

Poznań, 30.06.2020 r.

dr hab. inż. Piotr Kuświk
Instytut Fizyki Molekularnej
Polskiej Akademii Nauk

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Drózdza
pt. „Właściwości magnetyczne nanostruktur epitaksjalnych na bazie stopu FeRh”**

Rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Drózdza dotyczy właściwości magnetycznych układów warstwowych, w których jedną z warstw stanowi stop FeRh. Badania w niej prezentowane zostały wykonane w Katedrze Fizyki Ciała Stałego na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie. Promotorem pracy jest prof. dr hab. Tomasz Ślęzak, a promotorem pomocniczym dr hab. Michał Ślęzak. Realizacja badań prezentowanych w rozprawie finansowana była przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu OPUS (2015/19/B/ST3/00543).

Przedstawiona do recenzji rozprawa dotyczy badań wyjątkowych właściwości magnetycznych warstw FeRh, polegających na zmianie uporządkowania magnetycznego pomiędzy stanem ferromagnetycznym (FM) a stanem antyferromagnetycznym (AFM) poprzez zmianę temperatury. Pomimo iż to przejście zostało odkryte w 1938 roku, to do dziś jest intensywnie badane, w szczególności w układach cienkowarstwowych. Podyktowane jest to możliwością wykorzystania tego efektu do zapisu informacji, o czym Doktorant wielokrotnie wspomina w swojej rozprawie. Podjęta przez Niego tematyka badań jest bardzo interesująca i skupia się głównie na oddziaływaniach bezpośrednich i pośrednich pomiędzy warstwą FeRh a innymi warstwami ferromagnetycznymi, tj. Co i Fe oraz wpływie tych oddziaływań na orientację spinów zarówno w warstwie FM, jak i FeRh. Badania te przeprowadzone są dla warstw epitaksjalnych nanoszonych na podłoża tlenku magnezu i wolframu w warunkach ultra wysokiej próżni.

Recenzowana rozprawa doktorska jest zbiorem opublikowanych czterech prac z tzw. listy filadelfijskiej uzupełnionych dodatkowym komentarzem Doktoranta. Taka forma prezentacji osiągnięć jest niewątpliwie dużo łatwiejsza w przygotowaniu niż „klasyczna” rozprawa zawierająca szczegółowy opis uzyskanych wyników oraz stosowanych metod badawczych. Brak tych poszerzonych informacji utrudnia nieco całościową ocenę uzyskanych wyników badań. Jest to szczególnie ważne, wówczas gdy w artykułach pojawiają się odniesienia do wyników nie pokazanych w publikacjach, nie ma ich również w komentarzu do rozprawy. Szkoda, że Doktorant nie dołączył do rozprawy suplementu pracy z Phys. Rev. Appl., do którego znajduje się odwołanie w treści tego artykułu. Nie jest to jednak duża wada, gdyż suplement ten można odnaleźć na stronach czasopisma. Zaletą tej formy dysertacji jest fakt, że główny materiał rozprawy został już oceniony przez niezależnych recenzentów powołanych przez redakcję czasopism i w mojej ocenie prezentują wysoką wartość naukową.

Rozprawa rozpoczyna się streszczeniami w języku angielskim i polskim, po których Doktorant wymienia listę publikacji wchodzących w skład rozprawy. Następnie przedstawiony jest komentarz do rozprawy doktorskiej zawierający 5 rozdziałów oraz spis literatury. We wstępie Autor głównie skupił się na opisie właściwości strukturalnych i magnetycznych stopu FeRh, który w funkcji temperatury zmienia swój stan magnetyczny pomiędzy stanami FM a AFM. W tej części zawarł również krótki opis dotyczący anizotropii magnetycznej. Następnie omawia możliwości zastosowania warstw FeRh niesprzężonych jak i sprzężonych z innymi warstwami FM do termicznego zapisu informacji. Szkoda, że w tej części rozprawy autor nie pokusił się o dogłębszy opis anizotropii magnetycznej, w szczególności w odniesieniu do stopu FeRh i warstw FM badanych w rozprawie. Zabrakło również podstawowych opisów oddziaływań magnetycznych pośrednich i bezpośrednich, które są kluczowe w interpretacji wyników badań, do których Doktorant często odnosi się w treści swoich publikacji.

W rozdziale drugim zostały wyszczególnione cele i omówiono koncepcję rozprawy. Głównym celem było zastosowanie przejścia fazowego AFM-FM do temperaturowego sterowania właściwościami magnetycznymi epitaksjalnych heterostruktur, zawierających warstwę FeRh. Dodatkowo Autor podjął badania zmierzające do weryfikacji doniesień teoretycznych na temat niejednorodności strukturalnych i magnetycznych warstw FeRh, naniesionych na podłoże MgO i przykrytych warstwą Au. Cel pracy jest klarownie i jednoznacznie sformułowany, a jednocześnie bardzo ambitny. Po zapoznaniu się z rozprawą nie mam wątpliwości, że został on osiągnięty.

W rozdziale trzecim Doktorant opisuje metody eksperymentalne, które wykorzystywał do realizacji badań. Ważną rolę w tych badaniach odgrywa preparatyka dobrej jakości warstw, które zostały naniesione przy użyciu metody epitaksji z wiązek molekularnych w warunkach ultra wysokiej próżni. Kluczowe warstwy FeRh nanoszone były wykorzystując równoczesne osadzanie z dwóch źródeł. Taka metoda pozwala uzyskać stop FeRh o pożądanym składzie, który w badaniach prowadzonych przez Doktoranta odgrywa istotną rolę, ponieważ tylko w wąskim zakresie stężeń atomów Rh zachodzi przejście AFM-FM. Ta technika nanoszenia jest również stosowana do wytwarzania warstw z gradientem składów. Dlatego istotne jest, aby Doktorant wyjaśnił jakie warunki zostały zapewnione, aby uzyskać jednorodność wytwarzanych warstw FeRh oraz w jaki sposób kontrolował ich skład. Do badań właściwości magnetycznych stosowany był magnetometr wykorzystujący magnetoptyczny efekt Kerra (MOKE) w dwóch konfiguracjach: podłużnej i polarnej oraz spektroskopia Mössbauera (CEMS). Spektroskopia ta pozwala również na analizę struktury wytwarzanych warstw, która dodatkowo kontrolowana była przy użyciu metody dyfrakcji elektronów niskoenergetycznych. Zarówno pomiary MOKE jak i CEMS prowadzane były w funkcji temperatury.

W zasadniczej części rozprawy (rozdział 4), opisane zostały najważniejsze wyniki i osiągnięcia prezentowane w pracach stanowiących rozprawę. W publikacji A, gdzie badano warstwę Co/FeRh/W(110), zaobserwowano, że następuje zmiana kierunku osi łatwego namagnesowania warstw Co pomiędzy wzajemnie prostopadłymi kierunkami leżącymi w

płaszczyźnie podłoża W(100), tj. kierunkami [1-10] oraz [001]. Zmiana ta jest podyktowana przejściem AFM-FM warstwy FeRh, przy czym w stanie FM obserwuje się kolinearne sprzężenie pomiędzy spinami warstwy Co a FeRh, natomiast w stanie AFM, w wyniku oddziaływania typu spin-flop z FeRh, następuje reorientacja osi łatwego namagnesowania Co. Należy podkreślić, że w części komentarza Doktorant w znaczący sposób rozszerzył opis odnoszący się do tej publikacji, gdyż uzyskane rezultaty stanowią ważny krok w kierunku kontrolowanego przełączania oraz stabilizacji orientacji wektora namagnesowania warstwy Co w dwóch jednoznacznie określonych kierunkach poprzez magnetyczny stan warstw FeRh. W związku z tym, że to przełączanie odbywa się bez użycia pola magnetycznego, a jedynie poprzez zmianę temperatury, układ taki może być potencjalnym kandydatem do termicznie indukowanego magnetycznego zapisu informacji, w którym dwa stabilne kierunki namagnesowania mogą odpowiadać logicznym stanom „0” i „1”. Uzyskany wynik jest niebywale interesujący, gdyż w ostatnich latach na całym świecie prowadzone są zaawansowane badania naukowe w dziedzinie magnetyzmu, których celem jest opracowanie skutecznej metody zapisu informacji, przy minimalnym wkładzie energetycznym. W przypadku warstw Co/FeRh/W(110) zamiana ta zachodzi w stosunkowo wąskim przedziale temperatur, co oznacza, że energia niezbędna do zapisu informacji będzie mała. To ma jednak swoją wadę, gdyż niewielka zmiana temperatury będzie prowadziła do zmiany stanu magnetycznego i w konsekwencji do utraty danych. Dlatego, aby spełnić warunek stabilności termicznej, o której Doktorant pisze w pracy „...stored information is not only thermally protected, but it also ...”, należy zapewnić stosunkowo dużą szerokość temperaturowej histerezy (ΔT). Nasuwa się jednak pytanie, czy istnieje możliwość poszerzenia tej histerezy, przy jednoczesnym zachowaniu temperatury przejścia w okolicach temperatury pokojowej?

W drugiej publikacji z cyklu (praca B), Doktorant badał heterostruktury Fe/FeRh(5nm i 10nm) naniesione na podłożu W(110). Pomiar magnetyczny wykazały, że dla obu badanych grubości warstw FeRh, warstwa Fe wykazuje jednoosiową anizotropię magnetyczną wzdłuż kierunku [001], bez względu na stan magnetyczny FeRh. Jest to sytuacja odmienna w porównaniu z anizotropią warstwy Co w heterostrukturach Co/FeRh. Bardzo ciekawa jest również obserwacja, że w przypadku Fe/FeRh, zachodzi reorientacja kierunków ustawienia spinów w warstwie AFM (FeRh), a nie w warstwie FM (Fe). Wyniki te zostały również potwierdzone w pomiarach CEMS. Ponadto zaobserwowano duży wzrost pola koercji, w sytuacji przejścia od stanu FM do stanu AFM stopu FeRh i powiązano go z obecnością ortogonalnego oddziaływania typu spin-flop.

Analizując wyniki przedstawione w pracach A i B, nasuwa się kilka pytań, na które być może Doktorant odpowie w trakcie obrony. Biorąc pod uwagę, że jednoosiowa anizotropia w kierunku (110) jest typowa dla warstw Fe(110), czy można wnioskować, że jest na tyle silna, że oddziaływanie z warstwą FeRh nie jest w stanie obrócić kierunku namagnesowania Fe, podobnie jak miało to miejsce z warstwą Co? Czy inne czynniki mogą mieć istotny wpływ na wzajemne ustawienia kierunków spinów w warstwach Fe(Co) i FeRh? Zarówno w układzie Co/FeRh i w Fe/FeRh zauważono, że przejście FM-AFM jest przesunięte w stronę niższych temperatur, w porównaniu ze stopem FeRh. W pracy A autorzy wiążą to z oddziaływaniem

wymiennym z warstwą Co i/lub z interdyfuzją na interfejsie Co/FeRh. Natomiast w pracy B powołują się na efekty bliskości. Wiadomo, że temperatura przejścia AFM-FM przesuwa się w kierunku niższych temperatur wraz ze zmniejszającą się koncentracją atomów Rh. Czy w obu przypadkach można sądzić, że ulega zmianie nominalny skład FeRh poprzez dodatkowy wkład od warstw Co(Fe)?

W pracy C badano oddziaływanie pomiędzy Fe a stopem FeRh, poprzez niemagnetyczną przekładkę Au w formie klina o grubości od 0.4 nm do 4nm. W takim układzie wykazano, że pośrednie oddziaływanie umożliwia kontrolę kierunku namagnesowania warstw FeRh w stanie FM, poprzez odpowiedni dobór grubości przekładki Au oraz temperaturę. Analiza zmian temperaturowych pętli histerezy dla grubości Au, przy której występują najsilniejsze zmiany, pozwoliła wykazać, że następuje dwukrotna zmiana kierunku łatwego namagnesowania warstwy Fe. Doktorant wiąże tę zmianę z dominacją własnej anizotropii warstwy Fe oraz z osłabieniem oddziaływania spin-flop podczas przejścia od stanu AFM do FM, a dla wyższych temperatur z oddziaływaniem magnetostatycznym wywołanym szorstkością interfejsu. Szkoda, że Doktorant nie ustosunkował się do roli oddziaływania typu RKKY, które ma charakter oscylacyjny w funkcji grubości niemagnetycznej przekładki. Wiadomo, że w przypadku przekładki Au takie oddziaływanie było obserwowane np. w układach warstwowych typu Co/Au/Co czy FM/Au/Ferrimagnetyk.

W publikacji D Doktorant skupia się na potwierdzeniu doniesień teoretycznych, które przewidują, że w układzie FeRh/MgO istnieje resztkowa faza FM w nominalnej fazie AFM stopu FeRh, która ma prostopadłą anizotropię magnetyczną. Jego badania z wykorzystaniem CEMS i MOKE jednoznacznie dowodzą, że po schłodzeniu do nominalnej fazy AFM stopu FeRh zawiera on fazę FM, która charakteryzuje się anizotropią prostopadłą i jest zlokalizowana na interfejsie z podłożem MgO. Oszacowana grubość tej warstwy wynosi 1-2ML stopu FeRh. Z badań temperaturowych wynika, że charakter histerezowy, który jest typowy dla przejścia pomiędzy stanami AFM-FM, jest również obserwowany dla składowej prostopadłej. W przypadku tych badań kluczowe okazały się badania CEMS, które potwierdziły obserwowane stany magnetyczne, a dodatkowo pozwoliły określić obecność fazy AFM w wysokotemperaturowej fazie FM. Autorzy sugerują, że naprężenia ściskające mogą być odpowiedzialne za stabilizację fazy AFM w trakcie przejścia pomiędzy AFM a FM. Naprężenia te zlokalizowane są na interfejsie pomiędzy FeRh i Au. Ta resztkowa faza nie bierze udziału w przejściu AFM-FM i ulega przejściu do fazy paramagnetycznej powyżej temperatury Néela.

Rozprawa kończy się obszernym podsumowaniem, które zawiera najważniejsze wnioski przedstawione w kolejnych publikacjach oraz załączonymi oryginalnymi publikacjami wchodzącymi w skład rozprawy. Rozprawa doktorska jest napisana bardzo starannie i zawiera niewiele błędów edytorskich. Czyta się ją bardzo płynnie, a jej redakcja i forma prezentacji stoi na wysokim poziomie.

Przedstawione prace stanowią bardzo ciekawe uzupełnienie wiedzy na temat wykorzystania oddziaływań w układach warstwowych do kontroli stanu magnetycznego warstw ferromagnetycznych. Tym samym wnoszą one istotny wkład do naszej wiedzy w

zakresie magnetyzmu cienkich warstw. Zbiór publikacji tworzy spójną i logiczną całość programu badawczego realizowanego przy wykorzystaniu odpowiednio dobranych metod eksperymentalnych, co umożliwiło wnikliwą interpretację wyników. W efekcie osiągnięty został zamierzony cel rozprawy doktorskiej, a uzyskane rezultaty, pomimo iż należą do grupy badań podstawowych, mogą w przyszłości posłużyć do opracowania układów warstwowych do przechowywania informacji. Artykuły opublikowane zostały w 4 bardzo dobrych czasopismach fizycznych, znajdujących na tzw. liście filadelfijskiej. Jeden artykuł został opublikowany w *Physical Review Applied* (IF2018:4,532), dwa artykuły w *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (IF2018: 2,683) oraz jeden w *AIP Advance* (IF2018: 1,579). Pomimo iż prace te online ukazały się niedawno, to niektóre z nich już zostały zauważone i zacytowane przez innych naukowców. W szczególności dotyczy to publikacji w *Physical Review Applied*, która w bazie Web of Science ma 7 cytowań, z czego 3 bez autocytowań. Jestem przekonany, że pozostałe publikacje zostaną również szybko zauważone w kręgu naukowców zajmujących się anizotropią i oddziaływaniami międzywarstwowymi w cienkich warstwach. Należy również podkreślić, że Doktorant we wszystkich czterech pracach jest pierwszym autorem, a jednocześnie autorem korespondencyjnym. Ten fakt oraz przedstawione oświadczenia współautorów pozwalają stwierdzić, że mgr inż. Piotr Drożdż odegrał wiodącą rolę w powstawaniu tych publikacji.

Rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Drożdża pt. „Właściwości magnetyczne nanostruktur na bazie stopu FeRh” dotyczy bardzo ciekawej grupy materiałów i biorąc pod uwagę omówione wcześniej wyniki badań opublikowane w czterech publikacjach oraz ich wkład w rozwój fizyki magnetyzmu cienkich warstw stwierdzam, że spełnia ona wymagania ustawowe stawiane kandydatom do stopnia doktora. W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie mgra inż. Piotra Drożdża do dalszych etapów przewodu doktorskiego, a w przypadku wyróżniającego się przebiegu obrony i odpowiedzi na moje pytania postawione w recenzji, będę wnioskował o wyróżnienie recenzowanej rozprawy.



