

Prof. Maciej Krawczyk
Instytut Spintroniki i Informatyki Kwantowej
Wydział Fizyki
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Recenzja pracy doktorskiej
pana mgr inż. Łukasza Frąckowiaka
pt. „Oddziaływania pomiędzy warstwami ferromagnetyczną i ferrimagnetyczną oraz w obrębie
ferrimagnetycznej warstwy poddanej strukturyzacji magnetycznej”.

Praca doktorska mgr inż. Łukasza Frąckowiaka została wykonana w Instytucie Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu pod kierunkiem dra hab. inż. Piotra Kuświka, prof. IFM PAN. Badania naukowe do pracy doktorskiej były współfinansowane ze środków projektu NCN SONATA BIS nr UMO-2015/18/E/ST3/00557 oraz z projektu NCN PRELUDIUM nr UMO-2018/31/N/ST5/01810.

Praca doktorska poświęcona jest badaniu oddziaływań magnetycznych i struktur domenowych występujących między warstwą ferromagnetyczną i ferrimagnetyczną, typu metal przejściowy – ziemia rzadka oraz oddziaływań w jednorodnej warstwie ferrimagnetycznej złożonej z metalu przejściowego i ziemi rzadkiej. Większość wyników przedstawionych w pracy doktorskiej zostało opublikowanych w trzech publikacjach, które ukazały się w renomowanych czasopismach naukowych i w których autor rozprawy jest pierwszym autorem.

Rozprawa doktorska składa się z 7 rozdziałów, abstraktu w języku polskim i angielskim, bibliografii i spisu zamieszczonych ilustracji i tabel. Po zwięzłym wstępie, w rozdziale drugim przedstawiono podstawowe pojęcia z fizyki magnetyzmu związane z podstawową tematyką pracy. Rozdział 3 poświęcono opisowi podstawowych właściwości układów warstwowych złożonych z metali przejściowych i ziemi rzadkich. W rozdziale 4 omówiono wykorzystywane w pracy doktorskiej metody eksperymentalne, w kolejnym rozdziale metodę wytwarzania warstw z analizą rozkładu elementów w układach warstwowych i stopach powstałych w procesie rozpylania magnetronowego z dwóch źródeł. Rozdziały 6 i 7 zawierają omówienie kluczowych wyników otrzymanych w pracy doktorskiej, czyli analizę oddziaływania magnetycznego pomiędzy wielokrotnymi warstwami [Au/Co i Tb/Co (Tb/Fe)] oraz wyniki badania procesu przemagnesowania w tych układach wielowarstwowych i zmian wywołanych bombardowaniem jonami He, w szczególności formowania się dwóch rodzajów ścian domenowych.

Rozdziały wprowadzające w tematykę magnetyzmu zostały napisane w sposób dość zwięzły, ale zawierające definicję podstawowych pojęć i wielkości wykorzystywanych w analizie otrzymanych w pracy wyników eksperymentalnych i opracowanych technologii wytwarzania. Autor nie ustrzegł się błędów edytorskich i interpunkcyjnych, w tym niewłaściwe stosowanie łączników i myślników, literówek (podpis pod rys. 2), brak konsekwencji w oznaczeniach iloczynu skalarnego (kropka w równaniu 2.2, bez kropki w równaniu 2.3), zapis normalną czcionką wielkości oznaczających zmienne (współrzędne przed równaniem 2.6), oznaczanie wielkości

wektorowych ze strzałką nad symbolem (brak strzałki na H_d przed równaniem 2.4), brak konsekwencji w stylu indeksów dolnych (kursywą czy normalną czcionką, np. równanie 2.1 i powyżej). Brakuje definicji skrótu EB, przed jego pierwszym użyciem (str. 4). Równanie 2.8 jest niekompletne, na co wskazuje również wyjaśnienie symboli zawarte w zamieszczonym poniżej tego równania opisie. Warto byłoby wykorzystywać rysunki własnego autorstwa do schematycznego opisu podstawowych struktur i zjawisk, zamiast rysunków zaczerpniętych z książek i artykułów, co pozwoliłoby poprawić jakość samych ilustracji, jak i ujednolicić z tekstem stosowane oznaczenia i język (np. rys. 1, 4, 5, 7, 9, 10 czy 11). Trochę brakuje głębszego wprowadzenia do analizy efektów międzywierzchniowych, które występują, czy mogą wystąpić w układach wielowarstwowych, w szczególności na granicy ferromagnetyka i metalu niemagnetycznego, czy mikroskopowych źródeł anizotropii powierzchniowej. Pod względem merytorycznym pozostaje pewna niejasność w opisie oddziaływania RKKY, w szczególności w układach wielowarstwowych. Równanie 2.13 sugeruje monotoniczny charakter, co nie jest spójne ze zdaniem poniżej tego równania i dalszymi badaniami doktoranta. Brakuje tutaj odnośników do dość bogatej literatury wyjaśniającej i opisującej oscylacyjny charakter tego typu sprzężenia, np. do prac P. Bruno [P. Bruno and C. Chappert, Phys. Rev. Lett., 67, 1602 (1991), P. Bruno, Phys. Rev. B 52, 411 (1995)], czy S. Parkina [Phys. Rev. Lett. 67, 3598 (1991)]. W równaniu 2.15 wprowadzona została stała wymiany A , ale brakuje pokazania jej związku z całką wymiany wprowadzoną w równaniu 2.2. Takie uzupełnienie pozwoliłoby wprowadzić większą spójność do pracy doktorskiej. Czy w równaniu 2.18 jest przedstawione wyrażenie na całkowitą energię ściany domenowej, czy też gęstość energii?

Rozdział 3 stanowi bardzo dobre wprowadzenie w fizykę ferrimagnetyzmu, w szczególności w warstwach złożonych z Tb, Co czy Fe. Bardzo ładnie opisane jest źródło anizotropii w układach warstwowych złożonych z elementów ziem rzadkich i metali przejściowych. Analiza ścian domenowych w układach ferrimagnetycznych bardzo ładnie wprowadza w główny nurt badań doktoranta. Interesujące jest również porównanie stopów i warstw wielokrotnych na bazie tych samych pierwiastków składnikowych. Interesujące byłoby jeszcze przedstawienie jakościowego wyjaśnienia obserwowanych zmian T_{comp} i T_C wraz ze zmianą stężenia Tb, przedstawionych na rysunku 17.

W rozdziale 4 bardzo ładnie została przedstawiona metodyka badawcza stosowana w pracy doktorskiej, w tym omówienie metody rentgenowskiej, pomiarów magnetooptycznych, a przede wszystkim pętli histerezy w materiałach ferrimagnetycznych. Kluczowym dla pracy doktorskiej jest rozdział 5, gdzie został opisany sposób wytwarzania próbek wielowarstwowych i stopowych. Jest on bardzo starannie zredagowany, opatrzone wieloma autorskimi wykresami i wnioskami, kluczowymi dla optymalizacji metody wytwarzania próbek do dalszych badań. W trakcie lektury rozdziału nasuwa się pytanie, czy niecentralne umieszczenie targetu, nieodzwone przy wytwarzaniu układów wielowarstwowych, może powodować powstawanie w nanoszonej warstwie anizotropii płaszczyznowej, jak na przykład w pracach: G. Wang, et al., J. Appl. Phys. 112, 093907 (2012), M. Arif, et al., J. Magn. Magn. Mater. 499, 166072 (2020), oraz, czy autor badał występowanie wyróżnionej osi anizotropii w płaszczyźnie warstw, w wytwarzanych próbkach, na przykład poprzez wykonanie analizy pętli histerezy w zależności od orientacji pola magnetycznego w płaszczyźnie warstwy.

W rozdziałach 6 i 7 przedstawione zostały wyniki badań, które stanowią sedno przedłożonej pracy doktorskiej. W rozdziale 6 w sposób wyczerpujący opisana została analiza wyników badania oddziaływań międzywarstwowych układów Au/Co/Tb/Co(Fe) dokonanych na podstawie pomiaru pętli histerezy w układach klinowych. W szczególności zbadano zależność zmian w pętli histerezy od grubości warstwy Tb i grubości warstwy Au, rozdzielającej

wielowarstwę Au/Co, stanowiącej jako całość układ ferromagnetyczny, od warstwy Tb/Co stanowiącej efektywny układ ferrimagnetyczny. Pokazano, że poprzez zmianę grubości warstwy Tb, co zostało odniesione do średniego stężenia terbu podukładu ferrimagnetycznego, można zmieniać w szerokim zakresie wartość pola magnetycznego przełączającego podukład ferromagnetyczny. Pokazano również, że do osiągnięcia silnego oddziaływania istotne jest by warstwa Au rozdzielająca podukłady ferromagnetyczny i ferrimagnetyczny znajdowała się pomiędzy podwarstwami Co. Zostało pokazane, że dla takiej struktury (i grubości warstwy Au 1 nm) oddziaływanie ma charakter ferromagnetyczny i przyjmuje wartość maksymalną w punkcie kompensacji podukładu ferrimagnetycznego. Interesujące, że dla przekładki złota o takiej samej grubości, ale umieszczonej pomiędzy warstwy Tb i Co sprzężenie ma charakter antyferromagnetyczny. Są to bardzo ciekawe wyniki, które wskazują na nowe możliwości kształtowania oddziaływań w układach warstwowych. Ciekawe jest pytanie, czy dla innych pierwiastków (ziem rzadkich, metali przejściowych czy przekładki niemagnetycznej) można spodziewać się podobnych efektów i jakie mogą być potencjalne zastosowania takich układów warstwowych.

Bardzo interesujące wyniki, opisane w ciekawy i kompletny sposób, zostały zaprezentowane w rozdziale 7. Przeprowadzone badania dotyczą procesu przemagnesowania w strukturyzowanych warstwach magnetycznych Tb/Co. Proces strukturyzacji tych układów wielowarstwowych posiadających prostopadłą anizotropię magnetyczną został przeprowadzony poprzez bombardowanie jonami He^+ . Pokazano, że wzrost dawki jonów powoduje zmniejszenie udziału podsieci Tb w efektywnych właściwościach magnetycznych, a tym samym przesuwanie punktu kompensacji w kierunku większych grubości podwarstw Tb. Zaproponowano bardzo ciekawe wyjaśnienie obserwowanych efektów i ich wykazanie przy wykorzystaniu pomiarów SIMS. Wykorzystując te właściwości, dokonano lokalnego naświetlania jonami He układu poprzez maski, otrzymując regularny układ naświetlonych obszarów o kształcie kwadratowym, rozmieszczonych w sieci kwadratowej materiału o innych właściwościach magnetycznych, w szczególności różniących się polem koercji i różną dominacją podsieci, z dominacją jonów Tb^+ i Co^+ . W dalszej części rozdziału, zostały wyjaśnione obserwowane eksperymentalnie procesy przemagnesowania, między innymi przy wykorzystaniu wprowadzonej koncepcji dwóch rodzajów ścian domenowych, o skończonej i zerowej szerokości. Jest to w mojej ocenie, najważniejszy rozdział pracy doktorskiej, prezentujący nowatorskie badania w obszarze magnetyzmu, otwierający nowy kierunek badawczy, układów warstwowych o efektywnych właściwościach ferrimagnetycznych i właściwościach będących w zainteresowaniu, tak pod względem badań podstawowych jak i potencjalnych zastosowań. Jednym z takich nasuwających się pytań, prawdopodobnie do dalszych badań, jest wpływ niejednorodności i defektów na obserwowane efekty przemagnesowania, wskazywane również przez autora w pracy doktorskiej. Czy na podstawie już przeprowadzonych badań, można stwierdzić jakiego rodzaju defekty i niejednorodności, czyli czy związane z samą morfologią układu warstwowego, czy powstałe w wyniku naświetlania, mają większy wpływ na przedstawione procesy przemagnesowania? Czy można oczekiwać, iż wykorzystanie do naświetlania cięższych jonów może powodować podobne efekty i być wykorzystane do strukturyzacji i lateralnej kontroli właściwości magnetycznych, jak jony He wykorzystane w pracy?

Rozdział 8 stanowi bardzo skrócone podsumowanie najważniejszych otrzymanych wyników naukowych. Podsumowanie to, pozostawia niestety pewien niedosyt, co do potencjalnego znaczenia otrzymanych wyników, w szczególności możliwości ich wykorzystania w technologiach komputerowych. Ograniczone ono jest w pracy doktorskiej tylko do jednego zdania na stronie 80, mianowicie do wskazania potencjalnego wykorzystania w opracowaniu nowej

generacji pamięci magnetycznych, ale brakuje wyjaśnienia czy to może prowadzić do zwiększenia gęstości zapisu, czy energetycznej efektywności oraz jakie parametry i właściwości byłby pod tym względem kluczowe.

Ostatnią częścią w pracy doktorskiej stanowi bibliografia oraz spis rysunków i tabel. Pozycje bibliograficzne zostały dobrane adekwatnie do omawianej tematyki, a jej dobór pokazuje bardzo dobre rozeznanie doktoranta w aktualnej literaturze przedmiotu, jak i znajomość najważniejszych pozycji z omawianej tematyki. Jedyną uwagę którą mam, odnosi się do błędów redakcyjnych w spisie literatury. Mianowicie, w pozycji [18] wydaje mi się, że jest błąd w nazwie czasopisma, w pozycjach [31], [33], [86], [87], [110] i [115] brakuje numerów stron, w [43] brakuje nazwy wydawnictwa, w pozycji [64] „and” jest umieszczone w złym miejscu, niejasne jest znaczenie „.: Imprint :” w pozycji [73] i [76], w [78] jest niepełna nazwa czasopisma i w całości zapisana wielkimi literami oraz błędy edytorskie w pozycjach [75], [80], [81] i [95].

Podsumowując, stwierdzam, że mgr inż. Łukasz Frąckowiak uzyskał szereg interesujących rezultatów, które zostały opublikowane w bardzo dobrych czasopismach naukowych i w interesujący sposób opisane w przedłożonej pracy doktorskiej. Jestem przekonany, iż przedstawione badania stanowią istotny wkład w rozwój fizyki magnetyzmu, w szczególności aktualnie szybko rozwijającego się obszaru fizyki cienkowarstwowych układów ferrimagnetycznych. Przedstawione badania prowadzone były w ramach dwóch projektów naukowych, w jednym doktorant był wykonawcą, w drugim, z programu Preludium, kierownikiem, jednoznacznie wskazując na wysokie kompetencje kandydata i możliwość samodzielnej pracy naukowej. Cały dorobek mgr inż. Łukasza Frąckowiaka jednoznacznie wskazuje, że jest on dojrzałym naukowcem, o bogatym dorobku naukowym i doświadczeniu grantowym.

Podsumowując, uważam, że przedstawiona rozprawa z nawiązką spełnia wszystkie wymogi Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Łukasza Frąckowiaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Ze względu na bardzo wysoką wartość naukową zaprezentowanych badań naukowych, potwierdzone pierwszo-autorskimi publikacjami w renomowanych czasopismach naukowych, dogłębną analizę oddziaływań magnetycznych i struktury domenowej w wielowarstwowych układach o ferrimagnetycznych właściwościach, wnoszę również o wyróżnienie pracy doktorskiej pana mgr inż. Łukasza Frąckowiaka.

Prof. Maciej Krawczyk

