

*Kontrola właściwości magnetycznych niskowymiarowych układów ferro-  
i antyferro- magnetycznych*

Anna Koziół-Rachwał

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

1. Imię i nazwisko: Anna Koziół-Rachwał
2. Posiadane stopnie naukowe:
  - (a) tytuł magistra, Uniwersytet Jagielloński, rok 2008
  - (b) doktor nauk fizycznych, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, rok 2014, tytuł rozprawy: „*Struktura i właściwości magnetyczne układów warstwowych metal/izolator*”, promotor prof. dr hab. Józef Korecki
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

2017 – obecnie – adiunkt, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

2014 – 2017 – asystent naukowy, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust.1 pkt. 2 Ustawy.

Jako osiągnięcia naukowe o których mowa w art. 2019 ust.1 pkt. 2 Ustawy przedstawiam cykl artykułów naukowych pod zbiorczym tytułem: „*Kontrola właściwości magnetycznych niskowymiarowych układów ferro- i antyferromagnetycznych*”

Lista publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe:

**O1.** The effect of the MgO buffer layer thickness on magnetic anisotropy in MgO/Fe/Cr/MgO buffer/MgO(001)

**A. Koziół-Rachwał**, T. Nozaki, V. Zayets, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, and Y. Suzuki, *Journal of Applied Physics* 120, 085303 (2016).

**O2.** Enhancement of perpendicular magnetic anisotropy and its electric field-induced change through interface engineering in Cr/Fe/MgO

**A. Koziół-Rachwał**, T. Nozaki, K. Freindl, J. Korecki, S. Yuasa & Y. Suzuki, *Scientific Reports* 7, 5993 (2017).

**O3.** Interlayer exchange coupling, dipolar coupling and magnetoresistance in Fe/MgO/Fe trilayers with a subnanometer MgO barrier

**A. Koziol-Rachwał,** W. Skowroński, M. Frankowski, J. Chęciński, S. Ziętek, P. Rzeszut, M. Ślęzak, K. Matlak, T. Ślęzak, T. Stobiecki, J. Korecki, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 424, 189-193 (2017).

**O4.** Growth and magnetic properties of ultrathin epitaxial FeO films and Fe/FeO bilayers on MgO(001)

**A. Koziol-Rachwał,** T. Ślęzak, T. Nozaki, S. Yuasa, and J. Korecki, *Applied Physics Letters* 108, 041606 (2016).

**O5.** Interface engineering towards enhanced exchange interaction between Fe and FeO in Fe/MgO/FeO epitaxial heterostructures

**A. Koziol-Rachwał,** W. Janus, M. Szpytma, P. Drózdź, M. Ślęzak, K. Matlak, M. Gajewska, T. Ślęzak, J. Korecki, *Applied Physics Letters*, 115, 141603 (2019).

**O6.** Control of spin orientation in antiferromagnetic NiO by epitaxial strain and spin-flop coupling

**A. Koziol-Rachwał,** M. Ślęzak, M. Zając, P. Drózdź, W. Janus, M. Szpytma, H. Nayyef, T. Ślęzak, *APL Materials* 8, 061107 (2020).

(a) Omówienie prac stanowiących osiągnięcie naukowe

Rozwój technologii wysokopróżniowych wpłynął na intensyfikację badań w dziedzinie fizyki nanostruktur. Konsekwencją obniżenia wymiarowości w nano – układach jest pojawienie się nowych, unikalnych właściwości które znalazły rozliczne zastosowania – od elementów układów elektronicznych po nanoprodukty lecznicze. Liczną grupę wśród nanomateriałów stanowią nanostruktury magnetyczne, wśród których wymienić można magnetyczne nanocząstki,<sup>1</sup> nanodruty,<sup>2</sup> cienkie warstwy czy układy wielowarstwowe.<sup>3</sup> Wyniki badań nad ich właściwościami magnetycznymi stały się motorem rozwoju elektroniki spinowej (spintroniki). Aktywnymi elementami w układach spintronicznych są ferromagnetyki (FM). Stan magnetyczny FM jest zwykle podwójnie zdegenerowany, a zmiana orientacji magnetyzacji, utożsamiana z zapisem informacji, wymaga pokonania bariery energetycznej. W litych materiałach FM o kierunku namagnesowania decyduje anizotropia magnetokrystaliczna, której źródłem jest oddziaływanie spin-orbita oraz anizotropia kształtu, która jest związana z istnieniem oddziaływań dipolowych.<sup>4</sup> W przypadku układów cienkowarstwowych, modyfikacja oddziaływania spin-orbita na powierzchni/międzywierzchni warstwy odpowiada za pojawienie się dodatkowego przyczynku do efektywnej stałej

anizotropii, tzw. anizotropii powierzchniowej. Dla układów o grubości rzędu kilku warstw atomowych przyczynę powierzchniowy może wносить dominujący wkład do efektywnej stałej anizotropii i decydować o kierunku namagnesowania warstwy. Dodatkowo, jeśli warstwa FM poddana jest naprężeniom anizotropia magnetoelastyczna może mieć decydujący wpływ na efektywną anizotropię warstwy. Badania nad anizotropią magnetyczną cienkich warstw skupiają uwagę badaczy od kilku dekad. Demonstracja efektywnej anizotropii magnetycznej preferującej prostopadły do powierzchni kierunek spontanicznego namagnesowania (Perpendicular Magnetic Anisotropy, PMA) w cienkich układach jedno- i wielowarstwowych przyniosła poważne konsekwencje dla spintroniki i doprowadziła do zwiększenia gęstości zapisu informacji pamięci magnetycznych. Dodatkowo, możliwość sterowania kierunkiem namagnesowania i indukowania dynamiki magnetyzacji poprzez transfer spinowego i spinowo-orbitalnego momentu siły (kolejno Spin Transfer Torque, STT oraz Spin Orbit Torque, SOT)<sup>5</sup> oraz realizacja zmiany anizotropii magnetycznej metalicznych warstw FM poprzez przyłożenie pola elektrycznego do ich powierzchni (Voltage Controlled Magnetic Anisotropy, VCMA)<sup>6</sup> doprowadziły do powstania nowej generacji komórek pamięci swobodnego dostępu (Magnetic Random Access Memories, MRAM) oraz sensorów magnetycznych. Właściwościom magnetycznym cienkich warstw FM oraz możliwościom ich kontroli poświęcone są prace **O1 – O3** niniejszego opracowania. Z kolei w artykułach **O4 – O6** skupiono się na eksploracji właściwości magnetycznych cienkich warstw antyferromagnetycznych. Antyferromagnetyki (AFM) nie posiadają wypadkowego momentu magnetycznego i są wykorzystywane w układach spintronicznych jako warstwa mocująca warstwę FM. Jest to możliwe, dzięki magnetycznemu sprzężeniu wymiennemu pomiędzy FM i przylegającą warstwą AFM (Exchange Bias, EB).<sup>7</sup> Najnowsze badania pokazują, że rola AFM w urządzeniach elektroniki spinowej może już wkrótce znacznie się zwiększyć. Ostatnie eksperymenty demonstrujące możliwość sterowania strukturą spinową AFM za pomocą prądu elektrycznego, naprężeń czy impulsów światła laserowego<sup>8</sup> w połączeniu z zaobserwowanymi efektami magnetorezystancji i spinowej magnetorezystancji Halla<sup>9</sup> umożliwiają potencjalne zastosowanie AFM jako aktywnych elementów urządzeń spintronicznych. W przeciwieństwie do FM, warstwy AFM pozostają niewrażliwe na zewnętrzne pola magnetyczne oraz nie generują magnetycznych pól rozproszonych, co jest cechą bardzo korzystną w kontekście zwiększenia gęstości zapisu danych.

W kolejnej części opracowania zostaną zaprezentowane możliwości modulacji magnetycznych właściwości warstw ferro – i antyferro – magnetycznych, które zostały szczegółowo przedstawione w pracach O1 – O6. Układy cienkowarstwowe opisane w niniejszym opracowaniu zostały przygotowane w Spintronics Research Center w National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) w Tsukubie (prace O1 – O2) oraz w laboratorium Nanostruktur Powierzchniowych Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica (prace O3 – O6). Warstwy były preparowane w warunkach ultra wysokiej próżni (Ultra High Vacuum, UHV) metodą epitaksji z wiązek molekularnych

(Molecular Beam Epitaxy, MBE). Grubość nanoszonych warstw była kontrolowana przez kwarcowe monitory grubości, a ich struktura została scharakteryzowana za pomocą dyfrakcji wysokoenergetycznych oraz niskoenergetycznych elektronów (Reflection High Energy Electron Diffraction, RHEED oraz Low Energy Electron Energy Diffraction, LEED). W pracach O2, O4, O5 do charakteryzacji chemicznych i magnetycznych właściwości warstw Fe oraz FeO używano spektroskopii Mössbauera, stąd do preparatyki niektórych próbek wykorzystano izotop  $^{57}\text{Fe}$ . Wszystkie układy wielowarstwowe zostały przygotowane na monokrystalicznych podłożach MgO o orientacji (001). Klinowe warstwy Fe, Cr, MgO i NiO były przygotowane przy użyciu przesłony znajdującej się między układem MBE a podłożem na które były nanoszone warstwy.

Analiza uporządkowania strukturalnego układów MgO/Fe/Cr/MgO (praca O1) oraz Fe/FeO (praca O5) została przeprowadzona przy użyciu transmisyjnego mikroskopu elektronowego (Transmission Electron Microscopy, TEM). Dodatkowo, skład chemiczny podwarstw w układzie MgO/Fe/Cr/MgO (praca O1) został zbadany za pomocą spektroskopii strat energii elektronów (Electron Energy Loss Spectroscopy, EELS) oraz spektroskopii elektronów Augera (Auger Electron Spectroscopy, AES).

Spektroskopia mössbauerowska elektronów konwersji (Conversion Electron Mossbauer Spectroscopy, CEMS) została wykorzystana do charakteryzacji magnetycznych właściwości cienkich warstw Fe w układzie MgO/Fe/Cr (praca O2) oraz warstw wustytu w układach FeO/MgO, Fe/FeO/MgO (praca O4) i Fe/MgO/FeO/MgO (praca O6). W pomiarach CEMS wykorzystano standardowy spektrometr mössbauerowski. Jako źródło promieniowania  $\gamma$  użyto  $^{57}\text{Co}(\text{Rh})$ , a do detekcji elektronów konwersji użyto przepływowego licznika z mieszkanką He/CH<sub>4</sub>. Analizy widm CEMS dokonano przy użyciu oprogramowania Recoil.<sup>10</sup>

Właściwości magnetyczne warstw FM oraz oddziaływanie warstw Fe w kontakcie z AFM zostały scharakteryzowane przy pomocy metody magnetoptycznego efektu Kerra (Magneto optic Kerr Effect, MOKE). Pętle histerezy magnetycznej warstw Fe w układzie MgO/Fe/Cr były rejestrowane *ex-situ* w geometrii polarnej (PMOKE) (prace O1, O2) oraz podłużnej (LMOKE) (prace O3 – O6). Dodatkowo, do wyznaczenia bezwzględnej wartości namagnesowania ( $M_s$ ) warstw Fe w układzie MgO/Fe/Cr (praca O1) został wykorzystany magnetometr naprzewodnikowy SQUID (Superconducting Quantum Interference Device).

W pracach O2 i O3 zostały umieszczone pomiary tunelowej magnetorezystancji (TMR) warstw Cr/Fe/MgO/Fe oraz Fe/MgO/Fe. W celu wykonania pomiarów TMR układy wielowarstwowe zostały poddane nanostrukturyzacji przy użyciu litografii optycznej (praca O2) oraz litografii elektronowej (praca O3). Pomiary MR zostały wykonane w geometrii w której prąd płynął prostopadle do powierzchni warstw (current perpendicular to plane, CPP), a pole magnetyczne było przykładane w płaszczyźnie próbki. W pracy

O3 ze względu na małe wartości MR w układzie Fe/MgO/Fe do pomiarów magnetorezystancji zastosowano metodę czteropunktową.

Do symulacji struktury magnetycznej elektrod Fe w układzie Fe/MgO/Fe (praca O3) oraz jej zależności od zewnętrznego pola magnetycznego wykorzystano oprogramowanie OOMF.<sup>11</sup> Symulacje zostały wykonane w ramach współpracy z grupą Elektroniki Spinowej AGH kierowaną przez dr hab. W. Skowrońskiego.

Analiza AFM struktury spinowej warstw NiO opisana w pracy O6 została wykonana dzięki pomiarom magnetycznego dichroizmu liniowego (X-ray Magnetic Linear Dichroism, XMLD). Pomiary XMLD zostały wykonane na linii XAS (X-ray Absorption Spectroscopy) w Narodowym Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS.<sup>12</sup>

### **Modulacja magnetycznych właściwości cienkich warstw Fe**

Istnienie prostopadłej anizotropii magnetycznej w układzie Fe/MgO zostało zapostulowane w pracach teoretycznych. Yang i współpracownicy pokazali że PMA w układzie Fe/MgO jest konsekwencją hybrydyzacji orbitali 3d Fe i 2p O na międzywierzchni.<sup>13</sup> W pracach teoretycznych pokazano również, że PMA w układzie Fe/MgO może być modulowana przy pomocy pola elektrycznego,<sup>14, 15, 16</sup> co potwierdziły prace eksperymentalne.<sup>17, 18, 19</sup> Istnienie prostopadłej anizotropii powierzchniowej zostało zaprezentowane dla warstw Fe w układzie MgO/Fe/Cr przez kilka grup eksperymentalnych.<sup>20, 21</sup> W pracy<sup>19</sup> dla warstw Fe o grubości ( $d_{Fe}$ ) większej niż 6Å wyznaczono powierzchniową stałą anizotropii ( $K_s$ ) oraz zbadano jej zależność od napięcia przyłożonego do międzywierzchni MgO/Fe. Wartość współczynnika VCMA, zdefiniowanego jako zmiana gęstości powierzchniowej energii anizotropii pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego została oszacowana na 100fJ/Vm dla warstw Fe o  $d_{Fe} > 6$  Å. Dla cieńszych warstw ( $d_{Fe} < 6$  Å) zaobserwowano osłabienie PMA oraz spadek wartości namagnesowania nasycenia ( $M_s$ ) warstw Fe. Zanotowano również zmianę charakteru zależności energii anizotropii od pola elektrycznego, dla ujemnych napięć współczynnik VCMA wzrósł do 300fJ/Vm podczas gdy anizotropia warstwy nie ulegała zmianie pod wpływem przyłożenia dodatniego napięcia. Wspomniane wyniki badań pokazały, że do zrozumienia pochodzenia PMA oraz jej zależności od pola elektrycznego w układzie MgO/Fe/Cr niezbędna jest szczegółowa analiza międzywierzchni MgO/Fe oraz Fe/Cr. W pracach **O1** i **O2** pokazano jak wzmocnić prostopadłą anizotropią magnetyczną oraz efekt VCMA w układzie MgO/Fe/Cr. Przedmiotem badań pracy **O1** była zależność pomiędzy magnetycznymi właściwościami warstwy Fe a grubością buforowej warstwy MgO ( $d_{MgO}$ ) w układzie MgO/Fe( $d_{Fe}$ )/Cr/MgO( $d_{MgO}$ ). Dla warstw Fe o grubościach z przedziału  $4\text{Å} \leq d_{Fe} \leq 7\text{Å}$  systematyczne pomiary pętli histerezy magnetycznej z wykorzystaniem PMOKE pokazały niemonotoniczną zależność pomiędzy polem koercji ( $H_c$ ) a  $d_{MgO}$ . Początkowy wzrost pola koercji wraz ze zwiększeniem grubości bufora był związany z redukcją zanieczyszczeń węglowych na powierzchni Fe, co potwierdzono w pomiarach RHEED i AES. Zgodnie z wcześniejszymi badaniami redukcja zanieczyszczeń C może być odpowiedzialna za wzrost anizotropii powierzchniowej,<sup>22</sup> co może tłumaczyć obserwowane zwiększenie  $H_c$ .

wraz ze wzrostem  $d_{MgO}$ . Grubość bufora dla której obserwowano maksymalną wartość  $H_c$  malała wraz ze wzrostem  $d_{Fe}$ , co świadczy o tym iż mała zmiana grubości Fe wpływa na ilość zanieczyszczeń C w międzywierzchni MgO/Fe. Co ciekawe, po osiągnięciu wartości maksymalnej  $H_c$  wraz z dalszym zwiększeniem grubości warstwy buforowej zanotowano spadek wartości pola koercji. Dla grubszych warstw Fe ( $d_{Fe} > 7\text{\AA}$ ) wzrost grubości MgO prowadził do reorientacji spinowej (Spin Reorientation Transition, SRT) warstw Fe z kierunku prostopadłego do płaszczyzny do kierunku w płaszczyźnie warstwy. Analiza zależności efektywnej anizotropii warstw Fe od grubości warstwy buforowej pozwoliła stwierdzić, że wraz ze wzrostem  $d_{MgO}$  zmienia się anizotropia magnetoelastyczna w układzie, której obecność może być związane z mieszaniami Fe i Cr na międzywierzchni Fe/Cr. Wpływ obecności atomów Cr w warstwie Fe w układzie MgO/Fe/Cr na PMA i efekt VCMA został opisany w artykule **O2**. W pracy do charakteryzacji chemicznych właściwości warstwy Fe w układzie MgO/Fe/Cr została użyta spektroskopia CEMS. Analiza widm CEMS potwierdziła obecność atomów Cr na międzywierzchni MgO/Fe. Wynik ten stanowił motywację do systematycznych badań zależności magnetycznych właściwości układu od grubości Cr na międzywierzchni MgO/Fe. Prostopadła anizotropia magnetyczna oraz efekt VCMA były wyznaczane poprzez pomiar tunelowego magnetooporu (TMR) oraz jego zależności od pola elektrycznego przy wykorzystaniu struktury magnetycznego złącza tunelowego Fe/MgO/Cr( $d_{Cr}$ )/Fe( $d_{Fe}$ )/Cr. Pomiar magnetorezystancji w funkcji  $d_{Cr}$  pozwoliły na określenie wpływu obecności ultra-cienkiej warstewki Cr ( $0 < d_{Cr} < 2\text{\AA}$ ) na efektywną anizotropię magnetyczną warstw Fe o grubościach z zakresu  $3\text{\AA} < d_{Fe} < 7\text{\AA}$ . Dla warstw Fe o  $d_{Fe} < 5.5\text{\AA}$  zaobserwowano osłabienie PMA wraz ze wzrostem  $d_{Cr}$ , podczas gdy dla grubszych warstw żelaza pokazano, że PMA i VCMA mogą zostać wzmocnione jeśli na międzywierzchni MgO/Fe obecne są atomy Cr. Dla  $d_{Fe} = 6.6\text{\AA}$  zaobserwowano wzrost efektywnej stałej anizotropii z  $K_{eff} = 0.68\text{MJ/m}^3$  do  $K_{eff} = 1.03\text{MJ/m}^3$  przy zastosowaniu warstwy Cr o ułamkowym pokryciu (sub-monowarstwy)  $0.4\text{\AA}$ . Z kolei dla żelaza o grubości  $5.9\text{\AA}$  pokazano wzrost współczynnika VCMA z  $230\text{fJ/Vm}$  do  $370\text{fJ/Vm}$  dla  $d_{Cr} = 0.7\text{\AA}$ . W pracy przedyskutowano możliwą przyczynę zaobserwowanych efektów w kontekście prac teoretycznych opisujących możliwość wzmocnienia PMA i efektu VCMA poprzez redukcję anizotropii kształtu,<sup>23</sup> modyfikację naprężeń<sup>24</sup> czy zmianę populacji orbitali  $d_{xz,yz}$  Fe spowodowaną domieszkowaniem atomami Cr na międzywierzchni MgO/Fe.<sup>25</sup>

Prace O1 i O2 opisują możliwość kontroli stanu magnetycznego cienkich warstw Fe poprzez modyfikację ich anizotropii powierzchniowej, która wnosi dominujący wkład do efektywnej anizotropii magnetycznej warstw o grubości rzędu kilku monowarstw atomowych. Z kolei w pracy **O3** pokazano jak kontrolować magnetyczne właściwości układu składającego się z dwóch ferromagnetycznych warstw Fe oddzielonych ultra-cienką tunelową barierą (TB) MgO. Układy wielowarstwowe typu FM/TB/FM są przedmiotem dużego zainteresowania ze względu na zaobserwowane dla nich zjawisko tunelowej magnetorezystancji (Tunnel Magnetoresistance, TMR), którego mechanizm związany jest ze spinowo – zależnym tunelowaniem

elektronów przez warstwę izolatora.<sup>26</sup> Dotychczasowe pomiary TMR dla wielowarstw Fe/MgO/Fe z krystaliczną barierą tunelową pokazują, że efekty magnetorezystancji są maksymalne dla grubości bariery MgO rzędu 2-3nm. Dla cieńszych przekładek MgO zaobserwowano drastyczny spadek TMR związany z rosnącym przyczynkiem tunelowania poprzez stany rezonansowe w warstwie MgO.<sup>27</sup> Efekty rezonansowe mogą tłumaczyć inne zjawisko zaobserwowane w układach FM/TB/FM, międzywarstwowe sprzężenie wymienne (Interlayer Exchange Coupling, IEC). Dla ultracienkiej przekładki MgO sprzężenie IEC może zdominować efektywne sprzężenie pomiędzy warstwami Fe i doprowadzić do antyrównoległego wzajemnego ułożenia wektorów namagnesowania warstw FM. Dla układów poddanych nanostrukturyzacji pojawia się dodatkowy przyczynnik do efektywnego sprzężenia pomiędzy warstwami FM – magnetyczne oddziaływanie dipolowe. W pracy **O3** badano wpływ nanostrukturyzacji na efektywne sprzężenie pomiędzy warstwami Fe w układzie Fe/MgO( $t_{MgO}$ )/Fe dla przekładek MgO o grubości z zakresu (0 - 7)Å. Pomiary LMOKE wykonane przed nanostrukturyzacją układu udowodniły obecność antyferromagnetycznego IEC pomiędzy warstwami Fe dla  $2\text{Å} < t_{MgO} < 6\text{Å}$ , co potwierdziło wcześniejsze wyniki badań nad sprzężeniem IEC w układzie Fe/MgO/Fe.<sup>28</sup> Konsekwencją nanostrukturyzacji było pojawienie się sprzężenia dipolowego, które wniosło dodatkowy przyczynnik do efektywnego AFM sprzężenia pomiędzy warstwami Fe. Pomiary magnetorezystancji złącz o różnych rozmiarach w połączeniu z symulacjami zależności magnetorezystancji od pola magnetycznego MR(H) pozwoliły na wyznaczenie przyczynku sprzężenia dipolowego do efektywnego oddziaływania pomiędzy warstwami Fe w układzie oraz na wyznaczenie zależności sprzężenia dipolowego od średnicy złącz. W pracy przeprowadzono również porównawcze badania zależności MR od grubości przekładek MgO dla układów Fe/MgO/Fe preparowanych bezpośrednio na podłożu MgO oraz na homoepitaksjalnej buforowej warstwie o grubości 10nm. Dla  $t_{MgO} > 5\text{Å}$  odnotowano wzrost wartości MR trójwarstw osadzonych na buforze MgO. W przypadku cieńszych przekładek ( $t_{MgO} < 5\text{Å}$ ) różnice w MR dla warstw preparowanych bezpośrednio na podłożu i na warstwie buforowej zanikają. Wynik ten można wytłumaczyć biorąc pod uwagę rosnący udział efektów rezonansowych w procesie tunelowania wraz z obniżaniem grubości bariery MgO. Dla bardzo cienkich przekładek dla których tunelowanie w układzie jest zdominowane przez efekty rezonansowe<sup>27,29</sup> konduktancja dla antyrównoległego ułożenia wektorów namagnesowania warstw Fe może być większa niż w przypadku ich równoległego ustawienia,<sup>30</sup> co może tłumaczyć zbliżone wartości MR obserwowane dla trójwarstw preparowanych bezpośrednio na podłożu i na warstwie buforowej.

Tematyka prac **O1-O3** związana jest z badaniami właściwości magnetycznych warstw ferromagnetycznych oraz możliwością ich kontrolowania. Kolejne trzy prace opisane pokrótce poniżej skupiają się na badaniu właściwości magnetycznych cienkich warstw antyferromagnetycznych.

### **Sterowalne właściwości magnetyczne warstw antyferromagnetycznych**



Prace **O4** i **O5** załączone do niniejszego opracowania opisują magnetyczne właściwości cienkich warstw wustytu (FeO). Lity wustyt krystalizuje w strukturze regularnej typu NaCl w której jony  $\text{Fe}^{2+}$  skoordynowane są oktaedrycznie przez atomy tlenu. FeO jest antyferromagnetycznym izolatorem z temperaturą Néela ( $T_N$ ) równą 198K. Poniżej  $T_N$  momenty magnetyczne jonów żelaza są zorientowane wzdłuż kierunku [111], a momenty magnetyczne  $\text{Fe}^{2+}$  sąsiadujących płaszczyzn {111} są zwrócone przeciwnie, co skutkuje AFM uporządkowaniem FeO. Dotychczasowe prace eksperymentalne pokazały że FeO jest tlenkiem niestechiometrycznym, a najczęściej spotykanymi defektami w warstwach FeO są oktaedryczne wakancje  $\text{Fe}^{2+}$  oraz jony  $\text{Fe}^{3+}$  które mogą być skoordynowane tetra- lub okta- edrycznie.<sup>31</sup> W artykule **O4** zoptymalizowano wzrost cienkich warstw FeO w celu wytworzenia stabilnej, AFM warstwy oraz badano jak obecność FM warstwy wpływa na magnetyczne właściwości FeO w układzie Fe/FeO. Stechiometria warstw FeO została scharakteryzowana przy pomocy spektroskopii CEMS. Analiza widm CEMS zmierzonych dla warstw MgO/FeO/MgO w temperaturze pokojowej pozwoliła na wyodrębnienie dwóch niemagnetycznych składowych o charakterystycznych wartościach przesunięcia izomerycznego. Pierwsza składowa, o bimodalnym rozkładzie rozszczepienia kwadrupolowego opisuje oktaedrycznie skoordynowane jony  $\text{Fe}^{2+}$  oraz jony  $\text{Fe}^{2+}$  znajdujące się w pobliżu defektów. Druga składowa posiada przesunięcie izomeryczne charakterystyczne dla jonów  $\text{Fe}^{3+}$  a jej istnienie związane jest z obecnością wakancji  $\text{Fe}^{2+}$ , którym towarzyszą podstawienia jonami trójwartościowymi.<sup>31</sup> Widmo CEMS warstw FeO zmienia się gdy wustyt zostaje pokryty metaliczną warstwą  $^{56}\text{Fe}$ . Obok paramagnetycznych składowych charakterystycznych dla FeO w widmie zostały zidentyfikowane trzy magnetyczne składowe, których łączny udział wyniósł blisko 50%. Pokazano, że ich pochodzenie związane jest z bliskością metalicznej warstwy Fe na międzywierzchni Fe/FeO. W pracy badano również jak obecność warstwy FeO wpływa na magnetyczne właściwości Fe poprzez pomiar pętli histerezy magnetycznej. Pętle histerezy zostały zmierzone przy użyciu magnetometru SQUID w zakresie temperatur od 10K do 100K po schłodzeniu próbki w zewnętrznym polu magnetycznym. Potwierdzeniem istnienia jednozrotowej anizotropii wymiennej w warstwie Fe wskutek oddziaływania z AFM warstwą FeO była obserwacja pola przesunięcia pętli histerezy magnetycznej w niskich temperaturach. Badania nad układem Fe/FeO były kontynuowane w pracy **O5**, w której skupiono się na możliwościach modyfikacji chemicznych i magnetycznych właściwości międzywierzchni Fe/FeO poprzez naniesienie ultra-cienkiej warstwy MgO pomiędzy warstwy Fe i wustytu. W pracy przeprowadzono porównawczą analizę widm CEMS warstw FeO w układzie Fe/FeO, Fe/MgO(1Å)/FeO i Fe/MgO(2Å)/FeO. Podobnie jak w pracy O4, dla wustytu w kontakcie z metaliczną warstwą Fe zanotowano obecność magnetycznych składowych w widmie CEMS FeO, co potwierdziło chemiczne rozmycie międzywierzchni Fe/FeO. Co ciekawe, wraz ze wzrostem grubości MgO w układzie Fe/MgO/FeO zaobserwowano spadek udziału magnetycznych składowych w widmie CEMS któremu towarzyszył wzrost przyczynku składowej niemagnetycznej opisującej regularnie skoordynowane jony  $\text{Fe}^{2+}$ . Wynik ten pokazuje, że obecność sub-monowarstwy MgO w układzie

Fe/MgO/FeO wpływa na „wyostrzenie” międzywierzchni Fe/FeO oraz poprawę stechiometrii warstwy wustytu. Zmiany chemicznej struktury międzywierzchni wpływają na magnetyczne oddziaływanie wymiany pomiędzy warstwami FM i AFM. W pracy przedstawiono wyniki systematycznych pomiarów LMOKE wykonanych dla różnych grubości MgO w układzie Fe/MgO/FeO. Pokazano, że pole  $H_{EB}$ , zdefiniowane jako  $H_{EB}=(H_{C1}+H_{C2})/2$ , gdzie  $H_{C1}$  i  $H_{C2}$  to pola koercji gałęzi pętli histerezy magnetycznej zarejestrowanej przy rosnącym i malejącym polu magnetycznym, zmienia się niemonotonicznie wraz ze wzrostem grubości MgO. Dla warstw Fe/MgO/FeO o grubości MgO równej  $1.8\text{\AA}$  zanotowano trzykrotnie większą wartość pola  $H_{EB}$  niż w przypadku dwuwarstw Fe/FeO. Dalszy wzrost grubości MgO powodował spadek  $H_{EB}$ . Wzmocnienie oddziaływania pomiędzy FM i AFM zaobserwowane dla sub-monowarstwowych grubości MgO w układzie Fe/MgO/FeO wytłumaczono w oparciu o model zakładający zmianę frustracji magnetycznej wywołaną modyfikacją szorstkości na międzywierzchni Fe/FeO. Wyniki badań zaprezentowane w pracy O5 pokazują jak za pomocą inżynierii międzywierzchni precyzyjnie kontrolować stechiometrię AFM oraz jego oddziaływanie z sąsiadującą warstwą FM. Inną efektywną metodą modulacji właściwości magnetycznych AFM jest zmiana naprężeń w warstwie. Dystorsje sieci krystalicznej wywołane naprężeniami prowadzą do zmiany anizotropii magnetokrystalicznej warstwy AFM, czego konsekwencją może być zmiana uporządkowania magnetycznego antyferromagnetyka. W pracy O6 pokazano jak zmiana naprężeń wpływa na kierunek spinów cienkiej warstwy NiO. Tlenek niklu, podobnie do FeO krystalizuje w strukturze NaCl a jego temperatura Néela wynosi 523K. Ostatnie eksperymenty demonstrujące ultraszybkie procesy dynamiki magnetycznej<sup>32</sup> czy możliwość modulowania struktury spinowej za pomocą prądu elektrycznego<sup>33</sup> ukazują bardzo duży potencjał aplikacyjny warstw NiO. W pracy O6 dzięki zastosowaniu techniki XMLD zbadano zależność kierunku spinów NiO od grubości buforowej warstwy Cr w układzie Fe/NiO/Cr( $d_{Cr}$ )/MgO. Dla warstw NiO przygotowanych bez użycia bufora Cr pokazano, że kierunek spinów AFM jest niemalże prostopadły do powierzchni warstwy. Wraz ze wzrostem  $d_{Cr}$  zaobserwowano reorientację spinów (SRT) NiO do kierunku w płaszczyźnie warstwy. Systematyczne pomiary LEED wykonane dla różnych grubości warstw buforowych pozwoliły na wyznaczenie zależności stałej sieci Cr od jego grubości i pomogły wytłumaczyć pochodzenie zjawiska SRT w układzie. Dla  $d_{Cr} < 1.5\text{nm}$  zanotowano pseudomorficzny wzrost warstw Cr na MgO. Wraz ze zwiększaniem  $d_{Cr}$  zaobserwowano wzrost stałej sieci w płaszczyźnie warstwy aż do grubości równej  $3.5\text{nm}$ , dla której stała sieci była bliska wartości stałej sieci litego Cr. Analiza pomiarów LEED potwierdziła, że zjawisko SRT obserwowane dla warstw NiO jest konsekwencją zmiany naprężeń wywieranych przez warstwę buforową na AFM. Warstwy NiO osadzone na cienkim buforze Cr doświadczają naprężeń rozciągających, które faworyzują kierunek spinów prostopadły do powierzchni.<sup>34</sup> Z kolei zrelaksowane warstwy Cr wywierają naprężenia ściskające na warstwy AFM i wymuszają ułożenie spinów w płaszczyźnie warstwy.<sup>35</sup> Wyniki badań zaprezentowanych w pracy O6 pokazują że poprzez odpowiedni dobór grubości bufora można precyzyjnie kontrolować kierunkiem spinów w warstwie AFM. W artykule

analizowano również rozkład struktury spinowej NiO w płaszczyźnie warstwy. Dla warstw NiO o grubości 14Å osadzonych na buforowej warstwie Cr udowodniono że oddziaływanie z warstwą FM faworyzuje prostopadle ustawienie spinów NiO względem spinów warstwy Fe (tzw. spin-flop coupling). Zaobserwowano również, że jednoosiowa anizotropia wyindukowana poprzez oddziaływanie z FM słabnie wraz ze wzrostem grubości NiO.

## Podsumowanie:

Za najważniejsze osiągnięcia będące podstawą przedkładanego wniosku habilitacyjnego uznaję:

1. Demonstrację wzmocnienia prostopadłej anizotropii magnetycznej warstw Fe w układzie Fe/Cr/MgO poprzez zastosowanie buforowej warstwy MgO.
2. Ukazanie możliwości sterowania prostopadłą anizotropią magnetyczną oraz jej zależnością od pola elektrycznego w układzie Fe/Cr/MgO/Cr poprzez zastosowanie sub-monowarstwy Cr na międzywierzchni Fe/MgO .
3. Demonstrację wpływu strukturyzacji na oddziaływanie ferromagnetycznych warstw Fe w układzie Fe/MgO/Fe oraz pomiary magnetorezystancji układu Fe/MgO/Fe dla grubości warstw MgO poniżej 1nm.
4. Opracowanie preparatyki wytwarzania stabilnych ultra-cienkich warstw FeO na podłożach MgO(001).
5. Demonstrację wpływu bliskości warstwy FM na strukturę chemiczną i magnetyczną antyferromagnetyka w układzie Fe/FeO.
6. Zaprezentowanie możliwości zwiększenia oddziaływania FM/AFM poprzez zastosowanie przekładki MgO na międzywierzchni w układzie Fe/MgO/FeO.
7. Zaobserwowanie zjawiska reorientacji kierunku spinów indukowanego zmianą naprężeń w epitaksjalnej AFM warstwie NiO w układzie Fe/NiO/Cr( $d_{Cr}$ ).

<sup>1</sup> S. Singamaneni, V.N. Bliznyuk, C. Binek, and E.Y. Tsymbal, Journal of Materials Chemistry **21**, 16819 (2011).

<sup>2</sup> L. Piraux, Applied Sciences (Switzerland) **10**, 1832 (2020).

<sup>3</sup> A.P. Guimaraes, New York, Springer (2009).

<sup>4</sup> M.T. Johnson, P.J.H. Bloemen, F.J.A. den Broeder, and J.J. de Vries, Reports on Progress in Physics **59**, 1409 (1996).

<sup>5</sup> J.C. Slonczewski, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **159**, L1 (2004).

<sup>6</sup> C. Song, B. Cui, F. Li, X. Zhou, and F. Pan, Progress in Materials Science **87**, 33 (2017).

- <sup>7</sup> A.E. Berkowitz and K. Takano, **200**, 552 (1999).
- <sup>8</sup> C. Song, Y. You, X. Chen, X. Zhou, Y. Wang, and F. Pan, *Nanotechnology* **29**, 112001 (2018).
- <sup>9</sup> M.B. Jungfleisch, W. Zhang, and A. Hoffmann, *Physics Letters A* **382**, 865 (2018).
- <sup>10</sup> K. Lagarec and D.G. Rancourt, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **129**, 266 (1997).
- <sup>11</sup> <https://Math.Nist.Gov/Oommf/> (n.d.).
- <sup>12</sup> M. Zając, T. Giela, K. Freindl, K. Kollbek, J. Korecki, E. Madej, K. Pitala, A. Koziół-Rachwał, M. Sikora, N. Spiridis, J. Stępień, A. Szkudlarek, M. Ślęzak, T. Ślęzak, and D. Wilgocka-Ślęzak, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **492**, 43 (2021).
- <sup>13</sup> H.X. Yang, M. Chshiev, B. Dieny, J.H. Lee, A. Manchon, and K.H. Shin, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics* **84**, 054401 (2011).
- <sup>14</sup> K. Nakamura, T. Akiyama, T. Ito, M. Weinert, and A.J. Freeman, *Journal of Magnetism* **16**, 161 (2011).
- <sup>15</sup> C.G. Duan, J.P. Velez, R.F. Sabirianov, Z. Zhu, J. Chu, S.S. Jaswal, and E.Y. Tsymbal, *Physical Review Letters* **101**, 137201 (2008).
- <sup>16</sup> F. Ibrahim, H.X. Yang, A. Hallal, B. Dieny, and M. Chshiev, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics* **93**, 014429 (2016).
- <sup>17</sup> T. Maruyama, Y. Shiota, T. Nozaki, K. Ohta, N. Toda, M. Mizuguchi, A.A. Tulapurkar, T. Shinjo, M. Shiraishi, S. Mizukami, Y. Ando, and Y. Suzuki, *Nature Nanotechnology* **4**, 158 (2009).
- <sup>18</sup> A. Rajanikanth, T. Hauet, F. Montaigne, S. Mangin, and S. Andrieu, *Applied Physics Letters* **103**, 062402 (2013).
- <sup>19</sup> T. Nozaki, A. Koziół-Rachwał, W. Skowroński, V. Zayets, Y. Shiota, S. Tamaru, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, and Y. Suzuki, *Physical Review Applied* **5**, 044006 (2016).
- <sup>20</sup> J.W. Koo, S. Mitani, T.T. Sasaki, H. Sukegawa, Z.C. Wen, T. Ohkubo, T. Niizeki, K. Inomata, and K. Hono, *Applied Physics Letters* **103**, 192401 (2013).
- <sup>21</sup> C.H. Lambert, A. Rajanikanth, T. Hauet, S. Mangin, E.E. Fullerton, and S. Andrieu, *Applied Physics Letters* **102**, 122410 (2013).
- <sup>22</sup> M. Rickart, B.F.P. Roos, T. Mewes, J. Jorzick, S.O. Demokritov, and B. Hillebrands, *Surface Science* **495**, 68 (2001).
- <sup>23</sup> A. Hallal, B. Dieny, and M. Chshiev, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics* **90**, 064422 (2014).
- <sup>24</sup> P. V. Ong, N. Kioussis, D. Odkhuu, P. Khalili Amiri, K.L. Wang, and G.P. Carman, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics* **92**, 020407(R) (2015).
- <sup>25</sup> J. Zhang, P. V. Lukashev, S.S. Jaswal, and E.Y. Tsymbal, *Phys. Rev. B* **96**, 014435 (2017).

- <sup>26</sup> S. Yuasa and D.D. Djayaprawira, *Journal of Physics D: Applied Physics* **40**, R337 (2007).
- <sup>27</sup> W.H. Butler, X. Zhang, and T.C. Schulthess, *Phys. Rev. B* **63**, 054416 (2001).
- <sup>28</sup> A. Koziół-Rachwał, T. Ślęzak, M. Ślęzak, K. Matlak, E. Młyńczak, N. Spiridis, and J. Korecki, *Journal of Applied Physics* **115**, 104301 (2014).
- <sup>29</sup> R. Matsumoto, A. Fukushima, K. Yakushiji, S. Yakata, T. Nagahama, H. Kubota, T. Katayama, Y. Suzuki, K. Ando, S. Yuasa, B. Georges, V. Cros, J. Grollier, and A. Fert, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics* **80**, 174405 (2009).
- <sup>30</sup> D. Herranz, F. Bonell, A. Gomez-Ibarlucea, S. Andrieu, F. Montaigne, R. Villar, C. Tiusan, and F.G. Aliev, *Applied Physics Letters* **96**, (2010).
- <sup>31</sup> C. Wilkinson, A.K. Cheetham, G.J. Long, P.D. Battle, and D.A.O. Hope, *Inorganic Chemistry* **23**, 3136 (1984).
- <sup>32</sup> T. Kampfrath, A. Sell, G. Klatt, A. Pashkin, S. Mährlein, T. Dekorsy, M. Wolf, M. Fiebig, A. Leitenstorfer, and R. Huber, *Nature Photonics* **5**, 31 (2011).
- <sup>33</sup> L. Baldrati, O. Gomonay, A. Ross, M. Filianina, R. Lebrun, R. Ramos, C. Leveille, F. Fuhrmann, T.R. Forrest, F. MacCherozzi, S. Valencia, F. Kronast, E. Saitoh, J. Sinova, and M. Kläüi, *Physical Review Letters* **123**, 177201 (2019).
- <sup>34</sup> W. Kim, E. Jin, J. Wu, J. Park, E. Arenholz, A. Scholl, C. Hwang, and Z.Q. Qiu, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics* **81**, 174416 (2010).
- <sup>35</sup> S. Altieri, M. Finazzi, H.H. Hsieh, H.-J. Lin, C.T. Chen, T. Hibma, S. Valeri, and G.A. Sawatzky, *Physical Review Letters* **91**, 137201 (2003).

**5.** Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

W roku 2008 rozpoczęłam studia doktoranckie na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie w grupie Nanostruktur Powierzchniowych, kierowanej przez prof. dr hab. Józefa Koreckiego. W czasie studiów doktoranckich prowadziłam badania nad strukturą i właściwościami magnetycznymi układów złożonych z ultracienkich warstw Fe i MgO. Wynikiem przeprowadzonych przeze mnie badań są cztery wymienione poniżej publikacje naukowe.

- Magnetism of ultrathin Fe films in MgO/Fe/MgO in epitaxial structures probed by nuclear resonant scattering of synchrotron radiation, A. Koziół-Rachwał, T. Giel, B. Matlak, K. Matlak, M. Ślęzak, T. Ślęzak, M. Zajac, R. Rüffer, and J. Korecki, *Journal of Applied Physics* **113**, 214309 (2013).
- Room-temperature perpendicular magnetic anisotropy of MgO/Fe/MgO ultrathin films, A. Koziół-Rachwał, W. Skowroński, T. Ślęzak, D. Wilgocka-Ślęzak, J. Przewoźnik, T. Stobiecki, Q.H. Qin, S. Van

Dijken, and J. Korecki, *Journal of Applied Physics* 114, 224307 (2013).

- Antiferromagnetic interlayer exchange coupling in epitaxial Fe/MgO/Fe trilayers with MgO barriers as thin as single monolayers, A. Koziół-Rachwał, T. Ślęzak, M. Ślęzak, K. Matlak, E. Młyńczak, N. Spiridis, and J. Korecki, *Journal of Applied Physics* 115, 104301 (2014).
- Tunable magnetic properties of monoatomic metal-oxide Fe/MgO multilayers, A. Koziół-Rachwał, T. Ślęzak, K. Matlak, P. Kuświk, M. Urbaniak, F. Stobiecki, L.D. Yao, S. Van Dijken, and J. Korecki, *Physical Review B* 90, 045428 (2014).

Badania, które wykonywałam podczas doktoratu były realizowane w ramach dwóch projektów naukowych (**TEAM**, **MAESTRO**) a przedłożona przeze mnie rozprawa doktorska została wyróżniona I Nagrodą im. Janusza Groszkowskiego za najlepszą pracę doktorską z dziedziny próżni przyznawaną przez Polskie Towarzystwo Próżniowe. W trakcie studiów doktoranckich uczestniczyłam w wyjazdach do ośrodka synchrotronowego ESRF w Grenoble, gdzie na linii badawczej ID 18 brałam udział w eksperymentach z wykorzystaniem metody rezonansowego jądrowego elastycznego oraz nieelastycznego rozpraszania promieniowania synchrotronowego (Nuclear Resonant Scattering (NRS) oraz Nuclear Inelastic Scattering (NIS)). Metoda NRS została wykorzystana w pierwszej wymienionej powyżej pracy do analizy magnetycznych właściwości układu MgO/Fe/MgO. Ponadto pomiary NRS i NIS zostały wykorzystane w wymienionych poniżej pracach:

- Noncollinear Magnetization Structure at the Thickness-Driven Spin-Reorientation Transition in Epitaxial Fe Films on W(110), T. Ślęzak, M. Ślęzak, M. Zając, K. Freindl, A. Koziół-Rachwał, K. Matlak, N. Spiridis, D. Wilgocka-Ślęzak, E. Partyka-Jankowska, M. Rennhofer, A.I. Chumakov, S. Stankov, R. Ruffer, and J. Korecki, *Physical Review Letters* 105, 027206 (2010).
- Magnetism of ultra-thin iron films seen by the nuclear resonant scattering of synchrotron radiation, T. Ślęzak, K. Freindl, A. Koziół-Rachwał, K. Matlak, M. Rennhofer, R. Ruffer, B. Sepioł, N. Spiridis, S. Stankov, M. Ślęzak, D. Wilgocka-Ślęzak, M. Zając, and J. Korecki, *Journal of Physics: Conference Series* 217, 012090 (2010).
- Different scenarios for the in-plane spin reorientation transition in Fe(110) films on W(110), T. Ślęzak, M. Zając, M. Ślęzak, K. Matlak, A. Koziół-Rachwał, D. Wilgocka-Ślęzak, A. I. Chumakov, R. Ruffer, 2 and J. Korecki, *Physical Review B* 87, 094423 (2013).
- Phonons in Ultrathin Oxide Films: 2D to 3D Transition in FeO on Pt(111), N. Spiridis, M. Zając, P. Piekarczyk, A. I. Chumakov, K. Freindl, J. Goniakowski, A. Koziół-Rachwał, K. Parliński, M. Ślęzak, T. Ślęzak, U. D. Wdowik, D. Wilgocka-Ślęzak, and J. Korecki, *Physical Review Letters*, 115, 186102 (2015).

Równoległe z pracami związanymi bezpośrednio z tematyką pracy doktorskiej oraz pomiarami w synchrotronie ESRF w trakcie studiów doktoranckich uczestniczyłam w badaniach magnetycznych

właściwości innych cienkowarstwowych układów, między innymi Fe/Au(001) oraz Fe/CoO. Wyniki wspomnianych badań zostały opisane w następujących pracach, których jestem współautorem:

- Thickness-driven polar spin reorientation transition in ultrathin Fe/Au(001) films, D. Wilgocka-Ślęzak, K. Freindl, A. Kozioł, K. Matlak, M. Rams, N. Spiridis, M. Ślęzak, T. Ślęzak, M. Zajac, and J. Korecki, *Physical Review B* 81, 064421 (2010).
- Fe/CoO(001) and Fe/CoO(111) bilayers: Effect of crystal orientation on the exchange bias, E. Młynczak, B. Matlak, A. Kozioł-Rachwał, J. Gurgul, N. Spiridis, and J. Korecki, *Physical Review B* 88, 085442 (2013).
- Magnetic properties of the Fe-MgO interface studied by Mössbauer spectroscopy, J. Balogh, I. Dezsi, C. Fetzer, J. Korecki, A. Kozioł-Rachwał, E. Młynczak, and A. Nakanishi, *Physical Review B* 87, 174415 (2013).
- Exchange bias in epitaxial CoO/Fe bilayer grown on MgO(001), J. Gurgul, K. Freindl, A. Kozioł-Rachwał, K. Matlak, N. Spiridis, T. Ślęzak, D. Wilgocka-Ślęzak, and J. Korecki, *Surface and Interface Analysis* 42, 696 (2009).

W roku 2012 w trakcie miesięcznego pobytu w ośrodku synchrotronowym Swiss Light Source (SLS) w Szwajcarii brałam udział w eksperymentach z udziałem fotoemisyjnego mikroskopu elektronowego (Photoemission Electron Microscope, PEEM), który w 2017 roku został zainstalowany na pierwszej linii badawczej w Narodowym Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS w Krakowie. Testowe pomiary mikroskopu oraz wyniki obrazowania magnetycznej struktury domenowej warstw Fe w trakcie reorientacji spinowej w układzie Fe/W(110) przy użyciu mikroskopu PEEM zostały opisane w pracach:

- X-ray photoemission electron microscopy study of the in-plane spin reorientation transitions in epitaxial Fe films on W(110), M. Ślęzak, T. Giela, D. Wilgocka-Ślęzak, A. Kozioł-Rachwał, T. Ślęzak, R. Zdyb, N. Spiridis, C. Quitmann, J. Raabe, N. Pilet, and J. Korecki, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 348, 101 (2013).
- Prospects of X-ray photoemission electron microscopy at the first beamline of the Polish synchrotron facility “Solaris”, M. Ślęzak, T. Giela, D. Wilgocka-Ślęzak, N. Spiridis, T. Ślęzak, M. Zajac, A. Kozioł-Rachwał, R.P. Socha, M. Stankiewicz, P. Warnicke, N. Pilet, J. Raabe, C. Quitmann, J. Korecki, *X-Ray Spectrometry* 44, 317–322 (2015).

W kwietniu 2015 rozpoczęłam dwuletni staż podoktorski w Spintronics Research Center (Tsukuba, Japonia) kierowanym przez Dr. Shinji Yuasa, gdzie pracowałam w projekcie ImPACT (Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies) nad nowymi układami magnetycznymi w których anizotropia magnetyczna jest sterowana napięciem elektrycznym. Moim zadaniem w projekcie było wytwarzanie oraz optymalizacja właściwości magnetycznych warstw w celu uzyskania materiałów o jak największej prostopadłej anizotropii magnetycznej (PMA) oraz badanie efektu zmiany PMA poprzez przyłożenie pola elektrycznego. Oprócz prac O1 – O2 jestem współautorem trzech wymienionych poniżej prac podejmujących tematykę badania efektu

VCMA oraz wpływu obecności atomów metali ciężkich o dużym oddziaływaniu spin-orbita na anizotropię magnetyczną i efekt VCMA w układzie Fe/MgO. Wynikiem wspomnianych prac jest również cytowany poniżej patent, którego jestem współautorem.

- Large Voltage-Induced Changes in the Perpendicular Magnetic Anisotropy of an MgO-Based Tunnel Junction with an Ultrathin Fe Layer, T. Nozaki, A. Koziół-Rachwał, W. Skowroński, V. Zayets, Y. Shiota, S. Tamaru, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, and Y. Suzuki, *Physical Review Applied* 5, 044006 (2016).
- Magnetic properties of epitaxial CoO/Fe(001) bilayers: The onset of exchange bias as a function of sub-layer thickness and temperature, J. Gurgul, E. Młyńczak, A. Koziół-Rachwał, K. Matlak, K. Freindl, E. Madej, N. Spiridis, T. Ślęzak, J. Korecki, *Physical Review B* 96, 104421 (2017).
- Highly efficient voltage control of spin and enhanced interfacial perpendicular magnetic anisotropy in iridium-doped Fe/MgO magnetic tunnel junctions, T. Nozaki, A. Koziół-Rachwał, M. Tsujikawa, Y. Shiota, X.D. Xu, T. Ohkubo, T. Tsukahara, S. Miwa, M. Suzuki, S. Tamaru, H. Kubota, A. Fukushima, K. Hono, M. Shirai, Y. Suzuki, S. Yuasa, *NPG Asia Materials* 9, 451 (2017).
- Magnetic element, magnetic memory device and magnetic sensor, T. Nozaki, S. Yuasa, A. Koziół-Rachwał, M. Tsujikawa, M. Shirai, K. Hoho, T. Ohkubo, X. Xu, US Patent, publication number: 20210036217, publication date: February 4.02.2021.

Wyniki badań dotyczące prostopadłej anizotropii magnetycznej i możliwości jej kontrolowania poprzez pole elektryczne zostały zaprezentowane przeze mnie w formie referatów podczas międzynarodowych konferencji (załącznik: WykazOsiągnięćNaukowych\_AKoziolRachwal.pdf).

W trakcie pobytu na stażu podoktorskim kontynuowałam współpracę z grupą Nanostruktur Powierzchniowych. Owocem współpracy z grupą w latach 2015-2017 są publikacje:

- Giant in-plane magnetic anisotropy in epitaxial bcc Co/Fe(110) bilayers, M. Ślęzak, T. Ślęzak, K. Matlak, B. Matlak, P. Drózdź, T. Giela, D. Wilgocka-Ślęzak, N. Pilet, J. Raabe, A. Koziół-Rachwał, and J. Korecki, *Physical Review B* 94, 014402 (2016).
- Magnetic properties of epitaxial CoO/Fe(001) bilayers: The onset of exchange bias as a function of sub-layer thickness and temperature, J. Gurgul, E. Młyńczak, A. Koziół-Rachwał, K. Matlak, K. Freindl, E. Madej, N. Spiridis, T. Ślęzak, J. Korecki, *Physical Review B* 96, 104421 (2017).

W roku 2017 powróciłam do Krakowa aby kontynuować pracę w grupie Nanostruktur Powierzchniowych AGH. Od 2018 roku jestem kierownikiem projektu Homing finansowanego przez Fundację na Rzecz Nauki Polskiej (FNP). W ramach realizacji projektu „*Antiferromagnetic proximity effect and development of epitaxial bimetallic antiferromagnets – two routes towards next-generation spintronics*” zajmuje się badaniem możliwości sterowania właściwościami magnetycznymi antyferromagnetyka poprzez



oddziaływanie z innym AFM o wyższej temperaturze uporządkowania oraz badam możliwość przełączenia uporządkowania magnetycznego cienkich warstw AFM za pomocą prądu. Oprócz prac O5 i O6 wynikiem realizacji projektu Homing są niżej wymienione prace.

- How a ferromagnet drives an antiferromagnet in exchange biased CoO/Fe(110) bilayers, M. Ślęzak, T. Ślęzak, P. Drózdź, B. Matlak, K. Matlak, A. Koziół-Rachwał, M. Zając, J. Korecki, *Scientific Reports* 9, 889 (2019).
- Fine tuning of ferromagnet/antiferromagnet interface magnetic anisotropy for field-free switching of antiferromagnetic spins, M. Ślęzak, P. Drózdź, W. Janus, H. Nayyef, A. Koziół-Rachwał, M. Szpytma, M. Zając, T. O. Menteş, F. Genuzio, A. Locatelli and T. Ślęzak, *Nanoscale* 12, 18091 (2020).
- Magnetic Anisotropy and Temperature Dependence of Exchange Bias in Epitaxial CoO(111)/Fe(110) Bilayers M. Ślęzak, Drózdź, A. Koziół-Rachwał, K. Matlak, J. Korecki, M. Zając and T. Ślęzak, *Acta Physica Polonica A* 137, 44 (2020).

Wyniki badań realizowanych w ramach projektu Homing są przeze mnie systematycznie prezentowane podczas referatów na międzynarodowych konferencjach (załącznik: WykazOsiągnięćNaukowych\_AKoziołRachwał.pdf).

Równolegle z realizacją projektu Homing od 2018 roku jestem zaangażowana w badania magnetycznego przejścia antyferromagnetyk ↔ ferromagnetyk w warstwach FeRh oraz magnetycznej anizotropii układu Au/Co/Fe(110). Najistotniejsze wyniki wspomnianych badań zostały opisane w pracach:

- Multiple spin reorientation transitions and large in plane magnetic anisotropy in epitaxial Au/Co/Fe(110) films, M. Ślęzak, P. Drózdź, K. Matlak, A. Koziół-Rachwał, J. Korecki, T. Ślęzak, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 475, 195-200 (2019).
- Perpendicular magnetic anisotropy and residual magnetic phases in gold-capped FeRh film on MgO(001), P. Drózdź, M. Ślęzak, K. Matlak, K. Freindl, N. Spiridis, D. Wilgocka-Ślęzak, A. Koziół-Rachwał, J. Korecki, T. Ślęzak, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 495, 165804 (2020).
- Spin-flop coupling induced large coercivity enhancement in Fe/FeRh/W(110) bilayers across ferromagnetic–antiferromagnetic phase transition of FeRh alloy, P. Drózdź, M. Ślęzak, K. Matlak, A. Koziół-Rachwał, J. Korecki, Ślęzak, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 498, 166258 (2020).
- Driving the polar spin reorientation transition of ultrathin ferromagnets with antiferromagnetic–ferromagnetic phase transition of nearby FeRh alloy film, P. Drózdź, M. Ślęzak, W. Janus, M. Szpytma, H. Nayyef, A. Koziół-Rachwał, K. Freindl, D. Wilgocka-Ślęzak, J. Korecki, T. Ślęzak, *Scientific Reports* 10, 14901 (2020).

W lutym 2021 zostałam beneficjentką programu SONATA BIS. W ramach realizacji projektu “Piezospintronics and voltage control of magnetic anisotropy – novel approaches to control magnetic state of antiferromagnets” wraz z zespołem będę zajmowała się badaniem możliwości sterowania uporządkowaniem magnetycznym warstw AFM za pomocą pola elektrycznego.

## 6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

### **Prowadzenie zajęć dydaktycznych**

Od pierwszego roku studiów doktoranckich byłam zaangażowana w prowadzenie zajęć dydaktycznych w wymiarze 90 godzin lekcyjnych rocznie. W trakcie studiów doktoranckich prowadziłam ćwiczenia rachunkowe z fizyki ogólnej dla studentów pierwszego roku na wydziałach: Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Wiertnictwa, Nafty I Gazu, Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH. W roku 2012 prowadziłam również ćwiczenia z fizyki w języku angielskim na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. Od czasu objęcia stanowiska adiunkta w 2017 roku prowadziłam zajęcia laboratoryjne z fizyki ogólnej na wydziałach: Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Górnictwa i Geoinżynierii oraz Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. W semestrze zimowym 2020/2021 prowadziłam również ćwiczenia rachunkowe z fizyki na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska.

### **Opieka naukowa nad studentami**

W roku 2019 byłam promotorem dwóch niżej wymienionych prac magisterskich.

- „Anizotropia magnetyczna warstw FeRh kontrolowana przejściem fazowym antyferromagnetyk – ferromagnetyk”, Weronika Janus, AGH 2019
- „Badanie właściwości magnetycznych epitaksjalnych warstw Fe/FeO”, Marcin Szpytma, AGH, 2019

### **Współpromotorstwo doktorantów**

Od 2019 roku pełnię rolę opiekuna naukowego w charakterze promotora pomocniczego dwojga doktorantów realizujących wymienione poniżej tematy prac doktorskich.

- “Modulacja właściwości magnetycznych nanostruktur antyferromagnetycznych sterowana zmianą naprężeń,” doktorantka mgr inż. Weronika Janus
  - “Badanie efektu bliskości antyferromagnetyka (AFM) w układach ferromagnetyk (FM)/AFM oraz AFM/AFM,” doktorant mgr inż. Marcin Szpytma
- Planowany termin obrony wyżej wymienionych prac to październik 2023.

## 7. Inne informacje dotyczące kariery zawodowej

Nagrody i wyróżnienia

- 2015 – I Nagroda im. Groszkowskiego za najlepszą pracę doktorską w dziedzinie próżni
- 2017 – stypendium Ministra dla Wybitnych Młodych Naukowców
- 2018, 2019, 2020 – zespołowa Nagroda Rektora

*Weronika Janus*