



Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej
Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki

Instytut Fizyki

pl. Marii Curie-Skłodowskiej 1, 20-031 Lublin tel. (081) 537 61 43 fax (081) 537 61 91 e-mail: fizyka@umcs.lublin.pl
www.fizyka.umcs.lublin.pl

dr hab. Ryszard Zdyb, prof. UMCS
Zakład Fizyki Powierzchni i Nanostruktur
e-mail: ryszard.zdyb@umcs.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Barbary Matlak
pt. "Polaryzacja wymienna w epitaksjalnych układach Fe/CoO i Co/CoO"

Układy ferromagnetyk/antyferromagnetyk są przedmiotem bardzo wielu prac badawczych zarówno eksperymentalnych jak i teoretycznych. Źródła tego zainteresowania wynikają z pobudek czysto poznawczych, a także z szerokich możliwości praktycznych zastosowań - tego typu układy są wykorzystywane w różnorodnych elementach spintronicznych. Mimo intensywnych badań wciąż wiele kwestii dotyczących natury obserwowanych zjawisk pozostaje nierozstrzygniętych. Wśród najważniejszych są szczegóły dotyczące morfologii i struktury magnetycznej międzypowierzchni takich układów, magnetycznych oddziaływań pomiędzy atomami znajdującymi się na granicy obu ośrodków i ich wzajemnego wpływu na podstawowe właściwości magnetyczne np. kierunek namagnesowania, czy też anizotropię magnetyczną.

Rozprawa doktorska mgr Barbary Matlak wpisuje się w nurt prac nad układami ferromagnetyk/antyferromagnetyk i poświęcona jest eksperymentalnym badaniom ich właściwości strukturalnych i magnetycznych. Autorka studiuje dwuwarstwy Fe/CoO i Co/CoO osadzone na podłożach W(110) i MgO(111).

Praca doktorska została wykonana na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Promotorem rozprawy jest dr hab. Tomasz Ślęzak.

Napisana w języku polskim rozprawa liczy 99 stron i składa się ze wstępu, sześciu rozdziałów i bibliografii zawierającej 116 pozycji.

W pierwszym rozdziale przedstawione zostały ogólne informacje związane z magnetycznymi właściwościami układów o obniżonej wymiarowości. Autorka dużo miejsca poświęca

na omówienie zjawiska polaryzacji wymiennej i prezentacji najważniejszych modeli teoretycznych opisujących to zjawisko.

W rozdziale drugim koncentruje się na przedstawieniu stanu wiedzy dotyczącego układów będących głównym przedmiotem rozprawy, czyli warstw Fe, Co i CoO wytwarzanych na podłożu W(110) i MgO(111). W szczególności omawia dostępne w literaturze dane dotyczące zjawiska polaryzacji wymiennej w warstwach Co-CoO, a także prezentuje zjawisko reorientacji wektora namagnesowania w układzie Fe/W(110), szeroko i szczegółowo badane w ostatnich latach przez krakowską grupę.

Kolejny rozdział dotyczy metodyki badań. W tej części rozprawy Autorka w krótki sposób przedstawia technikę LEED i koncentruje się na teoretycznym opisie magnetoptycznego efektu Kerra (MOKE), który służył jako główne źródło informacji o magnetycznych właściwościach studiowanych układów. Przedstawia konfiguracje (geometria podłużna i polarna), w których zostały przeprowadzone pomiary. Dość szczegółowo omawia programy komputerowe do sterowania pomiarami MOKE i analizy otrzymanych w tych eksperymentach wyników.

Najważniejsze rozdziały, czwarty i piąty, zawierają wyniki przeprowadzonych przez Autorkę rozprawy eksperymentów oraz ich interpretację. W rozdziale czwartym znajdują się rezultaty badań otrzymane dla układu CoO/Fe/W(110), a w piątym – dla Co/CoO/MgO(111). Oba rozdziały zakończone są krótkimi podsumowaniami, w których zostały przedstawione najważniejsze wyniki i wnioski.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie całej rozprawy doktorskiej.

Zdefiniowany we Wstępie ogólny cel rozprawy to zbadanie magnetycznych właściwości układów zawierających antyferromagnetyk (tlenek kobaltu) i ferromagnetyk (żelazo lub kobalt). Wśród szczegółowych celów mgr Barbara Matlak wymienia: określenie wpływu anizotropii magnetycznej warstwy żelaza na anizotropię magnetyczną warstwy tlenku kobaltu oraz wpływu zjawiska polaryzacji wymiennej na anizotropię magnetyczną warstwy kobaltu. Należy podkreślić fakt, że do realizacji postawionych zadań Doktorantka wykonuje eksperymenty, w których wykorzystuje klinowe próbki. Tak przygotowane warstwy umożliwiają określenie zależności różnych wielkości fizycznych od grubości warstw przy zapewnieniu tych samych warunków eksperymentalnych preparatyki próbek.

Do realizacji pierwszego z postawionych zadań badawczych Doktorantka wykorzystuje warstwy Fe osadzone na powierzchni W(110). Od wielu lat wiadomo, że w układzie tym zachodzi reorientacja wektora namagnesowania (SRT) od kierunku [1-10] do kierunku [001] wraz ze wzrostem grubości warstwy żelaza. Oznacza to również duże zmiany w efektywnej anizotropii magnetycznej Fe, które, gdy warstwa Fe jest w bezpośrednim kontakcie z antyferromagnetykiem CoO, wpływają na właściwości magnetyczne międzypowierzchni i całego układu, np. na polaryzację wymienną. Efekt przejawia się między innymi w nietypowej ogólnej zależności funkcyjnej pola polaryzacji wymiennej H_{EB} od grubości warstwy d ferromagnetyka. Zamiast spodziewanej odwrotnej proporcjonalności stwierdzono zależność jak $1/d^2$. Dodatkowo w badanym układzie występują bardzo wyraźne odstępstwa od tej zależności w pobliżu grubości, przy której zachodzi zmiana kierunku osi łatwej namagnesowania w Fe.

Podejmując próbę interpretacji uzyskanych wyników Doktorantka wyklucza istnienie niekolinearnych struktur w warstwie Fe. Jednak występowanie niekolinearnej reorientacji wektora namagnesowania w układzie Fe/W(110) zostało wykazane przez grupę profesora Koreckiego w eksperymentach rezonansowego rozpraszania jądrowego (Phys. Rev. Lett. 105, 027206 (2010)). W związku z tym faktem pojawia się pytanie czy można całkowicie wykluczyć możliwość formowania planarnej ściany domenowej w rozważanym układzie i jej wpływu na obserwowaną zależność H_{EB} od grubości warstwy tak jak zostało to zasugerowane przez Autorkę?

Korzystając z wyników symulacji pętli histerezy Doktorantka wyznaczyła objętościowe i powierzchniowe udziały stałych anizotropii magnetycznej rozważanego układu, a także zmiany kierunku momentów magnetycznych warstwy atomów antyferromagnetyka graniczącej z ferromagnetyczną warstwą Fe. W tej ostatniej zależności widać wyraźnie wpływ anizotropii magnetycznej ferromagnetyka na kierunek namagnesowania nieskompensowanej magnetycznie warstwy atomów antyferromagnetyka. W pobliżu grubości warstwy Fe odpowiadającej reorientacji wektora namagnesowania kierunek momentów magnetycznych w sąsiadującej warstwie atomów antyferromagnetyka ustawia się wzdłuż osi łatwej namagnesowania CoO. Występowanie tego efektu wskazuje na możliwość sterowania polaryzacją wymienną w tego typu układach poprzez zmiany magnetycznej anizotropii warstwy ferromagnetyka. Jest to niewątpliwie bardzo istotne osiągnięcie rozprawy.

Realizacja drugiego celu, czyli wykazanie wpływu zjawiska polaryzacji wymiennej na anizotropię magnetyczną ferromagnetyka została przeprowadzona w badaniach układu dwuwarstw Co/CoO osadzanych na podłożu MgO(111).

W tej serii eksperymentów mgr Barbara Matlak prezentuje wyniki świadczące o reorientacji wektora namagnesowania w warstwie kobaltu wywołanej zarówno zmianami grubości jak i temperatury. Wektor magnetyzacji obraca się od kierunku leżącego w płaszczyźnie warstwy do kierunku prostopadłego do powierzchni wraz z obniżaniem temperatury i zmniejszaniem grubości warstwy. Na podstawie obserwacji zmian znormalizowanego namagnesowania remanencji i pola polaryzacji wymiennej od wartości i zwrotu pola chłodzącego Autorka wnioskuje o wpływie polaryzacji wymiennej na anizotropię magnetyczną ferromagnetycznej warstwy kobaltu. Wniosek ten nie wydaje się jednak być tak oczywisty, co również sugeruje wypowiedź samej Doktorantki: „Rezultat ten wskazuje na możliwy wpływ zjawiska *exchange bias* na prostopadłą anizotropię magnetyczną...”. Niemniej jednak wytworzenie układu wykazującego efekt polaryzacji wymiennej i posiadającego prostopadłą anizotropię magnetyczną jest niewątpliwie bardzo ważnym osiągnięciem mającym również duży potencjał aplikacyjny.

Prezentując interpretację nietypowej zależności pola H_{EB} od temperatury w badanym układzie Autorka stwierdza, że „...niewielka część (ok. 1%) interfejsowych spinów w warstwie AFM jest silnie sprzężona ze spinami wewnętrznej części tej warstwy i odpowiada za niemal stałą wartość pola H_{EB} w szerokim zakresie temperatur...”. Szkoda, że ta myśl nie została szerzej rozwinięta i uzasadniona.

Z pewnością wiele dodatkowych wskazówek dotyczących procesów zachodzących na międzypowierzchni Co/CoO, w tym związanych z właściwościami magnetycznymi,

dostarczyłoby poznanie szczegółów natury przejścia SRT w badanym układzie. Realizacja takiego tematu mogłaby być jednak przedmiotem niezależnej rozprawy doktorskiej.

Podsumowując recenzję należy stwierdzić, że projekt badawczy, który postawiła przed sobą mgr Barbara Matlak jest niezwykle ciekawy i aktualny. Otrzymane wyniki są bardzo wartościowe i w sposób istotny zwiększają naszą wiedzę na temat wzajemnych oddziaływań magnetycznych warstw ferromagnetyka i antyferromagnetyka. Realizacja projektu świadczy o opanowaniu przez Doktorantkę wiedzy, również praktycznej, dotyczącej technik i technologii wytwarzania próżni, osadzania warstw i wielu powierzchniowo czułych technik eksperymentalnych.

Układ rozprawy jest prawidłowy. Kolejne rozdziały tworzą logiczny ciąg. Całość napisana jest w sposób bardzo przejrzysty i czytelny, a brak uchybień językowych sprawia, że rozprawę czyta się z przyjemnością.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Barbary Matlak stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym stawiane rozprawom doktorskim i może być dopuszczona do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Lublin, 29.01.2018

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the end, likely belonging to the reviewer.