

## Streszczenie

Cienkie warstwy ferromagnetyczne (FM) są uważane za kamień milowy współczesnych badań magnetyzmu ze względu na ich przydatność w zaawansowanych magnetycznych urządzeniach do przechowywania danych, czujnikach i nowej wyłaniającej się dziedzinie, spintroniki. Ultracienkie warstwy FM sąsiadujące z warstwami buforowymi/przykrywającymi metali ciężkich (HM) mogą być przyczyną szeregu interesujących zjawisk takich jak: (i) antysymetryczne oddziaływanie wymienne, powierzchniowe oddziaływanie Dzyaloshinskii-Moriya, (IDMI); (ii) istnienie, stanu namagnesowania prostopadłego do powierzchni warstwy - prostopadłej magnetycznej anizotropii (PMA); (iii) znaczną zmianą współczynnika tłumienia fali spinowej (SW) lub morfologii struktur domen magnetycznych.

Tematem rozprawy doktorskiej są statyczne i dynamiczne właściwości magnetyczne ultracienkich warstw i wielowarstw charakteryzujących się obecnością efektu IDMI. Obiektami badań są ultracienkie warstwy FM Co i CoFeB w otoczeniu warstw: Ir, Pt, Au, Re i Ta. Próbkę osadzano technikami rozylania magnetronowego i epitaksji z wiązek molekularnych (MBE). Procesy namagnesowania i struktury domenowe badano za pomocą magnetometrii i mikroskopii magnetoptycznego efektu Kerra (MOKE), mikroskopii sił magnetycznych (MFM), magnetometrii wibrującej próbki (VSM). Charakteryzację dynamiki magnetyzacji próbek przeprowadzono za pomocą spektroskopii rozpraszania światła Brillouina (BLS), rezonansu ferromagnetycznego na paśmie X (FMR) oraz wektorowego analizatora obwodów FMR (VNA-FMR).

W pierwszej części pracy przeanalizowano właściwości pojedynczych warstw Co. Omówiono wpływ warstw HM na właściwości klinów warstw Co (z sąsiadującymi warstwami Pt, Ir i Au) nanoszonych techniką rozpylania magnetronowego. Określono w zależności od grubości Co  $d_{Co}$  zmiany wielkości IDMI, wielkości anizotropii magnetycznej, pola koercji i tłumienia magnetycznego fali spinowej (SW). Zaobserwowano dużą wartość IDMI dla układu Ir/Co/Pt w porównaniu do odwrotnego ustawienia Pt/Co/Ir, podczas gdy wielkość IDMI warstw Au/Co/Pt i Pt/Co/Au okazały się porównywalne. Parametr tłumienia charakteryzowany szerokością linii widma BLS wykazał asymetrię dla najmniejszych grubości Co.

Warstwy Co z Re (charakteryzujące się różną grubością Re  $d_{Re}$  bufora i warstwy przykrywającej) i Pt, tj. Pt/Re( $d_{Re}$ /Co( $d_{Co}$ )/Pt i Pt/Co( $d_{Co}$ )/Re( $d_{Re}$ )/Pt zostały osadzone techniką MBE. Zależność pola magnetycznej anizotropii jednoosiowej w funkcji  $d_{Co}$  dla stałej grubości Re pokazała, że obecność Re powoduje zmniejszenie grubości Co dla której następuje reorientacja spinowa (SRT). Amplituda tych zmian zależy od położenia Re w warstwie buforowej lub w przykrywającej. Dla stałej  $d_{Co}$  zależność pola anizotropii magnetycznej od

grubości  $d_{Re}$  na początku gwałtownie maleje i następnie nieznacznie wzrasta dla większego  $d_{Re}$ . Stwierdzono też odwrotny znak IDMI przy zamianie Re jako bufor lub przykrycie. Parametr tłumienia (określony na podstawie badań BLS) zmniejsza się lub zwiększa odpowiednio gdy osadzano Re jako bufor lub przykrycie. Silne zmiany właściwości magnetycznych Co następowały przy wprowadzaniu warstw Re o grubości poniżej nanometra.

Analizie poddano dwa zestawy wielowarstw kobaltu, osadzonych przez rozpylenie magnetronowe DC. Pierwszy układ to asymetryczne wielowarstwy  $(Ir/Co/Pt)_N$  o liczbie powtórzeń  $N=6$ . Obrazy domen, uzyskane metodami MFM i MOKE, wskazały na istnienie: (i) domen paskowych o szerokości rzędu 100 nanometrów, domen różniących składową prostopadłą namagnesowania oraz (ii) dużych (kilkadziesiąt mikrometrów) domen z namagnesowaniem w płaszczyźnie. Symulacje mikromagnetyczne pozwoliły na opisanie przestrzennego rozkładu namagnesowania - submikrometrowych wirów z rdzeniami zorientowanymi w płaszczyźnie próbki. Symulacje te dobrze też opisały: (i) krzywe namagnesowania w funkcji pola magnetycznego przyłożonego w płaszczyźnie lub prostopadle do próbki oraz (ii) wyznaczony eksperymentalnie okres domen paskowych. Częstotliwości Stokesa i anty-Stokesa ze spektroskopii BLS wykazały histerezę - przełączalne zachowanie częstotliwości podczas przemiatania przyłożonego w płaszczyźnie pola magnetycznego. Wartość pola przełączającego była zgodna się z polem koercji mierzonym w płaszczyźnie, w którym przełączają się domeny ze składową namagnesowania w płaszczyźnie (w rdzeniach namagnesowania) skierowaną przeciwnie do kierunku pola magnetycznego. Zaobserwowano również histerezę, w funkcji pola przyłożonego w płaszczyźnie, różnicy  $\Delta f$  częstotliwości Stokesa i anty-Stokesa.

Z drugiego zestawu wielowarstw, wielowarstwy symetryczne (w przeciwieństwie do asymetrycznych wyżej analizowanych)  $[Co/Pt]N=24$  i grubości Co, 2,2 nm były również osadzane przez rozpylenie magnetronowe. Stwierdzono histerezę sygnału mierzonego w funkcji pola przyłożonego w płaszczyźnie uzyskane technikami FMR i VNA-FMR. Było to skorelowane z krzywą namagnesowania w płaszczyźnie. Histerezę tę można wytłumaczyć przełączaniem namagnesowania „rdzenia” w płaszczyźnie próbki. Stwierdzono dużą asymetrię propagacji SW odpowiadającą częstotliwościom Stokesa i anty-Stokesa. Można to wyjaśnić możliwym wkładem IDMI pochodzącym z różnicy strukturalnej dolnego interfejsu Pt/Co i górnego interfejsu Co/Pt. W badaniach BLS obserwowano bogate widmo SW. Widma SW w zerowym polu magnetycznym zależały od orientacji domen paskowych w stosunku do płaszczyzny padania światła. Tak więc naszą wielowarstwę można traktować jako rekonfigurowalny kryształ magnoniczny z histerezą właściwości.

W układach Ta/CoFeB/MgO badano procesy magnesowania i struktury domen magnetycznych. Obrazowanie struktur domenowych wykonano dla próbek charakteryzujących się pozapłaszczyznową osią łatwego namagnesowania. W miarę zbliżania się do grubości SRT stwierdzono znaczny wzrost gęstości centrów zarodkowania domen wraz z ewolucją morfologii domen. Stwierdzono istnienie wąskich domen paskowych (NSD). Wydaje się, że NSD mogą mieć zastosowanie jako falowody fal spinowych o szerokości poniżej mikrometra. Pomiar spektrometrem BLS wykazały, że analizowane próbki charakteryzowały się bardzo małym efektem IDMI – wielkość w granicach niepewności pomiarowych.

Ogólnie, przeanalizowano wpływ warstw HM na wielkość i znak IDMI, anizotropię magnetyczną i inne parametry w ultracienkich pojedynczych warstwach magnetycznych i wielowarstwach. Przedstawione rezultaty badań mogą mieć znaczenie w tworzeniu nowych nanostruktur z właściwościami sterowanymi interfejsami warstwy magnetycznej.