

Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii AGH  
dr hab. inż. Marcin Sikora

Kraków, 29.11.2019

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
Mgr Iwanny Jacyny**

***Właściwości układów warstwowych Pt/Co/Pt oraz ich  
modyfikacja pod wpływem promieniowania z zakresu skrajnego  
nadfioletu i nadfioletu***

Zjawisko reorientacji spinowej fascynuje badaczy magnetyzmu od dziesięcioleci. Po raz pierwszy zaobserwowane jako indukowana termicznie przemiana fazowa w objętościowych ferrimagnetykach, w ostatnich latach jest intensywnie eksplorowane w heterostrukturach złożonych z cienkich warstw ferromagnetycznych metali 3d i niemagnetycznych metali 5d. Dzięki intensywnemu rozwojowi technik depozycji warstw epitaksjalnych możliwe jest wytwarzanie takich układów o kontrolowanej wartości namagnesowania i niemal kwadratowej pętli histerezy na jednorodnych powierzchni rzędu centymetrów kwadratowych.

Dla zastosowanie tych układów do wytwarzania nanourządzeń spintronicznych, niezbędna jest możliwość zdefiniowania jak najmniejszej niezależnie przełączanej powierzchni odpowiadającej pojedynczemu elementowi. Zazwyczaj wykorzystuje się w tym celu techniki litograficzne. Jednak złożone procesy naświetlania i trawienia wykorzystywane w tych technologiach mają degradujący wpływ na szorstkość warstw i interfejsów, a zatem parametry funkcjonalne tych materiałów. Stąd niezwykle istotnym była zaprezentowana w 1998 roku przez Cheppert i współpracowników możliwość kontrolowania anizotropii w układach Co/Pt i Co/Pd poprzez naświetlanie warstw wiązką jonów He<sup>+</sup>. W kolejnych latach, dzięki zastosowaniu zogniskowanych wiązek jonów, wykazano możliwość definiowania na powierzchni tych układów obszarów o kontrolowanej osi łatwego magnesowania i wymiarach nanometrycznych. Otwiera to możliwość wytwarzania nanostruktur o prostopadłej anizotropii, szczególnie istotnej dla zwiększenia gęstości magnetycznego zapisu informacji, w wyniku pojedynczego, dobrze kontrolowanego procesu technologicznego.

Niedawno wykazano również, że analogicznie do wiązek jonów, kontrolowana zmiana orientacji kierunku łatwego magnesowania w heterostrukturach Co/Pt jest możliwa z użyciem impulsów laserowych o dużej gęstości mocy. Przy czym źródłem zmian nie jest w tym przypadku lokalna zmiana tekstury materiału, ale kontrolowany proces lokalnego wyżarzania, który prowadzi do tworzenia stopu Co-Pt na interfejsie warstw prowadząc do

znaczącego zwiększenia koercji i amplitudy efektów magnetoptycznych w obszarach o anizotropii prostopadłej.

Recenzowana rozprawa doktorska przedstawia istotny wkład w rozwój badań nad nanoukładami z indukowaną laserowo reorientacją spinową. Jej celem było zbadanie wpływu intensywności, długości fali i czasu trwania impulsów laserowych na morfologię warstw, a szczególnie na wielkość „interfejsu stopowego” oraz jego stopień wymieszania (stechiometrię). Praca opisuje systematyczne studia nad strukturą atomową heterostruktur Pt/Co/Pt zmodyfikowanych ultrakrótkimi impulsami promieniowania z zakresu nadfioletu oraz jej związku ze zmianami magnetycznymi. W tym celu prowadzono eksperymenty przy użyciu trzech impulsowych źródeł laserowych. W zakresie EUV były to źródło laserowo-plazmowe IO WAT (Warszawa) i źródło laserowo-plazmowe PALS (Praga, Czechy) o paśmie, odpowiednio, 9-70nm i 0.5-7nm. W zakresie UV wykorzystano laser ekscymerowy z laboratorium HZDR (Drezno, Niemcy) o długości fali 308nm.

Badania prowadzono na heterostrukturach o zmiennej grubości bufora Pt, nanoszonego na monokrystaliczne podłoże  $Al_2O_3$  podgrzane do ok. 750°C (tzw. warstwy na podłożu „gorącym”) oraz utrzymywane w temperaturze pokojowej (warstwy na podłożu „zimnym”). Grubość warstwy kobaltowej i wierzchniej warstwy Pt była taka sama we wszystkich próbkach i wynosiła, odpowiednio 3,5nm i 5nm.

Próbki naświetlane lokalnie i rastrowo impulsami o różnej fluencji były charakteryzowane magnetycznie za pomocą techniki magnetoptycznego efektu Kerra (MOKE) w geometrii polarnej. Do badania zmian powierzchni próbek użyto mikroskopu interferencyjno-polaryzacyjnego z kontrastem fazowym Nomarskiego. Badania lokalnej struktury atomowej wybranych próbek wykonano z zastosowaniem transmisyjnej i skaningowej mikroskopii elektronowej (TEM i SEM). Podstawowymi technikami badawczymi, które umożliwiły ilościową charakteryzację parametrów warstw stopowych były: (i) dyfrakcja rentgenowska (XRD) – zarówno w modzie symetrycznym jak i asymetrycznym; (ii) reflektometria rentgenowska (XRR) i (iii) fluorescencja rentgenowska przy niskich kątach padania (GIXRF). Za pomocą tych technik możliwe było zbadanie rozkładu pierwiastków i struktury krystalicznej w funkcji głębokości. Badania te zostały wykonane zarówno w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie jak i z wykorzystaniem źródła synchrotronowego, którym było laboratorium ELETTRA (Triest, Włochy).

Rozprawa jest podzielona na cztery części. Pierwsza przedstawia w zwięzły sposób cel pracy i jej strukturę. Druga, która składa się z trzech rozdziałów (odpowiednio 1-3) przedstawia kontekst pracy w odniesieniu do dotychczasowych badań zjawiska reorientacji spinowej oraz prezentuje parametry badanych próbek i podstawy zastosowanych technik analitycznych. Najistotniejsza – trzecia część rozprawy zawiera szczegółowy opis przebiegu eksperymentów przeprowadzonych w trzech laboratoriach laserowych (rozdziały od 4 do 6). Każdy z nich zawiera również komplet wyników badań analitycznych wraz z opisem zaobserwowanych zmian strukturalnych i ich wpływu na właściwości magnetyczne. Ostatnia, czwarta część pracy zawiera podsumowanie i wnioski. Kolejną pozycją jest spis literatury liczący 25 pozycji, do których autorka odnosi się w tekście rozprawy. Zawiera on kompletne zestawienie najistotniejszych pozycji literaturowych z zakresu badań nad indukowanym wiązką jonów lub impulsami laserowymi zjawiskiem reorientacji spinowej w układach Co/Pt. Praca jest zakończona przedstawieniem dorobku publikacyjnego autorki, który składa się z pięciu prac, opublikowanych w

*Optics Express* (2 prace), *Journal of Alloys and Compounds*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* oraz *Journal of Synchrotron Radiation*. Dwie z wymienionych prac są bezpośrednio związane z tematem rozprawy, z czego praca w *Journal of Alloys and Compounds* zawiera rezultaty przedstawionych w rozdziale czwartym rozprawy. Fakt ich publikacji świadczy niezbicie o wysokim poziomie naukowym przedstawionych w rozprawie badań i nie pozostawia wątpliwości, co do oryginalności uzyskanych wyników i poprawności merytorycznej prezentowanej analizy.

Na podkreślenie zasługuje wysiłek autorki włożony w przygotowanie kompletnej rozprawy, zamiast coraz powszechniejszej formy zestawienia opublikowanych prac. Dzięki trudowi włożonemu w przygotowanie rozdziałów wstępnych i bardziej szczegółowy opis uzyskanych wyników przedstawiona rozprawa ma o wiele większe walory dydaktyczne. Dotyczy to części drugiej rozprawy, w której opis zastosowanych metod eksperymentalnych jest jakościowy i bardzo zwięzły, natomiast znacznie większy nacisk położono na szczegółowy opis metodologii analizy danych z pomiarów reflektometrii i fluorescencji. Znaczący walor dydaktyczny mają również te rozdziały części trzeciej, które opisują specyfikę prowadzenia eksperymentów w poszczególnych laboratoriach laserowych. Zawierają one szereg praktycznych informacji, które są specyficzne dla tych unikalnych instrumentów badawczych. Dzięki temu przedstawiona do recenzji praca może stać się istotnym źródłem informacji dla kolejnych generacji badaczy.

Niewątpliwą mocną stroną recenzowanej pracy jest spójny i systematyczny opis wyników trzech eksperymentów wykonanych w laboratoriach laserowych przedstawiony w trzeciej części rozprawy. Dzięki temu, że każdy z rozdziałów tej części ma podobną strukturę i sposób graficznej prezentacji uzyskanych wyników, znacznie łatwiejsze staje się zrozumienie szczegółów prezentowanych analiz i porównanie zmian strukturalnych generowanych przez impulsy laserowe o istotnie różnych parametrach. Na wyróżnienie zasługuje też kompleksowy sposób, jednoczesnego modelowania danych XRR i GIXRF za pomocą pojedynczego zestawu parametrów oraz bardzo dobra zgodność uzyskanych w ten sposób wyników z rezultatami analizy danych dyfrakcyjnych. Szkoda, że praca nie zawiera graficznego podsumowania prezentującego porównanie zmian struktury obserwowanych w wyniku wszystkich przeprowadzonych eksperymentów. Taki rysunek, przedstawiający kompilację danych zawartych w rysunkach 4.11, 5.10 oraz w tabeli 6.10, np. w funkcji długości fali i/lub fluencji impulsów, byłby doskonałym uzupełnieniem podsumowania słownego zawartego w czwartej części pracy.

Struktura rozprawy, chociaż nietypowa, jest przejrzysta. Kompozycja i szata graficzna są bardzo estetyczne. Informacje są wprowadzane w sposób zwięzły i systematyczny. To wszystko powoduje, że pracę czyta się z przyjemnością. Wśród nielicznych mankamentów rozprawy wymienić należy zbyt lakoniczne podpisy niektórych rysunków i tabel oraz niespójności w stosowanej symbolice. Niejednoznaczna jest również nomenklatura wykorzystana do prezentacji danych MOKE. Ponadto nieuważny czytelnik może z łatwością pomylić poszczególne próbki „zimne” i „gorące” oraz referencyjne, badane w różnych laboratoriach. Można by uniknąć tego typu problemów, gdyby praca zawierała dodatkową listę lub tabelaryczne zestawienie wszystkich badanych próbek oraz wprowadzając ich spójne oznaczenie lub kodowanie. Widoczne są również liczne błędy gramatyczne i stylistyczne. Jednak nie mają one znaczącego wpływu na zrozumienie

prezentowanych treści i nie generują dwuznaczności. Dlatego ich obecność jest nieistotna z punktu widzenia oceny merytorycznej. Pomimo dostrzeżenia tych kilku drobnych mankamentów, strukturę rozprawy, formę prezentacji wyników i ich interpretację oceniam bardzo dobrze.

W dwóch miejscach rozprawy pojawiły się informacje, które należałoby moim zdaniem uzupełnić o dodatkowe wyjaśnienia. Proszę, aby doktorantka odniosła się do nich w czasie publicznej obrony pracy.

1. Na rysunku 4.9 przedstawione są wyniki badania zmian powierzchni z zastosowaniem mikroskopu polaryzacyjnego. Na ich podstawie wyznaczono zależność „średniej wartości średnicy” obszarów o zmienionej morfologii w funkcji ilości impulsów, które zaprezentowano na rysunku 4.10. Niestety, jakość obrazów przedstawionych na rys. 4.9 nie pozwala dostrzec zmienionych obszarów. Proszę o przedstawienie sposobu analizy tych obrazów i metodologii wykorzystanej do wyznaczenia parametrów prezentowanych na rys. 4.10?
2. W rozdziale 4 wartość remanencji obszarów o prostopadłej anizotropii jest podawana względem nasycenia. Proszę, aby w analogiczny sposób przedstawić wyniki prezentowane w rozdziałach 5 i 6. Czy porównując wszystkie uzyskane wyniki możliwa jest korelacja względnej remanencji i/lub pola koercji w kierunku prostopadłym z grubością warstwy Co lub warstwy stopowej?

Podsumowując moją opinię stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr Iwanny Jacyny przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jakim było zbadanie zmian strukturalnych generowanych przez ultrakrótkie impulsy laserowe w układach warstwowych Pt/Co/Pt i wykazuje wysoką ogólną wiedzę teoretyczną autorki w dziedzinie fizyki. Zatem rozprawa ta spełnia wszystkie kryteria stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Dlatego wnoszę o dopuszczenie do jej publicznej obrony.

