

Kraków, 23.11.2020

dr hab. inż. Michał Ślęzak, prof. AGH

Katedra Fizyki Ciała Stałego

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH

Al. A. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

Email: mislezak@agh.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Jakubowskiego
pt. „Modyfikowanie właściwości strukturalnych i magnetycznych ultracienkich warstw kobaltu
poprzez naświetlanie wiązką jonów”**

Prowadzone od kilku dekad intensywne badania efektów magnetycznych w cienkich warstwach i nanostrukturach doprowadziły do bardzo ważnych odkryć i zastosowań. Wśród tych najbardziej spektakularnych czy szerzej znanych wymienić można zjawisko gigantycznego magnetooporu, za które odkrywcy, Albert Fert i Peter Grünberg, otrzymali w 2007 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki. Kolejne ważne odkrycia oraz ich już wykorzystywane jak również potencjalne zastosowania powodują, że dziedzina magnetyzmu układów niskowymiarowych rozwija się bardzo dynamicznie. Rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Jakubowskiego pt. „Modyfikowanie właściwości strukturalnych i magnetycznych ultracienkich warstw kobaltu poprzez naświetlanie wiązką jonów” jest bezpośrednio związana z tą tematyką. Autor skupia się w swoich badaniach na właściwościach magnetycznych (a konkretnie na anizotropii magnetycznej i sprzężeniu międzywarstwowym) cienkich, epitaksjalnych warstw ferromagnetycznych oraz na możliwości ich kontrolowanej modyfikacji przy pomocy naświetlania jonami.

Praca została wykonana w Instytucie Fizyki PAN, Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Promotorem pracy jest prof. dr hab. Andrzej Wawro, natomiast promotorem pomocniczym dr Iosif Sveklo z Wydziału Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku. Pracę doktorską stanowi cykl trzech spójnych tematycznie publikacji (oznaczonych jako D1, D2, D3) poprzedzonych napisanym w języku polskim opracowaniem. Ten swego rodzaju przewodnik składa się ze streszczeń w języku polskim i angielskim, wstępu oraz podzielonego na rozdziały przeglądu podstawowych informacji dotyczących kolejno: magnetyzmu cienkich warstw, procesu epitaksji, modyfikacji struktury jonami oraz technik eksperymentalnych wykorzystanych w badaniach opisanych w publikacjach D1-3. Po tym liczącym 52 strony opisie autor dokonuje streszczenia wszystkich trzech prac, prezentuje obszerny spis cytowanej przez siebie literatury i załącza oryginalne publikacje D1-3. Liczącą w sumie 116 stron całość kończą oświadczenia autora i współautorów dotyczące indywidualnych przyczynków do powstania poszczególnych publikacji D1-3.

Tematyka pracy jest w mojej ocenie bardzo ciekawa a uzyskane wyniki są ważne i bardzo dokładnie udokumentowane. Do tej kwestii odniosę się bardziej szczegółowo w dalszej części recenzji, przy okazji analizy trzech prezentowanych publikacji D1-3. Wysoko oceniam również pomysł przygotowania i sam układ przewodnika, w którym autor opisuje i podaje wiele informacji, których czytelnik nie znajdzie w pracach D1-3. Czytelnikowi nie znającemu szczegółów dotyczących niektórych efektów fizycznych czy technik eksperymentalnych wykorzystywanych w pracy znacząco ułatwia to odbiór pracy i tym samym podnosi jej wartość. Niestety jakość zaprezentowanego w rozdziałach I – V opisu pozostawia u czytelnika pewien niedosyt. Poniżej pozwolę sobie wskazać wybrane niedociągnięcia i moje komentarze do konkretnych fragmentów rozprawy.

W rozdziale pierwszym autor dokonuje dobrego wprowadzenia, prezentuje motywację i wyraźnie określa cel pracy jednocześnie prezentując szczegółowy plan jego realizacji. Niektóre wyrażenia budzą wątpliwości, często wynikają one ze „slangowego” sposobu opisywania, który w pracy doktorskiej a już zwłaszcza w jej wstępie nie powinien mieć miejsca („namagnesowanie silnie wpływa na właściwości transportowe”, „nowe uporządkowania magnetyczne”, „skośne osadzanie materiału”).

W rozdziale drugim autor tłumaczy podstawowe pojęcia i efekty z dziedziny magnetyzmu cienkich warstw, które są szczególnie istotne z punktu widzenia rozprawy (uporządkowanie i anizotropia magnetyczna, sprzężenie RKKY). Ta jedna z ważniejszych części przewodnika w szczególności powinna być wolna od błędów merytorycznych, językowych czy innych niejasnych lub nieprecyzyjnych sformułowań.

Wątpliwości budzi np. opis sprzężenia RKKY: „Odpowiedzialne za nie są elektrony przewodnictwa przepływające przez niemagnetyczną przekładkę, które sprzęgają namagnesowanie sąsiednich warstw magnetycznych”. Tu raczej słowo „pośredniczą” byłoby lepsze niż „przepływają”.

Przy opisie pętli histerezy magnetycznej już w drugim jego zdaniu czytelnik natknie się na niezdefiniowane wcześniej pojęcia związane z techniką MOKE, która zresztą jest opisana w rozprawie dużo później. Na rysunku 2 pokazane są dwie pętle histerezy magnetycznej, ale nie ma o nich prawie żadnego komentarza w tekście głównym.

Z kolei na stronie 19 zdanie „Magnetyczne, cienkie warstwy wykazują bardzo duży stopień anizotropii.” jest enigmatyczne i zdecydowanie zbyt uogólniające, ponieważ z łatwością można znaleźć liczne publikacje, w których cienkie warstwy wykonane z materiałów ferromagnetycznych nie wykazują żadnej albo znikomą anizotropię magnetyczną.

Kolejnym błędnym wyrażeniem jest „anizotropia prostopadłego namagnesowania” lub w wersji angielskojęzycznej, również niepoprawnie „perpendicular magnetization anisotropy”. Poprawnie powinno być „prostopadła anizotropia magnetyczna” oraz „perpendicular magnetic anisotropy”. Nie chodzi tutaj tylko o formalny aspekt tej pomyłki ale o to, że wersje błędna i poprawna mają faktycznie bardzo różne fizyczne znaczenie. Można bowiem sobie łatwo wyobrazić sytuacje (jak również znaleźć liczne pokazujące to publikacje), w której w układzie który wykazuje nawet olbrzymią **anizotropię magnetyczną (magnetic anisotropy)** jego obecny stan magnetyczny charakteryzuje się **namagnesowaniem (magnetization)** w płaszczyźnie (i vice versa). Sam autor obserwuje w swoich eksperymentach podobne efekty, np. indukowanie, wzmacnianie czy osłabianie PMA niekoniecznie przecież oznacza przełączanie namagnesowania do stanu prostopadłego czy w płaszczyźnie.

Opis ciekawego i pouczającego diagramu fazowego w przestrzeni fazowej (K_1, K_2) również zawiera nieścisłości, np. warunek $K_1 > 0$ nie jest jednoznaczny z namagnesowaniem prostopadłym, jest to tylko warunek konieczny (trzeba jeszcze $K_2 > -K_1/2$). W tekście poprzedzającym rysunek 4 stałą K_{is} opisano jako „różnicę między anizotropiami warstw na powierzchni lub interfejsie, a atomami leżącymi głębiej” – wydaje się to być nieprawdą, bardzo proszę o komentarz.

Najczęściej, ale **nie zawsze** jest prawdą, że „Pętla histerezy $M(H)$, mierzona w polu przyłożonym wzdłuż osi łatwej (ang. easy axis) nasycza się w mniejszym polu, niż w wzdłuż osi trudnej”. Czy doktorant może wskazać przykładowe okoliczności, w których może mieć miejsce sytuacja odwrotna? Rysunek 5 na str. 23 nie został przez autora prawie w ogóle opisany, ta uwaga dotyczy się również jeszcze kilku rysunków w rozprawie.

W rozdziale trzecim autor opisuje proces epitaksjalnego wzrostu warstw. Na str. 25 napotykamy stwierdzenie, że „ułożenie atomów w początkowym stadium wzrostu przyjmuje strukturę krystalograficzną powierzchni” – nie jest to w ogólności prawdą, można jedynie stwierdzić, że jest to dość często (ale wcale nie tak bardzo często jakby podpowiadała intuicja) spotykana sytuacja.

Na rys. 8 zjawisko dyfuzji powierzchniowej zostało chyba w jednym miejscu błędnie przypisane. Czy chodziło tu raczej o dyfuzję w objętości próbki lub segregację?

W rozdziale czwartym znajdujemy opis modyfikacji struktury krystalicznej jonami. Na str. 28 („Powstawanie defektów”) czytelnik kolejny raz doświadcza przykrego zwyczaju prezentowania rysunku (rys.11) i nie opisywania jego szczegółów. Opis powstawania defektów w tym podrozdziale zdaje się być niezwiązany a na pewno nie bezpośrednio związany z tym co prezentuje rysunek 11. Np. zaznaczona na rysunku 11 bariera **Ehrlich**-Schwoebela nie została nawet wspomniana w opisie (jest też błąd w nazwisku).

Dość obszerny rozdział V to opis technik eksperymentalnych wykorzystanych przez autora w trakcie realizacji pracy. W tym ważnym rozdziale również napotykamy błędy, począwszy od literówek w pierwszym zdaniu („wykorzystanie” zamiast wykorzystane), przez błędne rozwinięcie skrótu MBE, po kolejną literówkę w następnym zdaniu („zapewnienia” zamiast „zapewnia”) i karkołomne (dla czytelnika) zagnieżdżenie różnego rodzaju nawiasów. To wszystko powoduje, że czytanie staje się momentami uciążliwe. W opisie rys. 12 brakuje informacji podczas jakiego procesu zrobiono zdjęcie uchwytu z próbką. Słabo zorientowany w tej dziedzinie czytelnik może np. pomyśleć, że chodzi o proces nanoszenia warstwy (jest to w końcu podrozdział zatytułowany „Wzrost heterostruktur metalicznych - MBE”) i zdziwić go może, że uchwyt i próbka aż tak się nagrzewają, podczas gdy w rzeczywistości chodzi prawdopodobnie o proces wygrzewania próbki. Wydaje mi się, że dla nie zaznajomionego z preparatyką MBE czytelnika powinno się w tej części pracy choćby pobieżnie opisać sposób kontroli grubości nanoszonej warstwy i ideę wagi kwarcowej. W tej ostatniej kwestii muszę jednak zwrócić uwagę, że autor podał odniesienie do odpowiedniej pozycji literaturowej ułatwiając tym samym czytelnikowi dalsze studia.

W odniesieniu do opisu układu MBE ze strony 32, zgadzam się, że przykładem standardowego wyposażenia komory preparacyjnej z MBE **może** być dyfraktometr RHEED. W kolejnym rozdziale zatytułowanym „Wybrane techniki eksperymentalne” doktorant stosunkowo dokładnie opisuje technikę dyfrakcji niskoenergetycznych elektronów LEED. W opisie tym pojawia się zdanie: „Odległości punktów dyfrakcyjnych otrzymanej sieci odwrotnej i rzeczywiste odległości międzypłaszczyznowe są odwrotnie proporcjonalne”. Nie jest to błąd ale nie wtajemniczonymu czytelnikowi może to sugerować, że z odległości między widocznymi na ekranie plamkami dyfrakcyjnymi można wyznaczyć odległości międzypłaszczyznowe w kierunku normalnym do powierzchni, np. odległość między powierzchniową i kolejną warstwą atomową badanej próbki. W rzeczywistości możliwe jest wyznaczenie odległości między atomami znajdującymi się w tej samej płaszczyźnie, przykładowo na powierzchni (i zwłaszcza na powierzchni ze względu na wspomnianą przez autora *stricte* powierzchniową czułość LEED). Kwestia wyznaczania odległości międzypłaszczyznowych jest bardzo ważna z punktu widzenia fizyki powierzchni bo pozwala na badania efektów takich jak np. relaksacja struktury krystalograficznej przy powierzchni kryształu. W rzeczy samej, technika LEED daje taką możliwość lecz nie w oparciu o pojedynczy obraz dyfrakcyjny. Zostało to przez autora częściowo zasygnalizowane w dalszej części opisu, tu słusznie wskazano na konieczność wykonania systematycznych badań intensywności wybranych plamek dyfrakcyjnych w funkcji energii padających na próbkę elektronów. Uwagę zwraca sformułowanie: „Dzięki temu LEED jest niemal idealnym narzędziem do analizy struktur powierzchniowych”. Słusznie użyto tu słowa „niemal” bo z punktu widzenia tematyki dyskutowanej w pracy jednym z ograniczeń techniki LEED jest jej uśredniający charakter, który wynika z ograniczonej możliwości zogniskowania wiązki elektronów na powierzchni badanej próbki. Czy doktorant może wymienić i krótko opisać inne, alternatywne narzędzia lub techniki, które przychodzą tu z pomocą i pozwalają na badanie struktury powierzchni **lokalnie**, w skali mikro lub nano?

W dalszej części tego rozdziału autor opisuje technikę dyfrakcji wysokoenergetycznych elektronów (RHEED). Nie rozumiem zdania dotyczącego czasowej zmienności intensywności obrazu RHEED. Czy chodzi tu o wspomnianą na wstępie możliwość rejestracji obrazów RHEED „na żywo” podczas procesu wzrostu warstwy? W tym kontekście bardzo podoba mi się rysunek 17. Jest to co prawda ilustracja w dużej mierze „samo-wyjaśniająca się” ale krótki opis poszczególnych wariantów wzrostu i ich korelacji z oscylacjami intensywności RHEED znacząco podniósł by wartość tego rozdziału. Drobną

uwaga w odniesieniu do przedostatniego zdania na stronie 37: grubość oczywiście nie oscyluje. (Oscyluje intensywność mierzona w RHEED, w funkcji rosnącej grubości.)

W opisie techniki RBS na str. 42 pojawiają się sformułowania „wynik pomiaru jest w stanie osiągnąć absolutną dokładność” oraz „nie są wymagane żadne standardy związane z próbką”. Bardzo proszę o wyjaśnienie znaczenia tych słów.

Na str. 43 czytamy, że „lateralne efekty rozpraszania” mogą „wyglądać boczne części” widma. Kolejne zdanie to „Przy pomocy odpowiednich metod numerycznych (np. oprogramowanie SIMNRA [132]), służących do oceny struktury próbki, można wyodrębnić z widma z dobrą dokładnością dla każdego z pierwiastków (izotopów) oraz warstw w próbce.” Czytałem to zdanie kilka razy i nadal nie wiem co takiego można wyodrębnić z widma? Przyczynki od „lateralnego rozpraszania”? Co to jest rozpraszanie lateralne? Opis RBS i widm RBS jest niestety bardzo niezrozumiały. Podobnie, opis spektroskopii anihilacji pozytonów PAS jest bardzo nieprzystępny. Ogólnie rzecz ujmując, te rozdziały sygnalizują czytelnikowi dlaczego użyto opisanych metod i jakie informacje można na tej podstawie uzyskać (profile głębokościowe, defekty) ale sposób prezentacji a w szczególności opis omawianych technik pozostawia wiele do życzenia.

Bardzo rozbudowany opis technik RBS i PAS silnie kontrastuje ze stosunkowo pobieżnym opisem symulacji w pakiecie TRIDYN. Jest to o tyle zaskakujące, że z prezentowanych na końcu pracy oświadczeń współautorów i samego autora można wywnioskować, że w publikacjach D2 i D3 główny udział doktoranta polegał właśnie na wykonaniu takich symulacji. Z tego punktu widzenia dokładny opis procesu symulacji i związanych z nim trudności byłby pomocny w ocenie wkładu pracy doktoranta w powstanie prac D2 i D3.

Podsumowując przewodnik zawarty w pierwszych pięciu rozdziałach pracy, stwierdzam, że cechuje go trafny wybór poruszonych w nim tematów. W wielu przypadkach wysoko oceniam również jego zawartość merytoryczną, która znacząco ułatwia czytelnikowi analizę rozprawy. Jednak wskazane powyżej uchybienia i błędy techniczne (również edycyjne i literowe, które w większości pominąłem w recenzji) powinny zostać przez doktoranta wyeliminowane przed złożeniem pracy, na etapie poprawiania przez Niego ostatecznej wersji pracy.

Znacznie lepiej sytuacja wygląda w rozdziale szóstym. Streszczenie prac składających się na recenzowaną rozprawę doktorską rozpoczyna się od bardzo zgrabnego i informatywnego akapitu uzasadniającego spójność tematyczną wymienionych prac. W dalszej części autor streszcza po kolei wszystkie trzy prace. Poniżej zaprezentuje komentarze jakie nasunęły mi się po lekturze streszczeń oraz samych publikacji D1-3 zawartych w rozdziałach VI i VIII.

Pierwsza praca, w której doktorant jest pierwszym oraz korespondencyjnym autorem została zatytułowana „On defects' role in enhanced perpendicular magnetic anisotropy in Pt/Co/Pt, induced by ion irradiation”. Praca ta została opublikowana w marcu 2019 r. w dobrym czasopiśmie J. Phys.: Condens. Matter (współczynnik wpływu 2.7). Lektura tej publikacji i przegląd niektórych cytowanych w niej artykułów potwierdza przedstawiony przez autora w streszczeniu wniosek, że jest to rozszerzenie wcześniejszych prac nad modyfikacją anizotropii magnetycznej trójwarstw Pt/Co/Pt przy pomocy jonów. W tym kontekście autor nawiązuje do licznych artykułów dotyczących tego tematu, opublikowanych w przeszłości przez niektórych ze współautorów prezentowanego raportu, mam tu na myśli głównie Prof. A. Maziewskiego i Prof. A. Wawro. Jako wartość dodaną, zarówno w polskojęzycznym streszczeniu umieszczonym w rozprawie doktorskiej jak i we wstępie publikacyjnym, autor wskazuje dokumentację korelacji właściwości strukturalnych i magnetycznych badanych próbek. Ponadto porównując wyniki uzyskane w przeszłości przy pomocy jonów Ga z wynikami swoich eksperymentów z jonami Ar autor postuluje „uniwersalność” rozumianą jako niezależność opisywanych efektów od rodzaju użytych jonów. Można dyskutować czy podobne wyniki uzyskane dla zaledwie dwóch rodzajów jonów uprawniają do formułowania aż tak daleko idących

wniosków ale z pewnością takie rozumowanie nie jest całkiem bezpodstawne. Natomiast jeśli chodzi o korelacje właściwości strukturalnych i magnetycznych trójwarstw Pt/Co/Pt to faktycznie analiza publikacji autorstwa Pana Jakubowskiego potwierdza, że przy pomocy technik opisanych przez autora w rozdziale V rozprawy, dokonano w niej bardzo dokładnej analizy zmian strukturalnych wywołanych naświetlaniem jonami Ar. W szczególności wzięto pod uwagę efekty degradacji poszczególnych warstw, tworzenie się stopów, powstawanie naprężeń sieci krystalicznej oraz defektów. W największym skrócie, autor koncentruje się na wskazaniu strukturalnych czy morfologicznych mechanizmów modyfikujących anizotropię magnetyczną w dwóch charakterystycznych obszarach (gałęziach) map anizotropii magnetycznej na płaszczyźnie (F , d_{co}). Obszary te cechuje zwiększona siła prostopadłej anizotropii magnetycznej co faktycznie czyni je szczególnie ciekawymi. W tym miejscu chciałbym zwrócić uwagę na moim zdaniem bardzo ciekawe, sprytne z punktu widzenia eksperymentalnego i efektywne podejście do tematu zależności anizotropii magnetycznej od grubości warstwy oraz dozy wiązki naświetlającej, polegające na wytworzeniu próbek „dwu-klinowych”, w których powstają gradienty grubości i dozy wzdłuż dwóch wzajemnie prostopadłych kierunków w płaszczyźnie próbki (taką metodę zastosowano we wszystkich trzech publikacjach). Pozwala to na wyznaczenie trójwymiarowej mapy (anizotropia magnetyczna, grubość, doza) przy użyciu jednej próbki. W ten sposób autorzy uzyskują informację w szerokim zakresie dozy jonów i grubości Co, w sposób niezwykle efektywny a na dodatek eliminują często uciążliwy problem niepowtarzalności warunków preparatyki spotykany gdy konieczne jest wykonanie serii kilkunastu lub kilkudziesięciu podobnych próbek. Bardzo podoba mi się również sposób prezentacji tak uzyskanych map anizotropii w omawianych publikacjach. Wracając do tematu korelacji struktura-magnetyzm, autor z oczywistych względów zmuszony był do przygotowania również próbek jednorodnych (o wybranej grubości Co i konkretnej dozie jonów Ar). Dwie takie próbki odpowiadają właśnie dwóm interesującym gałęziom o podniesionej wielkości PMA. Efektem tych bardzo dokładnych, systematycznych i najwyraźniej bardzo dobrze zaplanowanych badań jest wskazanie źródeł indukujących anizotropię dla obu gałęzi PMA, oznaczonych jako F_{low} oraz F_{high} i odpowiadających mniejszej i większej dozie jonów, odpowiednio. W przypadku F_{low} autorzy upatrują wzrostu PMA indukowanego naprężeniami struktury krystalicznej oraz niewielkimi efektami mieszania się warstw graniczących ze sobą na tzw. międzywierzchniach lub używając slangu interfejsach. W przypadku gałęzi indukowanej większymi dawkami analiza prowadzi do wniosku, że PMA rośnie wskutek znacznie większego mieszania warstw na interfejsach, modyfikacji powierzchni próbki oraz zmiany (zmalenia) grubości warstwy ferromagnetycznej. Zostawiając na chwilę twarde dane z pomiarów właściwości strukturalnych prezentowane w publikacji, intuicyjnie rzecz biorąc mnie najbardziej przekonuje argument indukowanej jonami zmiany grubości warstwy Co. Malejąca grubość warstwy ferromagnetyka w naturalny sposób pociąga za sobą wzrost PMA, taki mechanizm dobrze zgadza się również z oczekiwanym i obserwowanym przez autorów przejściem do stanu paramagnetycznego (dla jeszcze większej dozy jonów). Niemniej jednak pozostałe mechanizmy indukujące PMA, na czele z mieszaniem warstw na interfejsach również dobrze pasują do wyobrażeń i intuicji recenzenta i autorów.

Druga z prac, zatytułowana „**Modifications of the magnetization ordering in Co/Mo/Co layers by Ga⁺ ion irradiation**” została opublikowana w bardzo cenionym czasopiśmie Applied Physics Letters, którego prestiż jest moim zdaniem znacząco wyższy niż by to wynikało jedynie z obecnego współczynnika wpływu, który za ostatnie 5 lat wynosi 3.40. Według bazy „Web of science”, do chwili obecnej praca ma 7 cytowań. W pracy tej autorzy skupili się na właściwościach magnetycznych układu Co/Mo/Co, który to układ w stanie nienaświetlonym i dla grubości obu warstw ferromagnetycznych wynoszących 3 nm wykazuje anizotropię magnetyczną o symetrii dwukrotnej, w płaszczyźnie próbki. Przed przystąpieniem do modyfikacji jonami, sprzężenie warstw Co zostało przez autorów przanalizowane w funkcji grubości przekładki Mo i okazało się być antyferromagnetyczne w przedziale (0.5, 1 nm) a ferromagnetyczne dla pozostałych grubości Mo. Wpływ naświetlania jonami badano ponownie w próbkach dwuklinowych (matrycowych), tym razem analizy właściwości magnetycznych (sprzężenia międzywarstwowego i anizotropii magnetycznej) dokonano w dwuwymiarowej przestrzeni

(d_{Mo} , F). W przypadku stanu referencyjnego o sprężeniu AFM ($d_{\text{Mo}} = 0.8 \text{ nm}$) wraz ze wzrostem F zaobserwowano początkowo stopniowy spadek siły sprężenia AFM a powyżej pewnej wartości krytycznej F sprężenie zmienia się na ferromagnetyczne. Dalszy wzrost dozy powoduje zmniejszanie namagnesowania w stanie nasycenia i w konsekwencji zanik ferromagnetyzmu warstw Co w temperaturze pokojowej. Dla grubszej (2.5 nm) przekładki Mo nie zaobserwowano zmiany charakteru sprężenia (jest ono ferromagnetyczne) w funkcji F a jedynie przejście do stanu paramagnetycznego. Zmianie nie ulega również charakter anizotropii magnetycznej w płaszczyźnie próbki – osie łatwa i trudna zachowują stałą orientację aż do utraty właściwości ferromagnetycznych. Już sama obserwacja powyższych efektów jest bardzo ciekawa jednak w oczywisty sposób narzuca się pytanie jakie mechanizmy są za te efekty odpowiedzialne. Odpowiedzi, moim zdaniem przekonującej i w dużej mierze wyczerpującej, autorzy udzielają bazując na symulacjach wykonanych w programie TRIDYN. Na podstawie bardzo klarownie zaprezentowanych w publikacji map (koncentracja Co, głębokość w próbce, doza) autorzy wnioskują, że zmiana charakteru sprężenia następuje, gdy stężenie Co w warstwie Mo osiąga 20 %, natomiast zanik właściwości ferromagnetycznych następuje gdy koncentracja atomów Co jest poniżej 80 %. Drugi z wniosków znajduje potwierdzenie w obliczeniach cytowanych przez autorów i jest w prosty sposób interpretowany jako efekt odpowiedniej liczby „niemagnetycznych” atomów (w tym przypadku Mo) sąsiadujących z atomami Co. W pierwszym przypadku wskazanie faktycznych mechanizmów prowadzących do zmiany charakteru sprężenia jest w rzeczy samej trudniejsze, autorzy słusznie wskazują kilka możliwych czynników, np. powstawanie ferromagnetycznych „mostków” w przekładce Mo czy wzrost szorstkości na interfejsach. Wykonane przez doktoranta symulacje w programie TRIDYN i ich interpretację uważam zatem za bardzo istotny przyczynek do publikacji D2. Należy również pamiętać, że zgodnie z oświadczeniem autora rozprawy był on również odpowiedzialny za planowanie i dobór parametrów wiązki w procesie naświetlania jonami (tyczy się to również publikacji D3, którą opiszę poniżej). Na tej podstawie trudno określić czy wkład doktoranta w powstanie publikacji D2 był wiodący, można jednak z całą pewnością stwierdzić, że był to udział znaczny i ważny z punktu widzenia interpretacji uzyskanych wyników.

Trzecia praca stanowiąca rozprawę została opublikowana w prestiżowym czasopiśmie Phys. Rev. Applied (współczynnik wpływu 4.19) i ma już 12 cytowań. Jak sam autor zauważa w streszczeniu pracy, jest ona rozszerzeniem publikacji D2 polegającym na zastosowaniu innych rodzajów jonów oraz bardziej wnikliwej analizie zmian strukturalnych. Metodyka przyjęta w pracy to kontynuacja sprawdzonych wcześniej rozwiązań, które częściowo już podsumowałem. Jakościowe zmiany właściwości magnetycznych pod wpływem naświetlania różnymi rodzajami jonów są takie same. Jeśli dobrze rozumiem to energie jonów Ga, Ar i Ne zostały celowo dobrane (35, 30 i 17 keV odpowiednio) tak by wywołać w warstwie Mo rozdzielającą warstwy ferromagnetyczne, podobne zmiany strukturalne. W rzeczy samej, naświetlając trzema rodzajami jonów uzyskano bardzo podobną modyfikację właściwości magnetycznych badanych układów. Za ciekawą uważam również propozycję wykorzystania techniki FIB do stworzenia sterowalnego kryształu magnonicznego. Czy są jakieś nowe wyniki z tym związane?

Podsumowując, przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi spójny tematycznie i ciekawy opis właściwości magnetycznych cienkowarstwowych układów ferromagnetycznych. W pracy zaprezentowano możliwość kontrolowanej modyfikacji anizotropii magnetycznej oraz sprężenia międzywarstwowego przy pomocy naświetlania jonami. Uważam, że zaprezentowane wyniki stanowią duży wkład do rozwoju dziedziny magnetyzmu cienkich warstw. Na tej podstawie stwierdzam, że praca spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i może być dopuszczona do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Michał Słezak

23.11.2020