

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Eweliny Milińskiej pt.:
**„Właściwości magnetyczne strukturyzowanych układów
zawierających ultracienką warstwę Co”**

wykonanej w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie.

W przedstawionej do recenzji rozprawie mgr Ewelina Milińska opisała oryginalne badania magnetycznych właściwości struktur o submikronowych rozmiarach planarnych, zwanych kropkami ferromagnetycznymi. Kropki wytworzyła osadzając warstwę kobaltu (z wykorzystaniem technologii epitaksji z wiązki molekularnej – MBE) na specjalnie w tym celu przygotowanym strukturyzowanym podłożu. Strukturyzacja podłoża polegała na wyhodowaniu samoorganizujących się złotych wysepek na warstwie molibdenu. Warstwa kobaltu pokrywająca wysepki ze złota tworzyła kropki, bowiem miała inne właściwości magnetyczne niż ta sama warstwa kobaltu pokrywająca molibden, otaczający złote wysepki. Kształt złotych wysepek, ich rozmiary i gęstość powierzchniową Autorka kontrolowała poprzez ustawienie odpowiedniej temperatury podłoża podczas ich osadzania i poprzez dobranie odpowiedniej ilości osadzanego materiału. Topografię powierzchni kropek ferromagnetycznych obrazowała za pomocą mikroskopii sił atomowych (AFM), natomiast ich właściwości magnetyczne badała z wykorzystaniem magnetooptycznej mikroskopii i milimagnetometrii kerrowskiej (MOKE) oraz mikroskopii sił magnetycznych (MFM). Posłużyła się także symulacjami mikromagnetycznymi, modelując za pomocą oprogramowania OOMMF i LLG wpływ czynników strukturalnych kropek na ich stan magnetyczny i na proces ich przemagnesowania. Właściwości strukturalne interfejsów molibden/kobalt i złoto/kobalt w warstwach referencyjnych monitorowała *in-situ* za pomocą dyfrakcji wysokoenergetycznych elektronów (RHEED) oraz *ex-situ* za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), reflektometrii rentgenowskiej (XRR) i spektroskopii absorpcyjnej w pobliżu krawędzi absorpcji (XANES). Dodatkowo wyznaczyła wielkość momentu magnetycznego indukowanego na atomach molibdenu w układach wielowarstwowych

molibden/kobalt, posługując się technikami synchrotronowymi, takimi jak spektroskopia absorpcyjna w pobliżu krawędzi absorpcji (XANES) i rentgenowski magnetyczny dichroizm kołowy (XMCD).

Naszukowana powyżej zawartość rozprawy pozwala na natychmiastowe sformułowanie co najmniej dwóch wniosków, mających istotne znaczenie dla jej oceny.

Po pierwsze: tematyka badawcza podjęta przez Autorkę jest – moim zdaniem – bardzo ważna i aktualna, bowiem strukturyzowane magnetyczne układy niskowymiarowe są obecnie jednym z wiodących zagadnień współczesnej fizyki magnetyzmu z uwagi na swoje ciekawe właściwości i ogromny potencjał aplikacyjny. Autorka uzyskała oryginalne wyniki i wniosła istotny wkład w przecieranie jednej z bardzo obiecujących ścieżek umożliwiających tworzenie magnetycznych nanostruktur, jaką jest jednoczesne wykorzystanie efektu samoorganizacji podczas epitaksjalnego wzrostu i efektu zależności magnetycznych właściwości ultracienkiej warstwy ferromagnetycznej od rodzaju warstw z nią sąsiadujących.

Po drugie: w trakcie swych prac Autorka posłużyła się wieloma wyrafinowanymi i nowoczesnymi metodami preparacyjnymi i badawczymi, co z jednej strony było warunkiem koniecznym osiągnięcia postawionych ambitnych celów, ale z drugiej strony wymagało włożenia ogromnego wysiłku w opanowanie tych metod i wykorzystania możliwości współpracy z innymi ośrodkami naukowymi krajowymi i zagranicznymi. Autorce udało się wytworzyć za pomocą adekwatnych technik nowatorski materiał o z góry zaplanowanej nanostrukturze, a następnie kompleksowo przebadać jego właściwości magnetyczne i wykazać związki pomiędzy właściwościami strukturalnymi i magnetycznymi. Ten fakt całościowej realizacji eksperymentalnego złożonego dzieła badawczego od samego początku, od optymalizacji warunków preparacji próbek, poprzez wykonanie niezbędnych badań, a na modelowaniach numerycznych kończąc, znakomicie podnosi – w mojej ocenie – wartość całej rozprawy i świadczy o ogromnej pracowitości Autorki.

Rozprawa wydrukowana została w formie książki o formacie trochę mniejszym od A4 (dokładnie 163mm×235mm) i ma stosunkowo dużą objętość, bowiem liczy łącznie 242 strony. Rozpoczyna się streszczeniem (także w wersji angielskiej) i jest podzielona na jedenaście rozdziałów. Pierwszy rozdział stanowi wstęp ogólny i omawia podstawowe magnetyczne układy strukturyzowane i metody ich wytwarzania. Rozdział drugi jest wstępem bardziej szczegółowym i zawiera informacje o epitaksjalnym wzroście układów

cienkowarstwowych oraz o podstawowych oddziaływaniach magnetycznych występujących w ciele stałym. Rozdział trzeci poświęcony jest zjawiskom fizycznym, na których oparte jest działanie technik eksperymentalnych wykorzystanych przez Autorkę. Rozdział czwarty traktuje o najważniejszych szczegółach preparatyki próbek i zastosowanych metod badawczych. Na pierwszy rzut oka mogłoby się wydawać, że rozdziały trzeci i czwarty powinny stanowić jeden rozdział. Ale po chwili zastanowienia należy zgodzić się z podziałem zaproponowanym przez Autorkę, bowiem przy stosunkowo dużej liczbie wykorzystanych w rozprawie technik badawczych, odrębny rozdział przypominający ich podstawy fizyczne jest jak najbardziej na miejscu, podobnie jak odrębny rozdział o zastosowanych w poszczególnych eksperymentach konkretnych sprzętowych nastawach, konfiguracjach i parametrach. Kolejnych sześć rozdziałów zawiera oryginalne wyniki badań, ich opracowanie i dyskusję.

Rozdział piąty prezentuje wyniki zabiegów technologicznych mających na celu wytworzenie kropek ferromagnetycznych. Najważniejszym rezultatem jest tu stwierdzenie, że optymalnym buforem do epitaksjalnego wzrostu złota jest atomowo gładka warstwa molibdenu, osadzona na szafirowym podłożu w temperaturze ok. 900°C, i że jeżeli złoto jest osadzane na takim buforze w temperaturze pokojowej, a następnie zostanie wygrzane w temperaturze powyżej 200°C przez 30 minut, to utworzy warstwę ciągłą o niewielkiej szorstkości, natomiast jeżeli jest osadzane w temperaturze powyżej 500°C, to utworzy regularne samoorganizujące się sześciokątne wyspy o rozmiarach od kilkudziesięciu nanometrów do jednego mikrona, w zależności od temperatury osadzania i od ilości osadzanego materiału. Osadzenie w kolejnym etapie na tak przygotowanych podłożach warstwy kobaltu pozwala na uzyskanie odpowiednio albo próbek o warstwach ciągłych, pełniących rolę próbek referencyjnych, albo kropek ferromagnetycznych.

Rozdział szósty przedstawia wyniki badań wpływu ciągłych warstw sąsiadujących, zbudowanych ze złota albo z molibdenu, na właściwości strukturalne i magnetyczne ultracienkiej ciągłej warstwy kobaltu. Najbardziej istotne ze względu na główny cel pracy jest tu wykazanie, że w pewnym zakresie grubości warstwy kobaltu (a konkretnie w zakresie od 1.1 nm do 1.8 nm), oś łatwa namagnesowania kobaltu jest zorientowana prostopadle do płaszczyzny warstwy w przypadku, gdy kobalt osadzony jest na złocie, natomiast w przypadku gdy jest osadzony na molibdenie – równolegle. Ten fakt stanowi podstawę różnicowania właściwości magnetycznych kobaltu osadzonego na złotej wysepce względem kobaltu osadzonego na molibdenowej matrycy w zaproponowanej przez Autorkę metodzie wytwarzania kropek ferromagnetycznych.

Rozdział siódmy omawia wyniki badań układu molibden/kobalt metodami synchrotronowymi. Jest to zagadnienie ciekawe samo w sobie, ale stanowi swego rodzaju dodatek w stosunku do głównej tematyki pracy. Autorka wykazała indukowanie niewielkiego momentu magnetycznego na atomach molibdenu położonych w pobliżu warstwy kobaltu.

Rozdział ósmy jest – można powiedzieć – kulminacyjnym rozdziałem całej rozprawy, bazującym na wynikach uzyskanych w rozdziałach piątym i szóstym. Prezentuje podstawowe właściwości magnetyczne kropek indukowanych w warstwie kobaltu przez strukturyzowane podłoże w postaci złotych wysepek na molibdenie. Dla odpowiedniego zakresu grubości kobaltu Autorka uzyskała kropki magnetyczne, które występowały dokładnie w miejscach złotych wysepek i które miały właściwości magnetyczne znacząco różniące się od właściwości magnetycznych obszarów otaczających wysepki. Kropki charakteryzowały się namagnesowaniem prostopadłym do płaszczyzny warstwy, stanem monodomenowym, stosunkowo dużym polem koercji, a więc stabilnością magnetyczną w stanie remanencyjnym, i możliwością przemagnesowywania za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego. Chciałbym w tym miejscu zwrócić uwagę na rys. 8.4 na str. 135, który w piękny sposób ilustruje najważniejszy wynik uzyskany w rozprawie. Na rysunku tym Autorka zestawiała razem krzywe histerezy zmierzone metodami magnetooptycznymi dla kropek i dla ciągłych warstw referencyjnych o trzech różnych grubościach kobaltu, oraz krzywe modelowe wyliczone dla kropek jako kombinacja liniowa krzywych referencyjnych ze współczynnikami proporcjonalnymi do powierzchni zajmowanej przez kropki. Podobieństwo w charakterze krzywych zmierzonych dla kropek i wymodelowanych jest tutaj bardzo wymowne i wyjaśnia wszystko.

Rozdział dziewiąty zawiera wyniki pomiarów procesu przemagnesowania kropek ferromagnetycznych za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego. Autorka wykazała, że po przyłożeniu pola magnetycznego o odpowiedniej wartości (tym większej im mniejsza jest średnica kropki) przemagnesowanie pojedynczej kropki polega na zarodkowaniu w środku kropki domeny o przeciwnej orientacji magnetyzacji i na następującym natychmiast po tym gwałtownym ruchu ściany domenowej w kierunku krawędzi.

Rozdział dziesiąty prezentuje wyniki symulacji mikromagnetycznych, dotyczące wpływu kształtu kropki (kółko, sześciokąt, trójkąt), jej wielkości (od 50 nm do 800 nm), szerokości krawędzi (3 nm, 5 nm lub 10 nm), stanu krawędzi (anizotropia większa lub mniejsza od anizotropii rdzenia) i zawartości defektów na proces przemagnesowania. Warto zwrócić tutaj uwagę na rys. 10.20 na str. 198 podsumowujący znaczną część symulacji i będący jakościowym diagramem fazowym właściwości magnetycznych kropek w

funkcji rozmiaru kropek i szerokości krawędzi (wrysowanym oddzielnie dla dwóch przypadków różnej wielkości anizotropii krawędzi).

Rozdział jedenasty, ostatni, stanowi podsumowanie.

Rozprawę zamyka spis literatury, liczący 174 pozycje, oraz trzy dodatki zawierające szczegółowe informacje na temat symulacji widma absorpcji XANES, symulacji mikromagnetycznych oraz dorobku naukowego Autorki.

Układ rozprawy jest – w mojej opinii – logiczny i bardzo przejrzysty. Autorka w właściwy sposób posegregowała prezentowane informacje pomiędzy poszczególne rozdziały i podrozdziały. Wrażenie porządku i spójności całej rozprawy potęgują dodatkowo częste odsyłacze z jednych rozdziałów do drugich oraz komentarze podsumowujące wyniki uzyskane we wcześniejszych partiach rozprawy w kontekście celów stawianych do osiągnięcia w kolejnych jej częściach. Rozprawę czyta się dobrze, tok narracji jest gładki. Odsyłacze do rysunków i opisy rysunków są zgrabnie wkomponowane w tekst, a podpisy pod rysunkami zawierają kompletne informacje, ułatwiające zrozumienie prezentowanych zagadnień.

Wyniki zawarte w rozprawie uważam za bardzo cenne i rzetelnie opracowane. Autorka wyczerpująco udokumentowała optymalizację procesu preparacji nanostruktur, przedstawiła kompleksowe dane eksperymentalne niezbicie potwierdzające możliwość wytworzenia kropek ferromagnetycznych w zaproponowany przez siebie sposób, dokonała przejrzystej analizy i interpretacji uzyskanych rezultatów, a na polu eksperymentalnie niedostępnym z powodzeniem zastosowała symulacje mikromagnetyczne. Zawartość rozprawy świadczy o tym, że przygotowała ją osoba, która osiągnęła niezbędną biegłość fizyka-eksperymentatora, potrafiącego z powodzeniem sprostać trudom uprawiania współczesnej nauki i umiejącego w pełni wykorzystać możliwości nowoczesnych narzędzi badawczych.

Podsumowując powyższe uwagi, pragnę wyrazić jednoznacznie pozytywną ocenę merytorycznej zawartości rozprawy mgr Eweliny Milińskiej. Autorka podjęła bardzo ciekawą tematykę, przygotowała odpowiednie próbki i uzyskała wartościowe wyniki, które opracowała, przedstawiła i przedyskutowała w sposób prawie niebudzący zastrzeżeń. Moją pozytywną ocenę wzmacnia dodatkowo fakt, że w tej tematyce mgr Ewelina Milińska może poszczycić się współautorstwem czterech artykułów opublikowanych w prestiżowych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym, takich jak *Physical Review B*,

IEEE Transactions on Magnetics, Journal of Magnetism and Magnetic Materials oraz *Journal of Applied Physics*, przy czym w przypadku dwóch publikacji jej nazwisko znajduje się na pierwszym miejscu na liście autorów.

Jeżeli chodzi o formalną stronę prezentacji wyników, to mam parę zastrzeżeń, które wymienię w kolejności pojawiania się ich w trakcie czytania rozprawy.

W Spisie treści na str. viii brakuje istotnej i w miarę obszernej (bo liczącej 11 stron) pozycji o nazwie: Referencje, rozpoczynającej się od str. 215.

W streszczeniu rozprawy na str. 1 znajduje się niejasne zdanie: „Występuje on (tzn. *jednodomenny stan magnetyczny*) dla **szerokiego zakresu kropek** ...”. Autorka nie precyzuje tutaj, jaki zakres ma na myśli, bowiem w poprzednich zdaniach pisała o kilku zmieniających się parametrach, takich jak rozmiary planarne kropek, ich grubość czy wreszcie rodzaj warstwy podłoża lub warstwy przykrywającej.

W streszczeniu na str. 2 znajduje się niezręczne sformułowanie: „... indukowanie się momentu magnetycznego na atomach Mo **wskutek efektu bliskości** z warstwą Co w układach wielowarstwowych Mn/Co.” Podobne sformułowanie „**pod wpływem efektu bliskości**” pojawia się jeszcze na str. 18.

Na pierwszym pojawiającym się w rozprawie rysunku z topografią AFM (rys. 5.1(a)-(e), str. 74), nie jest podana jednostka przestrzennej skali obrazów (ani na obrazku, ani w podpisie pod rysunkiem, ani w tekście pracy). Można się jedynie domyślać, że chodzi tu o mikrometry. Na prawie wszystkich następnych tego typu rysunkach informację o skali można łatwo znaleźć, za wyjątkiem rys. 9.4 na str. 163, i rys. 10.4 na str. 176, gdzie też Autorka zmusza czytelnika do snucia domysłów.

Na tym samym rys. 5.1 na str. 74 brakuje też skali barw reprezentujących wysokości poszczególnych punktów, co w przypadku obrazów topograficznych jest sprawą istotną. Skali barw nie można się doszukać również na prawie wszystkich innych rysunkach AFM, tj. na rysunkach: 5.3, 5.4, 5.5, 8.10, 8.11, 8.12, 8.13, 9.6 i 10.1. Jedynie na rys. 9.3 taka skala istnieje, ale zastosowana w niej czcionka jest na tyle mała, że nazwy jednostki nie da się odczytać.

Rys. 5.2 na str. 75 zawiera obrazki zdecydowanie za małe i za blade, a przez to prawie kompletnie nieczytelne.

Na str. 186 znalazłem błędne odwołanie do rysunku w zdaniu: „Dla kropek z obniżoną anizotropią krawędzi, której szerokość wynosi 3 nm, proces przemagnesowania rozpoczyna się na brzegu struktury (rys. **10.13(b)**).” Powinno tu być: **rys. 10.13(c)**.

Na rysunkach: 10.13, 10.14, 10.17, 10.18, 10.24, 10.25, 10.27 i 10.28, przedstawiających dwuwymiarowe przestrzenne rozkłady magnetyzacji w kropkach uzyskane w symulacjach, rzuca się w oczy brak skali barw kodujących prostopadłą składową magnetyzacji. Całkowicie została też pominięta informacja o składowych magnetyzacji w płaszczyźnie (zazwyczaj przedstawiana w postaci strzałek), co w przypadku wystąpienia w modelowanych rozkładach ściany domenowej może być informacją ciekawą.

Pragnę nadmienić, że wymienione powyżej niedociągnięcia nie mają zbyt dużego wpływu na moją ocenę rozprawy jako całości.

Pod względem językowym rozprawa napisana jest bardzo starannie, o czym może świadczyć znikoma liczba błędów gramatycznych i literowych, jakie udało mi się zauważyć, przy tak dużej objętości tekstu. Wymienię je – dla porządku – poniżej. Wszystkie wytluszczenia tekstu w poniższych cytatach zaczerpniętych z rozprawy, zostały dodane przeze mnie.

Str. 10: „Stosowane różne techniki wytwarzania, kształt, rozmiar i gęstość powierzchniowa wpływają na strukturę domenową oraz **mechanizmem** przemagnesowania kropek.”

Str. 38: „**Taka zjawisko** może wystąpić dla pierwiastków, które są bliskie spełnienia **kryterium Stonera istnienie ferromagnetyzmu ...**”

Str. 127: „Takie wytłumaczenie jest **zgodne ze niższym** indukowanym momentem w układach warstwowych w porównaniu z referencyjną warstwą w postaci stopu.”

Str. 159: „Wolny skan powoduje w tym samym czasie powolne **przesuwanie igły górej/dół mierzzonego pola**”.

Jak widać lista usterek językowych jest bardzo krótka i ma ona oczywiście zerowy wpływ na moją ocenę całej rozprawy.

Reasumując stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr Eweliny Milińskiej do publicznej obrony przygotowanej przez nią rozprawy.

Marek Kisielewski