Re} - Re/Pt$  (4 nm) nanoszonych metodą epitaksji molekularnej na podłoża  $Al_2O_3$  pokryte warstwą buforową Pt (40 nm). Uzyskane wyniki porównano z referencyjną trójwarstwą Pt/Co/Pt. Warstwa renu miała kształt schodkowego klina o grubościach  $0 \leq d_{Re} \leq 3$  nm. Korzystając z magnetometrii PMOKE autor zauważył 3 różne fazy kobaltu w trójwarstwach Re/Co/Pt: fazę niemagnetyczną, superparamagnetyczną i ferromagnetyczną. Istnienie 3 faz zostało powiązane z ewolucją morfologii kobaltu podczas nanoszenia, od pojedynczych wysp do skupisk, a następnie warstwy ciągłej. Przeanalizowano również grubość martwej warstwy magnetycznej i jej zależność od grubości warstwy Re. Dla układu Re/Co/Pt grubość warstwy Co dla której zachodzi reorientacja spinów silnie zależy od grubości warstwy Re i jest mniejsza w porównaniu z wartością 2,45 nm dla trójwarstwy referencyjnej Pt/Co/Pt. Ponadto, badania BLS wskazywały na różnicę znaku IDMI dla układów Re/Co/Pt (wartości dodatnie) i Pt/Co/Re (wartości ujemne).

Rozdział 5 przedstawia wyniki badań wielowarstw HM/Co otrzymanych metodą rozpylania magnetronego. Dla wielowarstw asymetrycznych obserwowano wąskopaskową magnetyczną strukturę domenową. Pokazano mikrometrowe rozmiary domen namagnesowanych w płaszczyźnie wraz z namagnesowanymi poza płaszczyznę strukturami nanometrycznymi. Badania fal spinowych metodą spektroskopii BLS pozwoliły na wyznaczenie stałej IDMI oraz jej znaku ( $D_{eff} = +1,74 \pm 0,12$  mJ/m<sup>2</sup>). Otrzymane wartości wykorzystano do mikromagnetycznej symulacji przestrzennego rozkładu namagnesowania, w wyniku którego powstała struktura domenowa o wzajemnie ortogonalnym stanie namagnesowania. Zaobserwowano również zależność częstotliwości Stokesa ( $f_S$ ) i anty-Stokesa ( $f_{aS}$ ) od pola magnetycznego w płaszczyźnie i kierunku przemieszczania pola, którą powiązano z przełączaniem się w płaszczyźnie namagnesowania rdzenia wiru. Badane struktury wielowarstwowe mogą odegrać znaczącą rolę w badaniach cienkich warstw magnetycznych wykazujących Skymiony ze względu na dużą wartość stałej IDMI.

Podobne badania wykonano również dla symetrycznych wielowarstw [Pt(0.7 nm)/Co(2.2 nm)]<sub>x24</sub> naniesionych metodą rozpylania magnetronowego. Pętla histerezy mierzona w płaszczyźnie i w kierunku prostopadłym do płaszczyzny warstwy potwierdza występowanie namagnesowanych struktur magnetycznych w płaszczyźnie i poza płaszczyzną. Magnetyczne domeny w płaszczyźnie w zakresie mikrometrów zostały zobrazowane za pomocą mikroskopii Kerrowskiej. Natomiast w zakresie nanometrów obrazy domen w kierunku prostopadłym zostały uzyskane za pomocą mikroskopu MFM. W stanie rozmagnesowania w kierunku prostopadłym znaleziono równoległe struktury paskowe, które można obracać przez zastosowanie pola magnetycznego w płaszczyźnie. Badania FMR w paśmie X i VNA-FMR pokazały obecność histerezy pików rezonansowych w zależności od początkowego stanu namagnesowania. Histerezę można wytłumaczyć przełączaniem namagnesowania „rdzenia” w płaszczyźnie wielowarstwy. Ponadto, stwierdzono dużą asymetrię propagacji fal spinowych odpowiadającą częstotliwościom Stokesa i anty-Stokesa, którą wyjaśniono wkładem IDMI pochodzącym z różnicy strukturalnej dolnego i górnego interfejsu, odpowiednio Pt/Co i Co/Pt. Widma BLS uzyskane dla  $k$  równoległych do struktur paskowych zawierały kilka modów, którymi można dalej manipulować, zmieniając orientację  $k$  na kierunek prostopadły do pasków. Wyniki te mogą być w przyszłości poparte symulacjami mikromagnetycznymi. Uzyskane wyniki dotyczące modów fal spinowych dla równoległych pasków są interesujące i umożliwiają uzyskanie widm pasm magnonicznych z oddziaływaniem IDMI. Badaną wielowarstwę można traktować jako rekonfigurowalny kryształ magnoniczny z histerezą właściwości.

W rozdziale 6 Doktorant przedstawił wyniki badań procesów przemagnesowania i struktury domen magnetycznych dla cienkich warstw Ta(5 nm)/(Co<sub>0.25</sub>Fe<sub>0.75</sub>)B/MgO(2 nm)/Ta(2 nm). Grubość klinowej warstwy stopowej CoFeB zmieniała się od 1.24 do 1.6 nm. Wykorzystując techniki magnetooptyczne, takie jak magnetometria i mikroskopia PMOKE, zbadano statyczne i dynamiczne procesy przemagnesowania warstw CoFeB. W miarę zbliżania się do grubości odpowiadającej reorientacji spinów stwierdzono znaczny wzrost gęstości centrów zarodkowania domen wraz z ewolucją morfologii domen. Stwierdzono obecność wąskich domen paskowych (NSD). Dla  $d_{\text{CFB}} = 1.32$  i  $1.36$  nm długość odcinka prostego w domenach NSD stają się zbyt małe i pojawiają się struktury podobne do dendrytów. To ogromne zmniejszenie długości domen NSD wytłumaczono spadkiem wartości anizotropii magnetycznej w pobliżu przejścia SRT. Ewolucja domen NSD wraz ze wzrostem pola wiąże się z anihilacją dwóch przeciwległych ścian domenowych, dlatego zaobserwowano

występowanie domen cylindrycznych przy określonej wartości pola. Biorąc pod uwagę domeny typu NSD jako stan początkowy, zbadano również pośredni proces odwracania w funkcji czasu i pola magnetycznego. Długie proste segmenty domen NSD otrzymane w materiałach takich jak CoFeB mogą być interesującym tematem dla rekonfigurowalnych falowodów fal spinowych ze względu na ich niskie tłumienie, szerokość poniżej mikrometra i ich dopasowanie za pomocą asymetrycznych heterostruktur CoFeB ze znacznym IDMI oraz modulacji pola elektrycznego. Wydaje się, że tego typu warstwy z domenami NSD mogą znaleźć zastosowania w urządzeniach spintronicznych przyszłej generacji.

Podsumowując, w pracy doktorskiej zbadano statyczne i dynamiczne właściwości magnetyczne ultra cienkich warstw i wielowarstw wykazujących oddziaływanie Dzialoszyńskiej-Moriya w obszarze interfejsów. Badania wykonano dla ultra cienkich warstw Co i CoFeB sąsiadujących z warstwami metali ciężkich Ir, Pt, Au, Re i Ta. Przeanalizowano wpływ warstw metali ciężkich na wielkość i znak IDMI, anizotropię magnetyczną i inne parametry magnetyczne. Przedstawione rezultaty badań mogą mieć znaczenie w tworzeniu nowych nanostruktur z właściwościami sterowanymi interfejsami warstwy magnetycznej. Rozprawa doktorska Pana mgr Dihmana zawiera bardzo interesujące wyniki, które niewątpliwie poszerzają stan wiedzy dotyczący właściwości magnetycznych ultra cienkich warstw z oddziaływaniem IDMI. Korzystając jednak z prawa recenzenta do skomentowania niedociągnięć pracy pozwalam sobie na poniższe uwagi, głównie dotyczące struktury krystalograficznej i profili interfejsów w badanych układach:

1. W pracy nie zamieszczono informacji dotyczących struktury krystalograficznej badanych warstw Co. Z danych literaturowych wiadomo, że cienkie warstwy Co w zależności od warunków nanoszenia mogą rosnąć w fazie hcp, fcc, a nawet bcc.
2. Przedstawione wyniki badań własnych dotyczą w głównej mierze ultra cienkich warstw magnetycznych, dla których istotne znaczenie ma grubości warstwy mieszanej w obszarze interfejsów. Autor wykonał szczegółowe badania właściwości magnetycznych w temperaturze pokojowej. Biorąc pod uwagę niewielką różnicę w namagnesowaniu dla różnych faz Co można było również scharakteryzować profil chemiczny interfejsów w badanych układach dla wybranych metali ciężkich.
3. Autor w ramach uwag końcowych podsumowuje najważniejsze wyniki badań własnych, które niewątpliwie poszerzają stan wiedzy na temat właściwości magnetycznych ultra cienkich warstw z oddziaływaniem IDMI. Natomiast brakuje

podania kilku najważniejszych wniosków, które wynikają z wykonanych badań eksperymentalnych.

4. Na stronie 124 brakuje podpisu do rys. 6.1 d. Natomiast jest podpis do rys. 6.1 g, którego w pracy nie ma. Ponadto, podpisy rys. 6.1 e i 6.1 f wydają się błędne.

Pomimo wymienionych wyżej niejasności i redakcyjnych niedociągnięć należy stwierdzić, że rozprawa przedstawia wartościowe i oryginalne wyniki, a cel postawiony sobie przez Doktoranta został osiągnięty. Praca poszerza znacznie obecny stan wiedzy dotyczący właściwości magnetycznych ultra cienkich warstw wykazujących efekt IDMI. Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do prowadzenia dalszych badań podstawowych i potencjalnych zastosowań komercyjnych. Dokonania Pana mgr Dihmana spełniają również wymogi ustawowe (ustawa z 20 lipca 2018), niezbędne do uzyskania stopnia doktora. Jest współautorem 4 publikacji naukowych zamieszczonych w recenzowanych czasopismach naukowych, z czego wyniki opublikowane w trzech pracach, w których jest pierwszym autorem są zawarte w pracy doktorskiej. Wyniki swoich prac prezentował również na wielu krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych.

W moim przekonaniu przedstawiona do oceny praca spełnia warunki stawiane dysertacjom doktorskim, dlatego wnioskuję o dopuszczenie mgr Anuja Kumara Dhimana do kolejnych etapów postępowania w celu nadania stopnia doktora.

Łukasz Gmurczyk