

Instytut Fizyki UMCS

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. Anuja Kumara Dhimana

“Magnetization statics and dynamics in selected ultrathin films and multilayers with Dzyaloshinskii-Moriya interaction”

Przedstawiona rozprawa doktorska ma charakter doświadczalny. Autor zamieścił w niej wyniki badań właściwości magnetycznych ultracienkich warstw i multiwarstw charakteryzujących się obecnością oddziaływania Działozyńskiego-Moriya. Przedmiotem badań były układy zbudowane z ferromagnetycznych nanowarstw Co lub CoFeB w otoczeniu nanowarstw niemagnetycznych metali ciężkich: Ir, Pt, Au, Re, Ta wykazujących silne sprzężenie spin-orbita. W takim przypadku pojawia się efekt międzypowierzchniowego oddziaływania Działozyńskiego-Moriya (Interfacial Dzyaloshinskii -Moriya Interaction, IDMI), który badał autor przy pomocy spektroskopii rozpraszania światła Brillouina (BLS) na falach spinowych. Inne badania dotyczyły procesów namagnesowania oraz struktury domenowej przy użyciu magnetometrii i mikroskopii magnetoptycznego efektu Kerra (MOKE), mikroskopii sił magnetycznych (MFM) i magnetometrii wibrującej próbki (VSM). Przeprowadzono także pomiary techniką rezonansu ferromagnetycznego (FMR). Zastosowano więc szeroki wachlarz technik pomiarowych, co sprzyjało uzyskaniu jak najpełniejszej charakteryzacji próbek. Próbki potrzebne w eksperymentach otrzymywano metodami rozpylania magnetronowego RF oraz epitaksji z wiązek molekularnych (MBE). Tutaj niezwykle ważny był odpowiedni dobór rodzaju materiałów oraz grubości warstw, między innymi za względu na obecność efektów IDMI. Przeprowadzono symulacje komputerowe rozkładów namagnesowania w układach wielowarstwowych przy użyciu software Mumax3.

Recenzowana praca doktorska została wykonana pod kierunkiem dr. hab. Ryszarda Gieniusza, prof. UwB w Katedrze Fizyki Magnetyzmu Wydziału Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku. Promotorem pomocniczym był dr Piotr Mazalski. Rozprawa doktorska liczy 138 stron. Jest oparta na 3 artykułach z lat 2021-2022 opublikowanych w czasopiśmie z tzw. listy filadelfijskiej. W dwóch z nich doktorant jest pierwszym autorem. Dodatkowo, w spisie publikacji umieszczonym w rozprawie znajduje się jeden artykuł opublikowany w bieżącym

roku o podobnej tematyce, który nie został włączony do doktoratu. Spis prezentacji konferencyjnych i innych zawiera 6 wystąpień doktoranta oraz 3 postery.

Rozprawa doktorska składa się z abstraktu, listy nazw skróconych, zastosowanych symboli oraz badanych próbek, 6 rozdziałów oraz konkluzji. Każdy rozdział zawiera odrębną listę odnośników. Rozdział 1 przedstawia krótkie wprowadzenie w tematykę rozprawy, skoncentrowane głównie wokół nanomagnetyzmu oraz oddziaływania IDMI. Autor precyzuje cel pracy jako zbadanie układów magnetycznych charakteryzujących się znaczącym IDMI i obecnością struktur domenowych. Następnie wymieniona jest skrótowo tematyka przedstawiona w kolejnych rozdziałach rozprawy.

W rozdziale 2 autor opisuje na 21 stronach podstawowe pojęcia i wielkości związane z fizyką magnetyzmu, ze szczególnym uwzględnieniem procesów magnesowania, domen magnetycznych, anizotropii magnetycznej, oddziaływania Działoszyńskiego-Moriyi oraz fal spinowych. Tekstowi towarzyszą liczne wzory oraz 12 rysunków.

Rozdział 3 liczący 23 strony zawiera krótki opis kilku metod otrzymywania cienkich warstw, w tym tych zastosowanych w pracy technik: rozpylania magnetronowego i MBE. Następnie autor przechodzi do opisu użytych w doktoracie metod eksperymentalnych z naciskiem na zasadę działania konkretnej techniki. Są to: magnetometrie: PMOKE, LMOKE i TMOKE, VSM, mikroskopia MOKE, mikroskopie: sił atomowych (AFM) oraz sił magnetycznych (MFM). Następnie, na prawie 8 stronach opisane są podstawy fizyczne spektroskopii rozpraszania światła Brillouina (BLS), zasada działania interferometrów Fabry-Perota oraz spektrometru typu tandem z 2 sprzężonymi interferometrami F-P. Przedstawione są schematy optyczne tandemu dla dwóch konfiguracji oraz całego układu pomiarowego do badań BLS na falach spinowych. Tak szczegółowy opis wskazuje, że jest to ulubiona technika pomiarowa autora rozprawy. Na zakończenie tego rozdziału przedstawiona jest metoda rezonansu ferromagnetycznego (FMR) w zastosowaniu do badań na cienkich warstwach i jej 2 wersje: X-band FMR oraz Vector Network Analyzer (VNA-FMR). W skład rozdz. 3 wchodzi 16 starannie wykonanych, poglądowych rysunków.

Wyniki badań właściwości magnetycznych pojedynczych ultracienkich warstw Co sąsiadujących z warstwami metali ciężkich: Pt, Ir i Au przedstawione są w rozdz. 4.1. Stosując rozpylanie magnetronowe otrzymano nanostruktury złożone z klinowej warstwy Co o grubości w zakresie od 0 do 3,6 nm, otoczonej 2 nm warstwami Pt, Ir i Au oraz z buforem Ta/Au od strony podłoża (Si z warstwą tlenku). Przeprowadzono następnie systematyczne badania

właściwości tychże nanostruktur przy użyciu technik: PMOKE oraz BLS w geometrii Damona-Eshbacha. Na ich podstawie wyznaczono, w funkcji grubości warstwy Co, wartości parametrów takich jak: stałe anizotropii magnetycznej, pole koercji, tłumienie magnetyczne fali spinowej oraz tzw. efektywna stała D_{eff} gęstości energii oddziaływania IDMI. Dla grubości d_{Co} ok. 1 nm, $D_{\text{eff}} = +1,5 \text{ mJ/m}^2$ dla struktury Ir/Co/Pt, natomiast $-0,9 \text{ mJ/m}^2$ dla Pt/Co/Au. Ten parametr obliczony został korzystając z danych pomiarowych BLS dotyczących asymetrii częstości Δf dla pików Stokesa i anty-Stokesa stosując wzór z pracy Kai Di et al., Phys. Rev. Lett. 114 047201 (2015). W cytowanej pracy pokazano na przykładzie badanych metodą BLS nanowarstw Pt/Co/Ni, że asymetria Δf jest wynikiem oddziaływania IDMI.

Rozdział 4.2 zawiera wyniki pomiarów metodami PMOKE i BLS struktur Re/Co/Pt oraz Pt/Co/Re z 40 nm warstwą buforową Pt i 4 nm przykrywką Pt, otrzymanych techniką MBE na podłożach szafirowych w temp. 750°C . Zastosowano klinową warstwę Co (grubości 0-3nm) oraz prostopadły do niej układ 8 schodkowy (0-3nm) dla Re, co pozwoliło na możliwość pomiarów dla wielu kombinacji (d_{Co} , d_{Re}). Wcześniejsze obliczenia *ab initio* wskazywały na silne oddziaływanie IDM dla międzypowierzchni Co/Re, o znaku przeciwnym niż dla struktury Pt/Co oraz istnienie spinowych spirali dla Re/Co/Pt w magnetycznym stanie podstawowym. Autor przeprowadził szeroką charakteryzację właściwości magnetycznych obu struktur w zależności od położenia w nich warstwy Re. Z pętli histerezy wyznaczono wartości maksymalne kąta Kerra dla układu Re(0,4nm)/Co/Pt w funkcji d_{Co} . Dla $d_{\text{Co}} < 0,25 \text{ nm}$ układ jest niemagnetyczny; ze wzrostem d_{Co} przechodzi przez fazę superparamagnetyczną do ferromagnetycznej, gdy klastery atomów Co zlewają się w ciągłą warstwę. Bardzo szczegółowe badania BLS pozwoliły na wyznaczenie z widm Brillouina zależności asymetrii częstości Δf od d_{Co} dla kilku wartości d_{Re} . Następnie wyznaczono analogiczne zależności dla stałej D_{eff} w Re/Co/Pt (rys. 4.2.10 rozprawy). Wartość D_{eff} spada wraz ze wzrostem d_{Co} , natomiast rośnie z d_{Re} ok. 2x do $D_{\text{eff}} = 1,8 \text{ mJ/m}^2$, gdy wartość d_{Re} zmienia się od 0,1 do 3 nm (przy d_{Co} ok. 1,2 nm). Tę ostatnią wartość D_{eff} można porównać do otrzymanej przez autora $D_{\text{eff}} = 1,5 \text{ mJ/m}^2$ dla układu Ir/Co/Pt przy: $d_{\text{Co}} = 1 \text{ nm}$, $d_{\text{Pt}} = 2 \text{ nm}$. Potwierdza się także zmiana znaku stałej D_{eff} przy odwróceniu kolejności warstw w strukturze: $D_{\text{eff}} > 0$ dla Ir/Co/Pt, $D_{\text{eff}} < 0$ dla Pt/Co/Ir, analogicznie jak zaobserwowano dla struktur: Re/Co/Pt (+) i Pt/Co/Re (-).

W rozdziale 5.1 przedstawione są wyniki badań asymetrycznych wielowarstw kobaltu z liczbą powtórzeń równą 6, $[\text{Ir/Co/Pt}]_6$ otrzymanych metodą rozpylania magnetronowego na podłożu SiO_2/Si . Ultracienkie ferromagnetyczne warstwy Co o grubości 1,8 nm rozdzielone są

ultracienkimi warstwami niemagnetycznymi irydu i platyny. Ich dokładna struktura ma postać: Ti (4)/Au(30)/Ir(2)[Ir(1)/Co(1,8)/Pt(1)]₆/Pt(2), gdzie liczby w nawiasach oznaczają grubości warstw. Na tych próbkach przeprowadzono przy użyciu magnetometru VSM pomiary krzywych namagnesowania dla pola H w płaszczyźnie i prostopadle do próbki oraz struktury domenowej metodami MFM i LMOKE (3 rodzaje domen, w tym paskowych o szerokości rzędu 100 nm). Mikromagnetyczne symulacje komputerowe dały obraz namagnesowania w postaci submikronowych wirów z rdzeniami w płaszczyźnie próbki i potwierdziły zarówno zgodność z pomiarami krzywych namagnesowania, jak i wyznaczony eksperymentalnie okres dla domen paskowych. Różnica częstości Stokesa i anti-Stokesa otrzymana w badaniach BLS w funkcji pola H w płaszczyźnie próbki wykazała histerezę. Wartość pola przełączającego okazała się zgodna z polem koercji w którym przełączają się domeny w tej samej geometrii pola H. Wyznaczona z pomiarów BLS dla multiwarstw [Ir/Co/Pt]₆ wartość efektywnej stałej IDMI, $D_{\text{eff}} = +1,74 \pm 0,12 \text{ mJ/m}^2$ czyli względna niepewność pomiarowa wynosi ok. 7%.

Rozdział 5.2 przedstawia wyniki badań wielowarstwowej struktury Ti(4,bottom)/Pt(29,3)/[Pt(0,7)/Co(2,2)]₂₄/Pt(3,top) z 24 powtórzeniami, o grubościach warstw podanych w nm, osadzonej na utlenionym Si metodą magnetronowego rozpylania DC. Zmierzono pętle histerezy metodami VSM i PMOKE, obserwowano domeny magnetyczne metodami: MFM i mikroskopią LMOKE. Pomiary FMR wykonano w polu magnetycznym do 1T. Pozwoliły one na obserwację wpływu struktur domenowych na sygnał FMR. Przy użyciu techniki VNA-FMR uzyskano zależność częstości fal spinowych od pola B w płaszczyźnie próbki. Zastosowano spektroskopię Brillouina do zbadania dyspersji fal spinowych w stanie nasyconym ($B = 0,5\text{T}$) i bez pola magnetycznego. W widmach BLS układu warstw [Pt(0,7)/Co(2,2)]₂₄ zaobserwowano bogatą strukturę wielomodową (od 3 do 5 linii), z których jedynie linia o najniższej częstości, mająca największe natężenie wykazywała poznaną w rozdz. 4 i 5.1 asymetrię częstości: Stokes-antiStokes, natomiast pozostałe linie są symetryczne. Autor wykonał także badania BLS dla fal spinowych propagujących wzdłuż i prostopadle do osi wzdłużnej domeny paskowej. Planowane są dalsze prace w przyszłości, w tym symulacje mikro-magnetyczne, które mogą pomóc w interpretacji wyników BLS zmierzonych dla powyższych wielowarstw.

W rozdziale 6 umieszczono rezultaty badań ultracienkich struktur wielowarstwowych Ta(5nm)/(Co_{0,25}Fe_{0,75})₇₅B₂₅(1,24-1,6nm)/MgO(2nm)/Ta(2nm), o różnych grubościach warstwy magnetycznej CoFeB, otrzymanych metodą rozpylania magnetronowego na podłożach utlenionego Si i następnie wygrzanych w próżni w 300°C przez 1h w polu $B = 0,4 \text{ T}$. CoFeB

jest obiecującym materiałem, gdy chodzi o badania domen magnetycznych ze względu na prostopadłą anizotropię magnetyczną (PMA) i małe tłumienie fal spinowych. Właściwości magnetyczne cienkich warstw CoFeB można modulować elektrycznie. Ultracienkie warstwy CoFeB w sąsiedztwie warstw ciężkich metali i tlenków np. TaO_x, MgO tworzą układy o wysokiej anizotropii PMA, potencjalnie do wykorzystania w pamięciach o dużej gęstości zapisu ze względu na wąskie ścianki domenowe (do kilku nm). W pracy doktorskiej badane były procesy magnesowania przy użyciu magnetometrii PMOKE oraz szczegółowo obrazowano struktury domen magnetycznych dla próbek z pozapłaszczyznową osią łatwego namagnesowania, stosując mikroskopię PMOKE. Dla najcieńszych warstw CoFeB otrzymano interesujące wąskie domeny paskowe (NSD), które mogą znaleźć zastosowanie jako falowody dla fal spinowych. Warto dodać, że powyższe wyniki badań opublikowano we współpracy ze znakomitymi uczonymi, w tym z prof. Hideo Ohno z Tohoku University, w Japonii.

Podsumowując powyższą recenzję rozprawy doktorskiej mgr. Anuja Kumara Dhimana stwierdzam, że wykonana została duża praca eksperymentalna z użyciem dobrze dobranej zestawu różnych metod badawczych fizyki magnetyzmu. Co bardzo istotne, wybór struktur magnetycznych okazał się trafny. Publikacje A.K. Dhimana są wieloautorskie więc pożądana byłaby informacja o podziale pracy wśród współautorów, której nie znalazłem w rozprawie. Rezultaty badań są ważne dla badań podstawowych oddziaływania Działoszyńskiego-Moriya oraz innych efektów fizycznych w układach zawierających ultracienkie warstwy ferromagnetyczne sąsiadujące z warstwami metali ciężkich. Można mieć nadzieję, że okażą się także przydatne dla przyszłych zastosowań praktycznych. Sposób prezentacji wyników, ich interpretacja i wyciągnięte wnioski wskazują na to, że Autor bardzo dobrze opanował problematykę badawczą pracy doktorskiej. Większa część przedstawionych w rozprawie wyników badań wyszła drukiem w czasopiśmie o renomie międzynarodowej. Ze względu na powyższe argumenty uważam, że Autor osiągnął zaproponowane cele pracy doktorskiej.

Oceniam pozytywnie rozprawę doktorską mgr. Anuja Kumara Dhimana i stwierdzam, że spełnia ona wszelkie wymagania stawiane takim rozprawom. Wnoszę zatem o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne Panu Anujowi Kumarowi Dhimanowi.