INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Dr hab. inż. Magdalena Parlińska-Wojtan
Zakład Materiałów Funkcjonalnych
Instytut Fizyki Jądrowej PAN
Ul. Radzikowskiego 152
30-342 Kraków

Recenzja rozprawy habilitacyjnej dr Macieja Czapkiewicza

„Model dyspersji barier energetycznych aktywowanego termicznie procesu przełączania magnetyzacji w układach cienkich warstw z anizotropią prostopadłą"

Przedstawiona do recenzji rozprawa habilitacyjna dr Macieja Czapkiewicza pt. „Model dyspersji barier energetycznych aktywowanego termicznie procesu przełączania magnetyzacji w układach cienkich warstw z anizotropią prostopadłą", została przygotowana na Wydziale Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji AGH w Krakowie. Rozprawę stanowi cykl 12 prac opublikowanych w recenzowanych czasopismach takich jak Physica Status Solidi, Journal of Applied Physics, Applied Physics Letters, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Materials Science-Poland, Physical Review B czy Scientific Reports, streszczonych w autoreferacie wraz z krótkim wstępem. Publikacje bardzo dobrze komponują się w cykl, co świadczy o dobrze zaplanowanym prowadzeniu badań i szukaniu odpowiedzi na pojawiające się nowe zjawiska i czasami niewytłumaczalne wyniki.

Głównym celem naukowym, który Habilitant sobie wyznaczył, było wyjaśnienie zjawisk towarzyszących przełączaniu magnetyzacji w cienkowarstwowych układach z anizotropią prostopadłą. Ponadto, Kandydat chciał zoptymalizować efekt podmagnesowania warstwy ferromagnetyka przez antyferromagnetyk w wyżej wymienionych układach. Dr Czapkiewicz stworzył też model wyjaśniający przebieg procesu aktywowanej termicznie relaksacji namagnesowania oraz narzędzia przydatne do charakteryzacji własności fizycznych i jakości aplikacyjnej cienkich warstw ferromagnetycznych stosowanych w elementach elektroniki spinowej. Właśnie ta aplikacyjność otrzymanych wyników, będąca efektem współpracy z niemiecką firmą Singulus Technologies AG i wspólna publikacja w najwyżej punktowanym w dorobku Habilitanta czasopiśmie (H12), zasługuje na uznanie.

Otrzymane przez doktora Czapkiewicza wyniki są ciekawe, a omawiane zjawiska mogą znaleźć zastosowanie przy projektowaniu czujników pola magnetycznego, w szczególności do projektowania głowic do odczytu gęsto upakowanej informacji na dyskach twardych), komórek pamięci nieulotnych typu Magnetic Random Access Memory (M-RAM) przełączane spinowo spolaryzowanym prądem, dodatkowo z możliwością wspomagania przełączania napięciem poprzez jego wpływ na anizotropię, rejestry przesuwne, układy logiczne, a także układy nanooscylatorów, wykorzystujące dodatnie sprzężenie precesji namagnesowania i płynącego prądu spinowego.

Autor zaczął od badań struktury domenowej warstwy ferromagnetycznej, w celu lepszego zrozumienia mechanizmu tworzenia się efektu exchange bias (EB) w strukturach

zaworów spinowych (spin valves – SV) po naniesieniu oraz po obróbce termicznej (wygrzewaniu i schładzaniu w polu magnetycznym). Wyniki opublikował w pracy H01 (Phys. Stat. Sol. 2004) wraz z zaproponowanym rozszerzeniem modelu Stonera-Wohlfartha.

Kolejnym zagadnieniem związanym z zaworami spinowymi SV z anizotropią prostopadłą, którym Habilitant zajął się w swojej pracy badawczej, jest specyfika sprzężenia z antyferromagnetykiem (efekt EB) w przypadku orientacji namagnesowania spinów prostopadłej do międzywierzchni ferromagnetyk antyferromagnetyk. Następne prace zostały podporządkowane problematyce anizotropii prostopadłej w supersieciach Co/Pt z antyferromagnetykiem IrMn. W ramach współpracy z SFI Trinity Nanoscience Laboratory w Dublinie, naniesiono układy wielowarstwowe [Pt/Co]x3/IrMn i zmierzono pętle histerezy anomalnego efektu Halla i zauważono, że struktura zaworu spinowego SV typu antyferromagnetyk/ferromagnetyk użyta dla układów z anizotropią prostopadłą dawała zazwyczaj niewielki efekt EB (zależny od grubości warstw kobaltowych). Ponadto obserwowane były anomalie pętli histerezy w postaci dodatkowych pól przełączania, które powstawały tylko w jednym kierunku przemagnesowywania. W celu wyjaśnienia zauważonych anomalii Autor przeprowadził obserwacje struktury domenowej przy użyciu mikroskopu efektu Kerra. Okazało się, że obraz struktury domenowej podczas procesu przemagnesowania jest zależny od kształtu gałęzi pętli histerezy magnetycznej, a złamanie symetrii pętli jest ściśle skorelowane z różnicami w ewolucji domen ferromagnetycznych podczas wzrostu lub malenia pola magnetycznego. Zjawiska te opisano w pracy H02 (phys. Stat. Sol. 2006).

W celu ilościowej charakteryzacji asymetrii procesu przełączania magnetyzacji w układach z warstwą antyferromagnetyka, Autor wykonał pomiary relaksacji znormalizowanej magnetyzacji m, mierząc ją w funkcji czasu, przy stałym polu magnetycznym o wartości bliskiej polu przełączania. Krzywe relaksacji opisane zostały za pomocą modelu Fatuzzo-Labrune, co pozwoliło na dopasowanie parametrów tego modelu: prawdopodobieństwa nukleacji małych domen (parametr R) i prędkości rozrostu istniejących domen (parametr k). W przypadku asymetrycznej pętli przemagnesowania stwierdzono dominację parametru R w jednym kierunku zmian pola, oraz parametru k w drugim kierunku, co było potwierdzone przez Habilitanta obserwacją struktury domenowej przy użyciu mikroskopu Kerra. Ponadto Autor usystematyzował pomiary zależności pola koercji, efektu EB oraz magnetorezystacji w zależności od grubości warstw Co w supersieci Co/Pt. Wyniki zostały opublikowane w pracy H03 (J.Appl.Phys. 2006).

Główne osiągnięcie habilitacyjne doktora Czapkiewicza, polegało na zbadaniu magnetooptycznym termicznie aktywowanego procesu przemagnesowania układów wielowarstwowych Co/Pt/IrMn i zostało opisane w pracach H04, H05 oraz H06. Bardzo ciekawą koncepcją jest wykonanie w systemie $[Co/Pt]_{x3}/Pt_t/IrMn$, warstwy Pt_t w formie klina o zmiennej grubości od 0 do1.2 nm (H04). W tych próbkach, zjawisko EB nie malało monotonicznie wraz ze wzrostem grubości przekładki Pt_t oddzielającej supersieć Pt/Co od antyferromagnetyka IrMn. Największe pole podmagnesowania (H_{ex}) występowało dla warstwy Pt_t o nominalnej grubości w przedziale około 0.1 do 0.2 nm, jednakże w przypadku warstwy Pt_t o grubości 0.1 nm obserwowane były bardzo drobne domeny magnetyczne, co można tłumaczyć dużą niejednorodnością tak cienkiej warstwy. Bardzo ciekawym wynikiem jest fakt, że dla większych grubości przekładki Pt widać było wyraźnie, że im mniejszy efekt EB, tym mniejsza różnica w zależnym od kierunku zmiany pola sposobie przełączania magnetyzacji. Obydwa efekty słabły ze wzrostem grubości przekładki, i dla grubości ponad 1 nm były praktycznie nieobserwowalne (brak mierzalnego pola Hex) a obrazy domenowe były podobne do próbki referencyjnej bez warstwy IrMn. Jednak efekt EB oraz asymetria przełączania były

słabsze także w przypadku bezpośredniego kontaktu supersieci Pt/Co z warstwą antyferromagnetyczną IrMn. Fakt mocniejszego efektu EB w przypadku bardzo cienkiej warstwy separującej, tłumaczyć można lepszym skompensowaniem podsieci antyferromagnetyka, które łatwiej mogą się dopasować w przypadku niejednorodności.

Habilitant wciąż jednak poszukiwał przyczyny asymetrii procesu przemagnesowania w zależności od kierunku zmian pola magnetycznego. Autor postawił wstępną hipotezę, iż przyczyną tych różnic są inne wartości energii aktywacji procesu nukleacji domen bądź propagacji ściany domenowej. W celu weryfikacji tej hipotezy, używając modelu Fatuzzo, autor obliczył parametr prawdopodobieństwa nukleacji domeny R dla różnych wartości pól magnetycznych H, a stąd energię aktywacji procesu nukleacji WN oraz objętość Barkhausena procesu nukleacji V_{BN}. Ponadto w pracy H04 pokazano na wykresie wartości energii aktywacji w funkcji grubości przekładki Pt_t, że wartości tych energii zależą od kierunku zmian pola. Otrzymane z powyższego modelu wyniki objętości V_B potwierdziły wcześniejsze ustalenia i zostały opublikowane w pracy H05 (Applied Physics Letters 2007).

W badaniach procesu przemagnesowania układów wielowarstwowych Co/Pt/IrMn porównano zależność efektu EB od grubości przekładki Pt_t z analogicznym efektem występującym w pojedynczej warstwie Co o grubości 5 nm. Pojedyncza warstwa kobaltu o grubości 5 nm wykazuje anizotropię w płaszczyźnie i jak się można było spodziewać, badania wykazały, iż efekt EB maleje w takim przypadku monotonicznie wraz ze wzrostem grubości przekładki separującej warstwę ferromagnetyczną i antyferromagnetyk IrMn. Autor pokazał, że zależność pola H_{EB} od grubości przekładki była w tym przypadku dobrze opisana przez zależność wykładniczą, zjawisko asymetrii procesu przemagnesowania oraz niemonotoniczność zjawiska EB od grubości Pt mają ścisły związek z anizotropią prostopadłą. Wyniki zostały opublikowane w pracy H06 (JMMM 2007).

W dalszych badaniach dr Czapkiewicz postanowił skorelować model dyspersji energii anizotropii z własnościami strukturalnymi układu wielowarstwowego, a wyniki opublikował w kolejnych dwóch pracach H07, H08. Jako ulepszenie modelu energii aktywacji, Autor zaproponował i uzasadnił wykorzystanie modelu Bruno, który pozwala na opisanie krzywej relaksacji magnetycznej za pomocą tylko jednego parametru, σW - przestrzennej dyspersji barier energetycznych aktywowanego termicznie procesu przełączania magnetyzacji.

Habilitant zaobserwował mikroskopią MFM ewolucję struktury domen magnetycznych w dużej rozdzielczości, co pozwoliło mu na bezpośrednią obserwację objętości Barkhausena V_B. Oszacowana na podstawie obrazów MFM wartość tej objętości okazała się zgodna z parametrami V_{BP}, V_{BN} i V_B, które autor otrzymał w wyniku dopasowania modeli Fatuzzo-Labrune i Raqueta do danych opisujących dynamikę przemagnesowania. Wyniki i powyższe wnioski przedstawiono w pracach H07 (Phys. Stat. Sol. 2007) oraz H08 (Mat. Sc. Pol. 2008).

W pracach H07 i H08, Autor stara się odpowiedzieć na pytanie, dlaczego w przypadku układów ferromagnetyk/antyferromagnetyk dyspersja barier energetycznych aktywowanego termicznie procesu przełączania magnetyzacji zależy od kierunku przemiatania polem magnetycznym? Badania wykazały, że jedynie lokalne zaburzenia kąta osi anizotropii magnetycznej (rzędu kilku stopni względem kierunku normalnego do warstwy), przy jednoczesnym istnieniu sprzężenia EB są przyczyną braku symetrii procesu przemagnesowania. Wniosek ten wynika z faktu, że w jednym kierunku przemiatania pola występują duże różnice energii aktywacji, podczas gdy w przeciwnym kierunku różnice te są niewielkie, przy tym samym rozporządkowaniu kierunków anizotropii sformułowanie modelu przestrzennej dyspersji energii aktywacji generowanej przez lokalne zaburzenia kąta osi

anizotropii (model PDE). Zaproponowany przez Autora model tłumaczy nie tylko różnice gęstości nukleacji domen w zależności od kierunku przełączania pola w przypadku układów ferromagnetyk/antyferromagnetyk, ale również opisywaną poprzednio bardzo dużą korelację dyspersji energii aktywacji supersieci ferromagnetycznej z teksturą próbki. Lokalne zaburzenia kąta osi anizotropii mogą wynikać z faktu, iż układ wielowarstwowy naniesiony metodą rozpylania katodowego jest polikrystaliczny, gdzie wielkość krystalitów jest rzędu 50 nm, a różnice ich wysokości rzędu 1 nm. Ponieważ magnetyczna anizotropia jest lokalnie prostopadła do międzywierzchni w danym miejscu, podczas gdy pole magnetyczne jest prostopadłe do uśrednionej powierzchni całej warstwy, powstaje niewielki kąt między lokalnym kierunkiem anizotropii a kierunkiem pola zależny od kształtu krystalitu.

Praca H09] (Phys. Rev. B 2008) została poświęcona wyznaczeniu objętości Barkhausena oraz energii aktywacji procesu przemagnesowania, dla układów wielowarstwowych $[Pt/Co]_{x3}$/IrMn. Natomiast w pracach H10, H11, H12 Habilitant opisuje wykorzystanie swojego modelu przestrzennej dyspersji energii anizotropii (PDE) do analizy jakości i jednorodności cienkich warstw magnetycznych. Zaproponowany model PDE pozwala nie tylko na jakościową ocenę, ale też na ilościową charakteryzację parametrów takich jak tekstura krystalitów lub gładkość międzywierzchni, za pośrednictwem łatwych do przeprowadzenia pomiarów magnetooptycznych, z których uzyskać można parametr lokalnej dyspersji barier energetycznych σ_W. Wpływ składu układu wielowarstwowego Pt/Co/Pt oraz $Pt/Co_xB_{1-x}/Pt$ oraz grubości warstwy ferromagnetycznej na anizotropię prostopadłą, objętość Barkhausena oraz na sposób relaksacji, który świadczy o jakości warstwy ferromagnetycznej. Wyniki zostały zebrane w pracy H10 (Applied Physics Letters 2010). Innym przykładem zastosowania przez autora metody oceny jakości warstwy ferromagnetycznej za pośrednictwem obserwacji jej struktury domenowej była optymalizacja grubości bufora pod względem krytycznego prądu przełączania magnetyzacji pokazana w pracy H11 (J. Appl. Phys. 2015).

Kontynuacja badań nad układami wielowarstwowymi z anizotropią prostopadłą, prowadzona przy współpracy z firmą Singulus Technologies AG, pozwoliła na stworzenie zoptymalizowanych struktur, które po nanostrukturyzacja działały jako w pełni funkcjonalne elementy spintroniczne – nanooscylator lub komórka pamięci M-RAM. Przykładem komórki M-RAM są elementy o rozmiarach rzędu 100 nm, złożone z warstw $[Co_{0.5}/Pt_{0.2}]$ Å~ 6/$Co_{0.6}/Ru_{0.8}/Co_{0.6}/[Pt_{0.2}/Co_{0.5}]$ Å~ 3/$W_{0.25}/CoFeB_{1.0}/MgO_{0.8}/CoFeB\ t_{FL}/W_{0.2}/CoFeB_{0.5}$ (grubości w nm, dla uproszczenia pominięto warstwy buforowe,ochronne i elektrodowe). W strukturze powyższych warstw można zauważyć badane wcześniej układy supersieci Co/Pt, przedzielone przekładką rutenu - stanowiące razem sztuczny antyferromagnetyk - a także cienką warstwę wolframu między sztucznym antyferromagnetykiem a zamocowaną warstwą referencyjną CoFeB. Zaproponowany przez autora model aktywowanego termicznie przełączania został dopasowany do wyników diagramu fazowego stabilności termicznej takiego układu, co przedstawiono w pracy [H12] (Sci. Rep. 2017).

Podsumowując, w cyklu publikacji pod wspólnym tytułem „Model dyspersji barier energetycznych aktywowanego termicznie procesu przełączania magnetyzacji w układach cienkich warstw z magnetyczną anizotropią prostopadłą" Autor:

• stworzył narzędzia i metodologię badania termicznie aktywowanych procesów przełączania magnetyzacji w cienkowarstwowych układach z anizotropią prostopadłą;

• wykonał badania efektu „Exchange Bias" w układach z antyferromagnetykiem IrMn i supersiecią Pt/Co wykazującą anizotropię prostopadłą, które dowiodły anomalii pętli histerezy

w takich układach, w postaci różnic gęstości nukleacji domen zależnych od kierunku przełączania magnetyzacji;

• odkrył istotną korelację dyspersji energii termicznej aktywacji przełączania namagnesowania supersieci ferromagnetycznej z teksturą polikryształów i szorstkością warstwy ferromagnetyka;

• stworzył model przestrzennej dyspersji barier energetycznych PDE, który z powodzeniem objaśnia zarówno anomalie pętli histerezy w układach ferromagnetyk/antyferromagnetyk jak również bardzo dużą korelację dyspersji energii aktywacji z własnościami strukturalnymi warstwy ferromagnetyka z anizotropią prostopadłą;

• wdrożył model PDE do oceny jakości warstw ferromagnetycznych z anizotropią prostopadłą, co pozwoliło na optymalizację struktur wielowarstwowych służących do budowy elementów spintronicznych, takich jak złącza MTJ.

Ogólnie dorobek Kandydata oceniam jako wystarczający (42 publikacje i 2 rozdziały w książce), ale nie wybitny, jak na wiek Kandydata. Bardzo szkoda, że Kandydat swoje prace wchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego opublikował w czasopismach o tak niskim IF ($0.9 < IF < 2.1$), tym bardziej, że osiągnięte wyniki są z dziedziny magnetyzmu i spintroniki, które są bardzo aktualnymi dziedzinami nauki i istnieje wiele czasopism, tj. Materials Research Letters (IF = 7,44), Advanced Functional Materials (IF = 15,621), Journal of Physical Chemistry C (IF = 4,309), Journal of the Mechanics and Physics of Solid (IF = 4,087), czy nawet Nanoscale (IF=6,970), w których badania można było opisać. Dzięki temu wyniki osiągnięte przez Kandydata znalazły by większe uznanie międzynarodowe, a On sam mógłby liczyć na znacznie większą ilość cytowań. Wysiłek wkładany w napisanie manuskryptu i opublikowanie go w czasopiśmie o IF = 1 jest identyczny z wysiłkiem włożonym w napisanie manuskryptu i opublikowanie go w czasopiśmie o IF = 6 czy nawet 8. Tylko prace publikowane ze współautorami zagranicznymi są publikowane w nieco lepszych czasopismach (IF do 4.1). Poza tym w żadnej z pozostałych publikacji wymienionych w p. A1 i A2 wykazu opublikowanych prac naukowych Kandydat nie jest pierwszym autorem.

Również udziały procentowe Kandydata w publikacjach wchodzących w skład osiągnięcia habilitacyjnego są dosyć zaskakujące, np. w publikacji H1 autorstwa 10 osób, dr Czapkiewicz ma 70% udziału. Oznacza to, że pozostałe 30% należy rozdzielić na 9 osób. Będąc sprawiedliwym, każdy ze współautorów otrzyma 5%. Nie odpowiada to nawet czasowi poświęconemu na przeczytanie i korektę chociażby językową manuskryptu, o merytorycznej już nie wspomnę. Niestety, takich oświadczeń i wysokoprocentowych udziałów Kandydata we współtworzeniu publikacji jest sporo. Publikacja H3 – Kandydat 50% na trzecim miejscu – pozostała czwórka współautorów – każdy po ok 10 – 15%, łącznie z pierwszym autorem? H4 – Kandydat jako pierwszy autor ma 75%, pozostałych 5 w sumie 25% czyli każdy po 5 %. Kierując się tymi zasadami prof. Van Dijken w publikacji H3 powinien mieć 75% udziału, co w sumie z dr Czapkiewiczem dawałoby już 125%, nie wspominając o udziale pozostałych współautorów.... Wydaje mi się, że wkład Habilitanta w poszczególnych pracach jest wystarczająco widoczny, więc przypisywanie sobie tak wysokiego udziału procentowego jest zupełnie niepotrzebne.

Dr Czapkiewicz brał udział w 10 grantach (7 krajowych i 3 międzynarodowych w ramach współprac), jako wykonawca, w tym w 2 jako główny wykonawca i był również opiekunem diamentowego grantu. Habilitant jest też laureatem 9 nagród Rektora AGH (2

indywidualnych i 7 zespołowych), jedna z jego prac została wyróżniona Outstanding Paper Award na 7-mej międzynarodowej konferencji MIXDES w Gdyni w 2000 roku. Ponadto, również w 2000 roku, otrzymał Nagrodę im. Janusza Groszkowskiego za rozprawę doktorską. Kandydat brał aktywny udział w 12 konferencjach krajowych i międzynarodowych, wygłosił 7 referatów w ośrodkach krajowych i zagranicznych. Jest doświadczonym wykładowcą, prowadził wiele różnych zajęć laboratoryjnych z fizyki, również w języku angielskim. Opracował ponadto program i materiały dydaktyczne do 3 ćwiczeń laboratoryjnych oraz jest współautorem skryptu uczelnianego. Brał aktywny udział w Małopolskiej Nocy Naukowców oraz w Festiwalu Nauki i Sztuki w Krakowie. Habilitant był promotorem 6 prac inżynierskich i 3 prac magisterskich. Godnym pochwały jest fakt, że rezultaty prac dyplomowych zostały wykorzystane praktycznie w Laboratorium Elektroniki Spinowej Katedry Elektroniki AGH. Ponadto, w latach 2011-2015, habilitant był opiekunem i promotorem pomocniczym pracy Doktorskiej.
Na doświadczenie międzynarodowe habilitanta składa się kilka krótkich (do 2 tygodni) pobytów zagranicznych.

Pomimo uwag krytycznych, dotyczących głównie publikacji w niskopunktowanych czasopismach, uważam, że zarówno recenzowana rozprawa habilitacyjna Pana dr Macieja Czapkiewicza pt. „Model dyspersji barier energetycznych aktywowanego termicznie procesu przełączania magnetyzacji w układach cienkich warstw z anizotropią prostopadłą" jak i dorobek i parametry (indeks Hirsha = 10 i cytowania = 309) Pana doktora spełniają, zgodnie z "Ustawą o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki", z dnia 14 marca 2003 roku wraz ze zmianami z dnia 18 marca 2011 roku, w części dotyczącej stopnia doktora habilitowanego, warunki stawiane rozprawom habilitacyjnym i po spełnieniu innych warunków formalnych wnoszę o nadanie dr Maciejowi Czapkiewiczowi tytułu doktora habilitowanego.

ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków
www.ifj.edu.pl
centrala: +48 12 662 8000
61/04
dyrektor: +48 12 662 8200
e-mail: dyrektor@ifj.edu.pl
fax: +48 12 662 8458
NIP: PL 6750000444
REGON: 000326983
RIN: RIN-III-