

Recenzja  
pracy doktorskiej mgr Katarzyny Buchty  
**Właściwości kolumnowych struktur magnetycznych kobaltu**

Promotor pracy dr hab. Tadeusz Luciński

**Wybór tematu i cel pracy**

Praca doktorska pani mgr Katarzyny Buchty omawia wytwarzanie, budowę i proces przemagnesowania cienkich warstw kobaltu o niejednorodnej wewnętrznej budowie. Stosując technikę nanoszenia pod kątem (Glancing Angle Deposition – GLAD), w połączeniu z możliwością obrotu podłoża, doktorantka osadza warstwy, które zbudowane są w postaci gęsto upakowanych kolumn, maczug bądź zygzaków. Słusznie, za nazwą używaną w literaturze, nazywa je rzeźbionymi. W okresie kiedy interesowano się genezą indukowanej anizotropii jednoosiowej w cienkich warstwach (lata 60. minionego stulecia), nanoszono pod kątem warstwy ferromagnetyczne (NiFe, Co, Fe), które wyrastały w postaci anizotropowo zorientowanych kolumn. Kierunek osi łatwego magnesowania pokrywał się z kierunkiem tekstury wzrostu warstwy. Rozwój technik nanoszenia warstw w warunkach ultra wysokiej próżni (UHV) oraz technik kontroli ich wzrostu podczas nanoszenia, spowodował w ostatnim dziesięcioleciu, powrót do tych badań, głównie do badań procesów: adhezji, cieniowania samoorganizacji, budowy zarodka/wyspy. Na przykład prace: PRB vol. 63 104431 (2001) *Influence of the deposition angle on the magnetic anisotropy in thin Co films on Cu(001)*, APL vol.77 (2000) 2030 *Growth-induced uniaxial anisotropy in grazing-incidence deposited magnetic films*.

Pani mgr Katarzyna Buchta dysponuje aparaturą do nanoszenia warstw epitaksjalnych z wiązki molekularnej (MBE) wyposażoną w obrotowy uchwyt podłoża, komorę analityczną ze spektrometrem XPS i mikroskopem AFM. Świetna aparatura, ale cel badań bardzo skromny „wytworzenie i zbadanie właściwości transportowych i magnetycznych warstw kobaltu osadzanych metodą GLAD” (str. 65, rozdział 6 - *Wyniki pomiarów i ich dyskusja*).

We wstępie, w części w której zwykle formułuje się oryginalną tezę (nowy pomysł), znajdujemy spis prostych zadań badawczych, niestety nie na miarę tego bardzo nowoczesnego urządzenia, którym doktorantka dysponowała.

**Treść pracy i uwagi ogólne**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy 146 stron i można w niej wyróżnić dwie podstawowe części. Pierwsza część (cztery rozdziały) to rozdziały opracowane na podstawie literatury, są one dobrze opracowane, choć bardzo istotny problem wpływu rodzaju podłoża na procesy homo- i heteroepitaksji został całkowicie pominięty w dyskusji modelu wzrostu warstw.

Procesy przemagnesowania doktorantka omawia dla przypadku sferycznej cząstki o kształcie wydłużonej elipsoidy w oparciu o model obrotów jednorodnych namagnesowania Stonera-Wohlfatha i wirowy Aharoniego-Freia (w rozdziale 4.4.2 *Przemagnesowanie wirowe, model Aharoniego-Freia*, brak cytowania pracy Frei, S. Shtrikman, D. Treves PR, vol.106, 446 (1957)). Rozważania te uzupełnia o przykłady przemagnesowania matrycy nanodrutów (par. 4.4.3). Przypadek ten dyskutuje w oparciu o wyniki prac Goolaup et al. (Eur. Phys. J. B vol. 44,259 (2005) i Phys Rev.B vol.75 144430 (2007)), w których omawiane są procesy przemagnesowania, strukturyzowanych z ciągłej warstwy NiFe, nanodrutów. Istotna jest dla tego przypadku, analiza pola koercji/nukleacji w funkcji kierunku przyłożenia zewnętrznego pola magnetycznego względem długiej osi nanodru (przy założeniu nieskończonego cylindra, wzór 4.29, str. 39). Zależność ta jest parametryzowana czynnikiem  $a$  (wyrażającym stosunek średnicy krytycznej do rzeczywistej nanodrutu), który określa przejście od procesów koherentnego przemagnesowania do wirowego. Jeśli średnica krytyczna jest dużo większa od rzeczywistej proces jest koherentny, jeśli natomiast jest mniejsza proces jest wirowy. Analiza kątowa pola koercji w oparciu o wzór (4.29), zdaniem doktorantki, jest kluczowym dowodem na wirowy proces przemagnesowania rzeźbionych struktur warstw Co.

Doktorantka, podobnie jak w przypadku analizy magnetycznej pętli histerezy  $M(H)$ , omawia na podstawie literatury, pola przełączania (w tym przypadku skoki magnetooporu) dla nanodrutów NiFe i Co. Mikromagnetyczna analiza zależności kątowej pól przełączania nanodrutu, w oparciu o model zamian dynamicznych namagnesowania Landau Lifszica Gilberta, wskazuje na występowanie przejść od procesu koherentnego do wirowego.

Rozdział 5. to opis użytej do badań aparatury w celach: otrzymywania, charakteryzowania strukturalnego, pomiarów magnetycznych i magnetooporowych rzeźbionych warstw Co. Doktorantka w rozdziale 5.1 opisuje aparaturę MBE i jej wyposażenie, nasuwa się istotne pytanie, czy komora analityczna aparatury MBE wyposażona jest w dyfrakcję nisko energetycznych elektronów LEED?, pozwalającą na określenie struktury krystalograficznej fazy zarodkowania rosnącej warstwy Co, to istotna i podstawowa informacja do dalszej analizy próbek (proszę o wyjaśnienie tej kwestii podczas obrony).

Omówienie ogólnych zasad działania mikroskopu skaningowego SEM (rozdział 5.2), czy mikroskopów AFM i STM (rozdział 5.5) jest w przypadku tej pracy zbędny, gdyż z jednego „kliknięcia” dowiadujemy się wszystko na ten temat z internetu. Bardziej wartościowe byłyby opisy ze szczegółami eksperymentalnymi nawiązujące do przeprowadzonych w pracy badań.

Badania własne mgr Buchta opisała w rozdziale 6 (*Wyniki pomiarów i ich dyskusja*), rozpoczynają się od opisu budowy otrzymanych struktur i warunków ich nanoszenia metodą GLAD. Wytworzyła: kolumny, kolumny/maczug i zygzaki, wszystkie nanosiła na utlenione podłoże Si [100]. Niestety nie podała, jak gruba była warstwa tlenku krzemu?, czy podłoże można uznać za amorficzne? czy może zachodził proces epitaksji? Nie określiła tekstury wzrostu i struktury krystalograficznej (Co fcc czy hcp?), są za to bardzo dobre zdjęcia ze skaningowego mikroskopu elektronowego obrazujące kształt: kolumn, kolumn/maczug i zygzaków. Niestety brak ilościowej analizy na przykład w funkcji całkowitej grubości warstwy: kąta nachylenia kolumn, średnicy kolumn, kąta między zygzakami. Morfologie powierzchni struktur kolumnowych i zygzakowatych (rozdział 6.2) mgr Buchta zobrazowała za pomocą mikroskopu AFM w projekcji 2D i 3D, wyznaczyła profil nierówności, wykazała bardzo silną szorstkość powierzchniową (do 25% grubości nominalnej), która rośnie ze wzrostem grubości warstwy (ilości ramion zygzaków) Co.

Pomiary pętli histerezy dla wszystkich kształtów struktur rzeźbionych doktorantka wykonała w zakresie od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  w zewnętrznym polu magnetycznym zmieniającym się co



5° względem normalnej do powierzchni próbki (rozdział 6.3). Z znormalizowanych pętli wyznaczyła pole koercji ( $H_c$ ) i stosunek namagnesowania remanencji do namagnesowania nasycenia (parametr  $S$ ). Na podstawie pomiarów  $H_c$  od kąta przyłożenia pola magnetycznego, stosując wzór (4.29) z pracy Aharoni, Shtrikman PR vol.109, 1522 (1958), poprzez dopasowanie danych eksperymentalnych do wzoru, wyznaczyła parametr  $a$  określający przejście od procesu obrotów jednorodnych do wirowych. Z tabeli 6.2 (str. 107) wynika, że dla kolumn model Aharoni-Shtrikman-Frei spełniony jest najlepiej. Niestety mgr Buchta nie wyznaczyła średnicy kolumny i nie porównała jej z pomiarami z obrazów mikroskopu skaningowego czy AFM.

Należy się zgodzić z wnioskiem pani Buchty, że w przypadku struktur zygzakowatych, w szczególności wieloramiennych (4. i 6. ramion), proces przemagnesowania jest złożony, gdyż powstaje struktura wskazująca na dwie wartości anizotropii.

Ważnym wynikiem badań mgr Buchty jest wykazanie, że ciągle warstwy Co nanoszone w kierunku prostopadłym do podłoża wykazują pole koercji 0.02 kOe, kolumny 1 kOe a zygzaki 4 kOe.

Pętla magnetooprowe dla struktur kolumnowych (rozdział 6.5.1) potwierdzają zmiany kątowe pola koercji wyznaczone z pętli namagnesowania. W przypadku 6. ramiennych zygzaków skoki magnetooporu są zgodne są z polem koercji warstwy magnetycznie twardszej.

Maksymalne wartości magnetooporu wynoszą dla kolumn 0.90% dla zygzaków 0.59% i są zdecydowanie za małe aby mogły mieć praktyczne zastosowanie.

Pracę kończy ogólne podsumowanie i wypunktowane najważniejsze wnioski. Na końcu rozprawy znajdujemy 131 pozycji literaturowych, w tym jedna praca, w której pierwszym autorem jest mgr Buchta.

### Uwagi szczegółowe

Układ treści pracy doktorskiej jest prawidłowy, rozdziały zostały ułożone logicznie, forma graficzna bardzo staranna. Praca napisana jest prostym, prawidłowym językiem polskim. W rozdziale 6 *Wyniki pomiarów i ich dyskusja*, autorka pracy, ograniczyła się głównie do relacji z wyników pomiaru, zauważa się brak dostatecznie głębokiej naukowej analizy i dyskusji mechanizmów fizycznych.

Proszę o wyjaśnienie:

- dlaczego nie wyznaczono stałych anizotropii,
- dlaczego wykonano tylko pomiary przemagnesowania, w zewnętrznym polu magnetycznym rotującym od kierunku prostopadłego do płaszczyzny, a nie przeprowadzono pomiarów pętli histerezy  $M(H)$  i magnetooporowych w płaszczyźnie próbki i kierunkach narzuconych teksturą wzrostu, podobnie do eksperymentów opisanych w rozdziałach 4.4.3 i 4.5.1.

W podpisach pod rysunkami 6.48 i 6.49 jest odwołanie do złego wzoru, jest (6.2), powinno być (4.29). Na str. 121 w podsumowaniu parametr  $a$  jest źle interpretowany.

## Ocena pracy

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska autorstwa pani mgr Katarzyny Buchty „*Właściwości kolumnowych struktur magnetycznych kobaltu*” zawiera oryginalne wyniki, a doktorantka wykazała się dużą wiedzą i umiejętnościami stosowania różnorodnych nanotechnologicznych metod badawczych potrzebnych do charakteryzowania cienkich warstw magnetycznych.

Z całą stanowczością chciałbym podkreślić, że eksperymentalny cel pracy - zbadanie właściwości kolumnowych struktur magnetycznych kobaltu został osiągnięty. Na szczególne podkreślenie zasługują następujące nowe osiągnięcia:

- opracowanie metod nanoszenia metodą GLAD - MBE struktur Co,
- opracowanie metod charakteryzacji z użyciem mikroskopu SEM (przekroje poprzeczne, geometria struktury wewnętrznej) i AFM (morfologia powierzchni – obrazowanie 2D i 3D),
- próba analizy procesów przemagnesowania na podstawie interpretacji magnetycznych i magnetooporowych pętli histerezy.

Pracę oceniam dobrze. Moje szczególne uznanie jest za staranny i systematyczny eksperyment. Mgr Katarzyna Buchta wykazała dojrzałość w zakresie programowania celów i metod badawczych, a także umiejętność prawidłowego wnioskowania i prezentacji wyników.

Przedstawione powyżej uwagi krytyczne nie umniejszają wymienionych zalet pracy.

## 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 Naukowej Instytutu Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu o dopuszczenie pani mgr Katarzyny Buchty do publicznej obrony.

