

dr hab. Aleksandra Trzaskowska, prof. UAM
Instytut Spintroniki i Informatyki Kwantowej
Wydział Fizyki
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Poznań, 11.05.2023r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Sukanta Kumar Jena
pt.: "Magnetic properties of asymmetric layered heavy metal / ferromagnet systems".**

Przedstawiona do recenzji praca doktorska, której autorem jest mgr Sukanta Kumar Jena, została wykonana w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie pod kierunkiem prof. dr hab. Andrzeja Wawro, pełniącego funkcję promotora, oraz dr Eweliny Milińskiej, będącej promotorem pomocniczym. Badania naukowe do pracy doktorskiej były współfinansowane ze środków projektu finansowanego przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej w ramach programu Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (REINTEGRATION 2017 OPIE 14-20) oraz projektów Narodowego Centrum Nauki (2016/23/G/ST3/04196 i 2020/37/B/ST5/02299).

Praca ma charakter doświadczalny i poświęcona jest asymetrycznym ultracienkim warstwom wielokrotnym W/Co/Pt z namagnesowaniem prostopadłym do ich powierzchni o różnej ilości powtórzeń podstawowej trójwarstwy W/Co/Pt. Wspomniane układy wielowarstwowe o zredukowanej rozmiarowości charakteryzują się silną prostopadłą anizotropią magnetyczną (PMA). Dodatkowo różne sąsiedztwo warstwy ferromagnetycznej (Co) z warstwami metali ciężkich (w omawianej pracy są to W i Pt) skutkuje występowaniem oddziaływania Dzyaloshinskii–Moriya (DMI). Badane struktury wielowarstwowe były wytwarzane metodą epitaksji z wiązki molekularnej (MBE), co umożliwiło uzyskanie próbek o wyższej jakości struktury krystalicznej tworzącej poszczególne warstwy w porównaniu z powszechnie stosowaną metodą sputteringu. Wyniki prezentowane w przedstawionej dysertacji doktorskiej są interesujące w kontekście zastosowań praktycznych (jako krysztaly magnoniczne czy też potencjalne nośniki zapisu magnetycznego), jednocześnie są to badania o charakterze fundamentalnym.

Rozprawa została przygotowana w języku angielskim w klasycznej formie obejmującej 114 stron. Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów, z których każdy zaopatrzone jest w spis treści oraz odrębną literaturę, abstraktu w języku polskim i angielskim, spisu symboli i stosowanych skrótów oraz bardzo obszernych podziękowań. Dodatkowo zamieszczono listę prac współautorstwa doktoranta (2 prace), listę konferencji i seminariów, na których doktorant prezentował wyniki swoich badań, podróży naukowych i odbytych staży oraz listę grantów. Rozprawę doktorską kończy krótkie podsumowanie.

Pierwszy rozdział pracy doktorskiej, będący wstępem, określa cel poznawczy jaki postawił sobie doktorant oraz omówiono w nim w skrócie zawartość kolejnych rozdziałów rozprawy doktorskiej.

Celem pracy doktorskiej było zbadanie i określenie wpływu sekwencji, grubości warstw i ilości powtórzeń układu trójwarstwowego W/Co/Pt na stany magnetyczne i strukturę domenową badanego układu warstwowego. Dodatkowo wyznaczone zostały wartości oddziaływania Dzyaloshinskiego–Moriya (DMI).

Autor w pierwszym rozdziale pracy doktorskiej określa swój indywidualny wkład odnoszący się do zakresu pracy. Doktorant sam zaprojektował większość próbek, brał udział w ich wykonaniu i charakteryzacji strukturalnej oraz magnetycznej. Samodzielnie zmierzył strukturę domenową oraz przeprowadził obliczenia współczynnika DMI w oparciu o model magnetycznego medium efektywnego. Ponadto w doniesieniu do pracy "Interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction in epitaxial W/Co/Pt multilayers" (*Nanoscale* **13** (2021) 7685-7693) doktorant przygotował samodzielnie wstępną wersję manuskryptu i brał aktywny udział w edytowaniu jego wersji finalnej. Pod kątem edytorskim w tym rozdziale referencje 2,3,5,6 nie są kompletne.

Rozdział drugi stanowi wprowadzenie w tematykę magnetyzmu i zawiera podstawowe pojęcia i definicje wielkości wykorzystywanych w analizie wyników eksperymentalnych. Rozdział ten w sposób niezwykle zwięzły i często w sposób podstawowy omawia poszczególne zagadnienia. Doktorant nie ustrzegł się błędów edytorskich, a w szczególności braku konsekwencji w stosowanych symbolach i tak: w równaniu 2.1 E_z określono jako energię Zeemana, podczas gdy w spisie zawierającej najczęściej stosowane symbole jest to E_{Ze} , w równaniu 2.2 czym jest H ?, w równaniu 2.3 nie zdefiniowano μ_0 oraz d . Równanie 2.4: co oznacza H_{IEC} i d (co prawda równanie 2.4 jest opisane w rozdziale 5), natomiast w równaniu 2.5 i 2.6 α_i , ϕ ?. Najczęściej stosowany symbol θ w wielu równaniach jest zdefiniowany w różny sposób, odwrotna sytuacja dotyczy grubości warstw (oznaczone jako d lub t) oraz szerokości ścian domenowych. Z punktu widzenia edytorskiego wielkość niektórych rysunków jest nieporównywalnie duża z innymi rysunkami, co w konsekwencji powoduje, iż często podpis pod danym rysunkiem znajduje się na kolejnej stronie, co zresztą występuje w całej pracy doktorskiej. Pod kątem merytorycznym czytelnik może odczuwać pewien niedosyt w opisie np. domen i ścian domenowych, czy też oddziaływania DMI. Przedstawiona praca doktorska odnosi się do wspomnianych zagadnień, dlatego też uważam, iż w części teoretycznej powinny być one bardziej rozwinięte. Ostatni z podrozdziałów w tej części pracy jest doprawdy potraktowany skrótowo, a prezentując rysunek 2.9 należałoby choćby podać podstawowe relacje odnoszące się do interakcji światła z falami spinowymi, tym bardziej, iż metoda rozproszenia światła Brillouina pozwoliła na wyznaczenie parametru oddziaływania DMI.

W rozdziale trzecim została przedstawiona metodyka badawcza stosowana w pracy doktorskiej. Doktorant omówił metodę wytwarzania badanych układów wielowarstw (epitaksji wiązki molekularnej MBE) oraz stosowane metody badawcze: magnetometria SQUID, magnetometria wykorzystująca polarny efekt Kerr (PMOKE), mikroskopia sił magnetycznych (MFM) oraz spektroskopia Brillouina (BLS). Metody eksperymentalne stosowane przed doktoranta są opisane w sposób dość ogólny. W mojej ocenie opis aparatury należałoby w wielu miejscach doprecyzować. Doktorant nie podaje szczegółów technicznych poszczególnych metod np. na jakiej długości światła laserowego pracuje spektrometr Brillouina, który jest to typ spektrometru? Z jakim magnetometrem SQUID oraz z jakim mikroskopem AFM mamy do czynienia? Jaka jest rozdzielczość mikroskopu AFM i MFM? Ponadto równanie na stronie 56 nie zostało ponumerowane. Równanie to odnosi się do obliczeń stałej oddziaływania Dzyaloshinskii-Moriya, natomiast nie doprecyzowano w jaki sposób wylicza się wartość wektora falowego k . Standardowo w spektroskopii Brillouina określenie stałej DMI powinno uwzględniać dwa zwroty pola magnetycznego (+H i -H) w konfiguracji DE (Damona-Eshbacha). Czy pokazane rezultaty uwzględniają taką konfigurację pól magnetycznych? Rozdział 3.9 opisuje pętlę histerezy bez jakiegokolwiek odniesienia do aparatury badawczej - w obecnej formie rozdział ten powinien się raczej znaleźć w części teoretycznej, a nie w opisie aparatury. Natomiast muszę zaznaczyć, iż czytając opis aparatury

ewidentnie widoczna jest duża wiedza doktoranta na temat metody MBE i jej technicznych aspektów.

Rozdziały 4-6 zawierają wyniki badań eksperymentalnych, które stanowią sedno przedłożonej pracy doktorskiej. W rozdziale 4 przedstawiono wyniki badań struktur z pojedynczą warstwą kobaltu. Wspomniany rozdział w pierwszej części opisuje stan wiedzy na temat próbek Mo/Co/Au. Tego typu struktury pozornie są podobne do struktur W/Co/Pt (Mo i W charakteryzuje ta sama struktura krystaliczna i podobne parametry sieciowe, natomiast Au i Pt należą do grupy metali ciężkich i są sąsiadami w układzie okresowym). Mimo pozornego podobieństwa układów Mo/Co/Au i W/Co/Pt doktorant pokazał, iż badany przez niego układ W/Co/Pt charakteryzuje się innym zakresem grubości warstw Co (d_{Co}), w których pojawia się PMA. Dodatkowo doktorant zbadał wpływ grubości warstwy W (d_W) na występowanie PMA w układzie Pt/W(d_W)/Co(d_{Co})/Pt. Wykonane przez doktoranta badania stanów magnetycznych (PMOKE) dla próbki o zmiennej grubości W (0-100 Å) oraz Co (0-30 Å) pokazują obszary o zróżnicowanych właściwościach: począwszy od niemagnetycznego przez superparamagnetyczny, ferromagnetyczny z PMA i ferromagnetyczny z namagnesowaniem leżącym w płaszczyźnie warstwy. Dodatkowo ciekawym rezultatem jest wykazanie, istnienia reorientacji spinowej (SRT), która może być wywołana zarówno zmianą grubości warstwy kobaltu, jak i zmianą grubości warstwy wolframu. Dla wybranej konfiguracji układu wykazano ponadto istnienie domen bąbelkowych, co dodatkowo zostało potwierdzone wartością oddziaływania DMI. Uzyskaną w eksperymencie wartość DMI odniesiono dla próbek W(1)/Co(18)/Pt(5) na podstawie pracy [20]. Pragnę nadmienić, iż wartości uzyskane przez doktoranta i te z poszczególnych prac innych autorów są wartościami efektywnymi (D_{eff}), dlatego interesujące byłoby uwzględnienie wartości grubości badanych warstw magnetycznych, czyli porównanie współczynnika DMI powierzchniowego (D_s), a nie efektywnego (D_{eff}).

Chropowatość - nierówność powierzchni próbek W/Pt została określona na podstawie badania AFM topografii powierzchni (rysunek 4.5a) na poziomie 2 Å. Wysłuchanie takiego wniosku jest możliwe na podstawie profilu wysokościowego badanej próbki - jak ten profil się prezentuje? Zawartość omawianego rozdziału w dużej mierze pokrywa się z pracą: Z. Kurant, S.K. Jena, R. Gieniusz, U. Guzowska, M. Kisielewski, P. Mazalski, I. Sveklo, A. Pietruczik, A. Wawro and A. Maziewski; *JMMM* **558** (2022) 169485, w której doktorant jest współautorem. Wkład doktoranta do tej pracy jest określony jako „Investigator” (o czym pisze sam doktorant w rozprawie doktorskiej) uważam, iż określenie to powinno zostać doprecyzowane. Pod kątem edytorskim w tym rozdziale referencje 3-5, 7, 9-12, 14,16,17 nie są kompletne, referencje 20 i 21 to ta sama praca, ponadto styl referencji tego rozdziału jest inny niż pozostałych rozdziałów w pracy doktorskiej.

Interesujące wyniki badań, opisane w ciekawy sposób zawiera rozdział 5 pracy doktorskiej. Przeprowadzone badania dotyczą wielowarstw gdzie liczba powtórzeń mieści się w zakresie 2-7. Dla układu Pt/[W/Co/Pt(d_{Pt})/W(d_W)/Co/Pt]₂ doktorant wykazał występowanie sprzężenia antyferromagnetycznego z maksimum dla warstw Pt i W o grubościach równych 7Å i oszacował jego wielkość na podstawie długości plateau widocznego w pętłach histerezy magnetycznej. Występowanie wspomnianego sprzężenia zależy od grubości warstw Pt i W. Grubość wspomnianych warstw ma także istotny wpływ na relacje pomiędzy sprzężeniem wymiennym i oddziaływaniem magnetostatycznym dla układów, gdzie ilości powtórzeń trójwarstwy bazowej wynosiła 6 i 7. Doktorant pokazał także istnienie w stanie remanencyjnym stabilnej labiryntowej struktury domenowej dla badanych wielowarstw w sytuacji, gdy przeważa oddziaływanie magnetostatyczne.

Ostatni 6 rozdział pracy doktorskiej prezentuje rezultaty otrzymane dla układów z liczbą powtórzeń 10 i 20. W całości rozdział ten oparty jest na pracy: S.K. Jena, R. Islam, E. Milińska, M.M. Jakubowski, R. Minikayev, S. Lewińska, A. Lynnyk, A. Pietruczik, P. Aleszkiewicz, C. Autieri, A. Wawro; *Nanoscale* **13** (2021) 7685 w której doktorant jest pierwszym autorem. W mojej ocenie jest to najlepszy rozdział w przedstawionej do oceny dysertacji. W rozdziale tym doktorant zaprezentował dokładnie strukturalną charakterystykę badanych układów. Próbki zostały bardzo dobrze scharakteryzowane pod kątem magnetycznym (Tabela na str. 98). Wykazano, iż badane układy mogą posiadać strukturę domenową labiryntową, jak i paskową – dla której wyznaczono period. Rozmiar struktury domenowej pozwolił na wyznaczenie wartości współczynnika DMI badanych układów wielowarstw z wykorzystaniem modelu magnetycznego medium efektywnego. Wartość współczynnika DMI jest stosunkowo wysoka (2mJ/m^2) co zostało powiązane z wysoką jakością próbek pod kątem ich krystalicznej budowy. Uzyskana eksperymentalnie wartość współczynnika DMI została potwierdzona numerycznie m.in. z wykorzystaniem symulacji mikromagnetycznych. Nasuwa się pytanie czy większa wartość współczynnika DMI występuje tylko w trójwarstwach W/Co/Pt czy jest też widoczna w innych układach tego typu badanych przez doktoranta? Pragnę ponadto nadmienić, iż w tym rozdziale w dyskusji doktorant pisze o kolejnym rozdziale omawiającym wyniki uzyskane dla materiału Re/Co/Pt, którego w pracy doktorskiej nie ma. Pod kątem edytorskim ostatni z podrozdziałów ma złą numerację, natomiast referencje 3,5,7,8 i 22 nie są kompletne.

Za główne osiągnięcie mgra Sukanta Kumar Jena w przedstawionej pracy doktorskiej uważam wykazanie możliwość celowego dostrajania oddziaływania PMA, DMI, IEC i magnetostaticznego w asymetrycznych strukturach warstwowych metali ciężkich i ferromagnetyków. Tym samym doktorant osiągnął postawiony sobie cel, czyli pokazał, jak grubość warstwy składowej i liczba powtórzeń podstawowego stosu trójwarstwowego (W/Co/Pt) wpływają na omawiane własności magnetyczne.

Podsumowując, stwierdzam, iż mgr Sukanta Kumar Jena uzyskał szereg interesujących rezultatów, które zostały opublikowane w dwóch czasopismach o współczynniku wpływu: 3.097 (*JMMM*) i 8.307 (*Nanoscale*). Jestem przekonana, iż zaprezentowane wyniki badań stanowią istotny wkład w rozwój fizyki magnetyzmu oraz znacznie poszerzają stan wiedzy dotyczący własności magnetycznych cienkich warstw w układach ciężki metal/ferromagnetyk.

Rozprawa doktorska mgra Sukanta Kumar Jena pt.: ”Magnetic properties of asymmetric layered heavy metal/ferromagnet systems” wykonana w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych i w dyscyplinie nauk fizycznych, spełnia wymogi formalne zapisane w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 20 lipca 2018r. Biorąc pod uwagę zarówno kontekst merytoryczny, jak i formalny, wnioskuję o dopuszczenie mgra Sukanta Kumar Jena do dalszych etapów postępowania w celu nadania mu stopnia doktora nauk fizycznych.

Aleksandra Trzaskowska

/podpisała: dr hab. Aleksandra Trzaskowska, prof. UAM/