

Doc. dr hab. Lech Tomasz Baczewski
Instytut Fizyki PAN
Warszawa

**Ocena dorobku naukowego oraz recenzja rozprawy habilitacyjnej
dr Macieja Urbaniaka pt.:
*Właściwości magnetyczne i magnetoopór warstw wielokrotnych typu
[NiFe/Au.Co/Au]_N***

Dr Urbaniak ukończył studia wyższe na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu w roku 1994 i uzyskał tytuł magistra po obronie pracy magisterskiej pt.: „Magnetoopór stopów niejednorodnych magnetycznie”, wykonanej w IFM PAN pod kierunkiem doc. dr hab. H. Ratajczaka. W tym samym roku został on przyjęty na studia doktoranckie w IFM PAN. W roku 1999 uzyskał stopień doktora nauk fizycznych w Instytucie Fizyki Molekularnej PAN. Jego praca doktorska „Gigantyczny magnetoopór w układach wielowarstwowych Ni-Fe/Cu” została wykonana pod kierunkiem doc. dr hab. F. Stobieckiego. Po uzyskaniu stopnia doktora M. Urbaniak zatrudniony został w 1999 roku na stanowisku adiunkta w IFM PAN.

Od roku 1996 tematem badań dr Urbaniaka był magnetoopór warstw wielokrotnych [NiFe/Cu]_N otrzymywanych metoda rozpylania jonowego. Prace te prowadził w Zespole Cienkich Warstw prof. dr hab. F. Stobieckiego i w okresie tym zbadał szczegółowo wpływ grubości subwarstw oraz liczby powtórzeń na charakterystyki magnetooporowe. Wyznaczone zostały stałe sprzężenia międzywarstwowego typu RKKY na podstawie symulacji pętli histerezy warstw wielokrotnych oraz przeprowadzone zostały optymalizacje struktury warstw ze względu na czułość połową efektu GMR. Wyniki te stanowiły podstawę pracy doktorskiej M. Urbaniaka.

W pierwszym okresie po uzyskaniu stopnia doktora kontynuował on badania warstw wielokrotnych [NiFe/Cu]_N. Głównym celem tych prac było zbadanie stabilności termicznej układów [NiFe/Cu]_N oraz wpływu ich struktury na czułość połowa efektu GMR. Wykazano, że wygrzewanie warstw z małym N (N₆) prowadzi do utraty ciągłości subwarstw NiFe oraz bezpośredniego sprzężenia sąsiednich subwarstw NiFe poprzez przekładkę Cu (tzw. mostkowanie). Od roku 2004 dr Urbaniak uczestniczy w badaniach prowadzonych w Zespole Cienkich Warstw dotyczących układów warstw wielokrotnych typu [NiFe/Au/Co/Au]_N. Warstwy te charakteryzują się, dla odpowiednio dobranych grubości subwarstw, występowaniem prostopadłej anizotropii magnetycznej w subwarstwach kobaltu oraz anizotropii typu łatwa płaszczyzna w subwarstwach NiFe. Prowadzi to do interesujących, zarówno z poznawczego, jak i z praktycznego punktu widzenia właściwości magnetooporowych. Prace badawcze dotyczące tych układów zaowocowały, w latach 2004–2008, kilkunastoma publikacjami, których jest on współautorem.

W ostatnich latach uczestniczył on również w, prowadzonych w Zakładzie Cienkich Warstw, badaniach własności magnetycznych i magnetotransportowych warstw wielokrotnych Fe/Cr. W ich trakcie zidentyfikowano mechanizmy odpowiedzialne za obniżenie sprzężenia międzywarstwowego pod wpływem bombardowania warstw wysokoenergetycznymi (200 keV) jonami argonu oraz zbadano towarzyszące temu zmiany charakterystyk magnetooporu typu GMR.

Lista publikacji dr Urbaniaka obejmuje 48 pozycji. 11 prac opublikowanych było przed uzyskaniem stopnia doktora, a 37 – po jego uzyskaniu, w tym 31 prac opublikowanych w

czasopismach znajdujących się na tzw. „liście filadelfijskiej”, m.in. w J. Appl. Phys., Appl. Phys. Lett., IEEE Trans. Magn., J Alloys and Comp., Acta Phys. Polonica czy phys. stat. sol. Nie jest to może dorobek imponujący, ale można go określić, moim zdaniem, mianem przyzwoitego. Bardzo skromna natomiast jest liczba cytowań prac dr Urbaniaka, bo jest ich tylko 24 (co prawda bez autocytowań i cytowań współautorów). Największa liczba cytowań to tylko 8 i dotyczy pracy opublikowanej w J. Magn. Magn. Mater. z 1998 roku.

Krótką jest też lista referatów zaproszonych wygłoszonych przez dr Urbaniaka – tylko 2 pozycje i dotyczy to w obu przypadkach lokalnych konferencji organizowanych w kraju. Dłuższa jest natomiast lista referatów zaproszonych wygłoszona przez innych współautorów i obejmuje ona 15 referatów na konferencjach międzynarodowych organizowanych zarówno w Polsce jak i zagranicą. Dr Urbaniak był także współautorem 44 komunikatów konferencyjnych i uczestniczył w realizacji 4 grantów KBN – 3 pod kierunkiem prof. F. Stobieckiego i 1 - dr Lucińskiego.

Rozprawa habilitacyjna dr Urbaniaka składa się z dziesięciu wybranych oryginalnych prac w języku angielskim, oraz komentarza autorskiego w języku polskim. Spośród tych prac pięć są to doniesienia w formie 3-4 stronicowych listów, pozostałe są to dłuższe publikacje 6-8 stronicowe. Osiem prac jest wieloautorskich, a dr Urbaniak jest pierwszym autorem w dziewięciu pracach. Do rozprawy dołączonych jest 17 oświadczeń współautorów, które nie pozostawiają wątpliwości, że dr Urbaniak był pomysłodawcą i miał wiodący udział w wykonaniu opisanych badań. Prace włączone do rozprawy opublikowane były w latach 2004-2008 w czasopismach o światowym zasięgu; w tym 2 w Journal of Applied Physics, 1 w Appl. Phys. Letters, 2 w phys. stat. sol., 1 w J. Physics: Cond. Matter., 1 w J. Alloys and Compounds, 1 w Acta Phys. Polonica, oraz 2 w czasopismach o bardzo ograniczonym zasięgu tzn. Molecular Physics Reports i Materials Science Poland. Tu mam uwagę krytyczną – moim zdaniem do rozprawy habilitacyjnej z fizyki należy wybierać prace opublikowane w czasopismach bardziej renomowanych i o zasięgu światowym. Jeśli nawet uznać, że te dwie ostatnie prace zawierają istotne dla całości rozprawy wyniki, to można było pokusić się o opublikowanie ich w innym czasopiśmie, o większym zasięgu, co znacznie podwyższałoby szanse na ewentualne zwiększenie liczby cytowań.

Głównym zagadnieniem badawczym podjętym przez habilitanta są własności magnetyczne i transport elektronowy w warstwach wielokrotnych typu $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ otrzymywanych metoda rozpylania jonowego, gdzie warstwy magnetyczne zostały tak dobrane, aby występowała magnetyczna anizotropia prostopadła w subwarstwach kobaltu oraz anizotropia typu łatwa płaszczyzna w subwarstwach NiFe. W konsekwencji, w stanie remanencji, wzajemna orientacja momentów magnetycznych subwarstw Co i NiFe jest w przybliżeniu prostopadła. Ze względu na zastosowania istotną własnością badanych warstw jest występowanie gigantycznego magnetooporu (GMR).

Struktury warstwowe, których badania przedstawione są w rozprawie habilitacyjnej wykonane zostały metoda rozpylania jonowego. Układy typu zawór spinowy, badane w pracy [U.1], wykonał dr Urbaniak podczas pobytu w laboratorium Prof. G. Reissa z Uniwersytetu w Bielefeld w Niemczech. Warstwy badane w pracach [U.2–U.10] wykonane zostały w IFM PAN w Zakładzie Cienkich Warstw za pomocą magnetronego rozpylania jonowego.

W rozdziale 2 komentarza autor streszcza badania strukturalne warstw wielokrotnych będących przedmiotem badań. Właściwie badania te ograniczają się jedynie do dyfrakcji promieni X (nisko i wysokokątowej). Niewątpliwie obecność pików braggowskich w dyfrakcji niskokątowej oraz pików satelitarnych wokół analogicznych maksimów w dyfrakcji wysokokątowej dowodzi dobrej periodyczności warstw, ale brak mi dalszej analizy tych widm. Wracając do analizy widm – niezrozumiałą jest brak symulacji komputerowej widm odpowiednimi dostępnymi programami jak X-Pert, SimulReflec czy Parratt, co pozwala oszacować szorstkość międzypowierzchni, grubości warstw składowych itd. Są to parametry

bardzo istotne w interpretacji wyników magnetycznych jak choćby oddziaływania magnetostatyczne. Nie przeprowadzono także żadnych badań strukturalnych warstw wielokrotnych NiFe/Au/Co/Au przy użyciu mikroskopii sił atomowych AFM, która jest obecnie szeroko stosowaną i dostępną techniką w badaniach cienkich warstw metalicznych i nie tylko. Takie badania wykonano dla zaworów spinowych Cu/NiFe/V/NiFe/MnIr/Cu w pracy [U.1], która zresztą jest dość sztucznie dołączona do rozprawy biorąc pod uwagę jej tytuł i jednoznaczne określenie w nim typu badanych warstw wielokrotnych. Jest to tym bardziej niezrozumiałe, że autor miał dostęp do takiego mikroskopu o czym świadczą badania struktury domenowej metodą MFM, który jest tylko innym modelem pracy mikroskopu AFM.

Pierwsza z prac stanowiących rozprawę [U.1] nie dotyczy układów typu [NiFe/Au/Co/Au]_N ale, jak pisze autor w komentarzu autorskim, ze względu na to, że opisuje ona oddziaływania magnetostatyczne typu Néel'a w zaworach spinowych dołączona została do prac rozprawy habilitacyjnej. Nie jest to argument przekonujący i wydaje się iż bez tej pracy rozprawa byłaby bardziej spójna i zgodna z tytułem, a zakres przedstawionych w pozostałych pracach wyników jest wystarczająco szeroki i bogaty.

W pracy [U.4] przedstawione są wyniki badań struktury domenowej. Zaobserwowano silną zależność przestrzennego periodu struktury domenowej, p od grubości subwarstw Co i Au. Ze względu na brak w literaturze teorii opisujących strukturę magnetyczną układów zawierających sąsiadujące ze sobą subwarstwy magnetyczne o wzajemnie prostopadłych kierunkach anizotropii, w pracy [U.9] podjęto próbę wykorzystania klasycznej teorii Draaisma i de Jonga do opisu warstw typu [NiFe/Au/Co/Au]_N. Teoria D-J dotyczy jednak warstw wielokrotnych z anizotropią prostopadłą, co nie odpowiada badanemu przypadkowi, więc nie jest zaskakujące, że próba wyznaczenia z tej teorii stałej anizotropii na podstawie wartości p okazała się nieudana, prowadząc do znacznego jej niedoszacowania. Jeśli już habilitant zdecydował się mimo wszystko porównywać swoje wyniki z tą teorią, to aż się prosiło zbadanie próbki z większą grubością Au, gdzie teoria D-J przewiduje lokalne maksimum periodu, szkoda więc, że zakres ten nie był jednak zbadany.

W pracach [U.2, U.5, U.7]) przedstawiono wyniki badań własności magnetycznych. Z pomiarów pętli histerezy magnetycznej, podobnie jak w mikroskopii MFM, widoczne są cechy charakterystyczne dla układów z PMA. W pętli histerezy układu [NiFe/Au/Co/Au]_N obserwuje się dwa, częściowo przenikające się, zakresy, związane odpowiednio z przemagnesowaniem subwarstw NiFe i Co. W obszarze słabych pól magnetycznych następuje równoczesne przemagnesowanie obydwu rodzajów subwarstw magnetycznych. W wyższych polach, przyłożonych prostopadle do warstwy przemagnesowaniu ulega tylko subwarstwa NiFe. Obserwacja typowych dla warstw z PMA pętli histerezy świadczy o słabym wpływie subwarstw NiFe na przemagnesowanie Co: w pierwszym przybliżeniu subwarstwy te można traktować jako nieoddziałujące pomiędzy sobą.

Istotnym parametrem badanym przez habilitanta był magnetoopor. Charakterystyczne krzywe magnetooporowe zaobserwowano w warstwach [NiFe/Au/Co/Au]_N dla $N=3$ w których nie występuje gęsta struktura SD – prace [U.3 i U.5]. W pozostałych warstwach obserwuje się zależności z lokalnym minimum oporu w zakresie histerezy. W pracy [U.5] pokazano także, że amplituda efektu GMR zależy silnie od liczby powtórzeń N . Zmiany te, jak tłumaczy autor, spowodowane są między innymi malejącą rolą rozpraszania elektronów na międzypowierzchniach w grubszych warstwach oraz faktem, że dla większych N w zakresie średniej drogi swobodnej elektronu znajduje się więcej międzypowierzchni typu magnetyk/warstwa niemagnetyczna.

Za najbardziej wartościowe uważam wyniki zaprezentowane w rozdziale 5.3 komentarza i opublikowane w omawianych tam pracach. Autor sugeruje, że minima oporu w pewnym zakresie pola magnetycznego związane mogą być ze sprzężeniem magnetostatycznym wywołanym obecnością struktury paskowej w subwarstwach Co. W sytuacji takiej pole

magnetyczne pochodzące od struktury domenowej w subwarstwach Co prowadzić może do odchylenia od płaszczyzny momentów magnetycznych w subwarstwach NiFe [U.5]) i zmniejszenia kąta pomiędzy momentami sąsiednich subwarstw ferromagnetycznych. Z powodu zależności oporu układów od tego kąta spodziewać się można obniżenia oporu.

Próbie weryfikacji powyższej hipotezy przeprowadzono w pracy [U.2]. Modyfikując przyjęty model oporu tak by uwzględnić zależność odchylenia momentu magnetycznego subwarstw NiFe od orientacji namagnesowania w sąsiedniej domenie w subwarstwie C oszacowano wypadkową wartość pola magnetycznego działającego na subwarstwy NiFe. Oszacowanie wykonano na podstawie pomiarów pętli histerezy oraz magnetooporu. Otrzymana zależność H_x (maksymalne pole magnetostatyczne pochodzące od struktury domenowej subwarstw Co) od zewnętrznego pola zgodna jest z oczekiwaniem, że najsilniejsze pola magnetostatyczne występują w obszarze histerezy wyznaczonym przez pola kreacji i anihilacji struktury paskowej, z domenami o submikronowej szerokości. Uzyskane na podstawie krzywych magnetooporowych oszacowania wartości pól magnetostatycznych pochodzących od subwarstw Co [U.2, U.3] porównano z polem magnetycznym pochodzącym od nieskończonych domen pasiastych z zerową szerokością ścian domenowych uzyskując dość dobrą zgodność.

Dokładniejsza analiza zachowania układów cienkowarstwowych $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ w polu magnetycznym uzyskana może być na podstawie symulacji mikromagnetycznych. Wyniki symulacji wykorzystano w pracach [U.5] i [U.8] do uzyskania obrazu remanencyjnej struktury magnetycznej w warstwach $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$. Symulacje wykonane przy użyciu oprogramowania OOMF pozwoliły potwierdzić wpływ pól magnetostatycznych pochodzących od subwarstw Co z paskową strukturą domenową na orientację momentów magnetycznych subwarstw NiFe (rys. 9 w [U.5]) oraz wykazać, że oddziaływania te prowadzą do zmniejszenia kąta między momentami sąsiednich obszarów subwarstw magnetycznych co skutkuje obserwowanym obniżeniem oporu układu.

W pracy [U.10] symulacje mikromagnetyczne wykorzystane zostały do opisu pełnej pętli histerezy magnetycznej układu $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$. W przeciwieństwie do wyników przedstawionych w pracach [U.5] i [U.8] symulacje obejmowały znacznie mniejszą liczbę komórek (68 tys. w porównaniu z około 440 tys.) co pozwoliło symulować pełną pętlę histerezy, a nie tylko stan remanencyjny. Zmniejszenie liczby komórek w symulacji wynikało z zastosowania modelu z mniejszą niż uprzednio liczbą powtórzeń N . Wykazano, że minima oporu są wynikiem oddziaływań magnetostatycznych między sąsiednimi subwarstwami magnetycznymi i nie występują, gdy oddziaływanie to zostanie wyeliminowane z symulacji. Analiza właściwości magnetycznych i elektrycznych warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ prowadzona była na podstawie pomiarów magnetometrycznych (również mikroskopii magnetycznej) oraz oporu w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego. Metody te nie pozwalają jednak na niezależne zbadanie zachowania subwarstw Co i NiFe. W pracach [U.7] i [U.8] wykorzystano selektywne ze względu na pierwiastki chemiczne metody eksperymentalne. Autor trafnie dobrał odpowiednie techniki eksperymentalne, co pozwoliło na uzyskanie pełniejszej informacji o strukturze magnetycznej badanych układów warstwowych oraz potwierdzić istotny wpływ pól magnetycznych pochodzących od paskowej struktury domenowej. W pracy [U.7] posłużono się techniką rezonansowego rozpraszania promieni X (SXRMS) do niezależnego zbadania zmian orientacji momentów magnetycznych subwarstw Co i NiFe. Wykazano, że dla pola przyłożonego w płaszczyźnie, zgodnie z wcześniejszymi pomiarami sumarycznych pętli histerezy, subwarstwy Co i NiFe przemagnesowują się odpowiednio w kierunku trudnym i łatwym. Sygnał SXRMS odwzorowywał charakterystyczne pola związane z przemagnesowaniem Co, co świadczy o obecności sprzężenia magnetostatycznego.

W pracy [U.8] wykorzystano spektroskopię Mössbauerowską elektronów konwersji (CEMS) do zbadania zachowania subwarstw NiFe pod wpływem pól pochodzących od struktury domenowej. W badanych próbkach subwarstwy NiFe-wykonane zostały poprzez rozpylanie z targetu zawierającego izotop ^{57}Fe . Pomiar widm CEMS, na podstawie stosunku intensywności linii absorpcyjnych, pozwoliły wyznaczyć średni cosinus kwadratowy kąta między momentem magnetycznym subwarstw NiFe, a kierunkiem padania wiązki promieni gamma, który w przypadku omawianych pomiarów był prostopadły do powierzchni warstw. Zależność tego kąta θ dla NiFe w funkcji grubości warstw kobaltu t_{Co} potwierdza, że przyczyną odchylenia momentów NiFe są pola magnetostatyczne, gdyż grubsze subwarstwy Co są źródłem silniejszych pól magnetycznych.

Podsumowując ocenę rozprawy habilitacyjnej dra Urbaniaka stwierdzam, że w sposób istotny wzbogaca ona naszą wiedzę w zakresie poznania własności magnetycznych układów warstwowych z anizotropią prostopadłą. Należy przy tym podkreślić, że wytworzono i badano unikatowy układ magnetyczny złożony z warstw o anizotropii typu łatwa płaszczyzna (NiFe) jak i anizotropii prostopadłej (Co). Uznanie budzi odpowiedni dobór różnorodnych metod eksperymentalnych, jak również sprawna analiza wyników i sposób wyciągania wniosków.

Mam natomiast uwagę ogólną dotyczącą komentarza autorskiego. Liczy on 29 strony i 46 odnośników. Autorowi nie udało się w dużym stopniu uniknąć niepotrzebnego powtórzenia opisanych w publikacjach rozprawy habilitacyjnej wyników, gdy tymczasem podstawową rolą komentarza powinno być umiejscowienie wykonanych przez autora prac na tle badań prowadzonych w tej dziedzinie w kraju i na świecie. Choć autor dość niezłe przedstawia cele swoich badań w szerszej perspektywie, to słabiej wypada uwypuklenie, jakie znaczenie mają osiągnięte w pracach wyniki dla dalszego rozwoju dyscypliny. W komentarzu pojawiają się też błędy językowe, na przykład autor wszędzie używa określenia „interfejs” zamiast polskiego słowa „międzypowierzchnia”. Nie należy też używać sformułowania „spektra dyfrakcyjne” jak np. na stronie 6 komentarza, tylko „widma dyfrakcyjne”. Podobnie błędne jest określenie „podłoża krzemowe o teksturze (100)” (użyte na str. 5) – chodzi raczej o orientację krystalograficzną monokrystalicznego podłoża Si (100).

Wracając na zakończenie do oceny całości dorobku habilitanta to słabo wypada także jego doświadczenie w działalności organizacyjnej, gdyż jedynym osiągnięciem na tym polu jest współorganizowanie szkoły w Będlewie w 2004 roku. Dziwi mnie też brak zagranicznego stażu naukowego typu „post-doc”, bo za taki trudno uznać kilkutygodniowe pobyty w Niemczech. Ocenę dorobku naukowego habilitanta obniża także fakt, że nie kierował on dotychczas żadnym projektem badawczym, a tylko współrealizował projekty koordynowane i uzyskane przez innych. Działalność dydaktyczna habilitanta wypada na tym tle nieco lepiej - Dr Urbaniak prowadził zajęcia w ramach pracowni specjalistycznej dla magistrantów oraz zajęcia w ramach pracowni fizycznej na przestrzeni trzech lat dla studentów Wydziału Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej.

Zważywszy jednak na niewątpliwą umiejętność doboru ciekawych problemów badawczych w rozwijanej przez niego dyscyplinie, sposobów ich pomiaru i analizy uzyskanych wyników oraz działalność habilitanta w dziedzinie dydaktycznej uważam, że wykazał się on dojrzałością do samodzielnej pracy badawczej.

Biorąc pod uwagę przedstawioną rozprawę habilitacyjną oraz całokształt dorobku naukowego dr Urbaniaka uważam, że kwalifikują go one do stopnia naukowego doktora habilitowanego.

Przedstawiona rozprawa habilitacyjna spełnia, moim zdaniem, wymagania stawiane tego rodzaju pracom przez odnośną ustawę. Wnoszę więc o dopuszczenie dr Macieja Urbaniaka do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

