

Prof. dr hab. Tomasz Story  
Instytut Fizyki PAN  
w Warszawie

**Recenzja rozprawy habilitacyjnej pt.  
„Własności magnetyczne wybranych układów warstwowych sprzężonych wymiennie”  
i dorobku naukowego doktora Lesława Smardza**

Rozprawa habilitacyjna doktora Lesława Smardza poświęcona jest doświadczalnym badaniom magnetycznych właściwości cienkowarstwowych nanostruktur metalicznych oraz opracowaniu metod ich wytwarzania i zaawansowanej charakteryzacji. Układy typu ferromagnetyk (Co, Fe) – antyferromagnetyk (CoO, NiO) oraz ferromagnetyk-niemagnetyk (Co-Zr, Co-Ti, Fe-Ti i Fe-Zr) zostały przez habilitanta wytworzone przy wykorzystaniu nowoczesnej metody osadzania rozpylaniem magnetronowym w warunkach ultrawysokiej próżni i wnikliwie scharakteryzowane strukturalnie i chemicznie metodami spektroskopii elektronów Augera (AES), rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronów (XPS), dyfrakcji promieni rentgenowskich (XRD) i skaningowej mikroskopii tunelowej (STM). Doświadczalne badania właściwości magnetycznych takich wielowarstwów habilitant wykonał przy wykorzystaniu różnych technik magnetometrycznych (waga Faradaya, wibromagnetometr Fonera, magnetoptyczny magnetometr Kerra). Podstawowe wyniki badawcze pracy dotyczą zarówno wytwarzania i charakteryzacji nanostruktur metalicznych jak i doświadczalnych badań mechanizmów oddziaływań wymiennych na granicy antyferromagnetyk-ferromagnetyk (efekt jednozwrotowej anizotropii wymiennej, ang. *exchange bias effect*) oraz pomiędzy warstwami ferromagnetycznymi poprzez cienkie metaliczne przekładki niemagnetyczne. W przedłożonym zbiorze prac doświadczalnych i technologicznych habilitant z sukcesem podejmuje ambitne zadania badawcze w jednym z najważniejszych działów współczesnej fizyki i technologii ciała stałego jakim są wielowarstwowe układy magnetyczne typu ferromagnetyk-niemagnetyk. Zarówno efekty anizotropii wymiennej jak i międzywarstwowe oddziaływania wymienne mają podstawowe znaczenie dla szeregu ważnych układów magnetoelektronicznych, np. typu zawór spinowy. Układy te, w okresie zaledwie jednej dekady od ich odkrycia, znalazły zastosowanie w magnetycznych czujnikach i pamięciach nowej generacji o powszechnych zastosowaniach. Badane przez habilitanta nowe układy warstwowe pozwalają na podjęcie analizy tych ważnych efektów dla słabo zbadanych przypadków oddziaływań poprzez przekładki o różnej strukturze krystalicznej (amorficzne, nanokrystaliczne lub polikrystaliczne) i morfologii międzypowierzchni.

Rozprawę habilitacyjną dr. L. Smardza stanowi 12-cie prac oryginalnych opublikowanych w okresie 1991-2006 w dobrych czasopismach międzynarodowych, w tym: 4 prace w *physica status solidi* (a) i (b), 2 prace w *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* i po jednej pracy w *Journal of Applied Physics*, *Solid State Communications*, *Vacuum*, *Journal of Alloys and Compounds*, *Crystal Research and Technology* i *Czechoslovak Journal of Physics*. W 5-ciu pracach dr L. Smardz jest jedynym autorem a 7 pozostałych prac

ma charakter wieloautorski. W sumie dr L. Smardz jest pierwszym autorem 11-tu prac i drugim autorem w 12-tej pracy (h9). Wiodącą rolę dr. L. Smardza, zarówno w podjęciu tej problematyki badawczej jak i w realizacji prac technologicznych i badań doświadczalnych, jednoznacznie stwierdzają załączone oświadczenia współautorów. Rozprawa zaopatrzona jest w autoreferat informujący o głównych kierunkach badań przedstawionych w rozprawie oraz załączniki przedstawiające życiorys i dorobek naukowy habilitanta.

Tematycznie rozprawa habilitacyjna dr. L. Smardza podzielona jest na dwa działy obejmujące wytwarzanie, charakteryzację strukturalną i chemiczną oraz badania właściwości magnetycznych dwóch klas metalicznych struktur warstwowych, wykazujących międzywarstwowe sprzężenia wymienne:

- a) warstw podwójnych typu ferromagnetyk-antyferromagnetyk (Co-CoO, Co-NiO, permaloj-NiO), w których oddziaływania wymienne na międzypowierzchni prowadzą do zasadniczej modyfikacji (przesunięcia, poszerzenia) pętli histerezy magnetycznej w wyniku indukowania anizotropii wymiennej (jednozwrotowej);
- b) wielowarstw typu ferromagnetyczny metal-niemagnetyczny metal (Co-Ti, Co-Zr, Fe-Ti, Fe-Zr), w których sąsiednie warstwy ferromagnetyczne są sprzężone oddziaływaniami wymiennymi poprzez ultracienką przekładkę niemagnetyczną.

Publikacje h1 i h2, wykonane przy współpracy z grupą z Jülich, dotyczą warstw podwójnych ferromagnetyk-antyferromagnetyk Co-CoO otrzymanych metodą utleniania w powietrzu warstwy Co osadzonej przy wykorzystaniu działa elektronowego na podłożu Si (111)/SiO<sub>2</sub> (101). Badano także referencyjne warstwy Co skutecznie zabezpieczone przed utlenianiem poprzez nałożenie przykrywającej warstwy ZnS. W pracach h1 i h2 szczegółowo przedyskutowano kinetykę utleniania warstwy Co. Wyznaczona doświadczalnie zależność pola anizotropii wymiennej  $H_{EB}$  (przesunięcie pętli histerezy magnetycznej) od grubości ferromagnetycznej warstwy kobaltu  $d_{FM}$  spełnia zależność  $H_{EB} \sim 1/d_{FM}$ . Potwierdza to powierzchniowy charakter mechanizmu fizycznego odpowiedzialnego za anizotropowe (jednozwrotowe) oddziaływania wymienne. Obserwowana temperaturowa zależność pola anizotropii wymiennej  $H_{EB}(T) \sim (1-T/T_B)^n$  ( $T_B=200$  K,  $n>2$ ) jest dyskutowana przez habilitanta w ramach modelu teoretycznego pól przypadkowych na realnej (szorstkiej) międzypowierzchni. Wyznaczona doświadczalnie temperatura blokowania  $T_B$  dla układu Co-CoO jest niższa od temperatury Neela tlenku kobaltu.

W pracach h3 i h4 habilitant podjął badania warstw podwójnych Co-NiO oraz permaloj-NiO wytworzonych w IFM PAN metodą rozpylania magnetronowego na podłożu szklanym oraz krystalicznym Si (111)/SiO<sub>2</sub> (101). Wierzchnia warstwa ferromagnetyczna była zabezpieczona przed utlenianiem poprzez nałożenie warstwy Cu. Warstwy podwójne zostały wytworzone w postaci struktury klinowej zapewniającej możliwość wygodnej analizy właściwości magnetycznych struktury w funkcji grubości warstwy ferromagnetycznej  $d_{FM}$ . Przeprowadzone pomiary i analiza pętli histerezy magnetycznej warstw podwójnych pozwoliły na wyznaczenie zależności pola anizotropii wymiennej  $H_{EB}$  i pola koercji  $H_c$  od grubości ferromagnetycznej warstwy Co lub permaloju i zaobserwowania, zarówno dla pola wymiany anizotropowej jak i dla zmiany pola koercji  $\Delta H_c$ , zależności typu  $1/d_{FM}$ . Habilitant wykonał również, metodą mikroskopii kerrowskiej, analizę struktury domenowej warstw podwójnych wykazujących silne i słabe sprzężenie wymienne na międzypowierzchni Co (lub permaloj)-NiO. Analiza temperaturowej zależności pola wymiany wykazała, że warstwy podwójne Co-NiO oraz Co-permaloj charakteryzują się wysoką temperaturą blokowania  $T_B=500-520$  K, praktycznie równą temperaturze Neela tlenku niklu. Przeprowadzona w pracach h3 i h4 dyskusja obserwowanej eksperymentalnie znacznie niższej (od przewidywań

modeli teoretycznych) energii anizotropowych sprzężeń wymiennych w warstwach podwójnych weryfikuje negatywnie niektóre czynniki (zanieczyszczenia chemiczne, tworzenie stopów w obszarze międzypowierzchni), wskazując na ważną rolę morfologii oraz krystaliczności warstw.

Warstwy wielokrotne na bazie Co są przedmiotem prac: h5, h6 i h7 (otrzymywanie oraz charakteryzacja strukturalna i magnetyczna wielowarstw Co-Ti) oraz h10 i h11 (międzywarstwowe sprzężenia wymienne w układzie Co-Ti-Co i Co-Zr-Co). Habilitant poświęcił wiele uwagi zapewnieniu bardzo wysokiej jakości otrzymanych struktur warstwowych oraz ich szczegółowej charakteryzacji w czasie wzrostu warstw (wykonywanego w IFM PAN metodą rozpylania magnetronowego). Szczegółową analizę obecności nawet śladowych zanieczyszczeń prowadzono w komorze analitycznej metodą rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronów. Struktura krystaliczna warstw była badana metodami dyfrakcji promieni X a morfologię powierzchni warstw analizowano metodą skaningowej mikroskopii tunelowej. Habilitant stworzył bardzo wyczerpujący obraz właściwości magnetycznych tych wielowarstw. Szczególnie interesujące są obserwacje silnych zmian pola koercji warstwy Co w zależności od grubości zarówno warstwy Co jak i warstw niemagnetycznych (Ti lub Zr). Wykazano, że kluczową rolę odgrywa tu jakościowa zmiana struktury krystalicznej warstw: od warstw nanokrystalicznych (magnetycznie miękkich, grubość warstwy Co poniżej 3 nm) do znacznie bardziej magnetycznie twardych, grubszych warstw polikrystalicznych. Badania międzywarstwowych sprzężeń wymiennych poprzez cienkie przekładki Ti i Zr wykonano dla struktur klinowych Co-Ti-Co i Co-Zr-Co o zmiennej szerokości przekładki. Doświadczalnie stwierdzono istnienie zarówno ferromagnetycznych i antyferromagnetycznych sprzężeń biliniowych jak i sprzężenia bikwadratowego prowadzącego do tzw. struktur 90-stopniowych. Wnioski te oparte są na analizie zmian struktury domenowej oraz pola koercji wielowarstw w zależności od grubości przekładki niemagnetycznej. Habilitant prowadził także modelowanie pętli histerezy magnetycznej. Podsumowaniem tego cyklu badań jest zaproponowany w rozprawie habilitacyjnej schemat ewolucji charakteru międzywarstwowych sprzężeń wymiennych w układzie Co-Ti-Co i Co-Zr-Co od ferromagnetycznych dla najcieńszych przekładek (do około 2 nm), poprzez słabe sprzężenia antyferromagnetyczne (2-3 nm) do wielowarstw praktycznie niesprzężonych (grubość przekładek powyżej 3 nm). W układzie Co-Ti-Co habilitant obserwował także sprzężenia 90-stopniowe.

Warstwy wielokrotne na bazie Fe przedstawione są w pracach h8 i h9 (otrzymywanie oraz charakteryzacja strukturalna i magnetyczna wielowarstw Fe-Ti i Fe-Zr) oraz h12 (międzywarstwowe sprzężenia wymienne w układzie Fe-Zr-Fe). Do realizacji tego cyklu prac zastosowano analogiczne, do omówionych wyżej, techniki wytwarzania, charakteryzacji i badań właściwości magnetycznych warstw. W przypadku struktur Fe-Zr-Fe obserwowano sprzężenia ferromagnetyczne i słabe sprzężenia antyferromagnetyczne podczas gdy w wielowarstwach Fe-Ti-Fe zaobserwowano jedynie sprzężenia ferromagnetyczne. Zarówno w układach na bazie Co jak i na bazie Fe obserwuje się dosyć krótki zasięg sprzężeń wymiennych poprzez przekładki Ti lub Zr, co habilitant wiąże z silnym tłumieniem oddziaływań wywołanym kwazi-amorficzną strukturą krystaliczną przekładek.

Cykl omówionych powyżej 12-tu publikacji dr. L. Smardza stanowi spójny zbiór oryginalnych prac naukowych, w których habilitant podjął i z sukcesem zrealizował ważne zadania z dziedziny fizyki i technologii materiałów magnetycznych. Najważniejsze osiągnięcia przedstawione w rozprawie habilitacyjnej można krótko podsumować następująco.

- 1) Opracowanie metod wytwarzania oraz wykonanie szczegółowej charakteryzacji ultracienkich warstwowych układów typu ferromagnetyk/niemagnetyk na bazie ferromagnetycznych warstw Co i Fe i niemagnetycznych warstw Zr i Ti oraz antyferromagnetycznych tlenków CoO i NiO. Zbadanie zależności podstawowych charakterystyk magnetycznych tych materiałów (poła koercji, namagnesowania nasycenia) od grubości poszczególnych warstw i temperatury oraz wykazanie zasadniczego wpływu struktury krystalicznej warstw (nano- lub polikrystalicznej) na ich właściwości magnetyczne.
- 2) Zbadanie efektów sprzężenia wymiennego w warstwach podwójnych typu ferromagnetyczny metal (Co, Fe lub stop permalój) – antyferromagnetyczny tlenek (CoO lub NiO). Wyznaczenie zależności poła anizotropii wymiennej (jednozwrotowej) od temperatury, grubości warstwy ferromagnetycznej i struktury krystalicznej warstw.
- 3) Zbadanie właściwości magnetycznych cienkowarstwowych, metalicznych układów typu ferromagnetyczny metal (Fe lub Co) – niemagnetyczna przekładka (Ti lub Zr), wykazujących biliniowe i bikwadratowe międzywarstwowe sprzężenia wymienne. Wyznaczenie zależności znaku i energii sprzężenia wymiennego od grubości oraz struktury chemicznej i krystalicznej przekładki Ti lub Zr.

Dr L. Smardz posiada duży dorobek naukowy udokumentowany listą 73 prac oryginalnych opublikowanych w recenzowanych czasopismach międzynarodowych, w tym: Journal of Magnetism and Magnetic Materials (16) i physica status solidi a i b (9). 64 z tych prac powstało w okresie po uzyskaniu przez L. Smardza stopnia doktora nauk fizycznych w roku 1988. Dr L. Smardz opublikował także 21 prac (w tym 4 przed uzyskaniem stopnia doktora) w specjalnych wydawnictwach konferencyjnych i raportach naukowych. Dorobek ten jest odzwierciedlony w cytowaniach prac habilitanta. Według bazy danych ISI Web Science (1996 – wrzesień 2006) pełna liczba cytowań prac dr. L. Smardza wynosi około 240, w tym: praca w Journal of Applied Physics z 1992 roku - 35 cytowań, praca w Zeitschrift der Physik B z 1996 roku – 27 cytowań i praca w Journal of Magnetism and Magnetic Materials z 1997 roku - 22 cytowania. Według szczegółowej informacji podanej przez habilitanta całkowita liczba cytowań jego prac (po wyłączeniu autocytowań) wynosi 156.

Wyniki prac habilitanta były 98 razy przedstawiane na konferencjach naukowych. Dr L. Smardz zaprezentował także 1 referat zaproszony na międzynarodowej konferencji CSMAG'01 w Koszycach w roku 2001.

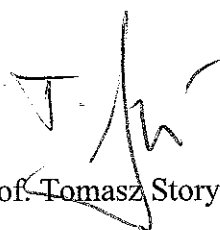
Zainteresowania naukowe dr. L. Smardza obejmują także inne, nie objęte tematyką rozprawy habilitacyjnej, problemy fizyki materii skondensowanej, w szczególności: własności magnetyczne i transportowe wieloskładnikowych litych stopów magnetycznych, oddziaływań wymiennych w modelowych materiałach ferromagnetycznych z rodziny monochalkogenidków europu i struktury elektronowej nanokrystalicznych materiałów metalicznych absorbujących wodór.

Dr L. Smardz posiada duże doświadczenie międzynarodowe uzyskane podczas kilku staży naukowych, które odbył w Jülich (prawie 2 lata), Paryżu/Meudon (1,5 roku), Wersalu i Moskwie. Habilitant uczestniczył w realizacji 9-ciu projektów badawczych finansowanych przez KBN. W 3 projektach pełnił funkcję kierownika.

Działalność dydaktyczna dr. L. Smardza związana jest z opieką naukową nad studentami Politechniki Poznańskiej realizującymi prace magisterskie i praktyki studenckie. Dokumentacja wniosku nie zawiera informacji na temat zaangażowania habilitanta w działalność w zakresie organizacji prac naukowych i popularyzacji nauki.

Omówione powyżej osiągnięcia naukowe przedstawione w rozprawie habilitacyjnej oraz pozostały dorobek naukowy dr. L. Smardza pozwalają stwierdzić, że jest on samodzielnym, doświadczonym fizykiem eksperymentatorem i technologiem skutecznie podejmującym ambitne zadania współczesnej fizyki materiałów magnetycznych i aktywnie wykorzystującym nowoczesne metody otrzymywania oraz charakteryzacji strukturalnej i chemicznej cienkowarstwowych układów magnetycznych.

Podsumowując uważam, że rozprawa habilitacyjna i dorobek naukowy dr. Lesława Smardza spełniają stosowne wymagania ustawowe i wnoszę o dopuszczenie habilitanta do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.



Prof. Tomasz Story