

## Autoreferat

1. Imię i nazwisko: **Łukasz Pluciński**
2. Dyplomy i stopnie: Magister inżynier, Politechnika Warszawska w Warszawie (1999).  
  
Doktor (Doktor der Naturwissenschaften), Uniwersytet w Hamburgu, Hamburg, Niemcy (2002), rozprawa pt. „Bulk and Surface Electronic Structure of Gallium Nitride and Zinc Selenide”.
3. Przebieg zatrudnienia: Uniwersytet w Hamburgu, Niemcy, staż podoktorski od listopada 2002 do czerwca 2003.  
Boston University, USA, asystent (Research Associate) od czerwca 2003 do maja 2005.  
University of Connecticut, Storrs, USA, asystent (Research Associate), od maja 2005 do maja 2006.  
Materials Science Department, Lawrence Berkeley Laboratory, USA, asystent (Scientific Engineering Associate), od czerwca 2006 do listopada 2006.  
Forschungszentrum Jülich GmbH, Peter-Grünberg Institut PGI-6, pracownik naukowy (Wissenschaftlicher Mitarbeiter), od listopada 2006.

#### **4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):**

##### **a) Tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego:**

Jako osiągnięcie naukowe zgłaszam cykl publikacji pt.: „**Struktura elektronowa materiałów spintronicznych wyznaczana przy pomocy spinowo- i kątowno rozdzielczej fotoemisji**”.

##### **b) Na cykl składają się następujące artykuły:**

[H1] **L. Plucinski**, Yuan Zhao, E. Vescovo, and B. Sinkovic, *MgO/Fe(001) interface: A study of the electronic structure*, Phys. Rev. B 75, 214411 (2007), IF(impact factor): 3.172<sup>1</sup>, doi: 10.1103/PhysRevB.75.214411.

Mój wkład polegał na wykonaniu większości pomiarów zawartych w pracy, wykonaniu wszystkich rysunków oraz napisaniu tekstu manuskryptu. Byłem również autorem korespondencyjnym w kontaktach z edytorem. Mój udział procentowy szacuję na 60%<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Podałem wartości „Impact Factor” zgodne z bazą Journal Citation Reports (JCR) dla roku, w którym ukazał się artykuł. Dla artykułów, które ukazały się w roku 2013 podałem wartości z roku 2012.

<sup>2</sup> Udział procentowy w pracy naukowej jest niezwykle trudny do określenia i obciążony znaczącą niepewnością względną, gdyż kryteria ilościowe, według których należałoby go wyznaczyć są praktycznie niemożliwe do

[H2] **L. Plucinski**, Yuan Zhao, C. M. Schneider, B. Sinkovic, and E. Vescovo, *Surface electronic structure of ferromagnetic Fe(001)*, Phys. Rev. B 80, 184430 (2009), IF: 3.475, doi: 10.1103/PhysRevB.80.184430.

Mój wkład polegał na wykonaniu większości pomiarów zawartych w pracy, wykonaniu wszystkich rysunków oraz napisaniu tekstu manuskryptu. Byłem również autorem korespondencyjnym w kontaktach z edytorem. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

[H3] J.-S. Lee, E. Vescovo, **L. Plucinski**, C. M. Schneider, and C.-C. Kao, *Electronic structure and Magnetic Properties of Epitaxial FeRh(001) ultra-thin films on W(100)*, Phys. Rev. B 82, 224410 (2010), IF: 3.774, doi: 10.1103/PhysRevB.82.224410.

Mój wkład polegał na wykonaniu obliczeń struktury pasmowej FeRh przy pomocy metody DFT LAPW oraz udziale w edycji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 25%.

[H4] **L. Plucinski**, G. Mussler, J. Krumrain, A. Herdt, S. Suga, D. Grützmacher, and C. M. Schneider, *Robust surface electronic properties of topological insulators: Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> films grown by molecular beam epitaxy*, Appl. Phys. Lett. 98, 222503 (2011), IF: 3.844, doi: 10.1063/1.3595309.

Mój wkład polegał na wykonaniu większości pomiarów zawartych w pracy, wykonaniu wszystkich rysunków oraz napisaniu tekstu manuskryptu. Byłem również autorem korespondencyjnym w kontaktach z edytorem. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

[H5] A. Herdt, **L. Plucinski**, G. Bihlmayer, G. Mussler, S. Döring, J. Krumrain, D. Grützmacher, S. Blügel, and C. M. Schneider, *On the nature of the spin polarization limit in the warped Dirac cone of the Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>*, Phys. Rev. B 87, 035127 (2013), IF: 3.767, doi: 10.1103/PhysRevB.87.035127.

Mój wkład polegał na wykonaniu części pomiarów zawartych w pracy, wykonaniu części rysunków oraz znaczącym udziale w edycji tekstu manuskryptu. Byłem również autorem korespondencyjnym w kontaktach z edytorem. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

[H6] **L. Plucinski**, A. Herdt, S. Fahrendorf, G. Bihlmayer, G. Mussler, S. Döring, J. Kampmeier, F. Matthes, D. E. Bürgler, D. Grützmacher, S. Blügel, and C. M. Schneider, *Electronic structure, surface morphology, and topologically protected surface states of Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> thin films grown on Si(111)*, J. Appl. Phys. 113, 053706 (2013), IF: 2.210, doi: 10.1063/1.4789353.

Mój wkład polegał na wykonaniu części pomiarów zawartych w pracy, wykonaniu części rysunków w niej zawartych oraz napisaniu tekstu manuskryptu. Byłem również autorem korespondencyjnym w kontaktach z edytorem. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

---

określenia. Dotyczy to na przykład równowagi między ilością czasu spędzonego przez każdego ze współautorów a tym, który ze współautorów, i w jakim stopniu, był pomysłodawcą artykułu.

[H7] L. Plucinski and C. M. Schneider, *The Electronic Structure of Spintronic Materials as Seen by Spin-Polarized Angle-Resolved Photoemission*, zaproszony artykuł przeglądowy do tematycznego tomu czasopisma *Journal Electron Spectroscopy and Related Phenomena* 189, 137 (2013), IF: 1.706, doi: 10.1016/j.elspec.2013.05.001.

Publikacja zawiera streszczenie moich dotychczasowych osiągnięć w dziedzinie spinowo- i kątowno-rozdzielczej fotoemisji. Mój wkład polegał na napisaniu tekstu manuskryptu, biorąc pod uwagę zarówno osiągnięcia związane z wybranymi badaniami opublikowanymi we wcześniejszych pracach, jak i w rozwoju instrumentacji. Byłem również autorem korespondencyjnym w kontaktach z edytorem. Mój udział procentowy szacuję na 70%.

**c). Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.**

**c1). Wstęp**

Technologie związane z szybkim cyfrowym przekazem danych zdominowały współczesny przemysł elektroniczny. Tradycyjne układy scalone bazujące na krzemie są od lat podstawą działania znakomitej większości urządzeń, jednak mają one ograniczenia związane z poborem mocy i ciepłą dyssypacją energii, granicą szybkości przekazywania danych, oraz miniaturyzacją. Na przykład, od 2005 roku częstotliwość taktowania najwydajniejszych procesorów w komputerach stacjonarnych pozostaje w przedziale między 3.5 i 4 GHz, co doprowadziło do popularyzacji układów wielordzeniowych, jako alternatywnej metody zwiększania wydajności.

Istnieją jednak także przemysłowo produkowane układy, które bazują na materiałach innych niż krzem. Głowice odczytu i zapisu w twardych dyskach tradycyjnie bazowały na warstwowych układach o skali nanometrowej, gdzie dwie warstwy ferromagnetyczne są przedzielone warstwą paramagnetyczną a oporność układu zależy od kierunków wzajemnego namagnesowania warstw magnetycznych (tzw. efekt gigantycznej magnetorezystancji (GMR)<sup>3</sup>). Od roku 2005 głowice w przemysłowo produkowanych dyskach bazują na efekcie magnetorezystancji tunelowej (TMR), gdzie dwie warstwy ferromagnetyczne są przedzielone izolatorem. Tego typu układy są oparte o prototypowe epitaksjalne złącze Fe/MgO/Fe, gdzie zintegrowane są warstwy monokrystaliczne. Zasada działania bierze pod uwagę elektronową strukturę pasmową warstw, a do wyjaśnienia efektu wymagane jest rozważenie przejść międzypasmowych w przestrzeni odwrotnej z uwzględnieniem spinowego rozszczepienia pasm związanego z energią wymiany.

Popularyzacja układów TMR pokazuje, że miniaturyzacja nowoczesnej elektroniki jest nierozdzielnie związana ze strukturami monokrystalicznymi i ich strukturą pasmową. Najdokładniejszą metodą pomiaru elektronowej struktury pasmowej jest fotoemisja z rozdzielczością kątową (ARPES), a większość współczesnych pomiarów koncentruje się na szczegółach dyspersji pasm w okolicach poziomu Fermiego, gdyż właśnie te stany są odpowiedzialne za przewodzenie prądu. Najbardziej interesujący przedział energii w pobliżu poziomu Fermiego można zdefiniować biorąc pod uwagę poszerzenie temperaturowe związane

---

<sup>3</sup> W roku 2007 Albert Fert i Peter Grünberg zostali uhonorowani nagrodą Nobla za odkrycie efektu GMR.

ze statystyką Fermiego-Diraca, które dla temperatury pokojowej wynosi około 0.1 eV<sup>4</sup>. Stąd najbardziej interesujący jest przedział energii wiązania w graniach kilkuset meV przy poziomie Fermiego, jakkolwiek pomiary w szerszym przedziale energii wiązania mogą również dostarczać interesujących informacji związanych ze szczegółami struktury pasmowej i efektami korelacji wieloelektronowej.

Konwencjonalne pomiary ARPES są prowadzone przy użyciu promieniowania o energii fotonów z zakresu  $h\nu=20-100$  eV, gdyż przy tych energiach przekrój czynny na fotoemisję jest wysoki i możliwa jest konstrukcja wysokiej rozdzielczości spektrometrów. Przy tych energiach średnia droga swobodna elektronów wzbudzonych z okolic poziomu Fermiego jest w granicach 10 Å, co oznacza, że elastycznie emitowane są tylko elektrony zlokalizowane przy powierzchni. Oznacza to również, że eksperymenty fotoemisyjne muszą być wykonywane w ultra wysokiej próżni (UHV) na specjalnie przygotowanych atomowo czystych powierzchniach, gdyż poza próżnią każda powierzchnia pokrywa się warstwą zanieczyszczeń, zwykle grubszą niż czułość klasycznego pomiaru fotoemisyjnego. Gdy energia fotonów jest większa, w granicach 2-6 keV, wtedy średnia droga swobodna elektronów emitowanych z okolic poziomu Fermiego osiąga kilka nm, i możliwe jest mierzenie objętościowej struktury pasmowej, jednak przy nieco kompromisowej rozdzielczości energetycznej, ze względu na niski przekrój czynny i szereg wyzwań technicznych związanych z wydajnością takiego układu eksperymentalnego [35]<sup>5</sup>.

Argumenty wymienione powyżej wskazują, że sprostanie współczesnym wyzwaniom technologicznym wymaga dogłębnych badań pasmowej struktury elektronowej w pobliżu poziomu Fermiego. Aby w pełni scharakteryzować stany energetyczne odpowiedzialne za przewodzenie elektryczne, takie badania powinny również zawierać rozdzielczość spinową oraz możliwość manipulacji czułością powierzchniową eksperymentu fotoemisyjnego.

Cykl prac zgłoszony w moim Autoreferacie dotyczy badań nad spinową strukturą elektronową szeregu modelowych materiałów związanych ze spintroniką. W skład tego cyklu wchodzi prace związane z interfejsem Fe/MgO [H1-H2], materiałem o ferro-paramagnetycznym przejściu fazowym [H3] oraz izolatorami topologicznymi [H4-H6]. Cykl ten jest zwieńczony przeglądowną pracą na temat spinowo- i kątowno-rozdzielczej fotoemisji przygotowaną na zaproszenie edytorów specjalnej edycji pisma „Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena” [H7].

## c2). Osiągnięcia naukowe wchodzące w skład rozprawy habilitacyjnej

Zgodnie z modelem Julliere'a<sup>6</sup> współczynnik magnetorezystancji (MR) w układzie TMR może być wyznaczony jako  $MR = 2P_1P_2/(1 - P_1P_2)$ , gdzie  $P_1$  i  $P_2$  są polaryzacjami spinowymi dwóch elektrod ferromagnetycznych. Polaryzacje te są zdefiniowane jako  $P = (N_{\uparrow}(E_F) - N_{\downarrow}(E_F))/(N_{\uparrow}(E_F) + N_{\downarrow}(E_F))$ , gdzie  $N_{\uparrow}(E_F)$  i  $N_{\downarrow}(E_F)$  są gęstościami stanów elektronowych (DOS) w elektrodach przy poziomie Fermiego odpowiednio dla większościowych i mniejszościowych stanów spinowych. Opis koherentnego tunelowania w monokrystalicznych złączach epitaksjalnych wymaga uzupełnienia modelu Julliere'a poprzez uwzględnienie zależności

---

<sup>4</sup> Temperaturowe poszerzenie poziomu Fermiego jest opisane przez statystykę Fermiego-Diraca ( $E$ ) =  $(e^{(E-E_F)/(k_B T)} + 1)^{-1}$ , gdzie  $k_B$  jest stałą Boltzmana. Przyjmuje się konwencję, że poszerzenie poziomu Fermiego wynosi  $4k_B T$ , co oznacza, że dla temperatury  $T = 300$  K poszerzenie wynosi około 103.4 meV.

<sup>5</sup> Numer odnosi się do mojej pełnej listy publikacji, która wchodzi w skład załączonego dokumentu „Wykaz Dorobku”.

<sup>6</sup> M. Julliere, Phys. Lett. 54A, 225 (1975).

gęstości stanów  $N(E_F)$  od wektora sieci odwrotnej  $\mathbf{k}$ . Zasada działania układu TMR opartego o złącze Fe/MgO/Fe(001) została przewidziana teoretycznie w 2001 roku<sup>7</sup> i polega na tunelowaniu między elektronowymi stanami Fe o symetrii  $\Delta_1$ , które przenikają silnie wewnątrz bariery MgO. Stąd efekt TMR powinien być silniejszy dla cieńszych warstw bariery MgO, podczas gdy realistyczna grubość izolującej bariery MgO wynosi od kilku do kilkunastu warstw atomowych. Jednak dla bardzo cienkich warstw MgO, takich jak około 4 warstwy atomowe, silnie zlokalizowane stany interfejsowe zaczynają mieć wpływ na efektywność działania złącza. Powyższe powody wskazują na konieczność określenia spinowej struktury elektronowej złącza Fe/MgO(001) w przestrzeni wektora  $\mathbf{k}$ .

W roku 2004 zostały opublikowane dwie przełomowe prace na temat realizacji układów TMR<sup>8</sup> bazujących na interfejsie żelaza z tlenkiem magnezu. Wykazano w nich eksperymentalnie około 200% magnetorezystancję tunelową w epitaksjalnych złączach typu Fe/MgO/Fe o wysokim stopniu uporządkowania krystalicznego. Kombinacja Fe i MgO wydaje się być idealna dla tego typu złącz ze względu na bardzo niewielką różnicę w stałych sieci krystalicznych (3.8%, biorąc pod uwagę wzrost w kierunku [001]) oraz dużą różnicę wolnych energii powierzchniowych dla Fe (około 2.9 J/m) oraz MgO (około 1.1 J/m). Dzięki temu możliwy jest pseudomorficzny wzrost nanometrowych warstw epitaksjalnych z minimalnym mieszanym w strefie interfejsu.

Zafascynowany nowymi możliwościami związanymi z układami TMR, nawiązałem w 2005 roku współpracę z dr. Elio Vescovo z NSLS/BNL w celu przeprowadzenia dogłębnych badań spinowej struktury elektronowej interfejsów między epitaksjalnymi warstwami ferromagnetycznymi i izolującymi. Badania były wykonywane na stacji U5UA w laboratorium synchrotronowym NSLS przy użyciu undulatorowego promieniowania synchrotronowego z zakresu  $h\nu = 15-150\text{eV}$  oraz polarymetru spinowego typu mini-Mott zainstalowanego na półsferycznym filtrze energii elektronów (hemispherical energy analyzer). Epitaksjalne warstwy Fe i MgO były napyłane w ultra-wysokiej próżni (UHV) na podłożach (001) molibdenu lub wolframu przy użyciu epitaksji wiązek molekularnych (MBE).

W połowie pierwszej dekady XXI wieku, badania nad interfejsem Fe/MgO dotyczyły szeregu zagadnień, dotyczących między innymi formowania się interfejsowej warstwy FeO<sup>9</sup>, formowania się zlokalizowanych elektronowych stanów interfejsowych, które mogą negatywnie wpływać na parametry układów TMR, czy też istnienia niemagnetycznej warstwy (magnetic dead layer) Fe w pobliżu interfejsu. Moje badania opublikowane w pracach [H1] oraz [H2] dają odpowiedź na te pytania z punktu widzenia eksperymentu fotoemisyjnego.

W pracy [H1] epitaksjalne warstwy MgO(001), napyłone na powierzchnię Fe(001) za pomocą bezpośredniego naporowywania ze stechiometrycznego tlenku magnezu w warunkach ultra-wysokiej próżni, zostały zbadane za pomocą spinowo-rozdzielczej fotoemisji pasma walencyjnego oraz za pomocą magnetycznego liniowego dichroizmu w spektroskopii stanów rdzeniowych. Minimalny sygnał fotoemisyjny dla energii kinetycznych powyżej maksimum pasma walencyjnego MgO potwierdził stechiometrię warstw MgO otrzymanych w ten sposób. Warstwy Fe(001) o grubości 40 Å, które służyły jako podłoże były napyłane na kryształ Mo(001).

Porównanie widm dla powierzchni Fe(001) utlenionej przy pomocy jednego Langmuira ( $1\text{L} = 10^6$  Torr-s) molekularnego tlenu w warunkach ultra-wysokiej próżni z widmami z pojedynczej

---

<sup>7</sup> Butler et al., Phys. Rev. B 63, 054416 (2001) oraz Mathon and Umerski, *ibid.* strona 220403(R).

<sup>8</sup> Parkin et al., Nature Materials 3, 862 (2004), Yuasa et al., *ibid.* strona 868.

<sup>9</sup> Tusche et al., Phys. Rev. Lett. 95, 176101 (2005).

warstwy atomowej MgO napyłonej na Fe(001) wskazuje na brak interfejsowej warstwy FeO w mierzonych próbkach MgO/Fe(001). Wygrzewanie mierzonych warstw w temperaturach poniżej 400°C prowadziło do niewielkich zmian w widmach fotoemisyjnych, najprawdopodobniej związanych ze strukturalnym uporządkowywaniem się interfejsu. Wygrzewanie w temperaturze 500°C powodowało wyraźniejsze zmiany w widmach, w mojej interpretacji spowodowane desorpcją MgO lub tworzeniem klasterów MgO na powierzchni, co prowadziło do częściowego odkrywania metalicznej powierzchni Fe(001).

Wszystkie zmierzone wyniki wyraźnie wskazują na brak niemagnetycznej warstwy Fe w obrębie interfejsu z MgO. Widma spinowo-rozdzielczej fotoemisji wykazały, że polaryzacja spinowa elektronów emitowanych z pasma walencyjnego Fe nie ulega zmniejszeniu między jedną a dwoma warstwami atomowymi MgO napyłonymi na Fe(001). Zgodnie z tym, wyniki liniowego dichroizmu w fotoemisji dla stanu Fe 3p pokazują, że ferromagnetyzm w obrębie interfejsu utrzymuje się po napyleniu jednej monowarstwy MgO, niestety dla grubszych warstw pomiar dichroizmu nie jest możliwy z powodu bliskości pików fotoemisyjnych dla Fe 3p i Mg 2p.

Podczas badań zwróciłem również uwagę na ciekawe efekty w fotoemisji rdzeniowego stanu Mg 2p. Energia kinetyczna pików fotoemisyjnych związanych z tym stanem zmniejsza się wraz z grubością warstwy MgO napyłonej na Fe(001). Jest to związane z efektami korelacji wieloelektronowej i szybkim ekranowaniem przez metaliczne podłoże Fe(001) dziury powstałej w MgO po fotoemisji elektronu. Również niewielki pik, który jest satelitą pików Mg 2p, został zmierzony dla cienkich warstw MgO rzędu jednej warstwy atomowej. Jego energia kinetyczna jest o 10.7 eV mniejsza od energii pików Mg 2p, i jest on związany z plazmonem powierzchniowym w podłożu Fe(001).

Podsumowując, praca [H1] wykazała, że struktura elektronowa interfejsu MgO/Fe(001) wyznaczona w eksperymencie fotoemisyjnym spełnia warunki narzucone przez teorie opisujące działanie układów TMR. Ponieważ jednak w pracy tej nie wyczerpałem tematu stanów interfejsowych, które mogą mieć wpływ na działanie układów TMR, temat ten został rozwinięty w kolejnej pracy [H2], która dotyczyła struktury elektronowej czystej i utlenionej powierzchni Fe(001).

Mimo tego, że powierzchnie Fe o niskich indeksach są istotne jako prototypowe powierzchnie ferromagnetyczne, szczegóły struktury pasmowej Fe(001) wciąż wymagają dokładnych badań. Powierzchnia Fe(001) jest ważna także z punktu widzenia polarymetrii spinowej, ponieważ właśnie na tzw. „rozpraszaniu wymiany” (exchange scattering) z utlenionej powierzchni Fe(001) bazuje najwydajniejszy obecnie detektor spinowy [S2]. W pracy [H2] skupiłem się na szczegółach struktury elektronowej powierzchni Fe(001). Pomiary były wykonane na próbkach chłodzonych ciekłym azotem do temperatury około 100K, a całkowita rozdzielczość energetyczna pomiaru fotoemisyjnego z czułością spinową wynosiła poniżej 120 meV. Wyniki spinowo-rozdzielczej fotoemisji w kierunku emisji normalnej oraz w kierunku  $\overline{\Gamma X}$  wykazały, że polaryzacja stanów elektronowych związanych z objętościową strukturą krystaliczną nie ulega zmianie w wyniku utlenienia powierzchni przy pomocy 1L O<sub>2</sub>. Z kolei mniejszościowe elektronowe stany powierzchniowe wzdłuż kierunku  $\overline{\Gamma X}$ , o energiach blisko poziomu Fermiego i związane z orbitalami  $d_{xz+yz}$ , znikają po utlenieniu powierzchni. Również w tej pracy wykonałem samodzielnie, przy użyciu pakietu WIEN2k<sup>10</sup>, obliczenia dla słabu Fe(001) o grubości 30 warstw atomowych, gdzie powierzchnie dwóch kolejnych słabów były oddzielone o niemal 30 Å. Obliczenie to pokazało, że mniejszościowy stan powierzchniowy w kierunku  $\overline{\Gamma X}$  w pobliżu

---

<sup>10</sup> P. Blaha, K. Schwarz, G. Madsen, D. Kvasnicka and J. Luitz, [www.wien2k.at](http://www.wien2k.at).

poziomu Fermiego składa się w rzeczywistości z dwóch oddzielnych pasm. Jedno z nich, znajdujące się tylko w pobliżu punktu  $\bar{\Gamma}$  około 200 meV powyżej poziomu Fermiego ma charakter  $d_{z^2}$ , a drugie, które rozpościera się wzdłuż większej części linii  $\bar{\Gamma}\bar{X}$  i jest częściowo wypełnione, ma charakter  $d_{xz+yz}$ . Zgodnie z szeregiem obliczeń przeprowadzonych przez różne grupy badawcze właśnie ten stan, jako stan interfejsowy między Fe i MgO, jest odpowiedzialny za zmniejszenie wydajności układów TMR bazujących na interfejsie Fe/MgO(001). Moje badania nad interfejsem Fe/MgO zostały docenione przez ekspertów zaproszeniem do opublikowania raportu w *2007 NSLS Science Highlights*.<sup>11</sup>

Uporządkowanie wektorów polaryzacji spinowej w materiałach magnetycznych wiąże się zwykle z niewielkimi różnicami energetycznymi, stąd szereg materiałów podlega przejściom fazowym związanym z temperaturą, ciśnieniem, domieszkowaniem, czy też naprężeniami struktury krystalicznej powodowanymi wzrostem cienkich warstw w trybie pseudomorficznym. Jednym z ważnych związków, który wykazuje temperaturowe przejście fazowe między niskotemperaturowym stanem antyferromagnetycznym (AF) a stanem ferromagnetycznym (FM) jest FeRh. Doświadczenie zdobyte podczas badań nad warstwami Fe/W(001) pozwoliło również na rozwinięcie tych badań i pomiary warstw FeRh napyłonych na W(001), a wyniki te zostały przedstawione w pracy [H3]. Dla grubości FeRh około 10 warstw atomowych przejście fazowe zachodzi pomiędzy 315K a 356K, podczas gdy temperatura Curie wynosi około 535K.

Przejście fazowe dla warstw badanych w pracy [H3] zostało scharakteryzowane za pomocą magnetycznego liniowego dichroizmu w spektroskopii stanów rdzeniowych Fe 3p. Dichroizm ten wykazał znaczącą różnicę między momentami magnetycznymi dla Fe a Rh, co jest zgodne z przewidywaniami teoretycznymi (około 3  $\mu$ B dla Fe i 1  $\mu$ B dla Rh), oraz równoległe uporządkowanie tych momentów. Jednocześnie jedynie niewielkie zmiany w strukturze elektronowej pasma walencyjnego zostały zmierzone między fazami AF i FM, co oznacza, że przejście fazowe nie jest związane ze znaczącą reorganizacją gęstości ładunku wewnątrz sieci krystalicznej. Badania dyfrakcji powolnych elektronów (LEED) wykazały wzrost pseudomorficzny dla 10 warstw atomowych FeRh/W(001). Różnica w stałych sieciowych między W a FeRh wynosi około 5%, więc tego typu warstwy FeRh z pewnością podlegają znaczącym naprężeniom sieci krystalicznej. Ponieważ przejście fazowe zostało w innych pracach zmierzone dla podobnych temperatur dla kryształów i polikryształów FeRh, można wnioskować, że jest ono względnie niezależne od naprężeń sieci krystalicznej. Należy jednak wspomnieć, że istnieją badania, które pokazują wpływ ciśnienia na temperaturę przejścia fazowego w FeRh<sup>12</sup>, oraz znaczącą zmianę stałej sieciowej między stanem AF i FM<sup>13</sup>.

W ciągu ostatnich kilku lat tak zwane trójwymiarowe (3D) izolatory topologiczne stały się przedmiotem dogłębnych badań naukowych. Najważniejsze wśród nich  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  oraz ich stopy, są półprzewodnikami o wąskiej przerwie energetycznej rzędu 100-200 meV, które posiadają szczególne właściwości elektroniczne związane z symetrią odwrócenia czasu (odbicie czasowe, parzystość T) w hamiltonianie struktury elektronowej  $\Theta H(\mathbf{k}) \Theta^{-1} = H(-\mathbf{k})$  uwzględniającym oddziaływanie spin-orbita. W skróconym opisie, przerwa energetyczna w

---

<sup>11</sup> L. Plucinski, Y. Zhao, B. Sinkovic, and E. Vescovo, „MgO/Fe interface: A study of the electronic structure”, 2007 NSLS Activity Report, Science Highlights PDF, 34 (2007). Praca była wyświetlana na głównej witrynie internetowej NSLS, oraz opublikowana w formie elektronicznej. Jest dostępna pod adresem internetowym: [http://www.bnl.gov/ps/nsls/newsroom/publications/activityreport/2007\\_NSLS\\_Activity\\_Report\\_Highlights.pdf](http://www.bnl.gov/ps/nsls/newsroom/publications/activityreport/2007_NSLS_Activity_Report_Highlights.pdf)

<sup>12</sup> N. I. Kulikov, E. T. Kulatov, L. I. Vinokurova, and M. Pardavi-Horvath, J. Phys. F: Met. Phys. 12, L91 (1992).

<sup>13</sup> L. Zsoldos, Phys. Status Solidi 20, K25 (1967), R. O. Cherifi et al. *Electric-field control of magnetic order above room temperature*, Nature Materials (2014), doi:10.1038/nmat3870.

izolatorach topologicznych wynika z odwrócenia kolejności orbitalnego charakteru pasm energetycznych, które jest związane z oddziaływaniem spin-orbita<sup>14</sup>. Stąd na powierzchni trójwymiarowego izolatora topologicznego, która jest interfejsem z próżnią, bądź w interfejsie z kryształem nieposiadającym własności odwrócenia pasm, mogą tworzyć się dwuwymiarowe stany elektronowe nazywane *topologicznymi stanami powierzchniowymi*. Istnienie tych stanów może być przewidziane za pomocą teorii topologicznych, przy użyciu niezmiennika topologicznego  $Z_2$  stosowanego przy opisie *kwantowego spinowego efektu Halla*<sup>15</sup>. Izolatory topologiczne 3D są scharakteryzowane poprzez cztery niezmienniki  $Z_2$ , dla których przyjęto konwencję  $(\nu_0; \nu_1 \nu_2 \nu_3)$ . W powierzchniowej strefie Brillouina istnieją cztery punkty  $\Gamma_{1,2,3,4}$  będące niezmiennikami odbicia czasowego, gdzie stany powierzchniowe, o ile istnieją, muszą ulegać degeneracji Kramersa. Stany powierzchniowe związane z punktami  $\Gamma_{1,2,3,4}$  są chronione topologicznie o ile przecinają one nieparzystą ilość razy poziom Fermiego wzdłuż linii między parą punktów  $\Gamma_n, \Gamma_m$ . Moje badania dotyczyły tylko tzw. silnych izolatorów topologicznych 3D oraz ich powierzchni [0001] dla których stan powierzchniowy w postaci stożka Diraca<sup>16</sup> istnieje w jednym punkcie  $\bar{\Gamma}$  będącym centrum powierzchniowej strefy Brillouina.

Mój program badawczy dotyczący trójwymiarowych izolatorów topologicznych skupia się na cienkich warstwach  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  oraz  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  napylnych w ultra wysokiej próżni metodą MBE na krystaliczne podłoża Si(111). Metodologia wzrostu tych warstw jest opisana w pracy [33], a główne parametry wzrostu to temperatura podłoża, szybkość napyłania, oraz względny stosunek szybkości napyłania dla poszczególnych napylnych pierwiastków. Po wzroście, próbki są przenoszone w atmosferycznym powietrzu, bez wyjątkowych zabezpieczeń, do komory próżniowej jednej ze stacji eksperymentalnych [30, 31] gdzie są czyszczone w ultra wysokiej próżni, ich powierzchniowa krystalizacja jest badana za pomocą dyfrakcji powolnych elektronów (LEED), a skład chemiczny powierzchni za pomocą spektroskopii Auger. Na optymalnie przygotowanych powierzchniach jest następnie przeprowadzany pomiar kątowno-rozdzielczej fotoemisji lub spinowo- i kątowno-rozdzielczej fotoemisji.

Optymalizacja przygotowywania powierzchni  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  została opisana w pracy [H4], gdzie powierzchnie były czyszczone poprzez cykliczny proces bombardowania jonami  $\text{Ar}^+$  o energii 500eV oraz wygrzewania do 250°C. Warstwy o początkowej grubości 20 nm były w ten sposób wytrawiane aż do momentu, gdy linie związane z podłożem krzemowym pojawiały się w widmach Auger. Pomiar kątowno-rozdzielczej fotoemisji na próbkach chłodzonych za pomocą ciekłego azotu (do około 90K) wykazały, że na tak przygotowanych powierzchniach formują się wyraźne stożki Diraca (Dirac cones), charakterystyczne dla trójwymiarowych izolatorów topologicznych, oraz, że w zmodyfikowanej formie istnieją one także dla bardzo cienkich warstw. Jednocześnie brak wyraźnych efektów związanych ze studniami kwantowymi w ultracienkich warstwach pokazuje, że proces czyszczenia za pomocą bombardowania i wygrzewania nie prowadzi do uzyskania płaskiej i idealnie atomowo uporządkowanej powierzchni, jakkolwiek późniejsze pomiary skaningowym mikroskopem tunelowym (STM) wykazały, że znaczna część tak przygotowanej powierzchni wykazuje lokalne krystaliczne uporządkowanie na poziomie atomowym.

W kolejnych dwóch pracach nad izolatorami topologicznymi [H5-H6] skupiłem się na polaryzacji spinowej w kątowno-rozdzielczej fotoemisji z cienkich warstw  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  oraz  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ . Interpretacja wyników spinowo-rozdzielczej fotoemisji w przypadku, gdy emisja spolaryzowanych elektronów jest związana z oddziaływaniem spin-orbita (SOC, spin-orbit coupling) stanowi wyjątkowe

---

<sup>14</sup> Stąd też przerwa ta jest z zasady mniejsza niż energia związana ze spin-orbitalnym rozszczepieniem pasm.

<sup>15</sup> C. L. Kane and E. J. Mele, Phys. Rev. Lett. 95, 146802 (2005).

<sup>16</sup> Według omawianej teorii punkt Diraca w takim stożku Diraca ulega degeneracji Kramersa.



wyzwanie. W przypadku układów wieloelektronowych oraz uwzględnienia SOC, spin nie jest w sensie ścisłym liczbą kwantową, co powoduje, że w ogólności każdy stan jest, z pewną wagą, spolaryzowany w obu kierunkach wektora kwantyzacji spinowej. W konsekwencji w grupie (*ensemble*) emitowanych elektronów kierunek i wielkość wektora polaryzacji spinowej  $P$ , które generalnie mogą być zmierzone dokładnie, nie są bezpośrednio związane z kwantowym stanem podstawowym w kryształach, ze względu na tak zwany proces *optycznej orientacji spinowej* (optical spin orientation)<sup>17</sup>. W przypadku ferromagnetyków takich jak Fe, Co lub Ni efekty związane z SOC można w wielu przypadkach pominąć, gdyż prowadzą one do niewielkich korekt energetycznych (rzędu kilkunastu meV) i większość pasm jest spolaryzowana w blisko 100%, co oznacza, że interpretacja struktury pasmowej przy pomocy spinowych liczb kwantowych  $m_s$  jest w przybliżeniu poprawna<sup>18</sup>. Jednak w przypadku spinowo spolaryzowanych stanów elektronowych takich jak topologiczne stany powierzchniowe, których natura jest związana z silnym oddziaływaniem spin-orbita, konieczna jest bardziej szczegółowa analiza uwzględniająca efekty relatywistyczne w strukturze pasmowej oraz szczegóły procesu fotoemisijnego związane z energią i polaryzacją promieniowania wzbudzającego oraz z geometrią układu pomiarowego.

W pracach [H5-H6] dokonałem porównania między polaryzacją w grupie emitowanych elektronów i obliczeniami struktury pasmowej stanu podstawowego dla powierzchni  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  oraz  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ . Badania te wykazały, że zarówno obliczona jak i zmierzona polaryzacja dla powierzchni  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  osiąga około 50%. Ze względu na efekty związane z procesem fotoemisji, wymienione w poprzednim paragrafie, bezpośrednie porównanie wyników polaryzacji w grupie emitowanych elektronów z wynikami obliczeniowymi stanu podstawowego nie jest możliwe. Jednakże fakt, że wyniki eksperymentalne wykazują polaryzację około 50 procentową (czyli znacznie poniżej 100%), wskazuje, że stan podstawowy topologicznego stanu powierzchniowego nie jest w 100% spolaryzowany, w przeciwieństwie do wczesnych analitycznych obliczeń nieuwzględniających potencjału sieci krystalicznej. Efektem współpracy nad optymalizacją właściwości cienkich warstw izolatorów topologicznych między instytutami PGI-6 oraz PGI-9 w Forschungszentrum Jülich jest też sprawozdanie wśród wybranych raportów badawczych („Selected Research Reports”) w *JARA-FIT Annual Report 2012*<sup>19</sup>.

Pomimo tego, że proces tzw. *optycznej orientacji spinowej* (optical spin orientation) jest znany od lat 80 tych XX wieku, prace uwzględniające to zjawisko w interpretacji wyników eksperymentalnych z izolatorów topologicznych pojawiły się dopiero na przełomie 2012 i 2013 roku. Wykazały one, że proces fotoemisji może nie tylko zmienić wielkość zmierzonej polaryzacji, ale także jej znak<sup>20</sup>.

Zaproszona praca przeglądowa [H7] dała mi szansę zaprezentowania moich najważniejszych dokonań w dziedzinie spinowo-rozdzielczej fotoemisji. Artykuł zawiera krótkie omówienie historii tej techniki pomiarowej, opinię na temat najważniejszych obecnie wyzwań naukowych, opis

---

<sup>17</sup> Patrz np. Tamura et al. „New Polarization Effect in Photoemission from Nonmagnetic Surfaces”, *Phys. Rev. Lett.* 59, 934 (1987).

<sup>18</sup> Rysunek 4 w publikacji [H7] wskazuje na blisko 100% polaryzację spinową w grupie elektronów emitowanych z powierzchni Fe(001). Jednakże, w pewnych punktach  $k$  i dla pewnych energii wiązania modele teoretyczne przewidują korekty energii rzędu 150-200 eV, gdy uwzględnione jest oddziaływanie spin-orbita, patrz np. M. N. Khan et al. *J. Phys. Condens. Matter* 20, 155208 (2008).

<sup>19</sup> G. Mussler, J. Kampmeier, J. Krumrain, S. Borisova, L. Plucinski, M. Luysberg, D. Grützmacher, „Molecular-Beam Epitaxy of Topological Insulator  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  Thin Films”, *JARA-FIT Annual Report* 35 (2012).

<sup>20</sup> Patrz np. Ch. Jozwiak et al., *Nature Physics* 9, 293 (2013) and J. Sanchez-Barriga et al., *Phys. Rev. X* 4, 011046 (2014)

nowoczesnych technik badawczych oraz opis szeregu wyników eksperymentalnych. W podsumowaniu tej pracy zwróciliśmy również uwagę, że w najbliższej przyszłości może być możliwe wykonywanie objętościowo czułych pomiarów fotoemisyjnych przy pomocy twardych promieni rentgenowskich (patrz także punkt 5b2)) z rozdzielczością spinową. To pozwoliłoby dodać nową jakość do badań objętościowej struktury pasmowej ponieważ większa część sygnału w tego typu widmach fotoemisyjnych jest związana z elektronowymi funkcjami falowymi w kryształach objętościowych, na które nie ma wpływu złamanie symetrii środkowej na powierzchni oraz gradient pola elektrycznego przy powierzchni.

## **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).**

### **5a). Podsumowanie dokonań naukowych przed otrzymaniem tytułu doktora**

W roku 1998, podczas piątego roku studiów na wydziale „Fizyka Techniczna i Matematyka Stosowana” Politechniki Warszawskiej rozpocząłem pracę pod kierunkiem dr. Jacka Krzywińskiego, wówczas pracującego w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie<sup>21</sup>. Współpraca ta zaowocowała moim wyjazdem do Hamburga, gdzie odbyłem kilkumiesięczny staż pracując przy nowoczesnym liniowym akceleratorze elektronów o ówczesnej nazwie „Tesla Test Facility – Free Electron Laser” (TTF-FEL) w dużym ośrodku badawczym Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY). Obecnie TTF-FEL jest częścią ośrodka „Flash” w DESY.

Praca pod kierunkiem dr. Krzywińskiego zaowocowała dwiema publikacjami na temat interakcji krótkich impulsów promieniowania z zakresu ultrafioletu próżniowego (VUV) z atomem wodoru, motywowanymi parametrami promieniowania wytwarzanego przez TTF-FEL [1, 3], w których wykazaliśmy m.in. stabilizację przekroju czynnego na jonizację atomu wodoru w zależności od intensywności promieniowania. Moją pracę przy akceleratorze TTF-FEL kontynuowałem również w trakcie pisania doktoratu w DESY, a owocem tego zaangażowania było współautorstwo w kolejnych artykułach dotyczących, często przełomowych, osiągnięć w wytwarzaniu undulatorowego promieniowania Self-Amplified-Spontaneous-Emission (SASE) w akceleratorze TTF-FEL [2, 5, 6, 9, 10].

W roku 1999 rozpocząłem staż doktorancki w grupie prof. Roberta L. Johnsona na Uniwersytecie w Hamburgu. W trakcie przygotowywania doktoratu pracowałem na stałe w laboratorium HASYLAB (Hamburg Synchrotron Laboratory) w DESY, i byłem odpowiedzialny za stację eksperymentalną F2.2 „Winklemi” używającą promieniowania produkowanego przez elektromagnes dipolowy (bending magnet) w pierścieniu akumulacyjnym DORIS II i przeznaczoną do pomiarów kątowno-rozdzielczej fotoemisji przy użyciu fotonów z zakresu energii 5 - 40 eV.

Moja praca doktorska dotyczyła struktury elektronowej pasma walencyjnego w GaN oraz ZnSe, które są półprzewodnikami o szerokich przerwach energetycznych. Wyniki związane bezpośrednio z doktoratem zostały opublikowane w trzech pracach w renomowanych czasopiśmie, w których jestem pierwszym autorem [8, 12, 13] i jednej nieco późniejszej pracy dotyczącej wpływu oddziaływań wieloelektronowych (quasiparticles) na wyniki fotoemisyjne w półprzewodnikach [S1]. Podczas przygotowywania doktoratu wykonałem i opublikowałem również inne pomiary i obliczenia, zarówno samodzielnie [11] jak i we współpracy z grupą prof. Wiesendangera z Uniwersytetu w Hamburgu [7].

---

<sup>21</sup> Obecnie dr Krzywiński pracuje w SLAC, Kalifornia, USA.

W trakcie mojego stażu doktoranckiego nawiązałem bliską współpracę z prof. B. A. Orłowskim oraz prof. B. J. Kowalskim z Instytutu Fizyki PAN w Warszawie, która dotyczyła pomiarów fotoemisyjnych na kryształach objętościowych azotku galu (GaN) przygotowywanych w Instytucie Wysokich Ciśnień „Unipress” w Warszawie w grupie dr. I. Grzegory i prof. S. Porowskiego. Z kolei pomiary epitaksjalnych warstw selenku cynku (ZnSe) były wykonywane we współpracy z grupą prof. E. Umbacha i prof. L. Molenkampa z Uniwersytetu w Würzburgu, którzy dysponowali kompleksowym systemem epitaksji z wiązek molekularnych (MBE) produkującym cienkie warstwy o najwyższej jakości. W tamtym czasie kilkakrotnie wizytowałem zarówno Instytut Fizyki PAN w Warszawie jak i Uniwersytet w Würzburgu w celu omówienia strategii prowadzenia badań oraz wygłoszenia seminariów na temat moich wyników.

Również w tym czasie, dzięki współpracy z dr. Andrzejem Fleszarem (Uniwersytet w Würzburgu) oraz Thomasem Strasserem (wówczas doktorantem na Uniwersytecie w Kiel), opanowałem podstawy obliczeń elektronowej struktury pasmowej przy pomocy metodyki teorii funkcjonału gęstości (DFT).

## **5b). Podsumowanie dokonań naukowych po otrzymaniu tytułu doktora niewchodzących w skład rozprawy habilitacyjnej**

### **5b1). Staż w grupie prof. Kevina Smitha**

Po obronie doktoratu zdecydowałem się na staż podoktorski w wiodących laboratoriach synchrotronowych w USA. Przez część mojego stażu podoktorskiego pracowałem w grupie prof. Kevina Smitha z Boston University (BU). W tym czasie kontynuowałem moje badania fotoemisyjne nad azotkami, co zaowocowało kolejnymi publikacjami z tej dziedziny [15, 16, 18] a zwieńczeniem tych badań była ważna praca dotycząca dwuwymiarowego gazu elektronowego (two-dimensional electron gas, 2DEG) na powierzchni wąskopasmowego azotku InN [20], którego właściwości mogą być kontrolowane poprzez metodykę preparatyki powierzchni, i który wykazuje nieparaboliczną dyspersję pasm energetycznych przy poziomie Fermiego. Praca ta została doceniona przez ekspertów zaproszeniem do opublikowania raportu w *2007 NSLS Activity Report*<sup>22</sup>. Od początku stażu podoktorskiego do moich obowiązków należała opieka nad doktorantami oraz magistrantami. W czasie współpracy z prof. Smithem byłem odpowiedzialny za opiekę nad młodszymi stażem członkami grupy, szczególnie podczas wykonywania pomiarów w laboratorium synchrotronowym.

### **5b2). Staż w grupie prof. Charlesa Fadleya**

Moje badania nad magnetycznymi właściwościami ciał stałych zawarte w „Osiągnięciu Naukowym” są prowadzone przy pomocy zróżnicowanych technik spektroskopowych, jednakże badania fotoemisyjne w zakresie energii fotonów poniżej 200 eV są powierzchniowo czułe, co

---

<sup>22</sup> L. Colakerol, T.D. Veal, H.-K. Jeong, L. Plucinski, A. DeMasi, T. Learmonth, P.-A. Glans, S. Wang, Y. Zhang, L.F.J. Piper, P.H. Jefferson, A. Fedorov, T.-C. Chen, T. D. Moustakas, C. F. McConville, and K. E. Smith, „Unveiling Electronic Properties Near a Semiconductor Surface” *2007 NSLS Activity Report*, 17 (2007). Praca była również wyświetlana na głównej witrynie internetowej NSLS jako „Science Highlight”.

utrudnia szczegółowe badanie objętościowej (bulk) struktury elektronowej. Czułość powierzchniowa jest bardzo przydatna w wielu badaniach, jednak na przykład w przypadku materiałów takich jak stopy Heuslera (Heusler alloys) lub rozcieńczone półprzewodniki ferromagnetyczne (dilute ferromagnetic semiconductors, DMS) czułość powierzchniowa jest znaczącą przeszkodą, gdyż zwykle w przypadku tego typu materiałów właściwości powierzchni różnią się znacząco od właściwości objętościowych. Niezawodną metodą zwiększenia czułości objętościowej jest pomiar fotoemisji dla wysokiej energii fotonów, co przekłada się na wysokie energie elektronów emitowanych z okolic poziomu Fermiego. W przypadku takich pomiarów stosowane są akronimy HAXPES (hard x-ray photoelectron spectroscopy, spektroskopia fotoelektronów przy użyciu twardych promieni rentgenowskich), lub HARPES (hard x-ray ARPES) gdy dodatkowo mierzony jest rozkład kątowy fotoelektronów. W przypadku energii kinetycznych rzędu 2-6 keV średnia droga swobodna elektronów osiąga 50-100 Å, czyli o ponad rząd wielkości więcej niż w przypadku typowych pomiarów fotoemisyjnych.

Zafascynowany nowymi możliwościami związanymi z fotoemisją dla twardych promieni rentgenowskich dołączyłem w 2006 roku do grupy prof. Charlesa Fadleya w Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) w Kalifornii. Mój staż w tej grupie zaowocował szeregiem pionierskich prac związanych z techniką HARPES. Istotą techniki HARPES jest możliwość mierzenia dyspersji pasm energetycznych w kryształach objętościowych (bulk band dispersions), czyli mierzenia map wartości własnych energii  $E_{\text{bin}}$  w zależności od położenia w sieci odwrotnej wektora  $\mathbf{k}$  w objętościowej strefie Brillouina. Tradycyjnie rozdzielczość energetyczna takiego pomiaru jest ograniczona do  $\Delta E > 100 - 200$  meV ze względu na brak intensywnych źródeł promieniowania dla energii fotonów powyżej 1-2 keV. To ograniczenie nie ma jednak charakteru fundamentalnego i będzie stopniowo znoszone wraz z rozwojem nowych źródeł promieniowania (np. źródeł promieniowania synchrotronowego najnowszej generacji). Jednakże dla wysokich energii wzbudzającego promieniowania i emitowanych elektronów rozdzielczość pomiaru HARPES jest ograniczona również w przestrzeni sieci odwrotnej  $\mathbf{k}$ , ze względu na wibracje sieci krystalicznej i duży wektor sieci odwrotnej  $\mathbf{G}$ , który jest wymagany do tego, żeby proces fotoemisyjny mógł mieć miejsce. W pionierskiej pracy [26], poprzez pomiar dyspersji pasm energetycznych w wolframie dla energii fotonów 870 eV i temperatur między 300K a 780K, wykazałem na podstawie modelu Debye-Wallera, że pasma energetyczne w wolframie będą widoczne w pomiarze fotoemisyjnym dla energii fotonów do około 6 keV, gdy próbka będzie chłodzona kriogenicznie do około 4K, oraz, że kriogeniczne chłodzenie da również możliwość mapowania pasm w szeregu innych materiałów dla nieco niższych energii do około 3 keV. Te przewidywania zostały potwierdzone w kolejnych przełomowych pracach, w których jestem współautorem [35, 39], gdzie zaprezentowana została zmierzona dyspersja objętościowych pasm energetycznych wolframu dla energii fotonów 6 keV oraz arsenku galu dla 3.2 keV.

Możliwości dokonywania pomiarów HARPES przy pomocy standardowego źródła promieni rentgenowskich  $\text{MgK}\alpha$  zostały zaprezentowane w pracy [32], natomiast rozwinięcie teoretycznej interpretacji poprzez uwzględnienie efektów związanymi z fononami w pracy [44]. Uczestniczyłem również w rozwinięciu metody fotoemisji fali stojącej (standing wave photoemission), która umożliwia badanie struktury elektronowej poniżej powierzchni przy użyciu promieniowania z zakresu miękkich promieni rentgenowskich [25, 37]. Również tę metodę rozszerzyliśmy ostatnio o mapowanie ARPES w celu zbadania właściwości interfejsu między  $\text{SrTiO}_3$  i  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  [43].

Spośród wyżej wymienionych prac na szczególną uwagę zasługuje praca [39], która dotyczy objętościowej struktury pasmowej najważniejszego rozcieńczonego półprzewodnika ferromagnetycznego  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ , gdyż jest ona tematycznie zbliżona do prac [H1-H7]. W pracy

tej została przedstawiona analiza widm HARPES dla energii fotonów 3.2 keV, która wykazała, że poziomy energetyczne manganu w  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  są położone około 400 meV poniżej poziomu Fermiego, ale zmiany spektralne dotyczą także całego pasma walencyjnego GaAs, co pozwoliło na uściślenie interpretacji źródeł magnetyzmu w tym materiale.

Przełomowe prace [35, 39] zostały również docenione poprzez publikacje w corocznych wspólnych raportach Forschungszentrum Jülich i RWTH Aachen (JARA-FIT Annual Report) w sekcji wybranych raportów badawczych (selected research reports) oraz komunikatami prasowymi na głównej witrynie internetowej Forschungszentrum Jülich<sup>23</sup>.

### **5b3). Rozwój instrumentacji do pomiarów fotoemisyjnych**

W dobie postępu technologicznego rozwój technik pomiarowych ma duże znaczenie, szczególnie w przypadku badań naukowych, które koncentrują się na zjawiskach nowych, wcześniej nieopisanych. W roku 2006 przyjąłem ofertę pracy w Forschungszentrum Jülich (Niemcy) w instytucie o obecnej nazwie Peter-Grünberg-Institut-6 (PGI-6) kierowanym przez prof. Clausa M. Schneidera, gdzie pracuję do dziś. Grupa ta specjalizuje się w eksperymentalnych badaniach struktury elektronowej ciał stałych, a główny nacisk jest kładziony na magnetyzm oraz na pilotażowy rozwój instrumentacji. Wyjątkowe możliwości stworzone w PGI-6 pozwoliły mi na zbudowanie 2 dużych stacji eksperymentalnych służących do pomiarów fotoemisyjnych, opisanych w dedykowanych artykułach [30, 31], na udział w konstrukcji najwydajniejszego obecnie polarymetru spinowego dostępnego komercyjnie [S2], oraz w szeregu fascynujących programów badawczych [27, 35, 38].

W pracy [30] opisałem system badawczy, który uruchomiłem w laboratorium synchrotronowym DELTA w Dortmundzie, i który znajduje się tam do dziś. System ten umożliwia równoczesne mierzenie dwuwymiarowych widm  $E(k)$  ARPES oraz widm spinowo-spolaryzowanej fotoemisji spinARPES. W momencie uruchamiania był to jeden z pierwszych (o ile nie pierwszy) na świecie systemów gdzie detektor spinowy został połączony ze spektrometrem hemisferycznym umożliwiającym pomiary spinARPES o wysokiej rozdzielczości kątowej.

Praca [31] dotyczy realizacji dwóch bliźniaczych systemów ARPES, które umożliwiają pomiary w wysokiej rozdzielczości energetycznej dla niskoenergetycznych elektronów przy użyciu źródeł monochromatycznych fotonów o niskiej energii między 8.4 eV a 11.6 eV. Jeden z systemów został uruchomiony przeze mnie w FZ Jülich, a drugi pod kierownictwem prof. S. Sugi w Japonii na Uniwersytecie w Osace.

Praca [S2] dotyczy budowy detektora spinowego najnowszej generacji, który pozwala na dokonywanie pomiarów fotoemisyjnych z rozdzielczością spinową w czasie o rząd lub dwa rzędy wielkości krótszym niż za pomocą konwencjonalnych polarymetrów Motta.

Praca [S3] dotyczy uruchamiania systemu do pomiarów czasowo-rozdzielczej fotoemisji w laboratorium synchrotronowym DELTA w Dortmundzie gdzie ultrakrótkie (poniżej 100 femtosekund) impulsy fotonów z zakresu VUV są produkowane poprzez modulacje wiązki elektronowej w pierścieniu akumulacyjnym (storage ring) femtosekundowym impulsem

---

<sup>23</sup> Komunikaty prasowe były wyświetlane w październiku 2012 oraz w sierpniu 2011 roku. Są dostępne pod adresami internetowymi <http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/DE/2012/12-10-14halbleiter-nature-materials.html> oraz <http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/DE/2011/11-08-18photoemissionsspektroskopie.html>.

laserowym. Proces ten jest nazywany „coherent harmonic generation” (CHG). Czas jednego okrążenia w pierścieniu akumulacyjnym DELTA wynosi 384 ns (2.6 MHz), jednak laser modulujący o długości fali 795 nm działa wydajnie jedynie przy częstotliwości 1 kHz. Oznacza to, że nawet gdy w pierścieniu akumulacyjnym znajduje się tylko jedna paczka (bunch) elektronowa, system CHG produkuje standardowe impulsy synchrotronowe o FWHM około 100 ps z częstotliwością 2.6 MHz, a tylko 1 na 2600 z tych impulsów jest modulowany przez laser i charakteryzuje się wysoką jasnością i FWHM poniżej 100 fs. Stacja opisana w pracy [30] jest wyposażona w detektor elektronów o rozdzielczości czasowej poniżej jednej nanosekundy, który umożliwi oddzielenie impulsów CHG od standardowych impulsów promieniowania synchrotronowego, na czym będą bazować nasze przyszłe czasowo-rozdzielcze eksperymenty fotoemisyjne wykonywane przy użyciu technik stroboskopowych.

#### 5b4). Przyszłe plany i kierunki badawcze

Obecnie kontynuuję badania nad cienkimi warstwami trójwymiarowych izolatorów topologicznych. Program badawczy obejmuje mierzenie właściwości supersieci złożonych z materiałów o charakterystyce *n* i *p* (np.  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  i  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ )<sup>24</sup> oraz inżynierię oraz badanie związków trójskładnikowych w celu kontrolowania pozycji poziomu Fermiego wewnątrz przerwy energetycznej. Ponadto zajmuję się badaniem wpływu powierzchniowego i objętościowego domieszkowania izolatorów topologicznych atomami o właściwościach magnetycznych (np. chrom lub żelazo).

Kontynuuję badania nad cienkimi warstwami magnetycznymi. Używając ultracienkich epitaksjalnych warstw żelaza Fe(001) jako prototypowego jedno-domenowego ferromagnetyka, badam wpływ efektów związanych z oddziaływaniem spin-orbita na dyspersję objętościowych i powierzchniowych pasm energetycznych.

Kontynuuję intensywną współpracę naukową z grupą prof. Fadleya, która dotyczy głównie badań struktury elektronowej interfejsów za pomocą techniki HARPEs. Uczestniczę również aktywnie w szeregu programów badawczych wewnątrz instytutu PGI-6, w szczególności w programie związanym z ultraszybką demagnetyzacją mierzoną za pomocą laserowych technik stroboskopowych oraz w mikroskopowych pomiarach struktury elektronowej przy pomocy mikroskopii fotoelektronowej (photoemission microscopy, PEEM).

Łukasz Pluciński

---

<sup>24</sup> W związkach tych istnieje „samoistne” domieszkowanie typu *n* i *p* związane najprawdopodobniej z defektami sieci krystalicznej o różnej naturze, zachwianiem stechiometrii lub niecelowym domieszkowaniem zanieczyszczeniami w procesie wzrostu kryształów i cienkich warstw.