

Warszawa, 25-12-2023

Prof. dr hab. Tomasz Story
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
w Warszawie

Recenzja pracy habilitacyjnej dr inż. Ewy Młyńczak i jej osiągnięcia naukowego w postaci cyklu artykułów naukowych pt. „Fundamentalne właściwości elektronowe epitaksjalnych warstw Fe(001) osadzonych na Au(001)”.

Pani Ewa Młyńczak ukończyła w roku 2009 studia na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. **Stopień doktora nauk chemicznych** uzyskała w roku 2013 w Instytucie Katalizy i Fizykochemii Powierzchni PAN w Krakowie na podstawie rozprawy pt. „*Surface and interface properties of metal-oxide magnetic nanostructures*” (promotor - prof. dr hab. Józef Korecki).

Obecnie Ewa Młyńczak jest zatrudniona na stanowisku adiunkta w Instytucie Katalizy i Fizykochemii Powierzchni PAN. Jej już bardzo bogate doświadczenie zawodowe obejmuje także podoktorski staż naukowy, który w latach 2015-2020 odbyła w Instytucie Petera Grünberga (PGI-6) w Centrum Badawczym w Jülich w Niemczech. W latach 2013-2018 E. Młyńczak była zatrudniona w Katedrze Ciała Stałego Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Habilitantka uczestniczyła także w szeregu krótko-terminowych pobytów badawczych w centrach promieniowania synchrotronowego we Włoszech, Francji, Szwajcarii i Wlk. Brytanii. Tak więc należy stwierdzić, że w pełni spełnia ona odnośne wymagania ustawowe związane z **aktywnością w innych jednostkach** badawczych.

W swojej **działalności naukowej** dr inż. E. Młyńczak podejmuje, metodami fizyki doświadczalnej w warunkach ultra wysokiej próżni, problemy zasadnicze dla rozwoju fizyki magnetyzmu i opracowania nowych cienkowarstwowych materiałów spintronicznych. Badany układem są wysokiej jakości monokrystaliczne, ferromagnetyczne warstwy bcc-Fe (001) osadzone epitaksjalnie na niemagnetycznym podłożu Au – ciężkim pierwiastku z silnymi efektami spinowo-orbitalnymi i bardzo dobrym dopasowaniem strukturalnym do Fe. E. Młyńczak zrealizowała (przy aktywnej współpracy z teoretykami) szeroki program badań doświadczalnych o dużej randze naukowej. Wyniki tych prac są ważne dla zrozumienia właściwości magnetycznych i elektronowych nie tylko badanych przez nią cienkich warstw kryształów Fe lecz także dla cienkowarstwowych materiałów z kontrolowanymi właściwościami strukturalnymi, elektronowymi i magnetycznymi.

Dr inż. Ewa Młyńczak przedłożyła **wniosek habilitacyjny związany z osiągnięciem naukowym pt. „Fundamentalne właściwości elektronowe epitaksjalnych warstw Fe(001) osadzonych na Au(001)”** przedstawiony w postaci cyklu 5 powiązanych tematycznie prac A1-A5 opublikowanych w latach 2016 - 2022 w bardzo dobrych międzynarodowych czasopismach fizycznych: Physical Review X (2016), Nature Communications (2019) i trzy prace w Physical Review B (2018, 2021 i 2022). Wyniki uzyskane przez habilitantkę stanowią dobrze określony indywidualny wkład do rozwiązania różnych problemów fizycznych związanych ze zrozumieniem podstawowych właściwości elektronowych i magnetycznych modelowego materiału współczesnej spintroniki: cienkim warstwom Fe osadzonych na Au.

W czterech publikacjach (A2-A5) habilitantka jest pierwszą autorką oraz autorką korespondującą, natomiast w pracy A1 E. Młyńczak jest na drugim miejscu listy autorów, pełniąc jednocześnie rolę korespondentki. Pierwszą autorką tej pracy jest doktorantka Pika Gospodarcic, którą habilitantka opiekowała się podczas realizacji swojego projektu badawczego.

W świetle 20 oświadczeń złożonych przez większość współautorów, w tych publikacjach kluczowy udział dr inż. E. Młyńczak w sformułowaniu zadań badawczych oraz ich realizacji doświadczalnej, a także interpretacji obserwacji doświadczalnych (przy współpracy z grupą teoretyków) nie budzi wątpliwości.

Aktywność badawcza związana z osiągnięciem naukowym habilitantki omówiona jest w 29-stronicowym autoreferacie, w którym przedstawiony jest dotychczasowy stan wiedzy w zakresie badań struktury elektronowej objętości i powierzchni kryształów Fe, a także omówione są zagadnienia fizyczne podjęte w poszczególnych pracach A1-A5, składających się na osiągnięcie naukowe habilitantki. Obejmuje to: opracowanie procedury technologicznej wzrostu epitaksjalnego warstw Fe(001) na monokryształach Au oraz zbadanie struktury elektronowej Fe metodami spektroskopii fotoelektronów i zaobserwowanie takich efektów jak: (1) indukowane oddziaływaniem spinowo-orbitalnym otwieranie przerw energetycznych w widmie stanów elektronowych, (2) anomalna dyspersja energii elektronów związana z efektami wielociałowymi (wpływ sprzężenia elektron-magnon), (3) kwantowanie wymiarowe spinowo spolaryzowanych stanów 3d Fe czy (4) krytyczna dyskusja różnych wariantów obliczeń *ab initio* spinowo rozdzielonych stanów elektronowych Fe(001). Krótko przedstawione są także stosowane przez habilitantkę wyrafinowane techniki doświadczalne (synchrotronowe i laboratoryjne). To dobrze napisane i łatwe w odbiorze wprowadzenie do tematyki badawczej habilitantki. Autoreferat zawiera także podstawowe informacje o innych osiągnięciach badawczych habilitantki oraz innych formach jej aktywności naukowej i dotychczasowym zatrudnieniu w polskich i niemieckich jednostkach naukowych.

Praca A1 dotyczy epitaksjalnego wzrostu cienkich warstw Fe(001) na podłożu Au(001) metodą epitaksji z wiązek molekularnych (MBE) przy wykorzystaniu dobrego dopasowania strukturalnego obu metali (przy skróceniu osi x-y kryształów o 45 stopni). Opracowano metodę niskotemperaturowego wzrostu warstw, po którym następuje wygrzewanie w wyższych temperaturach. Pozwala to skutecznie uniknąć niekorzystnego efektu pokrywania się powierzchni Fe ultra cienkimi wyspami złota. Opracowana przez

habilitantkę i jej doktorantkę metodyka pozwoliła na uzyskanie warstw bcc-Fe o bardzo wysokiej jakości i była wykorzystywana w późniejszych pracach, zwykle jako wzrost w warunkach UHV umożliwiający transport warstwy w warunkach wysokiej próżni do stanowisk pomiarowych w laboratoriach synchrotronowych.

W publikacji A2 przedstawione są oryginalne (pierwsze w literaturze przedmiotu) fotoemisyjne obserwacje otwierania (lub zamykania) tzw. przerw spinowo-orbitalnych (rzędu 100 meV) w widmie stanów elektronowych powierzchni bcc-Fe(001) w zakresie energii Fermiego, w punktach X powierzchniowej strefy Brillouina. Efekt ten może być sterowany poprzez namagnesowanie warstwy w różnych kierunkach krystalograficznych. Zaproponowana w pracy interpretacja fizyczna tych efektów bazuje na wynikach obliczeń struktury elektronowej objętości i powierzchni Fe(001) z uwzględnieniem członów relatywistycznych. Wyniki wskazują na kluczową rolę oddziaływania spin-orbita oraz łamania (w wyniku namagnesowania) symetrii odwrócenia czasu oraz symetrii translacyjnej (na granicy warstwa/próżnia). Ten bardzo intrygujący wynik badawczy pokazuje na nowy mechanizm sterowania magnetoprzewodnictwem elektrycznym warstw Fe(001) i kontroli takich ważnych efektów jak magnetorezystancja tunelowa czy samoistna (związanej z fazą Berry'ego) składowa anomalnego efektu Halla. Bezpośrednim dowodem istnienia takiego wpływu mogą być pomiary magnetoprzewodnictwa na takich samych warstwach, np. z wykorzystaniem 4-sondowego mikroskopu STM/STS?

Publikacja A3 dotyczy doświadczalnej obserwacji anomalii (załamania na zależności dyspersyjnej $E(k)$) w widmie stanów elektronowych Fe(001) dla energii elektronów głęboko poniżej poziomu Fermiego. Obserwowana duża energia wiązania 1.5 eV przekracza zakres energii charakterystycznych dla pojedynczych wzbudzeń bozonowych (fonony, magnony, plazmony). Opracowany zaawansowany model teoretyczny (tzw. metoda funkcji Greena GT) wskazuje na wielociałową naturę tego wzbudzenia uwzględniającego sprzężenie elektron – magnon w postaci indukowanego w procesie fotoemisji stanu związanego foto-dziury (mniejszościowej) i większościowej pary elektron- dziura.

Praca A4 poświęcona jest doświadczalnej weryfikacji (metodami spektroskopii fotoemisyjnej) efektów kwantowania wymiarowego stanów elektronowych 3d Fe w studniach kwantowych w postaci cienkich warstw bcc-Fe(001) o grubości 20 i 40 monowarstw. Zrealizowano bardzo rozległy program wszechstronnych badań struktury pasmowej Fe w ważnych zakresach energii i wektora falowego, także z rozdzielczością spinową. Dane doświadczalne porównano z wynikami obliczeń struktury elektronowej wykonanymi metodą GW oraz bazującymi na tych obliczeniach symulacjami widma fotoemisji wykonanymi metodą opracowaną przez habilitantkę. Zwraca uwagę wszechstronność i bardzo wysoka jakość obserwacji doświadczalnych. Pozwoliło to na identyfikację stanów elektronowych studni kwantowych i obserwację ich zależności od namagnesowania warstwy. Wskazano na istotną rolę kwantowania wymiarowego dla takich efektów jak zależność energii anizotropii magnetycznej oraz magnetooporu od grubości warstwy Fe.

W publikacji A5 habilitantka wykorzystuje opracowane przez siebie metody technologiczne wytwarzania warstw Fe(001)/Au oraz metodykę symulacji widma fotoemisyjnego na podstawie obliczeń struktury elektronowej (przedstawione w pracach A1-A4). Dokonuje porównania przewidywań teoretycznych różnych metod obliczeniowych *ab initio* (LDA, GGA, GW) z doświadczalnie obserwowanymi widmami fotoemisji oraz samoistnym wkładem do anomalnego efektu Hall (jako czułego „próbniaka” struktury pasmowej w obszarze energii Fermiego). W symulacjach fotoemisji zaniedbano wpływ elementów macierzowych dla fotoemisyjnych przejść elektronowych oraz transmisji elektronów z powierzchni warstwy, natomiast uwzględniono nieokreśloność prostopadłej składowej wektora falowego foto-elektronów. Taka procedura dobrze odzwierciedla obserwacje doświadczalne i pozwala na poczynienie istotnych wniosków co do przewidywanych różnymi modelami teoretycznymi przesunięć poszczególnych pasm względem energii Fermiego. Podstawowym wnioskiem z realizacji tego ciekawego projektu jest wskazanie metody teoretycznej GW jako najlepiej opisującej zarówno widma fotoemisyjne jak i samoistny anomalny efekt Halla.

Poza głównym osiągnięciem habilitacyjnym dotyczącym warstw Fe/Au(001) dr inż. Ewa Młyńczak posiada także **dotatkowe wartościowe osiągnięcia naukowe związane z badaniami cienkich warstw nowoczesnych materiałów spinowych**: właściwości elektronowych i transportowych nowych materiałów kwantowych - izolatorów topologicznych (cykl publikacji B1-B4) oraz właściwości strukturalnych i magnetycznych nanostruktur metal-tlenek (cykl publikacji C1-C6). W tym nurcie badań habilitantki warto odnotować wartościowe wyniki, uzyskane już po obronie pracy doktorskiej, dla materiałów topologicznych w różnorodnych konfiguracjach:

- silnego izolatora topologicznego (klasyfikacja Z_2) $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ o kontrolowanych właściwościach elektrycznych i położeniu poziomu Fermiego;
- topologicznego złącza p-n $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - publikacja w Nat. Commun. (2015);
- dualnego izolatora topologicznego o cechach zarówno silnego izolatora Z_2 (chronionego symetrią odwrócenia czasu) jak i topologicznego izolatora krystalicznego (chronionego symetrią odbicia zwierciadlanego) - publikacja w Nat. Commun. (2017).

Prace te dr inż. Ewa Młyńczak wykonywała podczas stażu podoktorskiego w Centrum Badawczym w Jülich w grupie fotoemisyjnej dr. Łukasza Plucińskiego, gdzie prowadziła pomiary i analizę struktury elektronowej powierzchni warstw metodą kąto-rozdzielonej spektroskopii fotoemisyjnej (ARPES) na warstwach wytwarzanych w laboratorium technologicznym MBE w Jülich.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych przedstawionych w pracy habilitacyjnej dr inż. Ewy Młyńczak należy zaliczyć.

1. Opracowanie metodyki i wytworzenie metodą MBE cienkich warstw Fe(001) na podłożu Au(001) o bardzo dobrej jakości strukturalnej i czystości atomowej powierzchni warstwy.
2. Zaobserwowanie anomalii w relacji dyspersji energii nośników mniejszościowych w Fe i zaproponowanie interpretacji fizycznej tego efektu jako odzwierciedlenia wielociałowych efektów oddziaływania foto-wzbudzonych nośników z magnonami.
3. Doświadczalne zaobserwowanie efektu otwierania się spinowo-orbitalnej przerwy energetycznej w widmie stanów elektronowych Fe w obszarze energii Fermiego.
4. Doświadczalne zbadanie i wyjaśnienie teoretyczne zależnych od namagnesowania efektów kwantowania energii elektronów w studniach kwantowych dla stanów 3d Fe i pokazanie znaczenia tego efektu w obserwowanych oscylacjach ważnych parametrów ferromagnetycznych (energii anizotropii magnetycznej czy całki sprzężenia międzywarstwowego) w funkcji grubości warstwy Fe.
5. Doświadczalne zweryfikowanie użyteczności różnych metod teoretycznych stosowanych do obliczeń *ab initio* struktury elektronowej Fe (LDA, GW, GGA) poprzez analizę przewidywań tych modeli dla eksperymentalnie obserwowanych widm fotoemisji ARPES i ilościowych obserwacji samoistnego anomalnego efektu Halla.

Dorobek publikacyjny E. Młyńczak jest już znaczący i obejmuje 25 prac poświęconych głównie doświadczalnym badaniom: (1) właściwości magnetycznych nanostruktur metal-tlenek, (2) właściwości elektronowych i transportowych izolatorów topologicznych oraz (3) właściwości elektronowych i strukturalnych cienkowarstwowych heterostruktur Fe/Au(001). Są to, w szczególności, 4 publikacje w Nature Communications, 7 publikacji w Physical Review B i po jednej pracy w Physical Review X i w Nano Letters. 19 z tych artykułów powstało po uzyskaniu przez E. Młyńczak stopnia doktora. W dorobku habilitantki są już publikacje dobrze cytowane, np. praca A2 opublikowana w czasopiśmie Physical Review X w roku 2016 była dotychczas cytowana 24 razy. Sumaryczna liczba cytowań prac E. Młyńczak to blisko 500 (z indeksem Hirscha 13). Lista prezentacji konferencyjnych E. Młyńczak obejmuje 12 referatów ustnych oraz 5 plakatów. Należy uznać, że na tym etapie kariery naukowej jest to bardzo dobry dorobek publikacyjny.

Warto odnotować, że E Młyńczak kierowała projektem badawczym EpiSpin (finansowany w Niemczech przez Helmholtz Association), w ramach którego sprawowała opiekę naukową nad doktorantką Piłą Gospodaric (rozprawa obroniona w 2019 r.).

Wniosek końcowy

Omówione powyżej osiągnięcia naukowe habilitantki stanowią jej ważny, indywidualny wkład do rozwiązania szeregu kluczowych problemów fizyki nowych, aktywnie badanych na świecie, cienkowarstwowych metalicznych materiałów magnetycznych o potencjale spintronicznym. W szczególności warto podkreślić, że wykorzystując wytworzone przez siebie znakomite epitaksjalne warstwy Fe/Au(001) habilitantka poczyniła szereg kluczowych dla rozwoju tej dziedziny badań wniosków dotyczących powiązania subtelnych cech struktury elektronowej Fe (polaryzacja spinowa, identyfikacja orbitalna, wpływ sprzężenia elektron-magnon lub kwantowanie wymiarowe) z takimi podstawowymi właściwościami fizycznymi jak anizotropia magnetyczna czy (samoistny) anomalny efekt Halla. Należy także odnotować, że na wysoką ocenę zasługuje również pozostały dorobek publikacyjny i międzynarodowa aktywność naukowa Ewy Młyńczak.

W związku z tym stwierdzam, że osiągnięcie naukowe pt. „Fundamentalne właściwości elektronowe epitaksjalnych warstw Fe(001) osadzonych na Au(001)” a także pozostały dorobek i aktywność naukowa dr inż. Ewy Młyńczak bardzo dobrze spełniają wszystkie wymagania art. 221 ust. 5 Ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. 2021 poz. 478 ze zm.) oraz odnośnych Uchwał Senatu AGH i wnioskuję o nadanie Pani dr inż. Ewie Młyńczak stopnia doktora habilitowanego nauk fizycznych.

Tomasz Stary