

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Raneckiej
pt. „Właściwości magnetyczne warstw wielokrotnych V/Fe i Nb/Fe ”

Tematyka i cel pracy

Recenzowana praca doktorska dotyczy badań własności strukturalnych oraz magnetycznych wielowarstwowych układów V/Fe i Nb/Fe. W szczególności autorka podjęła próbę określenia rodzaju oddziaływań międzywarstwowych w układach V/Fe i Nb/Fe oraz dla układu Nb/Fe modyfikacji oddziaływania międzywarstwowego wywołanej procesem wodorowania.

Wielowarstwowe układy magnetyczne w których warstwy ferromagnetyczne oddzielone są niemagnetycznymi przekładkami stanowią od wielu lat obszar intensywnych badań zarówno teoretycznych jak i eksperymentalnych, ze względów poznawczych oraz przede wszystkim w związku z ich potencjalnym zastosowaniem w technologii magnetycznego zapisu informacji. Zjawiskami fizycznymi, które stanowią źródło tak silnego zainteresowania są międzywarstwowe sprzężenie wymienne o oscylacyjnym z grubością niemagnetycznej przekładki charakterze oraz często współistniejący gigantyczny magnetoopór. Pomimo tego, że postęp w dziedzinie fizyki nanostruktur magnetycznych spowodował wyraźny spadek zainteresowania układami planarnymi na bazie ferromagnetyków w porównaniu z układami lateralnie ograniczonych nanostruktur, osobliwości struktury spinowej nazywanych skyrmionami czy w końcu układami warstwowymi z dominującą rolą podwarstw antyferromagnetycznych, to w przypadku wielu układów wielowarstwowych typu ferromagnetyk/warstwa niemagnetyczna (FM/NM) o dodatkowo różnych orientacjach krystalograficznych międzywarstwowe oddziaływanie wymienne nie zostało w pełni przebadane. Uwzględnienie w opisie oddziaływań międzywarstwowych procesów indukowania momentów magnetycznych w warstwach oddzielających podwarstwy ferromagnetyczne, oraz rzeczywistej struktury międzywierzchni (interfejsu) ferromagnetyk/warstwa niemagnetyczna przekładka powoduje, że obraz sprzężeń magnetycznych w układach wielowarstwowych staje się bardzo złożony w porównaniu do

wyidealizowanych układów z idealnymi interfejsami i niemagnetyczną przekładką która poprzez polaryzacje spinową elektronów przewodnictwa pośredniczy w długozasięgowych oddziaływaniach wymiennych. Skutkiem tego porównanie wyników badań eksperymentalnych z obliczeniami teoretycznym jest często trudne i niezadawalające. W recenzowanej rozprawie uzyskano znaczący postęp w analizie oddziaływań wielowarstwowych dla układów V/Fe oraz Nb/Fe oraz pokazano istotny wpływ wodorowania na sprzężenia magnetyczne w układzie Nb/Fe. Biorąc pod uwagę odwracalność procesu absorpcji wodoru i związaną z nią możliwość kontroli struktury magnetycznej układu Nb/Fe uważam, że tę część badań za szczególnie wartościową nie tylko z punktu widzenia poznawczego ale również ze względu na zastosowań np. w technologii magnetycznych sensorów wodoru.

W związku z powyższym, w mojej opinii, tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Raneckiej jest aktualna i ważna z punktu widzenia nie tylko badań podstawowych lecz również z punktu widzenia zastosowań.

Treść pracy

Przedstawiona praca napisana jest w języku polskim o poprawnym stylu i liczy 107 stron podzielonych na sześć rozdziałów.

W rozdziale pierwszym autorka zamieściła krótki wstęp i sformułowała cele pracy. Rozdział drugi (w szczególności podrozdział 2.1) wprowadza czytelnika w fizykę zjawiska sprzężenia międzywarstwowego dla układu typu FM/NM/FM. Autorka w oparciu o fenomenologiczny opis energii oddziaływania dwóch warstw ferromagnetycznych oddzielonych niemagnetyczną przekładką dyskutuje (również w oparciu o symulacje w ramach modelu Stonera-Wolfartha) występowanie efektywnego oddziaływania międzywarstwowego dla różnych wielkości stałych sprzężenia biliniowego J_1 oraz bikwadratowego J_2 . Ponadto w rozdziale tym znaleźć można wyczerpujący opis mechanizmów fizycznych odpowiedzialnych za sprzężenie bikwadratowe oparty o dostępne dane literaturowe. Niestety, w mojej opinii brakuje podobnie równie bogatego (jak w przypadku sprzężenia bikwadratowego) opisu modeli oddziaływania biliniowego (RKKY, model studni potencjału) z których wynika na przykład fascynujący efekt oscylacji stałej J_1 z grubością niemagnetycznej przekładki, który to efekt jest niezwykle ważny z punktu widzenia przedstawionych w pracy badań własnych. W tym samym rozdziale (podrozdział 2.2) autorka zwięźle i obszernie opisuje zjawisko gigantycznego magnetooporu oraz dyskutuje pozostałe zjawiska magnetoporowe z uwzględnieniem możliwych mechanizmów

inwersyjnego zjawiska GMR w układach warstwowych. Podrozdziały 2.3 i 2.4 stanowią analityczny i wyczerpujący przegląd dostępnych danych literaturowych dotyczących właściwości magnetycznych i transportowych układów wielowarstwowych V/Fe i Nb/Fe. Z małym zastrzeżeniem sformułowanym powyżej, uważam rozdział drugi pracy za czytelny i informatywny, a dobór cytowanej literatury za bardzo trafny.

W rozdziale trzecim opisane zostały zastosowane w opisanych w pracy badaniach metody eksperymentalne. W szczególności opisana została aparatura ultrawysokiej próżni wyposażona w układ do nanoszenia warstw metodą magnetronowego rozpylania jonowego oraz komorę dedykowaną metodzie XPS służącej określeniu składu chemicznego próbek. Badania strukturalne wytworzonych próbek autorka prowadziła w oparciu o pomiary ex-situ metodą dyfrakcji rentgenowskiej której podstawy fizyczne opisane zostały skrótowo w podrozdziale 3.2.1. Badania morfologii powierzchni badanych wielowarstw (rozdział 3.2.2) oparte była o pomiary skaningowej mikroskopii sił atomowych (AFM) oraz skaningowej mikroskopii tunelowej (STM). Biorąc pod uwagę fakt, że zastosowane techniki badawcze takie jak XRD, AFM, STM są w dzisiejszych czasach standardem w badaniach strukturalnych cienkich warstw wydaje się, że w tej części pracy można było z powodzeniem pominąć opisy metod XRD, AFM czy STM, przy założeniu użycia odpowiednich licznie dostępnych odnośników literaturowych. W dalszej części rozdziału trzeciego autorka przedstawiła opis metod zastosowanych w badaniach właściwości magnetycznych (PPMS, VSM) oraz transportowych pomiarach magnetooporu prowadzonych metodą czteropunktową z prądem w płaszczyźnie warstwy. Podsumowując ten rozdział pracy jest oczywiście konieczny i został poprawnie napisany choć jak wspomniałem wyżej niektóre jego części mogłyby zostać zastąpione odesłaniem czytelnika do odpowiednich pozycji literaturowych.

Kolejny czwarty rozdział pracy dokumentuje oryginalne wyniki badań przeprowadzonych przez autorkę rozprawy i współpracowników wraz z ich analizą i interpretacją. Należy podkreślić, że opisane w tych rozdziałach badania opublikowane zostały w czterech publikacjach w Acta Physica Polonica A, których pierwszą autorką jest mgr inż. Agnieszka Ranecka. Biorąc pod uwagę fakt, że wspomniane prace zostały opublikowane w latach 2015-2018 pojawia się refleksja, że praca mogłaby powstać wcześniej co sprawiłoby że wyniki w niej opisane byłyby bardziej aktualne. Generalnie, metodyka badań, których wyniki stanowią treść rozdziału 4 polegała na wytworzeniu układów wielowarstwowych V/Fe i Nb/Fe przeprowadzeniu badań ich struktury i morfologii a następnie pomiarów pętli histerezy magnetycznej w szerokim zakresie temperatury, których naturalną kontynuacją były pomiary magnetooporu. Dopasowanie wysymulowanych krzywych namagnesowania do danych

eksperymentalnych umożliwiły analizę sprzężeń magnetycznych w badanych układach. Ponadto dla układu wielowarstwowego Nb/Fe określono wpływ absorpcji wodoru na kształt pętli histerezy magnetycznej, a tym samym na stałe oddziaływań międzywarstwowych. W rozdziale 4.2 pokazano wyniki badań AFM/STM próbek V/Fe i Nb/Fe które wskazują na małą szorstkość badanych układów o czym wskazuje niska wartość parametru szorstkości 0.25 oraz 0.3 nm odpowiednio dla układów V/Fe i Nb/Fe. Prezentowane skany AFM można by uzupełnić o liniowe przekroje poprzeczne sygnału AFM co lepiej uwidoczniliby szorstkość ich powierzchni. Rozdział 4.2 opisuje wyniki badań dyfrakcyjnych XRD wielowarstwowych układów V/Fe oraz Nb/Fe. Przedstawione dyfraktogramy wskazują że dla obu typów próbek tzn. V/Fe oraz Nb/Fe udało się wytworzyć układy wielowarstwowe o dobrze zdefiniowanej nadstrukturze i teksturze w kierunku (110). Autorka często używa w pracy sformułowania „o orientacji (110)” co wydaje się nie być do końca poprawne biorąc pod uwagę fakt, że wytworzone układy wielowarstwowe nie są epitaksjalne lecz tylko silnie stekstrowane. W opisie wyników XRD brakuje określonych eksperymentalnie szczegółów rzeczywistej struktury wielowarstwowej takich jak periody struktury warstwowej czy średnie szorstkości międzywierzchni które można by było wyznaczyć np. z dopasowania uzyskanych dyfraktogramów nisko-kątowych. Parametry takie dostarczyłyby dodatkowych informacji o strukturze próbek w stosunku do przedstawionych wcześniej pomiarów AFM/STM o jedynie powierzchniowej czułości. Rozdział 4.4 dokumentuje pomiary in-situ badanych próbek metoda XPS w tym również próbek referencyjnych cienkich warstw żelaza na buforze V oraz pojedynczych warstw Fe i V. Analizując zależność natężeń całkowych pików XPS pochodzący od bufora V i wierzchniej warstwy Fe od grubości tej ostatniej autorka dowodzi warstwowego wzrostu Fe na warstwie wanadu i stwierdza, że występuję on dla grubości żelaza poniżej ok. 6 nm. Szkoda, że badania XPS nie były kontynuowane dla kolejnej warstwy V nanoszonej stopniowo na powierzchnie warstwy żelaza co pozwoliłoby na określenie charakteru wzrostu warstw wanadu na żelazie. Zazwyczaj, w przypadku układów wielowarstwowych wzrost planarny jest trudny do uzyskania biorąc pod uwagę np. różnice w wielkości energii powierzchniowych materiałów poszczególnych podwarstw. W takim przybliżeniu, jeżeli warstwa A rośnie warstwowo na warstwie B (o wyższej energii powierzchniowej) to relacja odwrotna jest niespełniona. Na szczęście energie powierzchniowe V i Fe są bardzo zbliżone co przy dodatkowym założeniu wytwarzania w procesie wzrostu cienkich warstw stopowych na granicach warstw V i Fe może prowadzić do wzrostu warstwowego w naprzemiennych stosach warstw. Podobną analizę wzrostu autorka przeprowadziła dla warstw Nb na warstwie Fe stwierdzając planarny wzrost Nb na żelazie. W

dalszej części tego rozdziału pokazano w badaniach XPS, że w procesie wzrostu biwarstw Fe/Nb Fe/V w obszarze interfejsu wytwarza się cienka warstwa stopowa której grubość wynosi odpowiednio 1.5 nm i 0.8 nm. Wyniki zaprezentowane w omówionym powyżej rozdziale uważam za bardzo cenne, a przedstawioną interpretację za poprawną z małym zastrzeżeniem braku choćby próby dyskusji stechiometrii interfejsowych warstw stopowych oraz błędem w opisie rysunku 4.19.

Rozdział 4.5 pracy dotyczy badań właściwości magnetycznych układów wielowarstwowych V/Fe. W pierwszej kolejności wyznaczono oscylacyjną zależność pola nasycenia od grubości podwarstw Fe co miało na celu wybór optymalnej dla badań sprzężeń magnetycznych grubości podwarstw Fe w układach V/Fe. Należy podkreślić że sama obserwacja oscylacji oddziaływania międzywarstwowego w funkcji grubości podwarstw ferromagnetycznych w układach warstw wielokrotnych jest istotnym wynikiem rozprawy. Dotychczas tego typu oscylacje obserwowane były najczęściej w układach potrójnych typu ferromagnetyk/niemagnetyczna przekładka/ferromagnetyk (FM/NM/FM) Rysunek 4.21 wskazuje na to, że maksymalne pole nasycające występuję w układach V/Fe (o stałej grubości V równej 7 warstw atomowych (ML)) dla warstwy Fe o grubości ok. 3 ML. Autorka argumentuje wybór grubości podwarstw Fe (3ML) do badań MSW w układach wielowarstwowych V/Fe ze zmienną grubością V wielkością całkowitego momentu magnetycznego układu oraz wielkością pola nasycającego. W związku z tym brakuje w przedstawionych wynikach zależności namagnesowania nasycenia M_s układów V/Fe od grubości Fe zwłaszcza, że badania XPS dowodzą wytwarzania interfejsowej warstwy stopowej Fe-V o grubości ok. 0.8 nm co oznacza dla grubości podwarstw równej 3 ML (ok 0.6 nm), że grubość czystej „niestopionej” warstwy żelaza wynosi zaledwie ok 0.2 nm. Wydaje się, że wybór większej grubości podwarstw Fe np. 9 ML byłby z pomiarowego punktu widzenia lepszy, gdyż wielkość M_s byłaby znacząco wyższa, przyczynę warstwy stopowej byłby niższy, a pola nasycenia dla tej grubości podwarstwy Fe jest ciągle dość wysokie i wynosi w temperaturze pokojowej ok. 1T. Dodatkowo kształt pętli histerezy układu V/Fe (rys.4.20) oprócz części niskopolowej (w polach do 0.5 T) obarczony jest częścią wysokopolową która pochodzić może od interfejsowych warstw stopowych która dla grubszych podwarstw Fe wносила by do mierzonych pętli histerezy mniejszy wkład.

W dalszej części rozdziału 4 na rysunku 4.23 pokazany jest jeden z najważniejszych wyników pracy – oscylacje efektywnej stałej sprzężenia podwarstw Fe w funkcji grubości warstw V w temperaturze pokojowej oraz 5K. Stała sprzężenia J wyznaczona została z zależności 2.4b z rozdziału 2.1 a więc w oparciu o wielkość pola nasycenia, które można

byłoby nazwać polem sprzężenia przy założeniu zerowej anizotropii magnetycznej podwarstw Fe, przy czym autorka pracy przyjęła konwencję określenia wielkości pola sprzężenia jako 0.9 wielkości pola nasycenia próbki. Wyraźnie widoczne są oscylacje stałej J w funkcji grubości przekładek V jednak stała J nie zmienia znaku w całym zakresie grubości przekładki V . Przedstawiona zależność $J(d_V)$ sugeruje, że w całym zakresie grubości występuje sprzężenie antyferromagnetyczne, a oscyluje jedynie jego wartość co nie zostało w żaden sposób przedyskutowane. Stosowna dyskusja tego wyniku byłaby bardzo cenna. Ponadto założenie zerowej anizotropii magnetycznej podwarstw Fe nie zostało udokumentowane żadnymi wynikami eksperymentalnymi np. poprzez kątowno zależne pomiary pętli histerezy magnetycznej z zewnętrznym polem magnetycznym w płaszczyźnie warstw. Na rysunku 4.24 pokazano wyniki pomiarów GMR oraz namagnesowania w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego dla układów z wielowarstwowych z grubością warstw wanadu 5.5 ML i 7.7ML. Pętla histerezy magnetycznej pokazana na rysunku 4.24a wykazuje znaczące namagnesowanie remanencji (co nie wskazuje na sprzężenie antyferromagnetyczne) co jest w sprzeczności z pomiarami namagnesowania w temperaturze pokojowej z rysunku 4.22. Czy oznacza to że sprzężenie międzywarstwowe zmienia znak w funkcji temperatury dla tej grubości przekładki? Jakie zatem jest pochodzenie obserwowanego efektu magnetooporowego w niskiej temperaturze? Takich wątpliwości nie budzą pomiary dla grubości przekładki wanadowej 7.7 ML gdzie występuje wyraźna korelacja pomiędzy pomiarami namagnesowania i magnetooporu (rys. 4.24b) oraz zgodność charakteru sprzężenia międzywarstwowego pomiędzy temperaturą pokojową a 5K. Dodatkowo w temperaturze 5K krzywe namagnesowania oraz magnetooporu dla układu 7.7MLV/3MLFe są wyraźnie histerezowe co może świadczyć np. o niezerowej anizotropii magnetycznej układu. W rozdziale 4.5.2 pokazane są wyniki badań temperaturowych magnetooporu warstw V/Fe. Zgodnie z oczekiwaniami magnetoopór nie zależy od grubości przekładki V i silnie maleje wraz ze wzrostem temperatury, przy czym w danej temperaturze w rozważanym zakresie grubości V maleje również ze wzrostem grubości przekładki. Ciekawym wynikiem jest pojawianie się inwersyjnego magnetooporu dla grubości $d_V=10,6$ ML poniżej temperatury 3K, przy czym wielkość efektu GMR o ujemnym znaku jest znacząca i wynosi ok. 5%. W mojej opinii autorka poprawnie interpretuje prawdopodobne źródło inwersyjnego efektu GMR jako efekt spinowo zależnego rozpraszania na domieszkach Fe w warstwie V które w bardzo niskich temperaturach stają się ferromagnetyczne. Jednocześnie istnieje dość dobra jakościowa zgodność zależności efektu GMR od grubości przekładki wanadowej (rys.4.30 i 4.31) z zależnością efektywnej stałej sprzężenia J od grubości przekładki V .

W rozdziale 4.5.3 autorka analizuje temperaturowe zależności namagnesowania nasycenia oraz stałej sprzężenia układów V/Fe z przekładką wanadową o grubości 7,2 ML oraz 7,7 ML. Uzyskane dopasowania modeli teoretycznych do danych eksperymentalnych wskazują na dominujący wpływ fal spinowych w temperaturowych zależnościach M_s i stałej sprzężenia J . W rozdziale 4.5.4 dokonano porównania wyznaczonych eksperymentalnie zależności stałej sprzężenia międzywarstwowego J od grubości przekładki V dla układów V/Fe z obliczeniami teoretycznymi. Obliczenia przeprowadzone w przybliżeniu GGA pokazują oscylacyjny charakter zależności $J(d_v)$ oraz wskazują na istotny wpływ indukowanych w przekładce wanadowej momentów magnetycznych. Zgadzam się z autorką rozprawy że porównanie danych eksperymentalnych oraz teoretycznych może mieć jedynie charakter jakościowy w związku z wyidealizowaną strukturą trójwarstw Fe/V/Fe przyjętą w obliczeniach która pomija występujące w rzeczywistych próbkach efekty mieszania Fe i V na interfejsach oraz zakłada orientację krystaliczną układu V/Fe (110). Uznać można, że jakościowo zgodność eksperymentu z teorią jest dobra za wyjątkiem braku obserwacji eksperymentalnej dodatnich wartości stałych J odpowiadającym ferromagnetycznemu sprzężeniu wymiennemu warstw Fe. Ponownie pojawia się pytanie dlaczego sprzężenie dla próbek rzeczywistych nie oscyluje pomiędzy ferro- i antyferromagnetycznym wraz ze zmianą grubości przekładki V ?

Rozdział 4.6 poświęcony jest właściwościom magnetycznym wielowarstw Nb/Fe. Wyznaczone w oparciu o zmierzone pętle histerezy magnetycznej, stałe sprzężenia międzywarstwowego J oscylują w funkcji grubości przekładki Nb zarówno w temperaturze pokojowej jak i w 5K, przy czym oscylacje stałej J gasną szybciej w wyższej temperaturze. Wynik ten uważam za znaczący zwłaszcza biorąc pod uwagę dość dobrą zgodność jakościową wyznaczonej eksperymentalnie zależności $J(d_{Nb})$ z pokazanymi w kolejnym podrozdziale wynikami obliczeń teoretycznych.

W kolejnym rozdziale pracy (rodz.4.7) autorka przedstawia głębszą analizę oddziaływań międzywarstwowych dla układów V/Fe i Nb/Fe. Głównym postulatem postawionym w tej części rozprawy jest konieczność uwzględnienia w fenomenologicznym wyrażeniu na energię oddziaływania międzywarstwowego dodatkowego członu opisywanego stałą J_3 o kątowej zależności typu $(\cos\Delta\phi)^3$. Autorka nazywa ten człon kubycznym przyczynkiem do sprzężenia międzywarstwowego. Z tabeli 4.2 pokazane zostało jak wzajemne relacje pomiędzy wielkościami oraz znakami stałych J_1 , J_2 i J_3 prowadzą do efektywnego sprzężenia międzywarstwowego o charakterze ferromagnetycznym, antyferromagnetycznym oraz odpowiadającego niekolinearnemu uporządkowaniu

magnetyzacji warstw ferromagnetycznych. Zaproponowany model został zastosowany do dopasowania zmierzonych pętli histerezy magnetycznej dla układów V/Fe oraz Nb/Fe. Autorka ponownie zakłada zerową anizotropię magnetyczną wytworzonych próbek i dla obu układów uzyskuje bardzo dobrą zgodność symulacji z eksperymentem. W przypadku układu V/Fe z grubością przekładki wanadowej równa 7.7 ML oraz układu Nb/Fe dla grubości przekładki Nb równej 7 ML dobrą zgodność symulacji z eksperymentem uzyskano przy założeniu znaczącej wielkości stałej J_3 w stosunku do stałej J_1 . Autorka słusznie zauważa, że w dotychczas opublikowanych danych literaturowych nigdy nie uwzględniano stałych oddziaływania wyższego (niż drugi czyli stała J_2) rzędu. Konieczna zatem jest dyskusja tego kontrowersyjnego wyniku obejmująca możliwe podłoże fizyczne prowadzące do kubicznego oddziaływania międzywarstwowego. Niestety, w pracy znajdujemy jedynie lakoniczne stwierdzenie, że mechanizmy fizyczne prowadzące do sprzężenia kubicznego są takie same jak te które prowadzą do sprzężenia bikwadratowego okraszone odnośnikiem literaturowym którego nie sposób znaleźć w bibliografii. Czy na pewno zaproponowana interpretacja uwzględniająca oddziaływanie kubiczne jest jednoznaczna? Kluczową rolę w odpowiedzi na tak postawione pytanie odgrywa kwestia anizotropii magnetycznej podwarstw Fe w badanych układach. Czy podejmowane były próby symulowania pętli histerezy magnetycznej z uwzględnieniem przyczynku do energii swobodnej układu związanego z anizotropią magnetyczną. Pomimo tekstury struktury krystalicznej która wspiera postulat o braku anizotropii magnetycznej w płaszczyźnie warstw można wskazać możliwe źródło jednoosiowej anizotropii magnetycznej tzn. może ona się pojawiać w wyniku nanoszenia warstw ferromagnetycznych pod niezerowym kątem względem normalnej do podłoża [PHYSICAL REVIEW B 88, 085442 (2013)].

W podrozdziale 4.8 przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu wodorowania na oddziaływanie międzywarstwowo w układzie Nb/Fe. Przykładowe pętle histerezy magnetycznej dla grubości podwarstw Nb = 8 ML oraz 9.5 ML przed i po procesie wodorowania zmieniają swój kształt w spektakularny sposób przy czym co bardzo ważne zmiany te są odwracalne po desorpcji wodoru. W szczególności wyraźnie widoczny jest indukowany absorpcją wodoru wzrost namagnesowania remanencji który świadczyć może o zmianie charakteru sprzężenia międzywarstwowego w badanych układach. Symulacje pętli histerezy magnetycznych pokazane na rys. 4.47 oraz 4.48 oparte są (jak sądzę, nie jest to niestety napisane w pracy) o minimalizację energii układu przy czym dla danej wartości zewnętrznego pola magnetycznego wielkość namagnesowania odpowiada globalnemu minimum energii. Powoduje to, że wysymulowane krzywe namagnesowania są zawsze bez-

histerezy co utrudnia ich porównanie z pętlami pomiarowymi które wykazują histerezę. Symulacje dla obu próbek przed i po wodorowaniu zakładają efektywne antyferromagnetyczne sprzężenie międzywarstwowe (dominuje stała J_1) i nie oddają wzrostu obserwowanego wzrostu remanencji po wodorowaniu. Skąd zatem bierze się obserwowana w pomiarach zmiana remanencji? W dalszej części rozdziału autorka dyskutuje zmiany stałych J_1, J_2 i J_3 uzyskane w wyniku dopasowania danych eksperymentalnych przed i po procesie wodorowania. Przyczynę do sprzężenia bikwadratowego interpretowany jest modelem fluktuacji grubości przekładki oraz tzw. modelem „loose spins”. W dyskusji używane są stosunki wielkości stałych sprzężenia ani ich bezwzględne wartości co utrudnia określenie jak zmieniają się poszczególne stałe sprzężeń. Niestety, dopasowanie pętli histerezy z rysunku 4.47c (pętla po wodorowaniu) budzi moje zastrzeżenia. Pętla symulacyjna nie wykazuje namagnesowania remanencji i wynika z przyjęcia założenia o znaczącym sprzężeniu antyferromagnetycznym co nie jest zgodne z eksperymentem. Wydaje się że dopasowanie powinno być przeprowadzone w oparciu metodę minimalizacji energii opartą o lokalne minimum energii całkowitej, co spowodowałoby pojawienie się histerezy i konieczność obniżenia lub nawet zmiany znaku stałej J_1 w symulacji. W mojej opinii przeprowadzona dalej dyskusja zmiany stałych oddziaływań jest w związku z powyższym trudna do zaakceptowania. Mam nieodparte wrażenie, że zastosowany model komplikuje bezpośrednią konkluzję wynikającą z pomiarów pętli histerezy. Nie patrząc na symulacje można by nawet zaryzykować tezę, że pętla histerezy z rysunku 4.47a odpowiadają sprzężeniu antyferromagnetycznemu w układzie przed wodorowaniem (krzywa czarna) oraz dominującemu sprzężeniu ferromagnetycznemu po wodorowaniu (krzywa czerwona), a obniżona remanencja w pętli czerwonej wynika np. ze struktury domen magnetycznych często występującej w układach wielowarstwowych. Sam wynik odwracalnej zmiany remanencji wywołanej absorpcją i desorpcją wodoru uważam jednak za bardzo ważny i wartościowy.

Podsumowując uważam następujące wyniki przedstawionej rozprawy doktorskiej za oryginalne i naukowo ważne:

- Obserwację oscylacji oddziaływania międzywarstwowego w układzie wielowarstwowym V/Fe w funkcji grubości warstw Fe
- Obserwacje w układach wielowarstwowych V/Fe i Nb/Fe oscylacji oddziaływania międzywarstwowego w funkcji grubości odpowiednio podwarstw V i Nb w szerokim zakresie ich grubości.

- Wykazanie współlistnienia z wymienionymi wyżej oscylacjami stałej sprzężenia J oscylacji efektu GMR z grubością niemagnetycznych przekładek w badanych układach.
- Pokazanie spektakularnego wpływu wodorowania na strukturę magnetyczną w układach wielowarstwowych Nb/Fe

W związku z powyższym uważam, że cel pracy został osiągnięty, a moje uwagi krytyczne czy też zastrzeżenia nie mają wpływu na ogólną, pozytywną ocenę pracy.

Wniosek końcowy

Na podstawie przeprowadzonej oceny rozprawy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Raneckiej stwierdzam, że rozprawa spełnia wymogi Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Agnieszki Raneckiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Tomasz Słuski