

Warszawa, 12.X.2015

Prof. dr hab. Andrzej Wiśniewski
Instytut Fizyki PAN, Warszawa

Recenzja pracy doktorskiej mgr Eweliny Milińskiej pod tytułem: „*Właściwości magnetyczne strukturyzowanych układów zawierających ultracienką warstwę Co*” wykonanej w Instytucie Fizyki PAN pod kierunkiem prof. nzw. dr. hab. Andrzeja Wawro

Przedmiot i cel badań

Intensywne badania magnetycznych struktur cienkowarstwowych są prowadzone w wielu ośrodkach na świecie. Dzieje się tak zarówno ze względu na aspekt badań podstawowych – właściwości tych struktur są istotnie różne od właściwości materiałów objętościowych, jak i ze względu na ich zastosowania w technologiach informatycznych. W obydwu przypadkach zasadnicze znaczenie ma możliwość otrzymywania cienkich warstw metodą epitaksji z wiązek molekularnych (MBE). Ta właśnie technologia wykorzystana została do otrzymywania próbek badanych w recenzowanej rozprawie doktorskiej. Dzięki tej metodzie wzrost warstw odbywa się w sposób wysoce kontrolowany, wytwarzane warstwy są monokrystaliczne, a w przypadku heterostruktur międzypowierzchnia (wolę ten termin, niż określenie „interfejs” używane w rozprawie) jest „ostra”, jej skład i struktura są dobrze określone. Z punktu widzenia zastosowań bardzo istotne jest zwiększenie pojemności dysków twardej lub innych nośników informacji bez zwiększania ich rozmiarów. Jest to możliwe jeśli zastosuje się technikę zapisu prostopadłego, tzn. kiedy kierunek namagnesowania domeny będzie prostopadły do jej powierzchni, a nie jak dotychczas równoległy. Możliwości takie stwarzają cienkowarstwowe struktury Au/Co, które są przedmiotem zainteresowania w recenzowanej rozprawie. Zaproponowano bardzo ciekawe podejście technologiczne: ferromagnetyczne kropki były indukowane w ultracienkiej warstwie kobaltu przez samoorganizujące się wyspy złota. Ponieważ możliwe było zmienianie rozmiarów i odległości pomiędzy wyspami złota, możliwe było również kontrolowanie właściwości magnetycznych wytwarzanych kropek.

Należy więc uznać, że zarówno obiekt badań, jak i problem fizyczny, który był badany w rozprawie doktorskiej – określenie statycznych i dynamicznych właściwości kropek magnetycznych – zostały dobrze wybrane. Pozwoliło to na uzyskanie szeregu nowych,

ważnych wyników, które istotnie zwiększają naszą wiedzę o możliwościach wytwarzania i właściwościach jednodomenowych struktur o namagnesowaniu prostopadłym. Tak więc, spełnione zostały z powodzeniem wymagania stawiane pracom doktorskim, co wykażę bardziej szczegółowo poniżej.

Wyniki prezentowane w rozprawie

Nie będę omawiał szczegółowo czterech pierwszych rozdziałów. Zawierają one wprowadzenie do zagadnień związanych z nanostrukturyzacją układów magnetycznych, wstęp teoretyczny (omówienie tematyki epitaksjalnego wzrostu cienkich warstw oraz wprowadzenie pojęć z magnetyzmu, które są niezbędne przy analizie właściwości badanych układów), omówienie technik eksperymentalnych wykorzystywanych w pracy doktorskiej (z wyjaśnieniem zjawisk fizycznych wykorzystywanych w poszczególnych metodach). Można uznać, że stanowią one bardzo dobry wstęp do najważniejszej części rozprawy, czyli przedstawienia wyników eksperymentalnych i ich interpretacji. Tę dosyć rozbudowaną część rozprawy (72 strony w formacie zbliżonym do C5 – 162 mm na 229 mm) będzie można polecić każdemu doktorantowi rozpoczynającemu badania związane z tematyką nanostruktur magnetycznych. Mam tylko kilka drobnych uwag związanych z tą częścią rozprawy i wspomnę o nich w dalszej części recenzji.

W rozdziale V, który stanowi bezpośredni wstęp do głównej części pracy, omówiona jest struktura badanych próbek. Rozdział zawiera wyniki własne Autorki oraz wcześniejsze wyniki uzyskane w zespole, w którym pracowała. Przedstawione rezultaty (badania AFM, SEM, RHEED) świadczą o tym, że badane układy cienkowarstwowe mają dobre zdefiniowaną strukturę krystaliczną, oraz że bardzo dobrze opanowano technologię i możliwe jest wytwarzanie struktur cienkowarstwowych o pożądanym, z góry założonym parametrach.

Rozdział 6 rozpoczyna zasadniczą część rozprawy. Omówiony jest w nim wpływ warstwy bufora i warstwy wierzchniej (tę funkcję spełniały warstwy molibdenu i złota) na właściwości ultracienkiej warstwy kobaltu. Badane próbki referencyjne miały strukturę Mo/Co/Mo, Au/Co/Mo, Mn/Co/Au i Au/Co/Au. Zasadniczym celem badań prezentowanych w tym rozdziale było określenie wpływu warstwy Au i Mo na anizotropię magnetyczną warstwy Co. Wykorzystując mikroskopię optyczną i magnetometrię magnetooptyczną Autorka wykazała, że w strukturach Au/Co/Mo i Au/Co/Au przy pewnej charakterystycznej grubości warstwy Co zachodzi zjawisko reorientacji spinowej. Przy czym, w układzie Au/Co/Au obserwuje się najszerszy zakres grubości warstwy kobaltu wykazującej namagnesowanie w kierunku prostopadłym. W rozdziale tym przedstawiono szereg wartościowych wyników, które zostały

klarownie podsumowane na zakończenie rozdziału (podrozdział 6.3), nie będę powtarzał tego podsumowania w recenzji. Należy podkreślić, że część wyników z tego rozdziału została opublikowana w Physical Review B. Mam dwa pytania związane z wynikami prezentowanymi w rozdziale 6, przedstawię je w dalszej części recenzji z prośbą o odpowiedź w czasie publicznej obrony.

W rozdziale 7 przedstawione są wyniki badań przeprowadzonych z wykorzystaniem synchrotronu w Grenoble metodą XMCD (metodą absorpcji spolaryzowanego kołowo promieniowania X). Przedmiotem badań był układ Mo/Co, a celem stwierdzenie czy następuje indukowanie momentu magnetycznego na atomach Mo. Autorka stwierdza, że następuje indukowanie niewielkiego momentu w atomach Mo położonych w bezpośrednim sąsiedztwie warstwy Co. Mam jednak co do tego pewne wątpliwości, o których chciałbym porozmawiać w czasie publicznej obrony.

W rozdziale 8, 9 i 10 zawarte są wyniki stanowiące trzon rozprawy. Ponieważ każdy z tych rozdziałów kończy się klarownym podsumowaniem, w recenzji ograniczę się tylko do podkreślenia najważniejszych rezultatów zawartych w tych trzech rozdziałach. Autorka pokazała, że jeśli na strukturyzowanym podłożu złożonym z samoorganizujących się wysp złota osadzi się cienką warstwę kobaltu, to w warstwie tej zostaną zaindukowane kropki magnetyczne. Kropki te tworzą się w miejscach bezpośredniego kontaktu warstwy Co z powierzchnią wysp Au. Są one otoczone magnetyczną matrycą, którą tworzy pozostała część warstwy Co osadzona pomiędzy wyspami na podłożu molibdenowym. W zależności od grubości warstwy magnetycznej mogą być zrealizowane różne wzajemne konfiguracje kierunku namagnesowania kropek i matrycy. Ponieważ technologia umożliwia kontrolowanie rozmiaru i gęstości powierzchniowej wysp złota, możliwa jest kontrola właściwości magnetycznych kropek. Przedstawione wyniki badań magnetoptycznych i badań z wykorzystaniem mikroskopu sił magnetycznych dostarczają bezpośredniego dowodu na to, że uzyskano jednodomenowe kropki magnetyczne, w których namagnesowanie ma kierunek prostopadły do powierzchni kropki. Jest to rezultat z jednej strony bardzo ciekawy z punktu widzenia badań podstawowych, z drugiej zaś o dużym znaczeniu praktycznym. Analizując wyniki doświadczalne zaproponowano mechanizm przemagnesowywania nanostruktur: inicjuje go zarodkowanie domeny o odwróconym kierunku namagnesowania, domena taka rośnie, czemu towarzyszy gwałtowny i niezaburzony ruch ściany domenowej powodujący zmianę kierunku namagnesowania kropek. Obserwacje eksperymentalne zostały poparte symulacjami mikromagnetycznymi, które pozwoliły na określenie wpływu rozmiarów i kształtu kropek na parametry charakteryzujące proces przemagnesowania. Autorka

zapropowała diagram fazowy ilustrujący różne mechanizmy przemagnesowania w zależności od kształtu i rozmiaru kropek oraz od struktury (jakości) ich powierzchni. Wyniki symulacji zostały opublikowane niedawno w czasopiśmie Journal of Applied Physics. Należy podkreślić, że symulacje mikromagnetyczne są cennym, nowym aspektem badań wniesionym przez mgr Milińską do Zespołu Heterostruktur Magnetycznych, w którym powstawała jej praca doktorska.

Uwagi merytoryczne, do których chciałbym, żeby Doktorantka odniosła się w czasie obrony:

1. W rozdziale 6, korzysta się z wzoru (6.7), który wiąże stałą anizotropii efektywnej z grubością warstwy magnetycznej. Wzór ten zawiera jako jeden z parametrów namagnesowanie nasycenia M_S . Autorka pisze: „Wartość M_S przyjęto równą wartości objętościowej warstwy kobaltu.” Jest to założenie rozsądne, proszę jednak o komentarz, czy takie założenie jest uzasadnione także, gdy mamy do czynienia z ultracienkimi warstwami (np. o grubości poniżej 1 nm), a jeśli występują odstępstwa od wartości M_S objętościowych warstw, to jakie mechanizmy mogą być za to odpowiedzialne?
2. W rozdziale 6, na str. 88 dyskutując krytyczną grubość Co, d_0 , czyli próg grubości, przy którym pojawia się niezerowy sygnał Kerra, Autorka obserwowaną różnicę wartości d_0 dla układu Au/Co/Au ($d_0 = 0,28$ nm) i Au/Co/Mo ($d_0 = 0,43$ nm) tłumaczy możliwością powstawania niemagnetycznego stopu na granicy warstwy Co i Mo. Jednak wartość d_0 dla układu Mo/Co/Au wynosi 0,3 nm, czyli jest bardzo zbliżona do wartości charakteryzującej układ Au/Co/Au. Czy gdy Mo jest „pod spodem” stop się nie tworzy? Czy też inne czynniki mają większy wpływ na wartość d_0 ?
3. W rozdziale 7 w tabeli 7.1 podane są wartości spinowego i orbitalnego momentu magnetycznego atomów molibdenu, wyznaczonych metodą XMCD, dla próbki $\Lambda 1$ (wielowarstwa) i E1 (stop). Trzy z tych wartości wynoszą: $-0,03(4) \mu_B$, $0,005(6) \mu_B$ oraz $0,01(4) \mu_B$, czyli jeżeli dobrze rozumiem ten zapis, są w granicy błędu doświadczalnego równe zero. Natomiast w tekście poniżej tabeli jest napisane: „Uzyskane dla tych próbek wartości m_s i m_l są różne od zera i wskazują na indukowany sygnał magnetyczny atomów Mo.” Proszę o komentarz.

Drobne uwagi krytyczne, jest ich niewiele, część zaznaczyłem w tekście (literówki, drobne uwagi do rysunków) i nie wymieniam ich w recenzji. Poniżej tylko kilka przykładowych uwag:

1. W opisie wzoru (2.2) nie jest wyjaśnione co oznacza kąt δ , kąt ten jest zaznaczony na rysunku 2.2, jako kąt pomiędzy „strzałkami” γ_A i γ_{int} , ponieważ wielkości te oznaczają energie powierzchniowe niezbędny jest pewien komentarz.
2. We wzorze (2.9) jest używane oznaczenie K_{eff} , które jest zdefiniowane 4 strony dalej.
3. Rys. 5.2 jest nieczytelny.
4. Na stronie 94., 5. wiersz od dołu: zamiast „oraz Mo/Co/Au” powinno być „oraz Au/Co/Au”.

Warstwa językowa pracy nie budzi zastrzeżeń, praca jest napisana klarownym językiem, dobrze się ją czyta. Zdarzają się lapsusy językowe (np. „płaska płaszczyzna” na stronie 37., „wzbudzony elektron zyskuje polaryzację” na str. 63., „w układach z elementami grupy 4d” na str. 115.) lecz jest ich niewiele. Podkreślić należy staranną szatę graficzną i przejrzysty układ pracy. Te dodatkowe zalety również dowodzą kompetencji Autorki – w sposób klarowny pisze się na tematy, które się dobrze rozumie.

Wnioski końcowe

Uważam recenzowaną pracę za bardzo wartościową. Autorka wykazała się dobrym opanowaniem technologii MBE, dzięki czemu możliwy był oryginalny sposób wytwarzania jednodomenowych kropek magnetycznych. W swojej rozprawie mgr Milińska pokazała również, w jaki sposób można wpływać na właściwości magnetyczne tych kropek. Określiła ich właściwości – zarówno statyczne, jak i dynamiczne. Stosując adekwatne techniki pomiarowe wykazała, że w sposób kontrolowany można wytwarzać kropki wykazujące namagnesowanie prostopadłe. Interpretując otrzymane wyniki doświadczalne, wskazała mechanizm odpowiedzialny za przemagnesowanie nanostruktur. Dzięki przeprowadzonym przez nią symulacjom mikromagnetycznym możliwe było określenie, jaki wpływ mają rozmiar i kształt kropki na proces przemagnesowania. Przedstawione wyniki pozwalają na zdecydowanie lepsze zrozumienie zjawisk jakie obserwuje się w nanostrukturach magnetycznych, w szczególności w tych, które cechuje namagnesowanie prostopadłe.

Uważam, że praca całkowicie, wręcz z nadmiarem, spełnia wymogi przewidziane odpowiednią ustawą. Wnoszę o dopuszczenie mgr Eweliny Milińskiej do publicznej obrony.

