

Recenzja
pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Matlaka
**Badanie magnetycznych przejść fazowych z zastosowaniem
obrazowania magnetoptycznego oraz jądrowego
rezonansowego rozpraszania promieniowania
synchrotronowego**

Promotor: prof. dr hab. Józef Korecki

Promotor pomocniczy: dr Tomasz Ślęzak

Wybór tematu i cel pracy

Praca doktorska pana mgr inż. Krzysztofa Matlaka dotyczy badań zjawiska reorientacji namagnesowania (spin reorientation transition - SRT) w epitaksjalnych warstwach żelaza na podłożu W(110). Problemy dyskutowane w pracy klasyfikujemy do badań podstawowych w zakresie niskowymiarowego magnetyzmu, dotyczą one mechanizmów oddziaływań magnetycznych w cienkich warstwach. Tematyka ta, w ostatnim czasie w wielu laboratoriach nanotechnologicznych, jest intensywnie uprawiana ze względu na szerokie zastosowania wyników tego rodzaju badań, w elektronice spinowej.

Doktorant badania SRT warstw Fe prowadził w ultrawysokiej próżni (UHV) za pomocą dwóch metod: magnetoptycznego efektu Kerra (MOKE) oraz spektroskopii oddziaływań nadsubtelnych z wykorzystaniem jądrowego rezonansowego rozpraszania promieniowania synchrotronowego (NRS). W metodzie MOKE z obserwacji zmian struktury domenowej wyciągał wnioski odnośnie konkurencji różnych przyczynków do anizotropii magnetycznej: od anizotropii magnetokrystalicznej, anizotropii powierzchniowej i anizotropii magnetoelastycznej wynikających ze zmian grubości i temperatury w klinowych warstwach Fe. Doktorant słusznie, średnią informację jaką dostarcza obserwacja struktury domenowej, postanowił uzupełnić i zweryfikować metodą NRS (o głębokościowej zdolności rozdzielczej) badając niekolinearne stany w klinowej warstwie Fe w funkcji grubości i temperatury.

Doktorant podstawowy cel badań - opis mechanizmów reorientacji namagnesowania w epitaksjalnych warstwach Fe - osiągnął w pełni, dzięki bardzo trafnemu zastosowaniu dwóch wzajemnie uzupełniających się metod eksperymentalnych.

Treść pracy i uwagi ogólne

Przedstawiona rozprawa doktorska liczy 100 stron i została podzielona na cztery podstawowe rozdziały. Pierwszy rozdział wprowadza w tematykę własności magnetycznych cienkich warstw, w którym autor daje wyczerpujący przegląd podstawowej literatury problemu, w

szczegółności koncentruje się na mechanizmach anizotropii, gdyż one decydują o rozkładach namagnesowania.

W podrozdziale 1.4 doktorant streszcza najważniejsze wyniki badań Fe/W(110) (układ badany od ponad 30 lat również w grupie prof. Koreckiego) zaznaczając, że brakowało do tej pory wpływu badań temperaturowych na zjawisko reorientacji spinowej. Rozdział drugi poświęcony jest literaturowym opisom metod eksperymentalnych: magnetoptycznego efektu Kerra i jądrowego rozpraszania rezonansowego. Zauważa się bardzo dużą dysproporcję w opisach metod, MOKE (23 strony) w stosunku do NRS (2 strony). Uważam, że istotne informacje z teorii efektu Kerra można było przedstawić w postaci odpowiednio skróconej (gdyż istnieje na ten temat obszerna literatura), dotyczy to podrozdziałów od 2.1.1 do 2.1.6.

Jednym z najważniejszych wyników pracy, opisanych w rozdziale 2.1.6, jest budowa mikroskopu/magnetometru Kerra do obserwacji struktury domenowej i pomiaru pętli histerezy w konfiguracjach podłużnej (LMOKE) i polarnej (PMOKE) z możliwością przeprowadzenia pomiarów in-situ (czyli charakteryzowania magnetycznego próbek w komorze próżniowej w procesie ich wytwarzania), jak również na zewnątrz (ex-situ). Doktorant systemy pomiarowe skompletował i oprogramował, umożliwiając obserwacje struktury domenowej po obróbce obrazu w czasie rzeczywistym. Działanie, a przede wszystkim czułość mikroskopu (kontrast domenowy), testował na układach warstw wymiennie sprzężonych (podrozdział 2.1.7). Metodę LMOKE sprawdzał na układzie Fe/klin (1.5 – 6.5 Å)MgO/Fe, otrzymał kontrast domenowy zależny od grubości MgO charakteryzujący się wzrostem sprzężenia antyferromagnetycznego z maleniem grubości przekładki MgO. Wykazał, że zakres występowania sprzężenia od grubości MgO jest większy gdy dolna warstwa Fe była naniesiona wprost na podłoże MgO, w stosunku do Fe naniesionej na warstwę buforową MgO.

Konfiguracje PMOKE testował na w układzie [supersieć Fe-Au/klin Au (5ML – 25 ML)/klin Fe(1 – 3 ML)], w którym monoatomowe supersieci Fe-Au, wykazujące anizotropie prostopadłą, są sprzężone przez klinową przekładkę Au, z klinową warstwą Fe (gradienty grubości klinowych warstw Fe i Au były do siebie wzajemnie prostopadłe). Na podstawie zmian kontrastu domenowego stwierdził oscylacje sprzężenia antyferromagnetycznego w funkcji grubości Au i Fe. Zmiany kontrastu domenowego w eksperymentach LMOKE i PMOKE nie zostały ilościowo opracowane pod względem charakteru i zmian zasięgu międzywarstwowego sprzężenia wymiennego, gdyż badane próbki były testowe a ich badania nie były w nurcie podstawowym pracy doktorskiej.

Podstawy fizyczne jądrowego rozpraszania jądrowego (NRS) ich zastosowanie do badania niekolinearnych struktur magnetycznych z przestrzennym rozkładem kierunków namagnesowania mgr Matlak opisał wyczerpująco w rozdziale 2.2. W podrozdziale 2.2.2 opisał bardzo zaawansowany eksperymentalnie pomiar widm NRS na klinowych, epitaksjalnych warstwach Fe preparowanych w wielokomorowym układzie UHV, znajdującym się na wiązce ID18, w ESRF Grenoble. Pomiar widm NRS były wykonywane in-situ, na dwuosiowym goniometrze umożliwiającym przestrzenną rotację próbki, z dużym uznaniem należy podkreślić przygotowanie tak zaawansowanego eksperymentu.

Podstawowe wyniki badań, zjawiska reorientacji spontanicznego namagnesowania (SRT) w epitaksjalnych warstwach Fe (110) o zmiennej grubości, badanych in-situ a przeprowadzonych z pomocą mikroskopii LMOKE i metody NRS doktorant opisał w rozdziale 3. Wyznaczenie grubości krytycznej przejścia odpowiadającego granicy pomiędzy obszarami namagnesowanymi w kierunku [1-10] i [001] w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego doktorant określił z położenia ściany domenowej dla paska środkowego (podrozdział 3.1.1). Uzyskana zależność liniowa grubości krytycznej od zewnętrznego pola

magnetycznego została wyznaczona teoretycznie z uwzględnieniem jedynie anizotropii objętościowej i powierzchniowej (z dokładnością do drugiego rzędu), dała tylko zgodność jakościową (współczynniki nachylenia prostych są różne). Wyniku takiego należało się spodziewać na podstawie obrazu wyginającej się ściany domenowej (zdjęcie rys.3.5), co autor badań prawidłowo komentuje, pisząc: „...że obszary o jednakowej grubości Fe charakteryzują się różną co do znaku i wartości efektywną stałą anizotropii”. Dlatego, aby uzyskać lepszą zgodność, trzeba wykonać symulacje mikromagnetyczne uwzględniające lokalne zmiany pola efektywnego (model makrospinowy jest niestosowalny).

Badanie wpływu temperatury na zmianę grubości krytycznej jest uzasadnione gdyż potwierdza spodziewany wynik wzrostu grubości krytycznej ze wzrostem temperatury. Bardzo pożytecznym wynikiem doświadczalnym z przeprowadzonych pomiarów jest pokazanie, że zależność jest liniowa w przedziale ok. 130° (tj. od ok. 300 K do 430 K), ponadto pomiar ten pokazuje konkurencyjność energetyczną pomiędzy kierunkami osi łatwych.

Kolejny eksperyment, indukowania reorientacji namagnesowania w remanencji poprzez zmianę temperatury (rozdział 3.1.2), badany na klinowych warstwach Fe o innym zakresie grubości (50 - 70 Å i 90 - 105 Å) preparowanych w temperaturze pokojowej oraz w 473 K pokazał, że grubość krytyczna zależy liniowo od temperatury, lecz w tym przypadku wartości stałej proporcjonalności grubości krytycznej od temperatury są o rząd wielkości mniejsze, ponieważ według autora pracy, silnie zależą od warunków preparatyki warstwy Fe. Badania te nie są systematyczne, przekazują jednak ważne praktyczne wskazówki odnośnie stabilności termicznej, jak również możliwościach przełączania magnetyzacji za pomocą temperatury.

Ponieważ badania przełączania magnetyzacji z kierunku łatwego [1-10] na kierunek [001] przy pomocy obserwacji struktury domenowej metodą MOKE nie dają informacji głębokościowo rozdzielczych (po grubości warstwy), wykorzystując sondę izotopu żelaza Fe^{57} mgr Matlak przeprowadził reflektometryczny eksperyment zbierania widm NRS od epitaksjalnych warstw Fe, na podstawie których pokazał, że podczas procesu SRT indukowanego zmianą grubości w 523 K, wraz ze wzrostem grubości zmiana orientacji magnetyzacji od kierunku [1-10] do [001] rozpoczyna się od warstw atomowych położonych najbliżej powierzchni a kończy się na interfejsie Fe/W(110), podczas gdy dla przejścia SRT indukowanego zmianą grubości w temperaturze pokojowej kolejność przełączania podwarstw jest odwrotna. Na podstawie tych wyników doktorant tworzy diagram fazowy „grubość-temperatura” procesu SRT (rys. 3.27), na którym obszary z jednorodną magnetyzacją równoległą do kierunków [1-10] i [001] są rozdzielone obszarem niekolinearnych stanów magnetyzacji. Niestety, doktorant nie próbuje diagramu fazowego „grubość – temperatura” z pomiarów NRS skorelować ze zmianami „grubość krytyczna-temperatura” otrzymanymi z obserwacji struktury domenowej metodą MOKE (proszę o wyjaśnienie w czasie obrony).

W dyskusji wyników, zjawiska reorientacji namagnesowania, autor doktoratu wnioski z badań metodami MOKE i NRS traktuje oddzielnie, a czytelnik odnosi wrażenie jakby autor bał się uogólnieć.

Opis eksperymentów i zastosowanych metod jest miejscami zbyt szczegółowy co pozbawia pracę przejrzystości i utrudnia jej zrozumienie.

Pracę kończy ogólne podsumowanie zredagowane oddzielnie dla każdej z zastosowanych metod.

Na końcu rozprawy znajdujemy obszerną bibliografię, w której nie znalazłem odniesienia do pracy: *Different scenarios for the in-plane spin reorientation transition in Fe(110) films on*

W(110) T.Ślęzak, M.Zajac, M.Ślęzak, K.Matlak, A.Kozioł-Rachwał, D.Wilgocka- Ślęzak, A.I.Chumakov, R.Rüffer, J.Korecki Phys. Rev. B 87 (2013) 094423.

Uwagi szczegółowe

Układ treści pracy jest prawidłowy, rozdziały zostały ułożone logicznie, forma graficzna staranna. Brak w pracy poważniejszych uchybień językowych.

Proszę o wyjaśnienie przypadkowych zmian pola koercji wyznaczonego z zależności grubość krytyczna w funkcji pola magnetycznego, mierzone w różnych temperaturach (rysunek 3.13).

Ocena pracy

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Krzysztofa Matlaka „*Badanie magnetycznych przejść fazowych z zastosowaniem obrazowania magnetoptycznego oraz jądrowego rezonansowego rozpraszania promieniowania synchrotronowego*” zawiera bardzo interesujące i oryginalne wyniki, doktorant wykazał się dużą wiedzą i szczególnymi zdolnościami eksperymentalnymi w preparatyce warstw epitaksjalnych i ich charakteryzowaniu w warunkach UHV z zastosowaniem bardzo nowoczesnych i różnorodnych metod badawczych.

Z całą stanowczością chciałbym podkreślić, że cel pracy: badanie zjawiska reorientacji namagnesowania (spin reorientation transition - SRT) w epitaksjalnych warstwach żelaza na podłożu W(110) został osiągnięty. Na szczególne podkreślenie zasługują następujące oryginalne wyniki:

- zbudowanie stanowiska pomiarów magnetoptycznych w konfiguracji podłużnej i polarnej (mikroskop/magnetometr) oraz jego implementacja do aparatury UHV (możliwość obserwacji struktury domenowej in-situ w czasie preparatyki warstw),
- akwizycja obrazów struktury domenowej z obróbką obrazu w czasie rzeczywistym,
- wyznaczenie, na podstawie analizy obrazów domenowych, zmian grubości krytycznej dla przełączania magnetyzacji z kierunku łatwego [1-10] na kierunek [001] w funkcji pola magnetycznego i temperatury,
- wykazanie, za pomocą jądrowego, rezonansowego rozpraszania promieniowania synchrotronowego (NRS), istnienia niekolinearnych stanów magnetycznych towarzyszących przełączaniu magnetyzacji z kierunku łatwego [1-10] na kierunek [001].

Pracę oceniam bardzo dobrze. Moje szczególne uznanie jest za staranny i systematyczny eksperyment. Mgr inż. Krzysztof Matlak wykazał dojrzałość w zakresie programowania celów i metod badawczych, a także umiejętność prawidłowego wnioskowania i prezentacji wyników.

Należy również bardzo pozytywnie ocenić aktywność publikacyjną doktoranta jest on współautorem 17 publikacji z listy filadelfijskiej, ale tylko dwie tegoroczne prace wiążą się z tematem pracy doktorskiej. Dorobek naukowy mgr Matlaka jest indeksowany H=5 i 41 cytowań.

Wniosek końcowy

Na podstawie przeprowadzonej oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że spełnia ona wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i stawiam wniosek do Rady Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie o dopuszczenie pana mgr inż. Krzysztofa Matlaka do publicznej obrony.

