

Warszawa, 09 lipca 2023 r.

Prof. dr hab. Maciej Sawicki
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Al. Lotników 32/46
02-668 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Krzysztofa Grochota:
“Spinowa magnetorezystancja i spinowy efekt Halla w cienkowarstwowych
układach hybrydowych: metal ciężki, ferromagnetyk, antyferromagnetyk”,
wykonanej pod kierunkiem
prof. dr. hab. Tomasza Stobieckiego i prof. dr. hab. Nika Spirids
w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.**

Rozprawa doktorska pana mgra Krzysztofa Grochota jest pracą doświadczalną, poświęconą badaniom struktur cienkowarstwowych o strukturze przekładkowej, w skład których wchodzi metale ferromagnetyczne, tzw. metale ciężkie i materiały o właściwościach antyferromagnetycznych. W ogólnym zarysie badania te prowadzone były pod kątem określonych rozważań materiałowych mogących znaleźć swoje zastosowania w nowej dziedzinie, w tzw. spintronice. Rozprawa została przygotowana w języku angielskim, liczy 147 stron numerowanych, z których ostatnie 13 zawiera obszerną, bo liczącą 173 pozycje Bibliografię, oraz 12 stron wstępnych. Strony te zawierają między innymi streszczenia rozprawy po polsku i angielsku, listę publikacji Autora, listę użytych skrótów oraz spis treści rozprawy. Część opisowa rozprawy składa się z 5-ciu rozdziałów, z których pierwszy jest wstępem, a ostatni podsumowaniem. Trzy środkowe rozdziały zawierają w kolejności odpowiednio: (Rozdział 2) Podstawy teoretyczne, (Rozdział 3) Opis metod doświadczalnych, oraz (Rozdział 4) Wyniki i dyskusję. Praca ma formę „hybrydową”, tj. w najważniejszym rozdziale 4-tym wszyte zostało 5 publikacji z dorobku Autora rozprawy (jedna się jeszcze nie ukazała, załączona została jej wersja znajdująca się w depozytorium arXiv). Każda z nich została poprzedzona wstępem przybliżającym dane zagadnienie rozprawy, które jest przedstawione w tej konkretnej publikacji.

Rozprawa doktorska mgra Grochota opisuje bogaty i różnorodny materiał doświadczalny, w tym wiele w pełni oryginalnych wyników. Doktorant zajmował się klasą materiałów spintronicznych, których sama funkcjonalność, jak i jej efekty, prowadzą, w końcowym efekcie, do zmian oporu elektrycznego. Stąd tytułowe pojęcia rozprawy: spinowa magnetorezystancja i spinowy efekt Halla. Tematyka tych badań jest bardzo ciekawa i wpisuje się w bardzo ważny nurt badań nad doбором najefektywniejszych kombinacji materiałowych w celu zmaksymalizowania efektywności tytułowych efektów. Prace takie, oprócz ich wagi

ogólnopoznawczej mają na celu opracowanie i wdrożenie rozwiązań charakteryzujących się większą efektywnością niż współczesne rozwiązania oparte na elektronice półprzewodnikowej i to często o rzędy wielkości. Doprowadzić to ma do znacznych oszczędności, głównie energii, a co za tym idzie do ograniczenia śladu termicznego generowanego przez naszą cywilizację, zapewniając jednocześnie stały wzrost efektywności magazynowania i przetwarzania informacji.

Funkcjonalność badanych w rozprawie struktur pochodziła z zawartych w nich metali ciężkich, charakteryzujących się silnym sprzężeniem spinowo-orbitalnym: platyny i wolframu. Są one źródłem stosunkowo silnych prądów spinowych mogących przełączać namagnesowanie sąsiadujących z nimi warstw ferromagnetycznych. Wykorzystując dodatkową warstwę materiału antyferromagnetycznego efekt przełączania można uzyskać bez wspomaganie zewnętrznego pola magnetycznego. Dlatego w pracy tej skoncentrowano się na dogłębnym testowaniu różnych szczegółów budowy struktur takich jak metal ciężki / ferromagnetyk, ferromagnetyk / metal ciężki / ferromagnetyk, oraz ferromagnetyk / metal ciężki / antyferromagnetyk, by maksymalnie wykorzystać oferowane przez nie funkcjonalności.

Zgodnie z przedstawioną listą publikacji Autor rozprawy jest współautorem 12 publikacji z tej właśnie dziedziny badań, w tym jedna jest jeszcze procesowana w wydawnictwie. To bardzo imponujący wynik, szczególnie że kilka z nich ma współczynnik wpływu powyżej 5, a dwie powyżej 10. Wg deklaracji wkładu osobistego główną rolą Autora w czasie prac badawczych było przygotowywanie struktur do pomiarów, prowadzenie prac doświadczalnych, ich analiza, współpraca w tworzeniu modeli i samo wykorzystanie tych modeli do opisanie uzyskanych wyników. Ten wszechstronny wkład robi wrażenie, choć z drugiej strony rozumiem, że zgromadzenie tak obszernego materiału badawczego jak ten zaprezentowany w publikacjach, możliwe było dzięki intensywnemu wykorzystaniu dedykowanego takim pomiarom stanowiska pomiarowego zbudowanego w macierzystym zakładzie Doktoranta.

Rozdział pierwszy jest krótkim wprowadzeniem do tematyki rozprawy, podaje najważniejsze powody dlaczego warto zajmować się podjętą tematyką. Kończy się syntetycznym przedstawieniem dalszych części rozprawy. Dwa następne rozdziały mają charakter opisowo-informacyjny. Podstawy teoretyczne badanych w rozprawie zjawisk są zarysowane w rozdziale drugim. Osobiście znajduję ten opis jako wystarczający do przedstawienia efektów fizycznych wykorzystywanych w badaniach Autora. W rozdziale trzecim Autor zawarł skrótowy opis metod doświadczalnych stosowanych przez niego w trakcie wykonywania opisanych w rozprawie prac badawczych.

Rozdział czwarty to najważniejsza część doktoratu. Tu znajdujemy opis dokonań na podstawie których Doktorant aspiruje do uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych. Składa się on z trzech głównych podrozdziałów, których główne różnice to rodzaj materiału badawczego, na którym skupione były wybrane badania. Część 4.1 opisuje wyniki uzyskane dla warstw

podwójnych: W/Co, Co/Pt, W/Co₂₀Fe₆₀B₂₀, Co₂₀Fe₆₀B₂₀/Pt i Au/Co₂₀Fe₆₀B₂₀ (publikacja P1), następnie Pt/Co₂₀Fe₆₀B₂₀ i Pt-Ti/Co₂₀Fe₆₀B₂₀ (publikacja [P2]), a rozdział kończy opis badań roli oddziaływania Dzyaloshinskiego-Moriya w układzie platyna-kobalt-tlenek magnezu w procesie przełączania prostopadle ustawionego namagnesowania warstwy Co przy pomocy impulsów prądu elektrycznego, które były przepuszczane w płaszczyźnie struktury. Część 4.2 opisuje wyniki uzyskane dla trójwarstwy kobalt-platyna-kobalt o płynnie zmienianej grubości przekładki platynowej. Część 4.3 opisuje modyfikacje wprowadzone do badanych układów materiałowych przez dodanie warstwy antyferromagnetycznej, w tym konkretnym przypadku w układzie Pt/Co/NiO i W/Co/NiO, o zmiennej grubości warstwy metalu ciężkiego.

Przyznaję, że jestem pod wrażeniem tak rozległego materiału faktograficznego, choć rozumiem, że z włączonych do rozprawy publikacji należy odfiltrować dużą ilość materiału przygotowanego przez innych współautorów. Do najważniejszych wyników podłożonej rozprawy uważam w sferze ogólnej tak udane zmierzenie się ze skomplikowaną materią zagadnienia, a w szczegółach:

- Separacja efektów wnoszonych przez efekty spinowej magnetorezystancji i anizotropowego magneoporu oraz określenie roli danego metalu ciężkiego do wyznaczenia wagi z jaką każdy z tych efektów jest obserwowany.
- Pokazanie jak grubość przekładki platynowej w warstwach potrójnych kobalt/platyna/kobalt wpływa na wartość sprzężenia wymiennego pomiędzy warstwami platyny, ich anizotropię magnetyczną, namagnesowanie nasycenia i inne istotne parametry takiej struktury.
- Pokazanie, że obecność antyferromagnetycznej warstwy NiO poniżej warstwy podwójnej platyna/kobalt wpływa na wartość jej spinowej magnetorezystancji.
- Wyznaczenie wpływu grubości platyny na wartość efektywności konwersji ładunek - spin tzw. kąta spinowego efektu Halla (SHA) i przewodnictwa spinowego efektu Halla (SHC) w warstwach podwójnych zawierających platynę.
- Pokazanie w tym ostatnim przypadku, że wprowadzenie warstwy tytanu do platyny zwiększa efektywność tej konwersji.
- Pokazanie, że kształt pętli obrazujących efekt przełączania namagnesowania przy pomocy prądu elektrycznego (CIMS) zależy od struktury domenowej wynikającej z obecności oddziaływania Dzyaloshinskiego-Moriya.
- Zademonstrowanie 4-poziomowego przełączania efektu CIMS w przypadku obecności silnego sprzężenia wymiennego pomiędzy warstwami platyny i asymetrii transmisji spinowej obu między-wierzchni kobalt/platyna i platyna/kobalt w układzie kobalt/platyna/kobalt o zmiennej grubości platyny.
- Pokazanie, że obecność anizotropii jednozwrotnej w płaszczyźnie warstwy platyna/kobalt/antyferromagnetyczny tlenek niklu umożliwia przełączanie

namagnesowania kobaltu przy pomocy prądu elektrycznego bez konieczności wspomagania przez zewnętrzne pole magnetyczne.

Rozprawa doktorska mgra Krzysztofa Grochota zawiera wiele mankamentów. Obowiązek recenzenta zmusza mnie do wymienienia przynajmniej najważniejszych z nich.

1. Rozprawa doktorska została przygotowana w języku angielskim, ale widać wyraźnie, że Autor nie radzi sobie w tej materii najlepiej. Dokładniej, niektóre fragmenty są napisane jasno i przejrzysto, w innych liczne uchybienia językowe bardzo przeszkadzają w odbiorze pracy, czasami zamazując tok myślowy wypowiedzi. Rażą braki w słownictwie fachowym lub zwyczajowo przyjętym w tej dziedzinie badań. I tak, tylko dla przykładu:
 - (a) Opisując osadzanie warstw Autor je „aplikuje” (str. 20). Powinno być „deposited”, lub najlepiej w tym przypadku „sputtered”.
 - (b) Na tej samej stronie znajdujemy: „A shutter was used to apply the samples where the wedge layer occurred”; I zaraz poniżej znajdujemy dziwnie brzmiącą zbitkę „... a constant velocity gradient gives ...” .
 - (c) Naprawdę mało czytelne są zdania: 2-gie ze strony 64 zaczynające się od: „It is worth noting that the resistance value R_{xy} not reached by a single CIMS loop the value equal to the upper or lower state of the AHE loop indicates...”,
 - (d) oraz ze str. 131: „In-plane $H(x)$ _exb field could achieve field-free magnetization switching ...”
- (2) W rozdziale 2-gim, przy opisie wiodących efektów fizycznych, brakuje mi zaprezentowania przykładów zależności oczekiwanych w doświadczeniu. Szczególnie brakuje takiej ilustracji dla tytułowej spinowej magnetorezystancji. W szczególności, co odróżnia ten efekt od innego powszechnego zjawiska anizotropowego magnetooporu? Jakie pomiary należy wykonać by jednoznacznie odróżnić jedno zjawisko od drugiego? Poprosiłbym o naświetlenie tego zagadnienia w trakcie obrony.
- (3) Pomimo, że rozdział 3-ci jest znacznie obficiej ilustrowany, to nie rozumiem dlaczego w rozdz. 3.5 traktującym o mikrostrukturyzacji, czyli działalności której Autor poświęcał tak wiele swojego czasu, na rys. 3.6 widzimy tylko pola kontaktowe – brakuje choćby jednego powiększenia przybliżającego czytelnikowi prawdziwą formę badanej próbki i podającej jej rzeczywiste rozmiary. Z drugiej strony sam opis procesu strukturyzacji nie informuje o celowości każdego z kroków opisanego tam procesu. Nie dowiadujemy się więc co było trawione najpierw, co potem i w jakim celu wykonywano kolejne metalizacje i procesy lift-off.
- (4) Duża doza niezrozumienia pojawia się w trakcie lektury rozdziału 3.6.3 opisującego metodykę badania efektywności przełączania namagnesowania impulsem prądowym

- (ang. CIMS). Według rys. 3.11 pomiary elektryczne odbywają się poprzez podawanie na kontakty prądowe impulsów napięcia wymuszających prąd pomiarowy o natężeniu wynikającym z prawa Ohma – o ile znany jest opór próbki w trakcie ekscytacji. Ale zaraz w 4-tej linii na stronie 33 Autor oznajmia, że te impulsy były generowane przez komercyjne źródło prądowe, co ma większy sens z praktycznego punktu widzenia. Po czym pojawia się zdanie, że pomiary napięcia (poprzecznego) wykonywane były woltomierzem wykorzystującym „low sampling voltage”. Bardzo proszę o zapoznanie komisji na obronie z pełnym schematem układu pomiarowego, z wyszczególnieniem jakie przyrządy były podłączane i w jakiej sekwencji, tj. z protokołem pomiarowym wykorzystywanym w trakcie, szczególnie tych, pomiarów.
- (5) W rozdziale 2.4 Autor zauważa, że „The AFM has a fixed magnetic direction”, by potem pisać: „the angle between the magnetizations of the ferromagnet and the antiferromagnet.” To ostatnie budzi już mój sprzeciw.
 - (6) Nie wiem czym jest „increasingly finer domain structure” i jak ona wynika z rys. 4.1 Poproszę o wyjaśnienie. Także o przybliżeniu komisji znaczenia następującego zdania z podpisu do rys. 4.2: „As it is easy to notice in $j_e=0$, the most remagnetization occurs in case (a) and is confirmed by the domain image in Fig.4.1(c).” Tu poproszę zacząć od wyjaśnienia terminu “remagnetization”.
 - (7) Myślę, że cały akapit zaczynający się od „At points...” na stronie 67 jest do wymiany. Nie wiem co się skąd wzięło, raz jest prąd raz napięcie. Jest to bardzo duża niestaranność.
 - (8) Nie jest wyjaśnione na czym polegał proces dobierania optymalnej wartości spinowej średniej drogi swobodnej, o którym Autor wspomina na stronie 106. W publikacji też tego nie odnalazłem.
 - (9) Na stronie 109 pojawia się dziwny termin: „interstitial zero dopants”.
 - (10) W 3-ciej linii drugiego akapitu podsumowania na str. 131 jest stwierdzenie, które jest sprzeczne ze danymi przedstawionymi na rys. 4.9. Poproszę o odniesienie się do tej uwagi.
 - (11) Uwaga ogólna. Autor korzysta w rozprawie zbyt często ze skrótów. Owszem, są one zdefiniowane, choć nie wszystkie (np. „RT” na str. 23). Dobry obyczaj nakazuje rezygnować ze skrótów w tytułach, wstępach, podsumowaniach i podpisach pod rysunkami. Oczywiście, pod warunkiem, że w grę nie wchodzi czynniki nadrzędne, np. ograniczenie miejsca w publikacjach typu „Letters”. W pozostałych wypadkach jest to miły ukłon w stronę czytelnika.

Podsumowując, pomimo przedstawionych uwag krytycznych, uważam, że, przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra Krzysztofa Grochota prezentuje wysoki poziom naukowy. Zawiera dokumentację bardzo bogatego materiału doświadczalnego uzyskanego różnymi technikami pomiarowymi, co jednoznacznie wskazuje na duży talent

Doktoranta jako fizyka doświadczalnika. Omawiane badania dotyczą ważnych problemów z punktu widzenia rozwoju fizyki tej tematyki i być może wpłyną na opracowanie nowych technologii, są oryginalne i zdecydowanie poszerzają wiedzę.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra Krzysztofa Grochota spełnia wymogi formalne i zwyczajowe stanowione przez odnośne przepisy dotyczące rozpraw doktorskich. W szczególności rozprawa ta stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego przez Doktoranta, wykazuje odpowiednią wiedzę teoretyczną i umiejętność prowadzenia badań naukowych i dlatego wnoszę o dopuszczenie mgra Krzysztofa Grochota do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania jemu stopnia naukowego doktora nauk fizycznych, w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Warszawa, 09 lipca 2023 r.

Kłociej Gawich