

Prof. dr hab. Józef Korecki  
Zakład Fizyki Ciała Stałego  
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej  
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie  
oraz  
Instytut Katalizy i Fizykochemii Powierzchni  
PAN

**Ocena rozprawy habilitacyjnej  
doktora Macieja Urbaniaka  
"Właściwości magnetyczne i magnetoopór warstw wielokrotnych typu  
[NiFe/Au/Co/Au]<sub>N</sub>"  
oraz jego dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego**

**Ocena rozprawy habilitacyjnej**

Cienko- i wielowarstwowe układy z prostopadłym namagnesowaniem zajmują niezwykle istotną pozycję w katalogu problematyki magnetyzmu niskowymiarowego, zarówno ze względu na szeroką gamę obserwowanych zjawisk, jak i, a może przede wszystkim, ze względu na ich potencjalne zastosowania. W układach wielowarstwowych ważne stają się ponadto oddziaływania międzywarstwowe, które prowadzić mogą do skomplikowanych struktur namagnesowania, począwszy od ferro- i antyferromagnetycznego, a skończywszy na niekolinearnym uporządkowaniu namagnesowania podwarstw. Ten ostatni przypadek jest tyleż interesujący, co skomplikowany, zwłaszcza, jeśli układ warstw wielokrotnych zawiera różne podwarstwy magnetyczne, tak jak w przypadku recenzowanej rozprawy. Takie układy wielowarstwowe z naprzemiennym typem anizotropii w kolejnych warstwach zostały zaproponowane w pracy eksperymentalnej (Mancoff et al. Appl.Phys. Lett. 2000) oraz teoretycznej (Taga et. al. Nature 2000). Kolejne warstwy ferromagnetyczne oddzielone niemagnetyczną przekładką dobierane są tak, aby ich anizotropia magnetyczna faworyzowała kierunek namagnesowania na przemian, raz w płaszczyźnie warstw, raz do nich prostopadle. Taki dobór warstw składowych pozwala na stabilizację sztucznego, niekolinearnego uporządkowania magnetycznego, co może znaleźć zastosowania w dziedzinie sensorów pól magnetycznych.

Tematyka układów wielowarstwowych z mieszaną anizotropią pojawia się w pracach zespołu profesora Feliksa Stobieckiego w roku 2004. Warstwy dające różnego typu anizotropię to stop NiFe o składzie bliskim permaloju (grubość ok. 2

nm, oś łatwa w płaszczyźnie) oraz ultracienki kobalt (w zakresie grubości ułamka do ok. 2 nm, oś łatwa prostopadła dla grubości mniejszej od ok. 1.2 nm), przedzielone warstewką złota o zmiennej grubości. Od samego początku dr Urbaniak jest współautorem praktycznie wszystkich tych prac, których naliczyłem w czasopismach filadelfijskich do momentu złożenia habilitacji ponad dwadzieścia, można więc chyba stwierdzić, że jest to „jego tematyka”.

Z tych prac, dziesięć (oznaczonych w komentarzu jako U.1 do U.10) zostało wybranych jako te, które stanowią rozprawę habilitacyjną. Wygląda, że dominującym kryterium doboru było miejsce (pierwsze) na liście autorów, bo tematycznie do tytułu rozprawy pasuje jeszcze kilka innych prac. Osiem publikacji to prace wielo-autorskie. Prof. Stobiecki jest współautorem wszystkich, dr Szymański siedmiu, pozostali współautorzy, a jest ich czternastu, przyczyniają się do powstania pojedynczych prac. Oświadczenia autorów nie pozostawiają żadnych wątpliwości, że dr Urbaniak miał dominujący wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań i przedstawienie ich w formie publikacji, a materiał badawczy nie był i nie będzie wykorzystany do awansu naukowego innych osób.

Przedstawione jako rozprawa habilitacyjna publikacje, poza dwiema, są opublikowane w czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej. Pięć publikacji ukazało się w czasopismach, które w swoim prywatnym rankingu zaliczam do bardzo dobrych, wydawanych poza Polską. Rozumiem też, i sam wcielam w życie, publikowanie w polskich czasopismach, tym bardziej, jeśli są to czasopisma typu „open access”. Trzeba sobie zdać jednak sprawę, że zakres oddziaływania takich prac w środowisku naukowym będzie na pewno mniejszy, w porównaniu z tytułami bardziej renomowanymi.

Nie ulega dla mnie wątpliwości, że przedstawiony przez dr. Urbaniaka jako rozprawa habilitacyjna monotematyczny zbiór publikacji spełnia wymagania formalne stawiane rozprawie habilitacyjnej. Wszystkie prace wchodzące w skład rozprawy są opublikowane w recenzowanych czasopismach, a takie czasopisma jak Applied Physics Letters, Journal of Applied Physics, Journal of Physics: Condensed Matter gwarantują poprawność metod badawczych oraz wysoką jakość i wiarygodność uzyskanych wyników, a także wysoki poziom pod względem formy prezentacji wyników.

Najważniejsze efekty i zjawiska w wielowarstwach  $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ , których dotyczy rozprawa to ich właściwości magnetyczne (w szczególności anizotropia

magnetyczna), oddziaływania magnetostatyczne i struktura domenowa, a przede wszystkim korelacja właściwości magnetycznych i gigantycznego magnetooporu. Motywem przewodnim prac jest możliwość zastosowania układów badanego typu, z niekolinearnym rozkładem namagnesowania, jako miniaturowego czujnika pola magnetycznego z liniową charakterystyką, który mógłby mieć zastosowanie w układach zapisu magnetycznego. Możliwość taka czyni pracę aktualną i ważną w dziedzinie fizyki stosowanej.

Istotna część pracy obejmuje zagadnienia związane w prostopadłym namagnesowaniem, występującym w badanym układzie dzięki obecności ultra cienkich warstw kobaltu. Pokazano, że zakres grubości podwarstw Co, w którym obserwuje się prostopadłe namagnesowanie (0.5 – 1.2 nm) nie odbiega od wartości dla warstw epitaksjalnych, a wielo-warstwy są termicznie stabilne do stosunkowo wysokiej temperatury (powyżej 250 °C), wykazując przy tym „an increase of uniaxial anisotropy of Co layers” (cytat z pracy U.6). Dalej czytamy w tej pracy, że stała anizotropii objętościowej  $K_{1V}$  znacznie wzrosła z wygrzewaniem. Ponieważ ze wzrostem grubości podwarstw kobaltu namagnesowanie przełącza się do płaszczyzny (por. praca U.5), to oznacza, że anizotropia objętościowa i powierzchniowa ze sobą konkurują, a więc wzrost stałej anizotropii objętościowej powinien powodować obniżanie pola nasycającego w płaszczyźnie, w obszarze grubości w którym namagnesowanie jest prostopadłe. Chyba jest tu jakaś niekonsystencja interpretacyjna. Mam też pewne zastrzeżenia dotyczące metodyki pomiaru (a właściwie wyznaczania) stałych anizotropii. To nie jest problem trywialny, zwłaszcza, gdy występują tak małe domeny i tak silne oddziaływania jak w obserwowanych strukturach pasiastych (por. Johnson et al., Rep. Prog. Phys. **59** (1996)). Nie jest też dla mnie jasnym, jak wyznaczane były stałe anizotropii kobaltu w obszarze namagnesowania w płaszczyźnie, a także, na jakiej podstawie założono, że dla NiFe można zaniedbać anizotropię powierzchniową, bo nie znalazłem na to bezpośredniego dowodu dotyczącego układów NiFe/Au, a w innych konfiguracjach anizotropia powierzchniowa NiFe jest znacząca (por. Nibarger et al. Appl. Phys. Lett. **83** (2003) 93).

Za najważniejsze i naprawdę istotne oraz nowatorskie osiągnięcia rozprawy uważam powiązanie właściwości magnetooporowych z oddziaływaniami magnetostatycznymi wynikającymi z obecności charakterystycznej struktury domenowej. Systematyczny ciąg prac należących do rozprawy układu się w logiczną

całość, zamierzoną dla rozwiązania postawionego problemu naukowego, demonstrując dojrzałość naukową habilitanta. Zaowocowało przy tym doświadczenie naukowe dr. Urbaniaka w tematyce magnetyzmu cienkowarstwowego zdobyte już na etapie pracy magisterskiej i pogłębione przy doktoracie. Mam duże uznanie dla dr. Urbaniaka za podjęcie problematyki oddziaływań magnetostatycznych w układach z mieszaną anizotropią, tym bardziej, że tego typu układy badane były i są również w naszym zespole. Z premedytacją ograniczyliśmy całkowite grubości warstw, aby uniknąć powstawania drobnej struktury domenowej, która stanowi znaczną komplikację zarówno dla struktury namagnesowania jak i magnetooporu. Dr Urbaniak podjął wyzwanie i pokazał, że pewne istotne cechy charakterystyk magnetooporowych (lokalne minima oporu w zależności efektu GMR od prostopadłego pola magnetycznego) można wyjaśnić polami rozproszonymi pochodzącymi od warstw kobaltu, działającymi na warstwy NiFe. Dla istnienia takich pól konieczne było założenie istnienia pasiastych struktur domenowych (co sugerowały też charakterystyczne pętle histerezy), a struktury takie zostały wkrótce potwierdzone bezpośrednio pomiarami MFM. Ponieważ brak było w literaturze teorii opisującej strukturę domenową w układach z mieszaną anizotropią, dr Urbaniak podjął próbę (należy stwierdzić, że zupełnie udaną) wykorzystania klasycznej teorii Draaismy i de Jonga, która dobrze opisała zaobserwowany eksperymentalnie silny wzrost periodu struktury w funkcji obniżania grubości układu.

Trochę brakuje mi w pracy analizy wpływu pośrednich oddziaływań na właściwości układu. Rzeczywiście, w obecności struktury domenowej, oddziaływania te są prawdopodobnie zupełnie maskowane przez magnetostatykę, ale w przypadku bardziej systematycznych badań pojedynczej „cegiełki” układu, czyli trój-warstwy NiFe/Au/Co, mogłyby być źródłem ciekawego materiału badawczego.

Wnikliwa i wszechstronna analiza właściwości magnetycznych pozwoliła na stworzenie wiarygodnego modelu przemagnesowania badanego układu, a także na zrozumienie charakterystyk magnetooporowych i ich modelowanie, poprzez odpowiedni dobór parametrów układu wielowarstwowego, takich jak grubość warstw składowych czy liczba powtórzeń. Podjęto również próbę interpretacji zależności magnetooporowych w oparciu o symulacje mikromagnetyczne przeprowadzone przy pomocy pakietu OOMMF. Mimo uzyskania rozsądnego obrazu rozkładu namagnesowania odwzorowującego periodyczność obserwowanej struktury domenowej nie udało się odtworzyć głębokości lokalnego minimum oporu,

przypisywanego oddziaływaniu magnetostatycznemu. W pracy U.5 fakt ten tłumaczony jest uproszczoną strukturą domenową, ale wg. mnie nie można wykluczyć roli pośrednich oddziaływań wymiennych.

Na podkreślenie zasługuje poszukiwanie przez dr. Urbaniaka optymalnej metodyki badawczej pozwalającej na wszechstronną charakterystykę badanego układu. Do takich działań zaliczam wykorzystanie spektroskopii mössbauerowskiej pozwalającej na selektywne określenie kierunku namagnesowania podwarstw FeNi. Sięgnięto też po nowoczesną technikę z wykorzystaniem promieniowania synchrotronowego, dla selektywnej obserwacji namagnesowania podwarstw Co i NiFe, co pozwoliło na pokazanie różnic w procesie przemagnesowania w obecności domen pasiastych (silne sprzężenie, warstwy Co i NiFe przemagnesowują się wspólnie) i gdy ich nie ma (słabe sprzężenie, warstwy Co i NiFe przemagnesowują się niezależnie).

Podsumowując tę część recenzji, stwierdzam, że przedstawiona habilitacja jest wszechstronnym rozwiązaniem nowego, oryginalnego problemu naukowego: korelacji właściwości magnetycznych i magnetooporowych w układach wielowarstwowych  $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$  o na przemian zmieniającym się typie anizotropii magnetycznej. Rozwiązanie tego problemu przez dr. Urbaniaka wskazuje na jego dojrzałość i rzetelność naukową

#### **Ocena dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego dr. Macieja Urbaniaka.**

Dr Maciej Urbaniak, absolwent Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, jest od początku swojej kariery naukowej związany z Instytutem Fizyki Molekularnej PAN. W tym Instytucie, w roku 1994, pod kierunkiem doc. Ratajczaka wykonał pracę magisterską dotyczącą magnetooporu stopów niejednorodnych magnetycznie i tamże rozpoczął studia doktoranckie pod opieką prof. Feliksa Stobieckiego. W ramach doktoratu zajął się właściwościami magnetycznymi cienkich warstw i z tego typu tematyką naukową związany jest do dziś. Praca doktorska pt. „Gigantyczny magnetoopór w układach wielowarstwowych Ni-Fe/Cu”, wyróżniona przez Dyrektora Instytutu, została obroniona w roku 1999, i w tym samym roku dr Urbaniak został zatrudniony w Instytucie na stanowisku adiunkta.

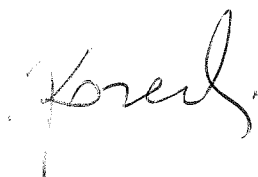
Dr Urbaniak, jak to wynika z dostarczonych mi materiałów, jest autorem 48 publikacji. Sprawdziłem, że do chwili obecnej lista ta powiększyła się o co najmniej 6 prac. Po doktoracie opublikowane zostały 43 prace, z czego 37 to pozycje w czasopismach z listy filadelfijskiej. Najwięcej prac (11) opublikowano w Acta Phys. Pol. A, siedem w Journal of Magnetism and Magnetic Materials, po kilka w innych czasopismach, między innymi w Physica Status Solidi, IEEE Transactions on Magnetism, Journal of Alloys and Compounds, Journal of Applied Physics, Applied Physics Letters. Prace te mają kilkadziesiąt cytowań (wyłączając samocytowania). Praktycznie wszystkie prace po doktoracie są związane z tematyką magnetyzmu cienkich warstw, a zwłaszcza z efektem gigantycznego magnetooporu. W problematyce tej dr Urbaniak jest uznanym specjalistą. Był zaproszony do wygłoszenia referatów na dwóch konferencjach międzynarodowych organizowanych w Polsce. Jest współautorem kilkunastu referatów i komunikatów konferencyjnych w Polsce i zagranicą.

Dr Urbaniak był wykonawcą kilku projektów badawczych KBN, ma też pewne doświadczenie dydaktyczne związane z prowadzeniem zajęć pracowni fizycznej.

Współpraca naukowa z zagranicą dr. Urbaniaka obejmuje takie instytucje jak Uniwersytety w Kassel, w Bielefeld (w sumie po kilkanaście tygodni pobytu)

Swoją działalnością dr Urbaniak udowodnił, że jest w pełni dojrzałym fizykiem, potrafiącym prowadzić samodzielną działalność naukową.

**Stwierdzam, że zarówno rozprawa habilitacyjna doktora Macieja Urbaniaka jak i jego dorobek naukowy spełniają wymogi określone przez ustawę i wnioskuję o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.**



Kraków, 9.01.2010