



dr hab. Ryszard Zdyb, prof. UMCS
Katedra Fizyki Powierzchni i Nanostruktur
e-mail: ryszard.zdyb@umcs.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Drózdza
pt. "Właściwości magnetyczne nanostruktur epitaksjalnych na bazie stopu FeRh"

Rozpoczęte w latach 70. ubiegłego wieku badania magnetycznych właściwości cienkich warstw stosunkowo szybko doprowadziły do bardzo ważnych odkryć i ich zastosowań. Wśród tych najbardziej spektakularnych jest zjawisko gigantycznego magnetooporu, za które odkrywcy, Albert Fert i Peter Grünberg, otrzymali w 2007 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki. Kolejne niezmiernie ważne odkrycia i ich aplikacje, np. zjawisko tunelowego magnetooporu, czujniki pola magnetycznego, magnetyczne pamięci RAM itd., wzmacniają dynamikę rozwoju badań magnetyzmu w układach o obniżonej wymiarowości.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Drózdza jest bezpośrednio związana z tą tematyką i dotyczy wytwarzania i badania właściwości magnetycznych wielowarstwowych struktur, w których bazę stanowi stop FeRh. Heterostruktury składające się z warstwy FeRh oraz naniesionych na nią epitaksjalnie warstw Fe i Co wytwarzane są na monokrystalicznych podłożach W(110) i MgO(001). Głównym celem prowadzonych badań jest określenie wpływu przejścia fazowego ferromagnetyk-antyferromagnetyk zachodzącego w stopie FeRh pod wpływem zmian temperatury na magnetyzm warstw Fe i Co i tym samym na możliwość sterowania ich właściwościami magnetycznymi.

Praca doktorska została wykonana na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. Tomasz Ślęzak a promotorem pomocniczym – dr hab. Michał Ślęzak. Rozprawę doktorską stanowi cykl czterech opublikowanych artykułów poprzedzony napisanym w języku polskim opracowaniem. Przewodnik ów składa się ze wstępu, części poświęconej zdefiniowaniu celu rozprawy, omówienia wykorzystanych metod eksperymentalnych, streszczenia artykułów tworzących rozprawę, podsumowania i bibliografii. Całość liczy 31 stron.

Artykuły stanowiące zasadniczą część rozprawy zostały opublikowane w uznanych międzynarodowych czasopismach i są to Physical Review Applied (1), Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2) i AIP Advances (1). Prace ukazały się w latach 2018 i 2020.

We wstępie do rozprawy poza wprowadzeniem w tematykę badań magnetycznych nanostruktur mgr Piotr Drózdź przedstawia również „głównego bohatera” rozprawy, czyli stop FeRh. Jest to niezwykle interesujący materiał, który wykazuje przejście fazowe ferromagnetyk-antyferromagnetyk w zakresie temperatur zbliżonych do temperatury pokojowej. Przemiana ta wykazuje histerezę: przejście do stanu ferromagnetycznego podczas ogrzewania próbki zachodzi w temperaturze wyższej w porównaniu do temperatury przejścia do fazy antyferromagnetycznej w czasie jej chłodzenia. Ta właściwość układu FeRh zostaje wykorzystana do sterowania magnetyzmem warstw Fe i Co znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie ze stopem.

W drugim, krótkim rozdziale, mgr Drózdź w sposób precyzyjny definiuje cel prowadzonych badań oraz przedstawia koncepcję jego osiągnięcia.

W następnej części przedstawione są informacje dotyczące preparatyki próbek i technik badawczych wykorzystanych w przeprowadzonych eksperymentach. Zarówno warstwy stopu FeRh jak i warstwy ferromagnetyków Fe i Co były nanoszone na monokrystaliczne podłoża W(110) i MgO(001) metodą epitaksji z wiązki molekularnej w warunkach ultrawysokiej próżni. Autor zaznacza, że precyzyjny pomiar grubości warstw był wykonany przy pomocy wagi kwarcowej. W tym miejscu, moim zdaniem, warto było zamieścić komentarz dotyczący skalowania wagi kwarcowej, czyli opisu w jaki sposób wskazania wagi kwarcowej są przeliczane na jednostki grubości warstwy.

Struktura krystalograficzna przygotowanych warstw była kontrolowana przy pomocy techniki LEED. W badaniach właściwości magnetycznych Autor stosował technikę MOKE w geometrii podłużnej (LMOKE) i polarnej (PMOKE) oraz Spektroskopię Mössbauerowską Elektronów Konwersji (CEMS).

W czwartym rozdziale przedstawione są streszczenia artykułów stanowiących rozprawę. Należy podkreślić, że omawiane artykuły tworzą jednotematyczny cykl publikacji a łączącym je elementem jest kontrola właściwości magnetycznych układów dwu- i trójwarstwowych bazujących na stopie FeRh poprzez zachodzące w nim przejście fazowe antyferromagnetyk-ferromagnetyk indukowane zmianą temperatury. Pośród wielu wartościowych wyników zawartych w rozprawie na szczególne podkreślenie zasługuje przeprowadzenie systematycznych badań dotyczących reorientacji magnetyzacji zachodzącej w warstwach ferromagnetycznych Fe i Co będących jednym ze składników badanych układów.

Pierwszy artykuł dotyczy omówienia zjawiska reorientacji namagnesowania w dwuwarstwach Co/FeRh indukowanego zmianami temperatury i omówienia koncepcji magnetycznej pamięci opartej o zaobserwowane zjawisko.

Okazuje się, że w warstwach Co o grubościach większych niż 8 Å wraz ze zmianami temperatury następuje obrót wektora magnetyzacji pomiędzy kierunkami [1-10] i [001] (kierunki podłoża W(110)) leżącymi w płaszczyźnie warstw. Reorientacja

namagnesowania w warstwie Co jest związana ze sprzężeniem pomiędzy momentami magnetycznymi atomów kobaltu i momentami magnetycznymi atomów obu podsieci antyferromagnetyka i jest wywołana zachodzącym w stopie FeRh przejściem fazowym ferromagnetyk-antyferromagnetyk. W przypadku gdy stop jest w fazie ferromagnetycznej namagnesowanie warstwy Co jest równoległe do namagnesowania warstwy stopu i jest to kierunek [1-10]. Gdy FeRh jest w stanie antyferromagnetycznym kontakt atomów Co z dwiema podsieciami z przeciwnie skierowanym namagnesowaniem powoduje ustawienie ich momentów magnetycznych wzdłuż kierunku prostopadłego do osi łatwej podsieci, czyli równoległe do kierunku [001]. Zmiany kierunku namagnesowania w warstwie Co zachodzące pod wpływem zmian temperatury stały się podstawą pomysłu na przygotowanie koncepcji magnetycznej pamięci, w której do zmiany stanu komórki pamięci wykorzystywana jest zmiana temperatury, np. poprzez oświetlenie laserem, a nie zewnętrzne pole magnetyczne.

Drugi artykuł poświęcony jest badaniom dwuwarstwy Fe/FeRh i obserwowanemu wzmocnieniu pola koercji podczas przejścia fazowego ferromagnetyk-antyferromagnetyk w warstwie stopu. Okazuje się, że zmiana fazy powoduje zmianę pola koercji o blisko jeden rząd wielkości. Obserwowane zmiany wyjaśnione są sprzężeniem magnetycznym pomiędzy warstwami Fe i FeRh - w stanie antyferromagnetycznym sprzężenie to powoduje prostopadle ustawienie momentów magnetycznych obu warstw. Biorąc pod uwagę Rys. 4 oraz Rys. 2 dotyczący wcześniejszej publikacji można dostrzec, że warstwa FeRh w fazie ferromagnetycznej ma łatwą oś skierowaną w dwu różnych kierunkach krystalograficznych, mimo że grubość stopu FeRh wynosi w obu przypadkach 100 Å. W przypadku Co/FeRh jest to kierunek [1-10], a w przypadku Fe/FeRh - [001]. W tym kontekście w przedstawionym przewodniku brakuje komentarza dotyczącego osi łatwej stopu FeRh oraz stopu pokrytego warstwami Fe i Co, chociaż w artykułach ta kwestia jest przynajmniej częściowo omówiona.

W kolejnej publikacji znajdujemy wyniki świadczące o możliwości kontroli właściwości magnetycznych układu trójwarstwowego składającego się ze stopu FeRh, warstwy Au w postaci klina o grubości w zakresie od 4 Å do 40 Å i warstwy Fe. W układzie tym przejście fazowe antyferromagnetyk-ferromagnetyk zachodzące w warstwie FeRh indukuje podwójną reorientację wektora namagnesowania między kierunkiem [001] a [110] i z powrotem do kierunku [001]. Pierwsze przejście wynika z osłabienia sprzężenia typu spin flop wraz ze zbliżaniem się do temperatury przejścia fazowego antyferromagnetyk-ferromagnetyk i skierowaniem namagnesowania wzdłuż osi łatwej warstwy Fe. Z kolei ponowne przejście do kierunku [001] jest związane z pojawieniem się ferromagnetycznego stanu w stopie FeRh oraz prawdopodobnie tworzeniem się dipoli magnetycznych na szorstkich międzypowierzchniach warstw.

Czwarta publikacja dotyczy ważnego problemu współistnienia faz ferromagnetycznej lub antyferromagnetycznej w warstwie FeRh, która nominalnie powinna być w stanie odpowiednio antyferromagnetycznym lub ferromagnetycznym. Pomiar wykonany metodami MOKE i CEMS dla stopu FeRh przykrytego warstwą Au jednoznacznie wskazuje na niekompletne przejście fazowe. W przypadku chłodzenia na międzypowierzchni FeRh/MgO pozostaje warstwa stopu z uporządkowaniem

ferromagnetycznym. Natomiast w przypadku grzania warstwy, po nominalnym przejściu do fazy ferromagnetycznej, na międzypowierzchni FeRh/Au pozostają domeny z antyferromagnetycznym porządkiem. Badania te mają istotne znaczenie między innymi w kontekście zrozumienia sprzężenia występującego między warstwami magnetycznymi rozdzielonymi warstwą niemagnetyczną tak jak ma to miejsce w przypadku zaworów spinowych. Mogą w części wyjaśniać podwójną reorientację magnetyzacji, w szczególności ortogonalne ustawienie momentów magnetycznych obu warstw w układzie Fe/Au/FeRh.

Opracowanie poprzedzające cykl czterech artykułów kończy Podsumowanie, w którym Doktorant przedstawia najważniejsze wnioski wynikające z każdej z zaprezentowanych publikacji.

Układ rozprawy jest prawidłowy, a kolejne jej części tworzą logiczny ciąg. Całość napisana jest w sposób bardzo klarowny i poza kilkoma drobnymi uchybieniami: „...w atomach znajdujących się w pobliżu powierzchni o złamanej symetrii translacyjnej...” i „koncentracja stopu” czyta się ją bardzo dobrze.

Przedstawione powyżej komentarze i nieliczne uwagi nie umniejszają naukowej wartości wyników, która jest potwierdzona artykułami opublikowanymi w prestiżowych czasopismach. W pracy zaprezentowano rezultaty, które w istotny sposób poszerzają naszą wiedzę dotyczącą układów składających się z magnetycznych warstw. W szczególności za bardzo cenne uważam systematyczne badania dotyczące sterowania właściwościami magnetycznymi warstw i opracowanie koncepcji pamięci magnetycznej bazującej na zjawisku reorientacji namagnesowania pod wpływem zmian temperatury. W związku z powyższym wnioskuję o wyróżnienie pracy doktorskiej mgr. inż. Piotra Drózdza.

Podsumowując, przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi jednolity opis podstawowych właściwości fizycznych układów warstw magnetycznych bazujących na stopie FeRh. Tym samym stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Drózdza spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym stawiane rozprawom doktorskim i może być dopuszczona do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Lublin, 17.07.2020

Ryszard Zdyś

