

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra Zbigniewa Kuranta
pt. „Badanie zmian własności ultracienkich warstw kobaltu pod wpływem struktury
otaczających je warstw”

Ultracienkie warstwy kobaltu umieszczone pomiędzy warstwami niektórych pierwiastków metalicznych (np.: Pt, Au, Pd) wykazują znaczną anizotropię powierzchniową, dzięki której kierunek łatwej osi efektywnej anizotropii skierowany jest prostopadle do powierzchni. Właściwość ta ma kluczowe znaczenie dla wielu perspektywnych zastosowań, z których najważniejszym jest magnetyczny zapis informacji. Dlatego od kilkunastu lat zaobserwować można duże zainteresowanie układami warstwowymi, podobnymi do tych, które są przedmiotem pracy doktorskiej mgra Zbigniewa Kuranta. Tak więc nie ulega wątpliwości, że temat rozprawy dotyczy zagadnień ważnych i będących w centrum zainteresowań wielu placówek badawczych.

Praca złożona jest z czterech zasadniczych rozdziałów oraz wstępu, podsumowania, dodatków dotyczących formalizmów stosowanych przy opisie zjawisk magnetoptycznych, opisu próbek, zestawienia stosowanych symboli i spisu literatury.

We wstępie podany został cel pracy, którym jest zbadanie wpływu wybranych materiałów pokrywających (Au, Ag, Cr, V, Mo) na właściwości magnetyczne i magnetoptyczne cienkich warstw kobaltu. Określone zostały również zadania, które pozwalały cel ten osiągnąć. Dotyczą one poprawy techniki pomiarów magnetoptycznych oraz metod ich interpretacji. Wykazana została celowość prowadzenia badań w zakresie objętym tematem pracy doktorskiej. Doktorant zwraca przy tym uwagę na to, że jego badania są kontynuacją prac wcześniej prowadzonych w zespole kierowanym przez promotora rozprawy Prof. Andrzeja Maziewskiego. W szczególności istotna jest tutaj praca dr hab. M. Kisielewskiego prof. Uniwersytetu w Białymstoku i innych, opublikowana w Phys. Rev. Lett. w 2002 roku.

Rozdział pierwszy poświęcony preparatyce badanych warstw zawiera podstawowe, ogólne informacje dotyczące osadzania warstw techniką MBE stosowaną w pracy, mechanizmu wzrostu cienkich warstw (ze szczególnym uwzględnieniem wzrostu

epitaksjalnego), metod pozwalających kontrolować strukturę (RHEED) oraz skład chemiczny osadzanych warstw (AES). W ostatniej części tego rozdziału omówiona została w sposób bardziej szczegółowy preparatyka warstw badanych w pracy.

Do materiału prezentowanego w tym rozdziale pracy mam szereg zastrzeżeń. Najważniejsze z nich to:

- Nieprecyzyjny opis spektroskopii elektronów Auger – dotyczy to mechanizmu emisji elektronów Auger oraz czynników determinujących głębokość z jakiej elektrony te są emitowane.
- Niejasna prezentacja wyników pokazanych w tabeli 1.1 – brak wyjaśnienia jakimi czynnikami wywołane są różnice w stałych anizotropii, podany odnośnik literaturowy nie jest ujęty w spisie literatury.
- Rysunek 1.3. nie pochodzi z cytowanej w podpisie pod tym rysunkiem pracy.
- Omawiając strukturę warstw autor używa określeń zbyt ogólnych n.p.: „optymalna gładkość”, „jakości warstwy Co”.
- Nieprecyzyjny opis warunków osadzania warstw.

Niewątpliwie ważną zaletą technologii osadzania warstw badanych w pracy jest ich wytwarzanie w sposób umożliwiający określenie na jednej próbce zmian właściwości w funkcji grubości dwóch różnych warstw stanowiących układ. Na przykład warstwy Co i pokrywającej lub dwóch różnych pokryć. Realizowane jest to poprzez wytwarzanie warstw z kontrolowanym gradientem grubości (warstwy klinowe). Istotne jest przy tym to, że kierunki określające wzrost grubości obu warstw są do siebie wzajemnie prostopadłe. Należy jednak pamiętać, że wadą tej metody jest to, że czas pomiędzy osadzeniem jednej warstwy i przykryciem jej następną jest różny dla różnych obszarów próbki. Przy małych szybkościach osadzania, nawet w warunkach ultrawysokiej próżni, może to prowadzić do niepożądanych efektów, na przykład częściowego utlenienia warstwy. Dlatego szybkość osadzania jak i temperatura podłoża oraz ciśnienie przed i w trakcie osadzania są tymi parametrami, które powinny być podane w opisie technologii wytwarzania warstw.

W rozdziale drugim pracy doktorant w sposób zwięzły omówił te przyczynki do energii swobodnej ferromagnetyka, które są istotne przy opisie struktury magnetycznej i procesu przemagnesowania badanych w pracy warstw.

Rozdział trzeci poświęcony jest metodom pomiarów magnetycznych wykorzystywanych w pracy (pomiar magnetoptyczne i rezonans ferromagnetyczny). Szczególnie ważna część tego rozdziału dotyczy pomiarów magnetoptycznych, które

stosowane były w badaniach wszystkich warstw. Ta technika pomiarowa, ze względu na jej lokalny charakter, doskonale nadaje się do badania warstw klinowych. Z prezentowanych w pracy, bardzo dobrze przedstawionych opisów stanowisk do pomiarów magnetometrycznych oraz obserwacji struktury domenowej widać, że tematyka ta stanowi specjalność doktoranta. Należy przy tym zaznaczyć, że jest to w dużym stopniu zasługa wieloletniej pracy całego zespołu kierowanego przez Prof. A. Maziewskiego, który w technikach pomiarów magnetoptycznych osiągnął wysoki poziom w skali europejskiej. Nie mam jednak wątpliwości, że wkład mgra Kuranta, w rozwinięcie metod analizy pomiarów magnetoptycznych oraz stanowisk pomiarowych jest istotny. Poza opisem magnetoptycznych technik pomiarowych, w rozdziale trzecim doktorant przedstawił krótkie omówienie metody rezonansu ferromagnetycznego. W rozdziale tym zdefiniowane zostały również parametry charakteryzujące własności magnetyczne badanych układów warstwowych.

Rozdział czwarty, poświęcony własnym wynikom podzielony jest na trzy podrozdziały. Pierwszy z nich (4.1.) dotyczy wpływu rodzaju i grubości warstwy pokrywającej na właściwości magnetyczne warstwy Co osadzonej na monokrystalicznej warstwie Au(111). Dyskutując wyniki dla układu warstw Au/Co*/Ag*/Au (warstwy Co* i Ag* są warstwami z wzajemnie prostopadłymi gradientami grubości), doktorant, korzystając z formalizmu Yeha, wyliczył rozkłady wartości kąta $\Theta_{K,P,MAX}$ określającego maksymalne skrócenie płaszczyzny polaryzacji światła odbitego od próbki w pomiarach magnetoptycznego efektu Kerra w konfiguracji polarnej. W szczególności pokazał, że mapa rozkładu tego parametru dobrze odzwierciedla wynik eksperymentu. Na podstawie analizy obrazów struktury domenowej określił rozkłady koncentracji centrów nukleacji i wymiaru fraktalnego ściany domenowej. Ponadto, z tych samych pomiarów wyznaczył rozkład pola koercji oraz efektywnej stałej anizotropii. Wyniki te są wyraźnym rozszerzeniem i wzbogaceniem wcześniejszych rezultatów uzyskanych dla omawianego układu warstwowego w Zespole prof. A. Maziewskiego.

W dalszej części podrozdziału 4.1. mgr Kurant prezentuje wyniki dla podobnych układów warstwowych jak opisany powyżej z tym, że warstwa srebra zastąpiona została warstwami wanadu, molibdenu i chromu. Tym samym w pracy zaprezentowane zostały wyniki dla pięciu różnych metali (Au, Ag, Cr, V, Mo) przykrywających warstwę Co. W stosunku do układów z pokrywającą warstwą Au lub Ag, dla pozostałych pokryć mgr Kurant zaobserwował wzrost wartości parametrów d_0 i d_{RL} (odpowiadają one odpowiednio grubości warstwy Co, poniżej której zanika sygnał magnetoptycznego efektu Kerra i minimalnej

grubości, przy której obserwowana jest prostokątna pętla histerezy). Zmianę tych parametrów autor przypisuje zmniejszeniu efektywnej grubości warstwy ferromagnetyka w wyniku utworzenia subwarstwy stopu na międzywierzchni Co/warstwa pokrywająca. Z interpretacją tą, zgodną z wykresami fazowymi omawianych układów, zgadzam się. Moje zastrzeżenia budzi fakt, że wartości podane w tabeli 4.1. różnią się nieco od tych pokazanych na rysunkach 4.13. Drugie, bardziej istotne zastrzeżenie dotyczy powtarzalności technologii i dokładności wyznaczania grubości (niestety sposób wyznaczania grubości warstw nie został w pracy zaprezentowany). Na rysunku 4.13 pokazane są zależności pozwalające określić wartości d_0 dla układu Au/Co/Au dla trzech różnych próbek. Łatwo zauważyć, że wartości te różnią się pomiędzy sobą znacznie, wykazując zmiany od około 0.17 nm (rys.4.13 b) do około 0.3 nm (rys. 4.13 a). Wartości d_0 i d_{RL} odbiegają również od znanych z literatury [P. Beauvillain. JAP 76 (1994) 6078, S. Padovani PRB 59 (1999) 11887]. Dlatego omówienie wyników, dotyczących różnego pokrycia warstwy kobaltu w zakresie jej grubości odpowiadających pojawieniu się właściwości ferromagnetycznych, stwarza wrażenie powierzchownego. Prezentując wyniki dotyczące najciekawszego, z punktu widzenia zastosowań, obszaru grubości warstwy Co, to jest dla $d > d_0$, doktorant wykazał, że zastąpienie warstwy Au przykrywającej Co warstwami Mo, V, Cr wywołuje następujące zmiany właściwości:

- przesunięcie grubości Co odpowiadającej maksimum pola koercji (H_C) w kierunku większych grubości,
- zmniejszenie H_C w całym zakresie grubości Co,
- zmniejszenie grubości odpowiadającej reorientacji namagnesowania.

Ponadto, dla wszystkich pięciu pokryć $X = Au, Ag, Cr, Mo, V$ (o grubości d_X z zakresu, w którym wzrost d_X nie wywołuje zmian właściwości magnetycznych Co) mgr Kurant wyznaczył zależność $K_{1eff}(d)$ i na tej podstawie określił wartości stałych anizotropii, objętościowej i powierzchniowej (K_{1V} i K_{1S}) (Tabela 4.2.). Dalej prezentowane są wyniki ilustrujące zmienność stałych anizotropii K_{1eff} i K_2 , dla warstw z pokryciem wanadem i molibdenem, zarówno w funkcji grubości Co jak i warstwy pokrywającej. W sposób szczególnie „elegancki” problem ten przedstawiony został dla próbki z pokryciem wanadem, w której stosując ograniczony do najciekawszego obszaru zakresu zmian grubości Co i V uzyskano pełny obraz zmian $K_{1eff}(d, d_V)$.

Podrozdział 4.1. kończy opis obserwacji zmian struktury domenowej w układach warstwowych Au/Co/V i Au/Co/Mo. Doktorant wykazał, że ze wzrostem grubości pokrycia maleje rozmiar struktury domenowej i rośnie gęstość centrów nukleacji. Dla wanadu efekt

ten zachodzi szczególnie gwałtownie. Natomiast dla pokrycia kobaltu molibdenem struktura domenowa wykazuje wyraźną anizotropię.

Podrozdział 4.2 poświęcony jest wpływowi, zarówno warstwy stanowiącej podłoże jak i warstwy pokrywającej, na właściwości magnetyczne warstwy kobaltu. Rodzaje warstw, pomiędzy którymi umieszczona była warstwa Co ograniczono w tym przypadku do Au i Mo. Analizując obrazy remanencyjne dla warstw z klinową warstwą Co przy różnych kombinacjach Au i Mo, stosowanych jako pokrycie lub podłoże, Doktorant wykazał w sposób jednoznaczny, że zastąpienie Au przez Mo wywołuje wzrost wartości parametru d_0 i ograniczenie zakresu grubości Co, w którym występuje anizotropia prostopadła do powierzchni warstwy. Pokazał również że opisana zmiana właściwości wywołana zastąpieniem Au przez Mo jest silniejsza gdy dotyczy warstwy podłoża. Na podstawie zależności $K_{1\text{eff}}(d)$ (Rys. 4.26) mgr Kurant wyznaczył wartości K_{1V} i K_{1S} dla układów warstwowych typu Mo/Co/Au, Mo/Co/Mo i Au/Co/Mo. Szkoda, że te ciekawe wyniki nie zostały w pracy omówione.

W końcowej części podrozdziału 4.2 mgr Kurant przedstawił wyniki (struktura domenowa, pętla histerezy magnetycznej, FMR) dotyczące anizotropii w płaszczyźnie warstw kobaltu w otoczeniu warstw Au i/lub Mo. Wykazał, że w układach z molibdenem, jako warstwą stanowiącą podłoże, anizotropia ta jest szczególnie silna (pole anizotropii przekracza 1.5 kOe). Jest ona również funkcją grubości kobaltu i osiąga maksimum dla $1.5 < d < 4$ nm.

W podrozdziale 4.3, kończącym omawianie wyników własnych, Doktorant przedstawił badania dynamiki procesu przemagnesowania układów warstwowych Mo/Co/Au charakteryzujących się wyróżnionym kierunkiem magnesowania w płaszczyźnie układu. Wykazał, że dla warstw tych występuje wyraźny efekt opóźnienia magnetycznego. Ciekawa jest przy tym obserwacja wskazująca na znaczne różnice czasowych zmian namagnesowania, rejestrowanych po przyłożeniu impulsu pola magnetycznego, dla układów warstwowych z różną grubością warstwy Co.

Kończąc omawianie rezultatów zaprezentowanych w pracy mgr Zbigniewa Kuranta należy podkreślić, że uzyskał on szereg ważnych i ciekawych wyników dotyczących wpływu rodzaju i grubości warstw otaczających ultracienką warstwę kobaltu na jej właściwości magnetyczne, a w szczególności na: zakres grubości odpowiadający występowaniu anizotropii prostopadłej, stałe anizotropii, wartości pól koercji, parametry opisujące właściwości magnetoptyczne. Należy przy tym wyjaśnić, że wyniki te w sposób znaczący wzbogacają naszą wiedzę w zakresie możliwości kontrolowanego sterowania magnetycznymi właściwościami nanostruktur. Uzyskanie prezentowanych w pracy wyników możliwe było

dzięki bardzo dobrze przemyślanej koncepcji budowy (morfologii) warstw przeznaczonych do badań, ich wykonaniu oraz perfekcyjnemu przeprowadzeniu pomiarów magnetoptycznych. Znaczna część wyników prezentowanych w rozprawie została opublikowana. Mgr Kurant posiada znaczący dorobek naukowy. Jest współautorem piętnastu publikacji.

Podsumowując, stwierdzam, że recenzowana praca w pełni spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, dlatego z pełnym przekonaniem wnoszę o dopuszczenie mgr Zbigniewa Kuranta do publicznej obrony.

G. Holcwicki