

Warszawa, 19 sierpnia 2021 r.

prof. dr hab. Andrzej Wawro
Instytut Fizyki PAN w Warszawie

Ocena dorobku habilitacyjnego dr Anny Kozioł-Rachwał w związku z postępowaniem o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego

Przedmiotem niniejszej recenzji jest opis osiągnięcia naukowego zatytułowany *Kontrola właściwości magnetycznych niskowymiarowych układów ferro- i antyferromagnetycznych* autorstwa dr Anny Kozioł-Rachwał z Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, sporządzony w celu uzyskania stopnia naukowego doktora habilitowanego.

Sylwetka naukowa Habilitantki

Cała kariera naukowa dr Anny Kozioł-Rachwał jest związana z krakowskimi instytucjami dydaktyczno-naukowymi. Tytuł zawodowy magistra uzyskała w 2008 roku na Uniwersytecie Jagiellońskim. Sześć lat później – w roku 2014 – otrzymała stopień doktora nauk fizycznych na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica. Osiągnięcie to zostało uzyskane po złożeniu i obronie rozprawy pt.: *Struktura i właściwości magnetyczne układów warstwowych metal/izolator* przygotowanej pod kierunkiem naukowym prof. dra hab. Józefa Koreckiego. Rozprawa ta została wyróżniona I Nagrodą im. Janusza Groszkowskiego przyznawaną przez Polskie Towarzystwo Próżniowe. Jeszcze w czasie trwania studiów doktoranckich Habilitantka poszerzała swoje doświadczenie w renomowanych zagranicznych instytucjach naukowych. W ośrodku synchrotronowym ESRF w Grenoble kilkakrotnie brała udział w badaniach wykorzystujących zjawisko rezonansowego jądrowego rozpraszania promieniowania synchrotronowego. W innym ośrodku Synchrotronowym SLS w Szwajcarii pracowała przy fotoemisyjnym mikroskopie elektronowym. W czasie trwania studiów doktoranckich była zaangażowana w realizację dwóch projektów naukowych, Team i Maestro. Po uzyskaniu stopnia doktora w 2015 r. rozpoczęła swój dwuletni staż (post-doc) w Spintronics Research Center w Tsukubie, Japonia. Zakres obowiązków był związany z dotychczas zdobytymi umiejętnościami, tzn. wytwarzaniem magnetycznych struktur warstwowych

z prostopadłą anizotropią, która mogła być sterowana przy pomocy przyłożonego pola elektrycznego. Po powrocie do Krakowa, w roku 2017, uzyskała stypendium Ministra dla Wybitnych Młodych Naukowców. W 2018 r. z powodzeniem wystąpiła o przyznanie funduszy na realizację projektu w ramach programu Homing finansowanego przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej (FNP). W bieżącym roku uzyskała finansowanie badań własnych w ramach konkursu Sonata-Bis ogłoszonego przez Narodowe Centrum Nauki (NCN).

Prace habilitacyjne

Przedmiotem badań opisanych w pracach, będących podstawą dorobku habilitacyjnego dr Anny Kozioł-Rachwał, są właściwości cienkowarstwowych struktur magnetycznych. Układy takie ze względu na ich budowę mają unikalne i relatywnie łatwo intencjonalnie regulowane właściwości. Wynikają one z faktu, że znaczna część atomów warstwy ferromagnetycznej ulokowana jest na interfejsach struktury i zmienia swoje właściwości w stosunku do atomów materiałów objętościowych. Zależą one od rodzaju sąsiadujących atomów oraz naprężeń wynikających z niedopasowania parametrów sieciowych. W układach utworzonych z kilku składowych warstw magnetycznych występują również sprzężenia międzywarstwowe. W ostatnich latach uwagę badaczy skupiły na sobie układy zawierające warstwy antyferromagnetyczne, które są mniej czułe na pole magnetyczne i nie generują pól rozproszonych, a jednocześnie dobrze sprzęgają się z warstwami ferromagnetycznymi. Bogactwo możliwych konfiguracji układów warstwowych pozwala na tworzenie struktur o właściwościach niespotykanych w naturalnych materiałach litych, będących przedmiotem zarówno badań podstawowych, jak i zastosowań praktycznych. Dodatkowo mogą one być intencjonalnie modyfikowane za pomocą światła, prądu elektrycznego, czy przyłożonego napięcia. Podjęte zagadnienia mieszczą się w jednym z głównych nurtów badań prowadzonych w dziedzinie fizyki ciała stałego. Wykorzystanie tego rodzaju struktur pozwoliło w ostatnich latach na intensywny rozwój nowej gałęzi elektroniki – spintroniki wykorzystującej nie tylko ładunek elektryczny, ale również moment magnetyczny elektronów.

Do oceny swojego dorobku habilitacyjnego Kandydatka przedstawiła 6 prac (oznaczonych jako: O1-O6) z opisanej powyżej dziedziny. W każdej z nich jest pierwszym współautorem. Prace te zostały opublikowane w latach 2016 – 2020 w języku angielskim w wysoko notowanych czasopismach o zasięgu globalnym: *Journal*

of Applied Physics (czynnik wpływu, ang. *imapct factor*: 2,546), *Scientific Reports* (5,133), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (2,993), *Applied Physics Letters* (3,596), *APL Materials* (4,841). Jedna z prac, O2, została zacytowana 32 razy. Pozostałe prace są rzadziej cytowane.

Praca O1 opisuje właściwości warstw $\text{MgO}(d_{\text{MgO}})/\text{Cr}/\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{MgO}$ w funkcji grubości bufora MgO (homoepitaksja MgO) i warstwy Fe. Pokazano, że w zależności od tych parametrów można zmieniać kierunek namagnesowania (anizotropię) oraz wielkość koercji. Modyfikacje te są efektem redukcji poziomu zanieczyszczeń C na interfejsie Fe/MgO oraz generowanych na nim naprężeń.

W pracy O2 analizowano nieco bardziej złożoną strukturę $\text{MgO}/\text{Cr}/\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{Cr}(d_{\text{Cr}})/\text{MgO}/\text{Fe}/\text{Ta}$. Wykazano istotny wpływ obecności Cr na interfejsie Fe/MgO powodujący wzrost anizotropii prostopadłej i efektywności jej modyfikacji za pomocą przyłożonego napięcia.

Opis sprzężenia międzywarstwowego w układzie Fe/MgO/Fe zależnego od grubości przekładki MgO stanowi treść pracy O3. W strukturze tej zaobserwowano silne sprzężenie antyferromagnetyczne. Analizowano również zależność magnetooporu. Omówiony też został wpływ procesów litografii na badane właściwości próbek. Interpretacja wyników eksperymentalnych została wsparta symulacjami mikromagnetycznymi przeprowadzonymi dla struktur litograficznych i pokazującymi zmianę namagnesowania z polem w obu warstwach Fe.

Oddziaływanie pomiędzy Fe i FeO zostało opisane w pracy O4. Pokazano, że w warstwach $\text{MgO}/\text{FeO}/\text{Fe}$ wierzchnia warstwa metaliczna modyfikuje stany magnetyczne warstwy tlenkowej. W niskich temperaturach po raz pierwszy zaobserwowano również polaryzację magnetyczną (ang. *exchange bias*) na interfejsie Fe/FeO w strukturach warstwowych.

Układ omówiony w pracy O5 różnił się od poprzedniego (praca O4) wprowadzeniem warstwy separującej MgO. Spowodowała ona istotne modyfikacje morfologiczne i magnetyczne w warstwie FeO. Ponadto obecność warstwy MgO o grubości mniejszej niż rozmiar komórki elementarnej powodowała silny wzrost polaryzacji magnetycznej pomiędzy warstwami Fe i FeO.

Układy analizowane w ostatniej pracy habilitacyjnej O6 zostały wzbogacone o obecność antyferromagnetycznej warstwy NiO. Pokazano, że w warstwach $\text{MgO}/(\text{Cr}(d_{\text{Cr}}))/\text{NiO}(d_{\text{NiO}})/\text{Fe}$ za pomocą naprężeń i sprzężenia międzywarstwowego

można modyfikować strukturę spinową antyferromagnetyka. Ze wzrostem grubości warstwy Cr zaobserwowano reorientację spinową NiO z kierunku prostopadłego do płaszczyznowego. W warstwach NiO z namagnesowaniem w płaszczyźnie zaobserwowano silną anizotropię jednoosiową z kierunkiem spinów zorientowanych prostopadle do tych w sąsiadującej warstwie Fe.

Przedstawione do oceny prace są spójne tematycznie. Obejmują analizę właściwości magnetycznych struktur warstwowych zawierających warstwy Fe i FeO, które są modyfikowane przez wprowadzenie dodatkowych warstw Cr, MgO i NiO. Różnorodna konfiguracja warstw składowych, wykonanych również w formie schodków lub klina, pozwala na modyfikację szerokiej gamy właściwości magnetycznych, takich jak: anizotropia, reorientacja spinowa, sprzężenie międzywarstwowe, magnetoopór. Wszystkie prace są wieloautorskie. Jednak przy dużej złożoności podjętych czynności, które doprowadziły do publikacji uzyskanych wyników, obejmujących: wytworzenie próbek, ich charakteryzację strukturalną, badanie ich właściwości różnymi, komplementarnymi technikami oraz symulacje mikromagnetyczne, dłuższa lista autorów jest zjawiskiem standardowym. Jak już wcześniej wspomniałem, Habilitantka jest pierwszą autorką w tych pracach, a także autorką korespondującą. Opierając się na wspomnianych listach autorów oraz treści oświadczeń pozostałych 23 współautorów tych prac, można wyciągnąć wniosek, że udział dr Anny Koziół-Rachwał w powstawaniu prac wybranych do oceny osiągnięcia habilitacyjnego był kluczowy.

Wyniki bibliometryczne

W wykazie osiągnięć naukowych przygotowanym przez dr Annę Koziół-Rachwał zawarte są następujące informacje naukometryczne: liczba publikacji – 34, liczba publikacji z i.f. – 32, sumaryczny i.f. 114,58, sumaryczna liczba cytowań (bez autocytowań) – 327, indeks Hirscha – 11, sumaryczna liczba punktów MNIŚW – 3620. Statystyka ta obejmuje wszystkie prace autorstwa Habilitantki.

Przeprowadzona przeze mnie w połowie sierpnia 2021 r. podobna analiza statystyczna dla kwerendy „koziol-rachwal a” w bazie Web of Science pokazała następujące wyniki: liczba wszystkich prac – 34, indeks Hirscha – 11, ilość cytowań / bez autocytowań – 343/327, liczba cytowań prac w roku 2020 – 95.

Oprócz sześciu prac przedstawionych do oceny dr Anna Koziół-Rachwał była współautorką 16 innych artykułów naukowych opublikowanych po otrzymaniu stopnia doktora w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym. Należy zaznaczyć, że kilka z nich

zostało zamieszczonych w bardzo wysoko notowanych periodykach: *Physical Review Applied* (i.f. – 4,985), *NPG Asia Materials* (10,481), *Physical Review Letters* (9,161) oraz *Nanoscale* (7,790). W dwóch pierwszych z tych prac Habilitantka była drugim autorem.

Dalsza analiza statystyczna, obejmująca wszystkie 22 prace opublikowane po uzyskaniu stopnia naukowego doktora, doprowadziła do następujących danych: sumaryczny i.f. – 88,805 (dla wybranych prac 01-06 – 22,596), średni i.f. na pracę bez autocytowań – 4,037 (3,766), sumaryczna liczba punktów ministerialnych – 2440 (610), średnia liczba punktów ministerialnych na pracę – 111 (102), całkowita liczba cytowań – 261 (56), średnia liczba cytowań na pracę – 11,86 (9,33). Należy jednak zauważyć, że niższa ilość cytowań nowszych prac wynika zazwyczaj z krótkiej perspektywy czasowej. Średni i.f. przypadający na pracę (4,037) jest wysoki i przekracza wartość uzyskaną przez renomowane czasopismo fizyczne *Physical Review B*. Podobny parametr obliczony dla punktów ministerialnych znacznie przekracza wartość 100, która jest cechą uznanych czasopism. Odpowiednie średnie parametry uzyskane dla prac wybranych do oceny dorobku habilitacyjnego są tylko nieznacznie niższe od wyżej przytoczonych dla wszystkich 22 publikacji.

Inna działalność po uzyskaniu stopnia doktora

Oprócz wspomnianych wyżej publikacji dr Anna Koziół-Rachwał była też współautorką prezentacji konferencyjnych. Po uzyskaniu stopnia doktora wygłosiła 9 referatów i przedstawiła 2 plakaty na konferencjach międzynarodowych. Jest również współautorką jednego patentu amerykańskiego, będącego efektem badań prowadzonych w czasie stażu podoktorskiego w Japonii. Jako wykonawca realizowała jeden projekt w czasie pobytu w ośrodku w Tsukubie. Po powrocie do Polski uzyskała finansowanie dla dwóch własnych projektów: Homing i Sonata-Bis, w których pełniła, lub pełni rolę kierownika. Drugi z tych projektów umożliwia stworzenie nowego zespołu badawczego, który ma prowadzić badania naukowe o charakterze podstawowym. Habilitantka była również poproszona o wykonanie kilku recenzji prac wysłanych do wysoko notowanych czasopism, jak np. *Advanced Functional Materials*.

Praca w instytucji dydaktycznej wymaga prowadzenia zajęć dydaktycznych przez doktorantów i młodych pracowników nauki. Wnioskodawczyni od czasu studiów doktoranckich do chwili obecnej prowadziła dla różnych grup studenckich ćwiczenia rachunkowe z fizyki (również w języku angielskim) i zajęcia laboratoryjne.

Habilitantka pełniła również indywidualną opiekę naukową nad młodszymi adeptami fizyki. W roku 2019 była promotorką dwóch prac magisterskich. Obecnie jako promotor pomocniczy wspiera dwoje doktorantów. Ich prace są w środkowej fazie realizacji, a ich obrona jest przewidziana w roku 2023.

Opinia końcowa

Wnioskodawczyni posiada tytuł naukowy doktora uzyskany w wyniku obrony rozprawy doktorskiej, uhonorowanej I Nagrodą Polskiego Towarzystwa Próżniowego. Przedstawione do oceny prace, opublikowane po nadaniu stopnia doktora, stanowią spójny tematycznie cykl publikacji, zamieszczonych w wysoko notowanych, recenzowanych czasopismach o obiegu międzynarodowym. Przedstawione w nich wyniki wnoszą istotny wkład w rozwój wiedzy obejmującej syntetyczne materiały warstwowe do zastosowań spintronicznych. Pierwsza pozycja na liście autorów oraz złożone przez współautorów tych prac oświadczenia wyraźnie dowodzą kluczowej roli Habilitantki w ich powstawaniu. Jest współautorką także kilkunastu innych artykułów naukowych, które charakteryzują się wysokimi parametrami statystyki bibliometrycznej. Swoje doświadczenie naukowe Kandydatka istotnie pogłębiła w czasie dwuletniego stażu podoktorskiego w uznanym ośrodku japońskim. Po powrocie do Polski z sukcesem wystąpiła o dwa własne projekty. Jeden z nich pozwala na utworzenie zespołu prowadzącego badania podstawowe. Habilitantka może się również poszczycić dużym dorobkiem dydaktycznym. Prowadziła ćwiczenia ze studentami. Jest też promotorką dwóch prac magisterskich i promotorką pomocniczą dwóch prac doktorskich. Osiągnięcia opisane powyżej dowodzą, że Wnioskodawczyni posiada wszelkie umiejętności niezbędne dla samodzielnego pracownika naukowego.

Przedstawione osiągnięcia spełniają również formalne wymogi ustawowe.

W kontekście powyższej oceny z pełnym przekonaniem popieram wniosek dr Anny Koziół-Rachwał o nadanie jej stopnia doktora habilitowanego nauk fizycznych.