



Poznań, dnia 20 lipca 2023 roku

Prof. UAM dr hab. Anna Dyrdał
Zakład Fizyki Mezoskopowej
Instytut Spintroniki i Informatyki Kwantowej, Wydział Fizyki
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 2, 61-614 Poznań

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pana mgr. Krzysztofa Grochota

pt. *Spinowa magnetorezystancja i spinowy efekt Halla w cienkowarstwowych układach hybrydowych: metal ciężki, ferromagnetyk, antyferromagnetyk*

Pan magister Krzysztof Grochot przygotował rozprawę doktorską pod tytułem „*Spinowa magnetorezystancja i spinowy efekt Halla w cienkowarstwowych układach hybrydowych: metal ciężki, ferromagnetyk, antyferromagnetyk*” / „*Spin Hall Magnetoresistance and Spin Hall effect in heavy metal, ferromagnet, antiferromagnet hybrid structures*” na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie pod kierunkiem prof. dr. hab. Tomasza Stobieckiego oraz prof. dr. hab. Niki Spiridis. Rozprawa doktorska napisana jest w języku angielskim, na bazie zbioru 4 opublikowanych i powiązanych tematycznie wieloautorskich artykułów naukowych (prace [P1]-[P3], [P5]) oraz manuskryptu (praca [P4]) zamieszczonego w bazie arXiv z nadanym numerem DOI. W pracach [P1]-[P3] Doktorant jest drugim autorem (są to prace w Scientific Reports, IEEE Transactions and Electronic Devices, oraz ACS Appl. Mater. Interfaces), przy czym w dwóch z nich pierwszymi autorami są autorzy odpowiedzialni za modele teoretyczne. W pozostałych dwóch pracach mgr Grochot jest pierwszym autorem (preprint oraz Phys. Rev. Appl.). Cała praca doktorska składa się z pięciu rozdziałów łącznie z wstępem i podsumowaniem. Rozdział drugi obejmuje teoretyczny wstęp do tematyki pracy. Opis stosowanych metod eksperymentalnych, łącznie z wytwarzaniem i charakteryzacją próbek, znajduje się w rozdziale trzecim. Rozdział czwarty składa się z przedrukowanych w całości artykułów [P1]-[P5] opatrzonych przygotowanymi przez Doktoranta informacjami wprowadzającymi do tych artykułów oraz uzupełnieniami i podsumowaniami. Oprócz tego praca zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim. Całość pracy liczy 147 stron. Spis literatury zawiera 173 pozycje.

Należy zaznaczyć, że tematyka pracy dotyczy aktualnych problemów związanych z efektami transportowymi generowanymi oddziaływaniami spinowo-orbitalnymi oraz wykorzystaniem oddziaływań spinowo-orbitalnych do zjawiska indukowanego prądem magnetycznego przełączania. Efekty fizyczne i charakterystyki transportowe prezentowane w publikacjach są istotne z punktu widzenia możliwości konstrukcji nowych magnetycznych pamięci typu RAM, opartych na indukowanym prądem magnetycznym przełączaniu. Rola oddziaływań spinowo-orbitalnych w procesie magnetycznego przełączania jest dwójaka. Z jednej strony oddziaływania te mogą generować prąd spinowy, który z kolei może być wykorzystany do magnetycznego przełączania poprzez transfer spinu do układu magnetycznego. Z drugiej strony, oddziaływania spinowo-orbitalne mogą w obecności prądu elektrycznego generować na interfejsie spinową polaryzację elektronów mobilnych, która oddziałując z przyległą warstwą magnetyczną poprzez oddziaływanie wymienne może doprowadzić do inwersji

magnetyzacji tej ostatniej. Zjawiskom tym towarzyszą również pewne efekty transportowe (magnetooporowe) generowane oddziaływaniami spinowymi.

Rozdział drugi pracy doktorskiej zawiera wprowadzenie teoretyczne („Theoretical Foundations”), a raczej zbiór podstawowych literaturowych informacji i definicji dotyczących efektów galwanomagnetycznych i magnetooporowych, spinowo-orbitalnych oddziaływań, spinowego efektu Halla i spinowo-orbitalnego momentu siły, oraz indukowanego prądem magnetycznego przełączania. W rozdziale tym również wprowadzona jest tzw. anizotropia wymienna na granicy ferromagnetyka i antyferromagnetyka. Rozdział ten nie zawiera oryginalnych elementów wprowadzonych przez Autora a jedynie jest bardzo skrótowym zebraniem pewnych informacji literaturowych, które będą potrzebne do opisu i interpretacji wyników eksperymentalnych.

Podobna sytuacja jest w przypadku rozdziału trzeciego, w którym zawarte są podstawowe informacje dotyczące metod wytwarzania struktur cienkowarstwowych, ich badań strukturalnych i charakteryzacji jakości powierzchni/interfejsów. W szczególności Autor opisał metodę naparowywania magnetronowego w warunkach wysokiej próżni. W dalszej części tego rozdziału Autor opisuje metodę mikroskopii opartej na magneto-optycznym efekcie Kerra (MOKE), służącą do pomiaru lokalnej pętli histerezy magnetycznej wytwarzanych struktur. Z przebiegu pętli histerezy i zmian tego przebiegu można uzyskać wiele informacji nt. stanu magnetycznego, magnetycznego przełączenia, itd. Dalej, Autor wymienia metody stosowane do badania stanu magnetycznego interfejsów między warstwami. W szczególności metody oparte na magnetycznym dichroizmie w zakresie promieniowania X, w tym metody oparte na magnetycznym dichroizmie kołowym (XMCD) i magnetycznym dichroizmie liniowym (XMLD). Z kolei do scharakteryzowania struktury krystalicznej, w tym struktury wielowarstwowej, w przedstawianym przez Doktoranta cyklu publikacji stosowane są techniki oparte na dyfrakcji promieniowania X.

W dalszej części rozdziału trzeciego Autor omawia metody, które jak należy wnioskować stosował samodzielnie w trakcie przygotowywania rozprawy doktorskiej (zgodnie z oświadczeniami o wkładzie Autora w poszczególnych publikacjach), a więc metody wytwarzania elementów w zakresie mikro i nano z naparowanych i scharakteryzowanych struktur cienkowarstwowych, z wykorzystaniem technik litografii optycznej oraz metody wykorzystywane do pomiarów elektrycznych. Doktorant opisuje tu zarówno metodę opartą na pomiarach w statycznym polu elektrycznym jak i metodę dynamiczną opartą na pomiarach wyższych harmonicznych odpowiedzi układu na dynamiczne pole elektryczne. W podsumowaniu tego rozdziału trzeba podkreślić, że opis stosowanych technik do charakteryzacji i wytwarzania próbek jest dość szczegółowy, co wskazuje, że Autor opanował podstawy fizyczne tych metod i ich wykorzystanie w dostępnej aparaturze.

Rozdział czwarty pracy zawiera wyniki oryginalne uzyskane przez Doktoranta oraz pozostałych współautorów publikacji [P1]-[P4] dla cienkowarstwowych struktur hybrydowych typu HM/FM, FM/HM/FM oraz HM/FM/AFM. Źródłem oddziaływań spinowo-orbitalnych w tych strukturach są warstwy metalu ciężkiego (HM), np. platyna Pt i wolfram W, w których oddziaływania spinowo-orbitalne są szczególnie silne. Z kolei warstwą ferromagnetyczną (FM) jest np. warstwa kobaltu Co lub warstwa stopu kobaltu, żelaza i boru - CoFeB. Warstwa AFM, stosowana w niektórych analizowanych strukturach, jest warstwą antyferromagnetyka, np. tlenku niklu, NiO. Warstwa ta jest odpowiedzialna za powstanie tzw. anizotropii wymiennej na granicy ferromagnetyka z antyferromagnetykiem. Rozdział czwarty podzielny jest na trzy podrozdziały, właśnie ze względu na wymienione wyżej trzy typy struktur, HM/FM, FM/HM/FM oraz HM/FM/AFM. Autor przedstawia w nim swoje wyniki w formie przedruku pięciu publikacji, których jest jednym z współautorów (w pracach tych jest od sześciu do dziesięciu współautorów). Oprócz wspomnianych publikacji rozdział ten zawiera uzupełnienia i rozszerzenia materiału zawartego w publikacjach.

W części 4.1 tego rozdziału mgr Grochot prezentuje wyniki dotyczące magnetorezystancji uzyskane dla warstw typu HM/FM, gdzie HM to warstwa W lub Pt, natomiast FM to warstwa ferromagnetyczna Co lub CoFeB. Prąd ładunkowy płynący w takim układzie w płaszczyźnie warstwy generuje prąd spinowy z warstwy HM do FM (spinowy efekt Halla). Prąd spinowy prowadzi do nierównowagowej spinowej akumulacji w układzie. Z pomiarów magnetorezystancji, w oparciu o teoretyczny model, wyznaczono dwa wkłady do magnetorezystancji, jeden z nich to anizotropowy magnetoopór, AMR, a drugi to magnetoopór indukowany spinowym efektem Halla (ang. Spin-Hall Magnetoresistance), SMR. Ta część podrozdziału 4.1 opiera się w całości na publikacji [P1]. W drugiej publikacji, [P2], dotyczącej struktur HM/FM wykorzystano zarówno metodę statyczną jak i metodę dynamiczną. Wyznaczono anomalny i spinowy efekt Halla oraz składowe magnetorezystancji. Część 4.1 uzupełniona jest o wyniki Autora dotyczące indukowanego prądem magnetycznego przełączania w układzie Pt/Co/MgO z prostopadłą magnetyzacją. Przełączanie w badanym układzie zachodzi poprzez ruch ścianki domenowej. Ze szczegółowej analizy tego procesu Autor wyciągnął wniosek o asymetrycznym wkładzie do spinowego momentu siły, pochodzącym od oddziaływania Dzialoshinskiego-Moryii na granicy między Pt i Co.

W części 4.2 rozważane są struktury FM/HM/FM, a konkretnie trójwarstwa Co/Pt/Co. Celem było zbadanie jak warstwa metalu ciężkiego Pt wpływa na transport spinu, własności magnetooporowe i dynamikę magnetyczną w badanym trójwarstwowym układzie. Wykorzystując technikę nanostrukturyzacji warstwy z przekładką klinową, uzyskano zespół nanoukładów o różnych grubościach Pt. To pozwoliło przeprowadzić pomiary w funkcji grubości warstwy Pt. Wyznaczono między innymi magnetorezystancję (AMR, SMR), spinowy kąt holowski, pole spinowo-orbitalne działające na warstwy magnetyczne i oddziaływanie międzywarstwowe. Wykorzystano przy tym kilka metod eksperymentalnych takich jak na przykład efekt diody spinowej, indukowaną prądem dynamikę oraz MOKE. Ten podrozdział oparty jest na dwóch publikacjach. Ważnym i ciekawym wnioskiem wynikającym z tych prac jest to, że w trakcie procesów nanoszenia ustala się pewna różnica między dwoma interfejsami pomiędzy platyną a kobaltem, tzn. granice między warstwą Pt a obydwoma warstwami Co charakteryzują się różnymi parametrami, co przekłada się na różnice w oddziaływaniach spinowo-orbitalnych na obydwu interfejsach i różne własności magnetyczne obydwu warstw. Jak pokazano, prowadzi to do wielostopniowego przełączania magnetycznego.

Część 4.3 oparta jest na publikacji [P5] i opisuje indukowane prądem przełączanie magnetyczne w strukturach Pt/Co/NiO oraz W/Co/NiO. Oprócz badania efektu CIMS wykonano pomiary SMR i AHE oraz zbadano m.in. wpływ wygrzewania na termiczną stabilność tych układów oraz indukowaną oddziaływaniami wymiennymi anizotropię magnetyczną (ang. exchange-bias, ExB). Wyznaczono też składową w płaszczyźnie i prostopadłą do płaszczyzny indukowanego oddziaływaniami wymiennymi pola anizotropii oraz ich wpływ na CIMS. Wykorzystując zaproponowany w publikacji model teoretyczny wyznaczono także kąt spinowego efektu Halla, SHA. Otrzymane wartości porównane zostały z wartościami otrzymanymi z pomiarów wyższych harmonicznych

Całość rozprawy kończy rozdział piąty zawierający krótkie podsumowanie. Doktorant podkreśla, że praca doktorska zawiera wyniki eksperymentalne dla układów hybrydowych złożonych z cienkich warstw FM/HM/FM oraz HM/FM/AFM wsparte modelami teoretycznymi. Tu należy podkreślić, że o ile zaprezentowane w rozprawie artykuły rzeczywiście zawierają modele teoretyczne, to jednak oświadczenia mgra Grochota o wkładzie do poszczególnych publikacji nie zawierają informacji, z których wynika, że jest on współautorem tych modeli. Opisu modelu w przybliżeniu dyfuzji spinu na próżno też szukać w opisie teoretycznym zawartym w rozdziale drugim. Nie posiadam więc przesłanki, że Doktorant brał udział w jego opracowaniu. Obecność na liście współautorów publikacji dra Łukasza Karwackiego oraz dra Piotra Ogrodnika (zajmujących się teorią transportu)

sugeruje raczej, że modele teoretyczne były w tych publikacjach ich domeną. W podsumowaniu znajdujemy także w końcu dość enigmatycznie sprecyzowany cel rozprawy doktorskiej cyt. „*to enhance the understanding of spin electronics phenomena*”. W podsumowaniu Autor odnosi się do tego co było przedmiotem wieloautorskich publikacji będących podstawą tej dysertacji, nie podsumowuje on jednak swojego jasno określonego celu i dobrze wyodrębnionego wkładu do tych publikacji.

Głównym mankamentem rozprawy jest dość nieczytelnie nakreślony indywidualny wkład Doktoranta w przygotowane publikacje. Oczywiście na podstawie oświadczeń Autora, mogę stwierdzić, że jego rola w powstaniu wszystkich tych artykułów polegała głównie na wykonaniu pomiarów transportowych oraz nanostrukturyzacji układów w cleanroomie. Ponadto, z deklaracji Doktoranta wynika, że przygotowywał on draft prac [P4] oraz [P5] oraz współredagował manuskrypty pozostałych prac. Zakres indywidualnego wkładu doktoranta w powstałe publikacje nie jest jednak precyzyjnie opisany. W tym miejscu muszę także zauważyć, że w przypadku pracy [P1] oświadczenie Autora pracy o analizie wyników nie pokrywa się z oświadczeniem autorów w opublikowanym artykule, gdzie czytamy „*ŁK TS and JB, analyzed the results*”.

Chociaż uzyskane w pracach [P1]-[P5] wyniki są niezwykle wartościowe i stanowią istotny wkład w prowadzoną w dziedzinie dyskusję naukową na temat efektów transportowych indukowanych oddziaływaniem spinowo-orbitalnym, to praca doktorska napisana jest dość chaotycznie. W rozdziale drugim i trzecim Doktorant nie przedstawia jasnego opisu efektów fizycznych, które są podstawą wykonywanych przez niego badań eksperymentalnych, a raczej dość hasłowo wymienia efekty omawiane w publikacjach. Rozdział drugi pisany jest jakby w pośpiechu i bez spójności logicznej. Najpierw zostaje wprowadzone pojęcie anizotropowego magnetooporu (AMR) oraz magnetoopór indukowany spinowym efektem Halla (SMR), a dopiero potem wprowadzone zostaje oddziaływanie spin-orbita oraz spinowy efekt Halla. A przecież dwa pierwsze efekty są generowane oddziaływaniem spin-orbita. Dodatkowo samo oddziaływanie spin-orbita zostało wprowadzone bardzo lakonicznie i „na skrót”. Biorąc też pod uwagę, że cała rozprawa doktorska opisuje efekty indukowane oddziaływaniem spin-orbita oczekiwałabym od Doktoranta przedstawienia szerszego i bardziej precyzyjnego opisu tego fundamentalnego oddziaływania, kluczowego dla badanych przez niego efektów. W rozdziale tym nie ma też nic o oddziaływaniu Dzyaloshinskii'ego-Moriya, również indukowanego oddziaływaniem spin-orbita, który jest kluczowy w dyskusji materiału z podrozdziału 4.1.3. W podrozdziale dotyczącym spinowego efektu Halla Autor nie podaje źródła wzorów (2.15)-(2.20). Dodatkowo σ raz jest polaryzacją spinową, a raz spinową macierzą Pauliego. Podobnie jest też w rozdziale trzecim, w którym Doktorant opisuje bardzo pobieżnie metody eksperymentalne wykorzystane w publikacjach pozostawiając czytelnikowi domniemywanie, które z tych metod były rzeczywiście stosowane przez niego, a które przez współautorów publikacji. Czytamy na przykład: „*The most of thin film systems analyzed in this dissertation were deposited in the Department of Thin Films of the Institute of Molecular Physics of the Polish Academy of Sciences in Poznań.*” Czy więc doktorant uczestniczył w wytwarzaniu materiałów cienkoarstwowych czy też zostały one wykonane przez konkretnych współpracowników? Strona redakcyjna również zawiera liczne mankamenty. I tak na przykład w tekście pojawia się wiele akapitów w miejscach, gdzie nie powinno ich być, występują też literówki oraz braki odstępów pomiędzy niektórymi wyrazami. Z punktu widzenia językowego bardzo niedobre wrażenie robi już na początku streszczenie w języku polskim, gdzie oprócz wspomnianych literówek możemy znaleźć mało szczęśliwe tłumaczenia na język polski – np. „*kompletna heterostruktura spinowego efektu Halla*”.

Podsumowując całość rozprawy doktorskiej uważam, że tematyka pracy obejmuje aktualne zagadnienia dotyczące transportu spinowego i oddziaływań spinowo-orbitalnych w strukturach hybrydowych zawierających warstwy ciężkiego metalu. Ze względu na generowany w tych układach silny spinowo-orbitalny moment siły, tematyka ta ma również element o znaczeniu aplikacyjnym w elementach wykorzystujących zjawisko indukowanego prądu magnetycznego przełączania. Autor

pracy doktorskiej przedstawił charakterystyki transportowe licznych cienkowarstwowych układów hybrydowych FM/H/FM oraz HM/FM/AFM. Doktorant zebrał i opracował oryginalne i bardzo ciekawe wyniki eksperymentalne, pozwalające myśleć o wykorzystaniu SMR czy CIMS w realnych urządzeniach dla elektroniki spinowej czy też w nowych typach pamięci MRAM. Szczególnie wysoko oceniam wyniki opublikowane w Physical Review Applied oraz ACS Applied Materials and Interfaces. Magister Grochot opanował techniki wytwarzania elementów w zakresie mikro i nano ze struktur cienkowarstwowych z wykorzystaniem technik litografii optycznej oraz metody wykorzystywane do pomiarów elektrycznych.

W związku z powyższym stwierdzam, że pomimo krytycznych uwag przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim oraz wnoszę o dopuszczenie magistra Krzysztofa Grochota do dalszych etapów postępowania w procesie o nadanie stopnia naukowego doktora.



Anna Dyrdał