



Kraków, 22.11.2023

Dr hab. Paweł Starowicz

Zakład Fizyki Ciała Stałego

Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego

UNIwersytet  
JAGIELLOŃSKI  
W KRAKOWIE

Wydział

Fizyki

Astronomii

i Informatyki

Stosowanej

Ocena dorobku naukowego oraz osiągnięcia habilitacyjnego

Pani dr inż. Ewy Młyńczak pod tytułem

*„Fundamentalne właściwości elektronowe epitaksjalnych warstw  
Fe(001) osadzanych na Au(001)”*

w związku z postępowaniem o nadanie stopnia naukowego doktora  
habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych  
w dyscyplinie nauki fizyczne

Pani dr inż. Ewa Młyńczak jest absolwentką Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, gdzie uzyskała tytuł magistra inżyniera fizyki technicznej w roku 2009, a następnie tytuł inżyniera inżynierii biomedycznej w 2010 roku. Badania związane z doktoratem prowadziła głównie w Instytucie Katalizy i Fizykochemii Powierzchni im. Jerzego Habera Polskiej Akademii Nauk w Krakowie, gdzie w roku 2013 obroniła pracę doktorską zatytułowaną „Surface and Interface Properties of Metal-Oxide Magnetic Nanostructures”. Po doktoracie była zatrudniona na etacie asystenta naukowego w Katedrze Ciała Stałego Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej. Cykl publikacji, który został przedłożony, jako osiągnięcie habilitacyjne, wiąże się z badaniami prowadzonymi w Instytucie Petera Grünberga (PGI-6) Forschungszentrum Jülich w Niemczech, gdzie przebywała na stypendium podoktorskim od roku 2013, a następnie w latach 2015 - 2020 była zatrudniona na stanowisku pracownika naukowego. Obecnie pani dr inż. Ewa Młyńczak jest adiunktem w Instytucie Katalizy i Fizykochemii Powierzchni im. Jerzego Habera Polskiej Akademii Nauk.

#### OSIĄGNIĘCIE HABILITACYJNE

Na osiągnięcie naukowe habilitacyjne pani dr inż. Ewy Młyńczak składa się 5 prac poświęconych badaniom warstw żelaza na podłożu Au(100). Pierwsza praca cyklu (A1) prezentuje szczegółowy opis techniki otrzymywania cienkich warstw o grubości do 10 ML (10-ciu monowarstw) oraz wpływu różnych parametrów procesu na morfologię i rozkład pierwiastków w warstwie. Kolejne prace (A2-A5) dotyczą warstw o rozmiarze od 20 ML do 100 ML i przedstawiają badania struktury elektronowej prowadzone metodą kątownorozdzielczej spektroskopii fotoemisyjnej (ang. angle-resolved photoemission spectroscopy - ARPES).

ul. prof. Stanisława

Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

tel. +48(12) 664-48-90

fax +48(12) 664-49-05

e-mail:

wydzial.fais@uj.edu.pl

Cykl habilitacyjny charakteryzuje się dużą spójnością, gdyż wszystkie badania przeprowadzone zostały dla tego samego obiektu, którym są cienkie warstwy Fe na Au(100), ponadto prace A2-A5 poświęcone są badaniom struktury elektronowej metodą ARPES. Moje uznanie budzi fakt, że badania struktury pasmowej tego samego układu zaowocowały powstaniem czterech oryginalnych artykułów opublikowanych w renomowanych, a nawet prestiżowych czasopismach. Prace te są poświęcone różnym istotnym dla fizyki materii skondensowanej zagadnieniom. Są to pierwsza bezpośrednia obserwacja powstawania przerw spinowo-orbitalnych pod wpływem pola magnetycznego (A2), obserwacja anomalii w dyspersji, która wiąże się z istnieniem pewnego rodzaju wzbudzeń spinowych (A3), analiza stanów powstałych w studni kwantowej w warstwie Fe, obserwacja wpływu pola magnetycznego na ich dyspersję i wytłumaczenie oscylacji anizotropii magnetycznej wraz z grubością warstw Fe (A4) oraz weryfikacja dokładności różnych metod obliczeniowych w oparciu o dane ARPES (A5).

Artykuły A2-A5 przedstawiają badania struktury pasmowej w układzie ferromagnetycznym z określonym namagnesowaniem, co wiąże się z obniżeniem symetrii struktury pasmowej. Jest to oryginalne zastosowanie metody ARPES. Ewentualna trudność wiąże się z obecnością pola magnetycznego, które mogłoby zniekształcić wyniki. Jednak w cyklu artykułów użyto cienkich ferromagnetycznych warstw z namagnesowaniem resztkowym, które ze względu na mały rozmiar warstw było zaniedbywalne.

W pracach poświęconych strukturze elektronowej (A2-A5) ważne miejsce zajmują dość zaawansowane obliczenia teoretyczne. Nie są to jedynie standardowe obliczenia struktury pasmowej ograniczające się do teorii funkcjonałów gęstości (DFT) lecz również model jednostopniowy fotoemisji (A2) oraz metoda funkcji Greena z wykorzystaniem teorii zaburzeń, która opisuje procesy wielociałowe w sposób bardziej realistyczny przy uwzględnieniu tzw. self-energii. Metody te są określone jako GW (A2-A5) oraz GT (A3).

Cykl habilitacyjny otwiera praca A1 opublikowana w Physical Review B pod tytułem „Localized segregation of gold in ultrathin Fe films on Au(001)”. Artykuł ten jest poświęcony badaniom cienkich warstw Fe na powierzchni Au(001) a także samego procesu ich wytwarzania. Wpisuje się ona w interesującą tematykę zjawisk powstałych na interfejsie ferromagnetyka oraz ciężkiego metalu charakteryzującego się więc silnym oddziaływaniem spin-orbita. Taki interfejs otwiera możliwości sterowania namagnesowaniem cienkiej warstwy przy użyciu prądu elektrycznego, co wiąże się z perspektywami aplikacyjnymi. Treść pracy stanowią badania samej powierzchni Au(001) przygotowanej do procesu napyłania, systematyczne wyniki obrazujące morfologię warstwy w funkcji ilości napyłonego żelaza oraz badania wpływu obróbki termicznej powierzchni zawierającej 10 monowarstw Fe na Au(001) w zależności od temperatury wygrzewania. Głównymi technikami badawczymi są dwie komplementarne metody: mikroskopia fotoemisyjna (PEEM) oraz mikroskopia elektronów niskoenergetycznych (LEEM), którymi badano odpowiednio skład chemiczny powierzchni i jej morfologię. Praca pokazała realistyczny obraz cienkich



warstw Fe/Au(001) z istniejącymi pęknięciami, zmieniającą się grubością wierzchniej warstwy Au, różnym rozkładem atomów Au, a także mieszaniem się atomów Au oraz Fe. Występowanie tych niedoskonałości zależy oczywiście od temperatury osadzania i temperatury wygrzewania. Badania dostarczyły cennych wskazówek do otrzymywania warstw Fe(10 ML)/Au(001) o wysokiej jakości.

Kolejny artykuł z cyklu (A2) zatytułowany „Fermi Surface Manipulation by External Magnetic Field Demonstrated for a Prototypical Ferromagnet” został opublikowany w *Physical Review X*. Publikacja ta opisuje badania struktury pasmowej warstwy 100ML Fe/Au(001) metodą ARPES przy różnych kierunkach namagnesowania resztkowego. Najważniejszym i oryginalnym wynikiem o dużym znaczeniu jest pierwsza obserwacja przerw spinowo-orbitalnych, które otwierają się lub zamykają pod wpływem pola magnetycznego. Namagnesowanie resztkowe łamię symetrię krystaliczną, co jest odzwierciedlone w obniżonej symetrii struktury pasmowej. Lokalizacja tych przerw w strukturze pasmowej zależy więc od kierunku namagnesowania. Analiza danych eksperymentalnych została przeprowadzona w odniesieniu do obliczeń wykonanych metodami teorii funkcjonałów gęstości (DFT). Warto podkreślić wykorzystanie jednostopniowego modelu fotoemisji, które umożliwiło symulacje widm ARPES, a także obliczeń, które pozwoliły wyróżnić stany powierzchniowe i te z wnętrza kryształu.

Artykuł A3 zatytułowany „Kink far below the Fermi level reveals new electron-magnon scattering channel in Fe” został opublikowany w *Nature Communications*. Praca opisuje przeprowadzone przy synchrotronie badania ARPES, w tym również z rozdzielczością spinową. Obiektem badań jest również ferromagnetyczna cienka warstwa (38 monowarstw) Fe(001) na Au(001). Obliczenia teoretyczne obejmują zarówno metody oparte na DFT (metoda FLAPW), jak i metody uwzględniające efekty oddziaływań elektronów w ramach tzw. self-energy. Wyniki obliczeń pasują doskonale do otrzymanej doświadczalnie struktury pasmowej i pozwalają zidentyfikować również pasma mniejszościowe i większościowe. Najważniejszym wynikiem pracy jest obserwacja anomalii w strukturze pasmowej przy energii wiązania 1,5 eV, która została opisana, jako związana z procesem wielociałowym występującym w ferromagnetyku. Powstała foto-dziura oddziałuje ze wzbudzeniami spinowymi typu Stonera i procesowi fotoemisji towarzyszy przeskoczenie spinowe. Trzeba podkreślić, że typ wzbudzenia został dobrze uzasadniony przy pomocy obliczeń teoretycznych GT, które mogą symulować efekty renormalizacji kwazicząstek przy oddziaływaniu z magnonami. Praca A3 prezentuje więc nie tylko ciekawy wynik ale również jego przekonującą interpretację. Moim zdaniem obecna anomalia, obserwowana przy stosunkowo wysokiej energii jest wartościowym wynikiem z różnych powodów. Sprawia to kontekst badań, mianowicie oddziaływanie elektronów z magnonami ma znaczenie dla rozwoju spintroniki, również wzbudzenia spinowe są proponowane, jako biorące udział w mechanizmie parowania w niekonwencjonalnych nadprzewodnikach.

W kolejnej pracy z cyklu habilitacyjnego (A4) „Spin-polarized quantized electronic structure of Fe(001) with symmetry breaking due to the magnetization

direction” głównym tematem jest badanie stanów powstałych w studniach kwantowych zrealizowanych w cienkich warstwach 20-tu lub 40-tu monowarstw Fe(001) na Au(001). Porównanie obliczeń dla trójwymiarowego żelaza z symulacjami dla cienkich warstw pozwala wyróżnić stany ze studni kwantowych, które są zidentyfikowane w obrazie fotoemisyjnym otrzymanym przy energii fotonów 70 eV oraz 8,4 eV. Ich dyspersje otrzymane eksperymentalnie dla warstw o grubości zarówno 20 ML jak i 40 ML są zgodne z symulacjami teoretycznymi. Wyniki dostarczają też wytłumaczenie dla oscylacji anizotropii magnetycznej w warstwach wraz z ich grubością. Ciekawym rezultatem jest zaobserwowanie wpływu pola magnetycznego na dyspersję stanów obecnych w studniach kwantowych. Można dodać, że z punktu widzenia rozwoju spektroskopii ARPES ważnym wynikiem jest określenie rozmycia widm w składowej wektora falowego prostopadłej do powierzchni, które ma swoją przyczynę w ograniczonej drodze swobodnej fotoelektronu w stanie końcowym fotoemisji. Wpływa ona poprzez zasadę nieokreśloności Heisenberga na to rozmycie. Praca A4 w sposób kompletny przedstawia badanie struktury pasmowej w studniach kwantowych zrealizowanych w warstwach Fe(001), które opiera się na systematycznych pomiarach przeprowadzonych metodą ARPES oraz odpowiednio dobranych obliczeniach teoretycznych.

Można powiedzieć, że w publikacji A5 zatytułowanej „Fe(001) angle-resolved photoemission and intrinsic anomalous Hall conductivity in Fe by different ab initio approaches: LDA and GGA versus GW” celem badań już nie jest sama struktura elektronowa lecz porównanie różnych metod obliczeń teoretycznych poprzez skonfrontowanie ich z eksperymentalną strukturą pasmową otrzymaną przy pomocy ARPES. Są to metody DFT z różną formą potencjału wymiennie-korelacyjnego (LDA oraz GGA) oraz metoda GW, która w sposób bardziej realistyczny uwzględnia procesy wielociałowego oddziaływania elektronów. Konkluzją jest, że ta ostatnia metoda najlepiej symuluje eksperymentalną strukturę pasmową dla warstwy Fe, chociaż pewne szczegóły w materiale doświadczalnym stanowią odstępstwo od tej reguły. Symulacja przewodności o pochodzeniu wewnętrznym w anomalnym efekcie Halla (ang. intrinsic anomalous Hall conductivity) również wskazuje, że obliczenia GW są bardziej realistyczne. Praca A5, która została opublikowana w Physical Review B, z pewnością ma sporą wartość jako studium porównawcze dla różnych metod obliczeniowych.

W tym miejscu chciałbym dokonać pewnych podsumowań samego osiągnięcia habilitacyjnego. Jeden artykuł z cyklu habilitacyjnego (A3) jest opublikowany w Nature Communications (Impact Factor: 12,1, 200 punktów ministerialnych), inny (A2) w Physical Review X (Impact Factor: 12,7, 200 punktów ministerialnych) i trzy pozostałe (A1, A4, A5) w Physical Review B (Impact Factor: 3,7, 140 punktów ministerialnych). Obecnie (listopad 2023) artykuły posiadają następujące liczby cytowań A1 – 2 cytowania, A2 – 23 cytowań, A3 – 10 cytowań, A4 – 5 cytowań, A5 – 3 cytowania, co daje łącznie 43 cytowania.



Pani dr inż. Ewa Młyńczak jest pierwszym autorem w czterech publikacjach (A2-A5), a w artykule A1 pierwszym autorem jest doktorantka, nad którą Habilitantka sprawowała opiekę naukową. We wszystkich pracach z cyklu habilitacyjnego pani dr Ewa Młyńczak jest autorem korespondencyjnym.

Z dokumentacji wynika, że pani dr inż. Ewa Młyńczak aplikowała o czas pomiarowy przy synchrotronie Elettra, a w ramach tego czasu pomiarowego otrzymała wraz z zespołem badawczym wyniki do publikacji A3, kierowała również grupą studentów podczas prac przy synchrotronie Elettra, osobiście zrealizowała pomiary metodą ARPES o wysokiej zdolności rozdzielczej do publikacji A4, opracowywała również dane otrzymane przy pomocy ARPES w publikacjach A2-A5. Należy tu dodać, że Habilitantka miała również swój wkład w postaci napisania kodu do symulacji wyników fotoemisji, który uwzględniał wpływ nieoznaczoności prostopadłej do powierzchni składowej wektora falowego fotoelektronu w stanie końcowym i który to kod został użyty w artykułach A4 oraz A5. Podczas pracy nad artykułami A2-A5 współpracowała również z teoretykami, w efekcie czego te prace stanowią bardzo korzystne połączenie wyników eksperymentalnych i teoretycznych. Pani dr inż. Ewa Młyńczak napisała manuskrypty lub ich pierwszą wersję w publikacjach A2-A5 oraz miała znaczący wkład przy powstaniu manuskryptu pracy doktorantki (A1). Wymienione fakty jednoznacznie wskazują na to, że Habilitantka miała wiodący wkład w publikacjach A2-A5 i bardzo istotny wkład do publikacji A1.

Mogę więc z pełnym przekonaniem stwierdzić, że publikacje z cyklu habilitacyjnego stanowią oryginalny i wartościowy wkład do fizyki ciała stałego, a w szczególności do opisu struktury pasmowej materiałów ferromagnetycznych. Jednocześnie pani dr inż. Ewa Młyńczak miała wiodący wkład do uzyskania tych wyników.

#### INNE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE

Warto zauważyć, że pani dr inż. Ewa Młyńczak jest również współautorem 8-miu innych znakomych prac powstałych w czasie Jej pobytu w Jülich. Są to 3 artykuły w Nature Communications i po jednym artykule w NanoLetters, Physical Review B, Applied Physics Letters, NPJ Quantum Materials i Scientific Reports. Część z nich jest poświęcona właściwościom izolatorów topologicznych w formie cienkich warstw osadzanych metodą epitaksjalną. Prace te nie wchodzą w zakres cyklu habilitacyjnego. Artykuły B1 oraz B2 dotyczą układu  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$  w którym przy odpowiedniej wartości  $x$  udało się ulokować stożek Diraca przy energii Fermiego (B1) lub 250 meV poniżej tej energii (B2). Ponadto w eksperymencie mikroskopii tunelowej z 4-punktowymi sondami udało się uzyskać kontrolę transportu ładunku przez zmiany napięcia bramki. Praca B3 z kolei jest poświęcona warstwom  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ , który jest półprzewodnikiem typu p na  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , czyli półprzewodniku typu n. Wyniki pokazują przesunięcie punktu Diraca w wyniku pola elektrycznego powstałego na utworzonym złączu. Publikacja B4 opisuje odkrycie stanu podwójnego izolatora

topologicznego w układzie  $\text{Bi}_1\text{Te}_1$  składającym się z pięciokrotnych warstw  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  oraz dwuwarstw Bi położonych naprzemiennie.

Przy całościowej ocenie dorobku naukowego trudno pominąć osiągnięcia pracy doktorskiej, a te dotyczą właściwości magnetycznych nanostruktur metal-tlenek. W ramach tej tematyki pani dr inż. Ewa Młyńczak opublikowała 6 publikacji, z których w 4-ch jest pierwszym autorem. Artykuły te znalazły się w takich czasopismach, jak Journal of Applied Physics (C1, C3), Physical Review B (C2, C4, C6) oraz Applied Surface Science (C5). Obiektem badań były epitaksjalne warstwy Fe na izolatorach, a główne techniki badawcze stanowiły spektroskopia elektronów konwersji Mössbauera, magnetoptyczny efekt Kerr'a oraz magnetometria z wibrującą próbką. Z tematyką doktoratu wiążą się jeszcze 3 inne publikacje, o których już tutaj nie będę wspominał.

Można zauważyć, że obiekt badań wykorzystany w pracy doktorskiej był w pewnym przybliżeniu ten sam, co w pracach z cyklu habilitacyjnego, chociaż rozumiem, że układy różniły się podłożem, a także grubością i orientacją warstw. Jednak w pracy doktorskiej badane były własności magnetyczne, a w ramach pracy w Forschungszentrum Jülich struktura elektronowa. Dlatego też użyte metody doświadczalne w obu etapach pracy badawczej i kariery były zupełnie inne.

Z dokumentacji wynika, że pani dr inż. Ewa Młyńczak prezentowała swoje wyniki 12 razy w formie referatów na konferencjach, w dużej części międzynarodowych, a także na 3-ch seminariach. Nie jest określone jaki charakter miały te referaty. Ponadto w dorobku habilitantki jest 5 prezentacji posterowych. Pani Młyńczak napisała również 14 recenzji artykułów naukowych.

#### PROJEKTY BADAWCZE, AKTYWNOŚĆ NAUKOWA W RÓŻNYCH INSTYTUCJACH NAUKOWYCH KRAJOWYCH I ZAGRANICZNYCH, DZIAŁALNOŚĆ DYDAKTYCZNA, ORGANIZACYJNA I INNE

Habilitantka również wykazuje aktywność w zakresie pozyskiwania funduszy na badania i prowadzenia projektów. W okresie od 05.2015 do 05.2019 była kierownikiem projektu EpiSpin PD-210 finansowanego przez Helmholtz Association of German Research Centers (Niemcy). W ramach tego projektu była zatrudniona w Instytucie Petera Grünberga (PGI-6) w Forschungszentrum Jülich, a także opiekowała się doktorantką, której badania zakończyły się obroną pracy doktorskiej w roku 2019 na Uniwersytecie w Duisburgu.

Wymaganie o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej zostało przez Habilitantkę spełnione z nawiązką. Pani dr hab. Ewa Młyńczak pracowała zarówno w Akademii Górniczo-Hutniczej jak i Instytucie Katalizy i Fizykochemii Powierzchni im. Jerzego Habera Polskiej Akademii Nauk. Ponadto w czasie studiów doktoranckich odbyła sześciomiesięczny staż naukowy w Instytucie National Center in nanoStructures and



bioSystems at Surfaces (S3) CNR-INFM w Modenie we Włoszech. Jednak przede wszystkim spędziła prawie 6 lat w Instytucie Petera Grünberga (PGI-6) w Forschungszentrum Jülich w Niemczech. W tym czasie nie tylko prowadziła pracę badawczą lecz również kierowała projektem badawczym, opiekowała się pracą doktorską i prowadziła ćwiczenia dla studentów na Uniwersytecie w Duisburgu. Można więc powiedzieć, że w czasie pobytu za granicą poznała realia pracy naukowo-badawczej od różnych stron, co z pewnością stanowi ważne doświadczenie. Warto jeszcze dodać, że Habilitantka brała udział w szeregu eksperymentów synchrotronowych przy synchrotronach Swiss Light Source (Szwajcaria), Diamond (Wielka Brytania) oraz Elettra (Włochy).

Na koniec recenzji chciałbym wspomnieć, że obecnie Habilitantka kontynuuje pracę naukową w Polsce, prowadzi badania struktury elektronowej w Narodowym Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS w Krakowie, a także ubiega się o finansowanie projektów z Narodowego Centrum Nauki.

Dorobek naukowy pani dr inż. Ewy Młyńczak obejmuje 24 publikacje, które są cytowane 494 razy (dane z listopada 2023), w tym 474 razy bez autocytowań, a odpowiedni indeks Hirscha wynosi  $H=13$ . Daleki jestem od oceniania dorobku naukowego tylko na podstawie liczb i statystyk ale gdybym miał tak zrobić, to w przypadku pani dr inż. Ewy Młyńczak chciałbym zwrócić uwagę na liczbę, która zdecydowanie się wyróżnia. Jest to średni impact factor Jej wszystkich publikacji, który wynosi 7,4. Rozumiem, że ten parametr był wyliczony dla pierwszych 22-ch publikacji.

Biorąc pod uwagę wszystkie przedstawione przeze mnie argumenty stwierdzam, że osiągnięcie naukowe oraz dorobek pani dr inż. Ewy Młyńczak spełnia wymagania ustawowe stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego określone w ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami. Z pełnym przekonaniem rekomenduję Radzie Dyscypliny Nauki Fizyczne Akademii Górniczo Hutniczej nadanie Pani Doktor stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie nauki fizyczne.



Dr hab. Paweł Starowicz