

Ocena dorobku naukowego oraz rozprawy habilitacyjnej dra Macieja Urbaniaka pt.:

**„Właściwości magnetyczne i magnetoopór  
warstw wielokrotnych typu  $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ ”**

Dr Maciej Urbaniak posiada w swoim dorobku naukowym łącznie 48 prac, opublikowanych w latach od 1994 do 2008 w czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym. Wiele spośród tych prac opublikował w czasopismach o wysokiej randze (2 publikacje w Journal of Applied Physics, 3 – w Journal of Alloys and Compounds, 1 – w Applied Physics Letters, 1 – w Journal of Physics: Condensed Matter), lub czasopismach specjalistycznych z dziedziny magnetyzmu (7 publikacji w Journal of Magnetism and Magnetic Materials). Przed uzyskaniem stopnia doktora opublikował 11 prac (w tym 5 w czasopismach znajdujących się na liście filadelfijskiej), a po uzyskaniu stopnia doktora (w 1999 roku) – 37 (w tym 31 w czasopismach znajdujących się na liście filadelfijskiej). W 15 pracach występuje na pierwszym miejscu na liście autorów, w dwóch innych jest jedynym autorem. Ma w swoim dorobku także 44 komunikaty konferencyjne, 7 referatów na zaproszenie, wygłoszonych na konferencjach krajowych i w innych placówkach naukowych w kraju i za granicą, oraz współautorstwo w 15 referatach konferencyjnych na zaproszenie, wygłoszonych przez innych współautorów na konferencjach międzynarodowych. Wymienione wyżej liczby stanowią wymowny wskaźnik bardzo wysokiej aktywności naukowej Habilitanta i dynamicznego wzrostu tej aktywności w ostatniej dekadzie.

W zasadzie cała działalność naukowa dra Macieja Urbaniaka związana jest z badaniami magnetycznych i magnetooporowych właściwości cienkich metalicznych warstw pojedynczych i wielokrotnych. W większości publikacji szczególny nacisk położony jest na różnorakie aspekty związane z efektem gigantycznego oporu magnetycznego (GMR). Oznacza to, że działalność Habilitanta mieści się w jednej z najbardziej aktualnych i „gorących” tematów badawczych fizyki materiałów magnetycznych, intensywnie rozwijanych w wiodących laboratoriach naukowych na świecie. Niewątpliwym czynnikiem stymulującym rozwój w tej dziedzinie jest możliwość bardzo szybkiego praktycznego zastosowania rezultatów badań w technice, przede wszystkim do zapisu informacji o dużej gęstości upakowania danych. Aktualność tematyki oznacza bardzo silną konkurencję, której wymogom można sprostać jedynie w ramach współpracy z innymi laboratoriami, wyspecjalizowanymi w określonych technikach badawczych lub preparacyjnych. Działalność dra Macieja Urbaniaka posiada również taki cenny walor krajowej i międzynarodowej współpracy. Świadczą o tym wyjazdy na staże naukowe i wspólne autorstwo publikacji. Habilitant, zatrudniony na stałe w Instytucie Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu, współpracował z takimi ośrodkami, jak: Uniwersytet w Kassel (Niemcy), Uniwersytet w Bielefeld (Niemcy), Uniwersytet Techniczny w Kaiserslautern (Niemcy), Uniwersytet Hanyang (Korea), Instytut Magnetyzmu Stosowanego (Hiszpania), Uniwersytet P.J.Safarika (Słowacja), Uniwersytet Adama Mickiewicza w

Poznaniu, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie, Instytut Problemów Jądrowych w Warszawie i Uniwersytet w Białymstoku. Tak szeroka współpraca potwierdza ważność i aktualność tematyki uprawianej przez Habilitanta.

W pierwszym okresie działalności naukowej, w ramach studiów doktoranckich rozpoczętych w IFM PAN w 1994 roku, dr Maciej Urbaniak zajmował się początkowo badaniami magnetooporu cienkowarstwowych układów granularnych  $\text{Co}_{20}\text{Ag}_{20}$ , oraz badaniami właściwości magnetycznych cienkich warstw stopów Fe-Cu-R-Si-B na bazie żelaza. Następnie zaangażował się w badania magnetooporu warstw wielokrotnych  $[\text{NiFe}/\text{Cu}]_N$  wytwarzanych metodą rozpylania jonowego i skoncentrował się na określeniu zależności charakterystyk magnetooporowych od grubości poszczególnych warstw i ich liczby. Z tej właśnie tematyki napisał, pod kierunkiem prof. dr hab. Feliksa Stobieckiego, pracę doktorską zatytułowaną: „Gigantyczny magnetoopór w układach wielowarstwowych  $\text{NiFe}/\text{Cu}$ ”. W pracy tej wyznaczył, w oparciu o symulacje pętli histerezy, stałe sprzężenia międzywarstwowego typu Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida (RKKY) oraz dokonał optymalizacji struktury warstw pod względem czułości polowej efektu GMR.

Po obronie pracy doktorskiej, dr Maciej Urbaniak początkowo kontynuował badania warstw wielokrotnych  $[\text{NiFe}/\text{Cu}]_N$ , skupiając się na ich stabilności termicznej oraz zależności polowej czułości efektu GMR od ich struktury. Wykazał, że w przypadku warstw o małej liczbie powtórzeń ( $N \leq 6$ ), wygrzewanie skutkuje utratą ciągłości warstw NiFe oraz zanikiem bezpośredniego sprzężenia sąsiednich warstw NiFe poprzez przekładkę Cu, przy równoczesnym przejściu do bezhisterezowych zależności magnetooporowych. Następnie zajmował się układami warstw wielokrotnych typu zawory spinowe. W strukturach  $[\text{NiFe}/\text{CuAgAu}/\text{Co}/\text{CuAgAu}]_N$ , dzięki zastosowaniu przekładki ze stopu CuAgAu, osiągał bardzo słabe sprzężenie pomiędzy warstwami ferromagnetycznymi i – w konsekwencji – bardzo wysoką polową czułość efektu GMR (sięgającą 6.8% / Oe). W asymetrycznych, podwójnych zaworach spinowych typu  $\text{MnIr}/\text{CoFe}_1/\text{Cu}/\text{NiFe}_1/\text{Cu}/\text{NiFe}_2/\text{CoFe}_2/\text{MnIr}$  uzyskał zależności magnetooporowe z trzema stanami oporu, związanymi z trzema konfiguracjami namagnesowania warstw ferromagnetycznych. W układach  $\text{MnIr}/\text{CoFe}/\text{AlO}_x/\text{NiFe}$  badał sprzężenie wymienne i wykazał istnienie optymalnego zakresu grubości warstw CoFe ze względu na wartość anizotropii jednozwrotowej. Wykazał także występowanie sprzężenia magnetostatycznego pomiędzy warstwami CoFe i NiFe. W strukturze  $\text{Cu}/\text{NiFe}/\text{V}/\text{NiFe}/\text{MnIr}/\text{Cu}$  badał oddziaływania magnetostatyczne typu Neel’a.

W roku 2004 dr Maciej Urbaniak podjął intensywne badania warstw wielokrotnych typu  $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ . Wyniki badań w krótkim czasie opublikował w kilkunastu pracach i podsumował w rozprawie habilitacyjnej zatytułowanej „Właściwości magnetyczne i magnetoopór warstw wielokrotnych typu  $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ ”.

Przedstawiona do recenzji rozprawa habilitacyjna złożona jest z 10 prac opublikowanych w latach 2004 – 2008 w czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym, w tym dwóch prac opublikowanych w Journal of Applied Physics i po jednej w takich czasopismach, jak: Journal of Alloys and Compounds, Applied Physics Letters oraz Journal of Physics: Condensed Matter. W siedmiu spośród tych prac, dr Maciej Urbaniak wymieniony jest na pierwszym miejscu zespołu autorskiego, a w jednej – na miejscu drugim. Załączone oświadczenia pozostałych współautorów wyraźnie potwierdzają jego dominującą rolę w przeprowadzeniu opisywanych w tych pracach badań. W ostatnich dwóch pracach (opublikowanych w 2008 roku) dr Maciej Urbaniak występuje jako jedyny autor. Jest to warte podkreślenia, gdyż zazwyczaj prace doświadczalne w dziedzinie fizyki ciała stałego wymagają ścisłej współpracy wielu wyspecjalizowanych zespołów, co w sposób oczywisty prowadzi do publikacji wielo-autorskich. Wspomniane dwie prace dotyczą

głównie numerycznego modelowania badanych efektów i w tym przypadku jednoosobowe autorstwo może być w pełni uzasadnione.

Prace tworzące habilitację poświęcone są badaniom właściwości magnetycznych oraz transportu elektronowego w warstwach wielokrotnych typu  $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ . Habilitant celowo dobierał grubości poszczególnych warstw ferromagnetycznych w taki sposób, aby w przypadku warstwy kobaltu uzyskać anizotropię typu łatwa oś prostopadła do płaszczyzny warstwy, natomiast w przypadku warstwy NiFe – anizotropię typu łatwa płaszczyzna. W efekcie uzyskiwał układy wielowarstwowe, w których magnetyzacja sąsiadujących ze sobą warstw magnetycznych Co i NiFe była, przy braku zewnętrznego pola magnetycznego, w przybliżeniu wzajemnie prostopadła. W badaniach skoncentrował się na wyjaśnieniu wpływu właściwości magnetycznych takich szczególnych układów na występujący w nich efekt gigantycznego magnetooporu.

Uważam, że tak postawione cele badawcze są bardzo ciekawe, ważne i aktualne, gdyż dotyczą metalicznych nanostruktur wielowarstwowych, które – jak już wspomniałem wyżej – znajdują się w chwili obecnej w centrum zainteresowań współczesnej fizyki magnetyzmu. Należy podkreślić, iż dr Maciej Urbaniak zajął się realizacją i badaniem nowatorskiego materiału magnetycznego o celowo wprowadzonej niekolinearnej strukturze rozkładu momentów magnetycznych, która powinna prowadzić do bardzo pożądanej z punktu widzenia zastosowań właściwości, a mianowicie liniowej zależności oporu elektrycznego od pola magnetycznego w szerokim zakresie pola. W moim przekonaniu postawione cele badawcze zostały osiągnięte.

Najważniejszym wynikiem pracy habilitacyjnej jest, moim zdaniem, wyjaśnienie charakteru oddziaływań magnetycznych zachodzących pomiędzy warstwami układu wielowarstwowego i odpowiedzialnych za specyficzny kształt eksperymentalnej krzywej magnetooporowej, zmierzonej w strukturze  $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$  o dużej liczbie powtórzeń ( $N > 3$ ), w polu prostopadłym do powierzchni próbki. Krzywa ta wykazuje charakterystyczne lokalne minimum oporu przypadające na taki zakres pola magnetycznego, w którym w warstwach kobaltu obserwowana jest histereza magnetyczna. Habilitant wykazał, że występowanie takiego minimum związane jest z paskową strukturą domenową w warstwach kobaltu. Struktura ta, poprzez silne sprzężenie magnetostatyczne, wymusza lokalną pozapłaszczyznową orientację wektorów magnetyzacji w warstwach NiFe. W efekcie kąt pomiędzy kierunkami magnetyzacji w sąsiadujących ze sobą warstwach Co i NiFe ulega zmniejszeniu, co skutkuje obniżeniem wartości magnetooporu.

Ta kluczowa dla całej pracy teza została, w mojej ocenie, rzetelnie udokumentowana eksperymentalnie w trakcie szeroko zakrojonych badań, prowadzonych we współpracy z innymi krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Habilitant porównywał krzywe magnetooporu, mierzone metodą czteropunktową, z krzywymi histerezy, zarejestrowanymi przy pomocy magnetometru wibracyjnego (VSM) i/lub magnetooptycznego magnetometru Kerra (MOKE). Wykorzystując wysokorozdzielczą mikroskopię sił magnetycznych (MFM), obrazował przestrzenne rozkłady magnetyzacji. Stwierdził występowanie paskowej struktury domenowej w układach o dużej liczbie warstw i silną zależność periodu struktury od grubości warstw Co i Au. Z zastosowaniem techniki rezonansowego magnetycznego rozpraszania miękkiego promieniowania rentgenowskiego (SXRMS) badał zmiany orientacji momentów magnetycznych niezależnie w warstwach Co i NiFe. (W tej metodzie czułość na dany pierwiastek uzyskuje się poprzez dostrojenie energii promieniowania rentgenowskiego do progu absorpcji tego pierwiastka). Stwierdził silne zmiany sygnału pochodzącego od niklu w zakresie pola odpowiadającego występowaniu struktury domenowej w warstwie kobaltu. Przy pomocy spektroskopii Mössbauera (CEMS) testował zachowanie się warstw NiFe pod wpływem pól generowanych przez strukturę domenową w warstwach Co.

Korzystając z tak różnorodnych technik badawczych, uzyskał spójne wyniki, potwierdzające tezę o silnym oddziaływaniu magnetostatycznym struktury domenowej obecnej w warstwach kobaltu, na warstwy NiFe. Należy dodać, iż w swoich badaniach bazował na próbkach własnej produkcji, wytwarzanych głównie w Zakładzie Cienkich Warstw IFM PAN w Poznaniu i osadzanych metodą magnetronowego rozpylania jonowego na monokrystalicznych podłożach krzemowych o orientacji (100). Dobrą jakość tych próbek wykazywał *ex-situ* przy pomocy dyfrakcji promieni rentgenowskich.

Dodatkowe potwierdzenie stawianej tezy dr Maciej Urbaniak uzyskał na drodze modelowania w oparciu o teorię Draaismy i de Jonge'a oraz w oparciu o mikromagnetyczne symulacje numeryczne. Co prawda teoria Draaismy i de Jonge'a dotyczy trochę innych układów, a mianowicie warstw ferromagnetycznych z anizotropią prostopadłą rozdzielanych przekładkami niemagnetycznymi, tym niemniej pozwoliła na wyliczenie charakterystyk magnetooporowych jakościowo zbliżonych z krzywymi doświadczalnymi. Znacznie lepszą zgodność symulowanych i eksperymentalnych histerez magnetycznych i magnetooporowych Habilitant otrzymał na bazie symulacji numerycznych, przeprowadzonych z wykorzystaniem ogólnodostępnego oprogramowania OOMMF. Na podstawie tych symulacji sporządził również obrazy przestrzennych rozkładów magnetyzacji w poszczególnych warstwach badanego układu. Widać na nich bezpośrednio poza-płaszczyznową orientację magnetyzacji w warstwach NiFe i replikowanie w warstwach NiFe struktury domenowej istniejącej w warstwach kobaltu. W tym miejscu czuję się w obowiązku dodać drobną uwagę krytyczną. Otóż Habilitant, prezentując symulowane przestrzenne rozkłady magnetyzacji, nic nie wspomina o tym, czy prezentowany rozkład odpowiada minimalnej całkowitej energii magnetycznej układu, czy też jest to pewien rozkład metastabilny, zależny od wstawionego do symulacji rozkładu początkowego. Z własnego doświadczenia wiem, że poszukiwanie stanu odpowiadającego globalnemu minimum energii w programie OOMMF wymaga przeważnie przeprowadzenia symulacji z różnymi rozkładami startowymi, a następnie wybrania rozwiązania końcowego o najmniejszej energii. Taka procedura postępowania pozwala skutecznie obejść swego rodzaju mankament programu OOMMF, jakim jest obliczanie konfiguracji momentów magnetycznych w temperaturze 0°K, z czym wiąże się łatwość „utknięcia” procesu symulacyjnego w pewnym stanie, odpowiadającym lokalnemu minimum energii. Ponieważ jednak dr Maciej Urbaniak zastosował symulacje tylko w celu wyjaśnienia obserwowanych zjawisk, a nie do jakiegoś precyzyjnego dopasowania, to – w moim przekonaniu – nawet nieco dokładniejsze wyniki symulacji nie miałyby prawdopodobnie wpływu na przeprowadzone przez niego wnioski.

Innym ważnym wynikiem pracy habilitacyjnej jest określenie stałych anizotropii warstw kobaltu w badanych wielowarstwach. Wykorzystując obrazowanie struktury magnetycznej przy pomocy magnetooptycznego efektu Kerra oraz pomiary pętli histerezy, dr Maciej Urbaniak otrzymał wartości tych stałych zbliżone do literaturowych ( $K_s = 4.25 \times 10^{-4} \text{ Jm}^{-2}$ ,  $K_v = 4.52 \times 10^5 \text{ Jm}^{-3}$ ). W oparciu o pomiary MOKE wyznaczył również zakres grubości warstw kobaltu (0.5÷1.2 nm), w którym orientacja magnetyzacji jest prostopadła do powierzchni. Jest to ustalenie bardzo ważne z punktu widzenia optymalizacji struktur ze względu na efekt GMR.

Ważnym wynikiem jest także określenie amplitudy efektu GMR w zależności od liczby powtórzeń warstw  $N$ . Habilitant uzyskał silną dynamikę wzrostu w zakresie małych  $N$  ( $N < 6$ ) i niewielkie zmiany dla dużych  $N$  ( $N > 10$ ). Takie zachowanie wyjaśnił po pierwsze – malejącą rolą rozpraszania elektronów na interfejsach w grubszych układach wielowarstwowych, po drugie – większą liczbą interfejsów typu magnetyk/warstwa niemagnetyczna w zakresie średniej drogi swobodnej elektronu dla dużych interfejsów i po

trzecie – poprawą jakości struktury warstw wielokrotnych w miarę oddalania się od podłoża. Badał także zależność amplitudy GMR od grubości warstw kobaltu. Stwierdził, że w pewnym zakresie grubości warstw kobaltu (0.5÷1.2 nm) obserwuje się małe zmiany amplitudy GMR, a duże zmiany anizotropii warstw Co. Dzięki temu możliwa jest modyfikacja charakterystyk magnetooporowych poprzez odpowiedni dobór grubości warstw kobaltu.

Ważnym rezultatem jest też wykazanie stabilności temperaturowej anizotropii warstw kobaltu do temperatury wygrzewania równej ok. 260°C. Jest to informacja bardzo istotna ze względu na ewentualne zastosowania techniczne badanych układów.

W podsumowaniu oceny rozprawy habilitacyjnej dra Macieja Urbaniaka, pragnę zaznaczyć, iż badania w niej przedstawione zostały bardzo dobrze zaplanowane, przeprowadzone i udokumentowane. Habilitant udowodnił, że potrafi dobrze wykorzystać dostępną aparaturę pomiarową, że świetnie interpretuje uzyskane wyniki i że biegle opanował numeryczne metody modelowania układów magnetycznych. Najważniejszy wynik, dotyczący istotnego wpływu międzywarstwowych oddziaływań magnetostatycznych na właściwości magnetyczne i magnetooporowe w układach wielowarstwowych, w których warstwy ferromagnetyczne dwóch typów o niekolinearnej orientacji magnetyzacji rozdzielone są nieferromagnetyczną przekładką, może być z łatwością wykorzystany do opisu innych materiałów o podobnej strukturze, a więc ma istotny walor ogólnopoznawczy. Wiele spośród uzyskanych wyników może mieć ogromne znaczenie praktyczne. Biorąc to wszystko pod uwagę, całą rozprawę oceniam pozytywnie.

Aktualnie dr Maciej Urbaniak kontynuuje badania właściwości magnetycznych i magnetooporowych warstw wielokrotnych, rozszerzając swoje zainteresowania o jedną z metod strukturyzacji próbek, jaką jest bombardowanie jonami. W wielowarstwach Fe/Cr, implantowanych jonami argonu o energii 200 keV, badał mechanizmy powodujące obniżenie sprzężenia międzywarstwowego i stowarzyszone z tym zmiany charakterystyk GMR. W układach o różnych grubościach warstw ferromagnetycznych  $[\text{Co}_1/\text{Au}/\text{Co}_2/\text{Au}]_N$  wykazał możliwość lokalnej zmiany anizotropii magnetycznej w warstwach o większej grubości pod wpływem naświetlenia jonami helu o odpowiedniej dawce. Należy podkreślić, że podjęcie badań struktur o ograniczonych rozmiarach planarnych odpowiada najnowszemu trendom badawczym w dziedzinie fizyki materiałów magnetycznych.

Z powyższego skrótego przeglądu wyłania się obraz dra Macieja Urbaniaka jako w pełni dojrzałego i samodzielnego fizyka. Uważam, że Habilitant jest wysokiej klasy specjalistą, od lat zajmującym się magnetooporowymi właściwościami układów wielowarstwowych i osiągającym w tej tematyce znaczące wyniki. Posiada imponujący dorobek naukowy, który spotkał się z zainteresowaniem i uznaniem międzynarodowego środowiska naukowego. Wyrazem tego są liczne cytowania jego prac (w liczbie 24) oraz zaproszenie do recenzowania wielu prac (w liczbie 8), przeznaczonych do opublikowania w czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym.

Podsumowując stwierdzam, że dr Maciej Urbaniak wniósł znaczący wkład w wyjaśnienie międzywarstwowych oddziaływań magnetycznych w układach wielowarstwowych. Mając na uwadze cały dorobek naukowy Habilitanta, a w szczególności osiągnięcia opisane w jego rozprawie habilitacyjnej, uważam, że spełnia on wszystkie warunki stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego i wnioskuję o dopuszczenie dra Macieja Urbaniaka do kolokwium habilitacyjnego.

