



Prof. dr hab. Józef Barnaś
Wydział Fizyki,
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
w Poznaniu

RECENZJA

pracy habilitacyjnej dr Anny Koziół-Rachwał
pt. *”Kontrola właściwości magnetycznych niskowymiarowych
układów ferro- i antyferromagnetycznych”*
oraz ocena dorobku naukowego

Informacje ogólne i dorobek naukowy kandydata

Dr Anna Koziół-Rachwał ukończyła studia na Uniwersytecie Jagiellońskim w roku 2008. Pracę doktorską *„Struktura i właściwości magnetyczne układów warstwowych metal/izolator”* przygotowała pod kierunkiem prof. dr hab. Józefa Koreckiego na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej (AGH) im. Stanisława Staszica w Krakowie. Po jej obronie w 2014 roku uzyskała stopień doktora nauk fizycznych i została zatrudniona na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH na stanowisku asystenta naukowego. W roku 2015 wyjechała na staż podoktorski do Japonii, gdzie przez dwa lata pracowała w centrum badań spintronicznych (Spintronics Research Center) w Tsukubie,

kierowanym przez dra Shinji Yuasę. W roku 2017 wróciła na wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH i zatrudniona została na stanowisku adiunkta.

Tematyka pracy badawczej od samego początku kariery naukowej dr Anny Koziół-Rachwał do chwili obecnej koncentruje się wokół ultracienkich magnetycznych struktur warstwowych wytwarzanych metodą epitaksji i obejmuje zarówno proces wytwarzania struktur, ich charakteryzację, nanostrukturyzację, oraz badania właściwości strukturalnych, chemicznych, magnetycznych i elektrycznych.

Całkowity dorobek naukowy dr Anny Koziół-Rachwał obejmuje 34 publikacje, w tym 32 w czasopiśmie z nadanym impakt faktorem. Zdecydowana większość tych prac ukazała się w bardzo dobrych czasopiśmie naukowych. Łączny impakt faktor wynosi 114,58. Według bazy Web of Science publikacje te cytowane były 327 razy z wyłączeniem autocytowań. Z kolei odpowiedni indeks Hirscha wynosi 11.

Sześć publikacji zostało wybranych jako osiągnięcie habilitacyjne i te publikacje omówione zostaną w kolejnym punkcie recenzji, natomiast w tym punkcie skupię się na dorobku naukowym z wyłączeniem prac wchodzących w skład pracy habilitacyjnej. Dorobek ten (z wyłączeniem prac które stanowią osiągnięcie habilitacyjne) obejmuje 26 publikacji, z czego 24 ukazały się w czasopiśmie z nadanym impakt faktorem. Warto podkreślić, że 12 publikacji pochodzi z okresu przed uzyskaniem stopnia doktora a pozostałe 14 prac z okresu po jego uzyskaniu. Wszystkie publikacje są wieloautorskie. Wśród 12-stu publikacji przed doktoratem, w czterech dr Anna Koziół-Rachwał jest pierwszym autorem natomiast w pozostałych ośmiu jest na dalszej pozycji - podobnie jak we wszystkich 14-stu pracach po doktoracie. Najważniejsze prace opublikowane zostały w takich uznanych czasopiśmie jak Physical Review Letters (2), Nanoscale (1), Physical Review B (8), Physical Review Applied (1), Scientific Reports (2), Journal of Applied Physics (3), oraz Journal of Magnetism and Magnetic Materials (4). Pozostałe 5 prac ukazało się w mniej znanych czasopiśmie. Jest to dorobek bardzo wartościowy jeśli chodzi o merytoryczną zawartość publikacji. Poza tym, dorobek naukowy dr Anny Koziół-Rachwał obejmuje również prezentacje na konferencjach krajowych i zagranicznych. W formie ustnej takich prezentacji konferencyjnych było 11, natomiast w formie plakatowej było ich 6.

Badania naukowe habilitantka prowadziła w ramach wielu projektów badawczych. Przed doktoratem uczestniczyła jako wykonawca w projekcie TEAM oraz MAESTRO. Po doktoracie, będąc na dwuletnim stażu podoktorskim w Japonii, była wykonawcą w projekcie ImPACT (Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies) w ramach

programu 'Technology Grants-in-Aid for Scientific Research'. Po powrocie na AGH była kierownikiem projektu Homing przyznanego przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej. Aktualnie badania prowadzi w ramach projektu SONATA BIS. Rezultaty pracy naukowej dr Anny Koziół-Rachwał jak i jej sukcesy w aktywności grantowej są godne uznania i dobrze roszą na przyszłość. W podsumowaniu tej części działalności naukowej dr Anny Koziół-Rachwał chciałbym podkreślić że dorobek ten oceniam bardzo pozytywnie.

Opinia nt. osiągnięcia naukowego będącego podstawą wniosku habilitacyjnego

Pracę habilitacyjną stanowi cykl sześciu publikacji, wymienionych w autoreferacie jako prace O1 do O6. Są to:

O1. **A. Koziół-Rachwał**, T. Nozaki, V. Zayets, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, and Y. Suzuki, The effect of the MgO buffer layer thickness on magnetic anisotropy in MgO/Fe/Cr/MgO buffer/MgO(001), *Journal of Applied Physics* 120, 085303 (2016).

O2. **A. Koziół-Rachwał**, T. Nozaki, K. Freindl, J. Korecki, S. Yuasa & Y. Suzuki, Enhancement of perpendicular magnetic anisotropy and its electric field-induced change through interface engineering in Cr/Fe/MgO, *Scientific Reports* 7, 5993 (2017).

O3.A. **Koziół-Rachwał**, W. Skowroński, M. Frankowski, J. Chęciński, S. Ziętek, P. Rzeszut, M. Ślęzak, K. Matlak, T. Ślęzak, T. Stobiecki, J. Korecki, Interlayer exchange coupling, dipolar coupling and magnetoresistance in Fe/MgO/Fe trilayers with a subnanometer MgO barrier, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 424, 189-193 (2017).

O4. **A. Koziół-Rachwał**, T. Ślęzak, T. Nozaki, S. Yuasa, and J. Korecki, Growth and magnetic properties of ultrathin epitaxial FeO films and Fe/FeO bilayers on MgO(001), *Applied Physics Letters* 108, 041606 (2016).

O5. **A. Koziół-Rachwał**, W. Janus, M. Szpytma, P. Drózdź, M. Ślęzak, K. Matlak, M. Gajewska, T. Ślęzak, J. Korecki, Interface engineering towards enhanced exchange interaction between Fe and FeO in Fe/MgO/FeO epitaxial heterostructures, *Applied Physics Letters*, 115, 141603 (2019).

O6. **A. Koziół-Rachwał**, M. Ślęzak, M. Zając, P. Drózdź, W. Janus, M. Szpytma, H. Nayyef, T. Ślęzak, Control of spin orientation in antiferromagnetic NiO by epitaxial strain and spin-flop coupling, *APL Materials* 8, 061107 (2020).

Wszystkie prace są publikacjami wielo-autorskimi. Średnia arytmetyczna liczby współautorów wynosi około 7.6, co w przypadku prac eksperymentalnych jest dość typowe. Jednakże we wszystkich tych publikacjach dr Anna Kozioł-Rachwał jest pierwszym autorem, co wskazuje na jej dominujący wkład do tych prac. Wynika to również z opisu habilitantki jej wkładu do poszczególnych publikacji, oraz z dołączonych do dokumentacji oświadczeń współautorów wszystkich prac.

Tematyka prac tworzących osiągnięcie habilitacyjne jest bardzo aktualna i dotyczy kontroli stanu magnetycznego układu. Problem ten jest istotny z punktu widzenia zastosowania układów magnetycznych zarówno w technikach informatycznych jak i w elementach nanoelektroniki a w szczególności spintroniki. Prace O1-O3 dotyczą właśnie kontroli stanu magnetycznego poprzez zmianę anizotropii magnetycznej w cienkowarstwowych strukturach ferromagnetycznych. Istotna jest tutaj zmiana kierunku anizotropii magnetycznej z prostopadłej do warstwy do anizotropii w płaszczyźnie warstwy (lub na odwrót). To oczywiście związane jest z reorientacją kierunku namagnesowania. W pracy O1 taka zmiana kierunku anizotropii w cienkiej warstwie żelaza uzyskana została poprzez zastosowanie warstwy buforowej MgO w strukturach MgO/Fe/Cr/MgO. Przy odpowiedniej grubości warstwy buforowej zachodzi zmiana kierunku magnetyzacji z kierunku prostopadłego do warstwy do równoległego do warstwy. Z punktu widzenia wielu praktycznych zastosowań bardziej pożądana jest jednak możliwość zmiany wielkości (możliwie również kierunku) anizotropii magnetycznej (tym samym kierunku namagnesowania) przy pomocy jakiegoś zewnętrznie sterowanego parametru, np. przy pomocy zewnętrznego pola elektrycznego. Efekt zmiany anizotropii magnetycznej przy pomocy pola elektrycznego (VCMA: od voltage controlled magnetic anisotropy) zademonstrowany został w pracy O2 w układach cienkowarstwowych typu Cr/Fe/MgO. Poprzez kontrolowane domieszkowanie atomami Cr granicy między warstwami Fe i MgO uzyskano silny wpływ stopnia domieszkowania na wartość anizotropii magnetycznej, oraz duży współczynnik VCMA. Zmiana anizotropii w wyniku zewnętrznego pola elektrycznego może mieć duże znaczenie praktyczne, na przykład może być wykorzystana w procesie zapisu informacji.

Nieco inny problem, chociaż w podobnych układach, badany był w pracy O3, która poświęcona jest właściwościom magnetycznym i transportowym złączy tunelowych typu Fe/MgO/Fe. W pracy tej wyznaczone zostało oddziaływanie dipolowe między warstwami Fe w funkcji grubości bariery MgO (w zakresie grubości subnanometrowych) oraz wartość tunelowego magnetooporu (TMR: od tunnel magneto-resistance). Z zachowania się wartości TMR z wzrostem grubości bariery oszacowano długość tzw. „otworków” (ang. pinholes) w

strukturze bariery. Choć zyskane wartości TMR są znaczne, to jednak nie należą do wysokich w porównaniu z rekordowymi wartościami uzyskanymi na podobnych złączach w grupie Yuasy.

Omówione wyżej prace dotyczą układów ferromagnetycznych. Technologia ich wytwarzania nie należy do prostych i wymaga zaawansowanej aparatury, nie tylko do ich wytworzenia ale również do ich charakteryzacji. Dwie z tych prac powstały we współpracy z grupą japońską a wszystkie trzy są w pewnym sensie efektem dwuletniego pobytu habilitantki na stażu podoktorskim w Spintronics Research Center (Tsukuba). Szkoda tylko, że w tym okresie nie powstała praca na miarę czasopism tych najbardziej prestiżowych, ale mimo to pobyt ten był owocny dla habilitantki.

Możliwości spintroniki opartej na układach ferromagnetycznych są praktycznie już dość dobrze zbadane, podobnie jak właściwości fizyczne ferromagnetycznych struktur cienkowarstwowych. Stąd dalsze badania prowadzone są nad nowymi materiałami, mającymi nowe właściwości fizyczne i dającymi nowe możliwości aplikacyjne. Jednym z takich kierunków jest spintronika antyferromagnetyczna, która jest aktualnie przedmiotem zainteresowania w wielu wiodących laboratoriach w świecie. I właśnie tematyce związanej z fizyką cienkowarstwowych epitaksjalnych układów antyferromagnetycznych poświęcone są kolejne trzy prace, O4 do O6. Tematyka tych prac jest więc bardzo aktualna i prace te wpisują się w najnowsze trendy poszukiwań nowych rozwiązań i nowych struktur o potencjalnych możliwościach zastosowania w spintronice i technikach informatycznych. Praca O4 dotyczy epitaksjalnych ultracienkich warstw antyferromagnetycznego tlenku FeO i dwuwarstw Fe/FeO na podłożu MgO. Z badań histerezy magnetycznej wyznaczono wartość anizotropii wymiany, która występuje na granicy ferromagnetyka (Fe) i antyferromagnetyka (FeO). Znaleziona anizotropia wymiany występuje jednak w dość niskich temperaturach (do około 50 K), co jest znacznie poniżej temperatury Neela dla litego FeO (198 K). Samo pole wymiany na interfejsie jest efektem dobrze znanym w cienkich warstwach, ale mniej zbadanym w ultracienkich epitaksjalnych strukturach, z dobrze określoną strukturą atomową warstw i interfejsów.

Z kolei w pracy O5 wytworzono epitaksjalne warstwy Fe/MgO(d-MgO)/FeO o zmiennej grubości d warstwy MgO rozdzielającej Fe i FeO. Pokazano, że ultracienka warstwa MgO prowadzi do poprawy stechiometrii warstwy FeO, co z kolei prowadzi do zwiększenia oddziaływania wymiennego między warstwami Fe i FeO. Maksimum wzmocnienia znaleziono dla grubości warstwy MgO około 1.8 Angstrema. Wynik ten stwarza możliwość

modyfikacji oddziaływania wymiennego między Fe i FeO poprzez odpowiednią inżynierię interfejsu. Podobnego efektu można oczekiwać również w innych układach złożonych z ultracienkich warstw ferro- i antyferromagnetycznych.

Ostatnia z cyklu prac tworzących osiągnięcie habilitacyjne, praca O6, dotyczy reorientacji spinu w antyferromagnetycznym tlenku NiO w wyniku naprężeń w strukturze Fe/NiO(Cr)/MgO z warstwą buforową Cr w postaci klina. Pokazano, że orientacja spinu w NiO zmienia się z grubością warstwy Cr i przechodzi od prostopadłej do warstwy przy braku warstwy Cr do w płaszczyźnie warstwy jeśli grubość warstwy Cr rośnie od zera do 3.5 nm. Dokładne badania potwierdziły istnienie osi łatwej w przypadku struktury Fe/NiO/Cr. Co więcej, kierunek spinu w NiO jest prostopadły do kierunku magnetyzacji Fe. Istotnym wynikiem tej pracy jest pokazanie w jaki sposób można wpływać na kierunek spinu w antyferromagnetycznych tlenkach.

Ważnym punktem wszystkich prac jest precyzyjna technologia wytwarzania ultracienkich (w skali subnanometrowej) wielowarstw z wykorzystaniem metody epitaksji. Z kolei nanostrukturyzację wykonano metodami litografii optycznej i elektronowej. Ale nie mniej ważna jest precyzyjna charakteryzacja otrzymanych struktur pod względem chemicznym, krystalicznym jak i magnetycznym. Do scharakteryzowania wytworzonych układów wykorzystano szereg różnych technik eksperymentalnych takich jak metody dyfrakcji elektronów wysoko- (RHEED) i niskoenergetycznych (LEED), spektroskopię Mossbauera, spektroskopię transmisyjnego mikroskopu elektronowego, czy też spektroskopię elektronów Augera. Z kolei, do badań magnetycznych wykorzystano między innymi magnetoptyczny efekt Kerra (MOKE), magnetyczny dichroizm liniowy, oraz nadprzewodnikowy magnetometr (SQUID). Prace te są niewątpliwie żmudne i czasochłonne, ponadto wymagają zaangażowania zespołu, co wyjaśnia dość dużą liczbę współautorów. Ale jak już wspominałem, w tego typu pracach technologiczno-eksperymentalnych jest to niezbędne. Uzyskane wyniki w skali grubości subnanometrowych różnią się na ogół od tych dla znacznie większych grubości, a precyzyjna kontrola parametrów na tym poziomie jest niezwykle istotna. Jako recenzent (ale również jako teoretyk) wysoko oceniam poziom technologiczno-eksperymentalny tych prac i całego osiągnięcia habilitacyjnego.

Uzyskane wyniki są efektem nie tylko żmudnej pracy badawczej, ale również rzetelnej interpretacji fizycznej. Chociaż rezultaty nie są zbyt spektakularne, to jednak stanowią bardzo istotny wkład do fizyki ultracienkich nanostruktur magnetycznych. Za najciekawsze z ich uważam:

1. Pokazanie możliwości zmiany prostopadłej anizotropii magnetycznej jak również jej zależności od pola elektrycznego w strukturze Fe/Cr/MgO poprzez zastosowanie sub-monowarstwy Cr na granicy między Fe i MgO .
2. Wykonanie pomiarów tunelowego magnetooporu w strukturach tunelowych Fe/MgO/Fe dla grubości barier MgO poniżej 1nm.
3. Uzyskanie zwiększonego oddziaływania między ferro- i antyferromagnetykiem poprzez wprowadzenie przekładki MgO w układzie Fe/MgO/FeO.
4. Zaobserwowanie reorientacji kierunku spinów w epitaksjalnej antyferromagnetycznej warstwie NiO, indukowanej zmianą naprężeń w strukturze Fe/NiO/Cr(*d*).

Opinia nt. aktywności naukowej realizowanej w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej

Już w trakcie studiów doktoranckich dr Anna Kozioł-Rachwał odbyła krótki staż naukowy w ośrodku synchrotronowym ESRF w Grenoble, gdzie wykonywała prace eksperymentalne z wykorzystaniem metody rezonansowego jądrowego elastycznego oraz nieelastycznego rozpraszania promieniowania synchrotronowego. W 2012 roku odbyła miesięczny staż w ośrodku synchrotronowym Swiss Light Source (SLS) w Szwajcarii, gdzie z kolei prowadziła badania z wykorzystaniem fotoemisyjnego mikroskopu elektronowego (Photoemission Electron Microscope).

Najważniejszym z punktu widzenia ustawowych wymogów był jednak dwuletni staż podoktorski w latach 2015 – 2017 w Spintronics Research Center (Tsukuba, Japonia), którym kierował dobrze znany w świecie ekspert od magnetycznych złączy tunelowych, dr. Shinji Yuasa. W centrum tym prowadziła badania w ramach projektu ImPACT (Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies), a głównym celem tych prac było wytwarzanie nowych struktur oraz badanie ich właściwości magnetycznych z punktu widzenia poszukiwań układów o jak największej prostopadłej anizotropii magnetycznej, oraz w których anizotropią magnetyczną można sterować zewnątrznie przy pomocy napięcia elektrycznego. Jest to tematyka ważna z punktu widzenia zastosowań w pamięciach magnetycznych. W okresie tym powstało kilka ważnych dla dorobku naukowego prac, których dr Anna Kozioł-Rachwał jest współautorem.

Wniosek końcowy

Przedstawiona wyżej opinia dotycząca osiągnięcia naukowego będącego podstawą pracy habilitacyjnej, jak również opinia nt. działalności w innych instytucjach badawczych oraz nt. pozostałego dorobku naukowego pozwala jednoznacznie stwierdzić, że dorobek ten spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia dra habilitowanego w ramach ustawy z 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. W szczególności spełnia on wymagania wynikające z art. 219 ust.1 pkt. 2 i 3 tej ustawy i w pełni uzasadnia wniosek dr Anny Koziół-Rachwał o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego. Wniosek ten zdecydowanie popieram.

Poznań, 22 września 2021r.



Prof. dr hab. Józef Barnaś