

Recenzja rozprawy doktorskiej zatytułowanej:  
**„*Modulacja właściwości magnetycznych nanostruktur  
antyferromagnetycznych sterowana zmianą naprężenia*”**

wykonanej przez mgr inż. Weronikę Janus  
na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej  
w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Weroniki Janus dotyczy eksperymentalnych badań wpływu naprężenia mechanicznego na właściwości magnetyczne cienkowarstwowych struktur antyferromagnetycznych.

Rozprawa liczy łącznie 123 strony i złożona jest z 7 rozdziałów. Rozdziały poprzedzone są streszczeniem w języku polskim i angielskim, spisem treści i dwustronicowym wstępem. Po rozdziałach znajdują się jeszcze wnioski zajmujące jedną stronę, a rozprawę kończy bibliografia licząca 157 pozycji.

We wstępie mgr inż. Weronika Janus uzasadniła podejmowane przez siebie wysiłki badawcze, opisując interesujący trend we współczesnej spintronice, polegający na dążeniu do zastosowania materiałów antyferromagnetycznych jako aktywnych elementów pamięci. Duża odporność antyferromagnetyków na działanie zewnętrznego pola magnetycznego oraz brak pól rozproszonych, stwarza nadzieję na opracowanie pamięci o zwiększonej trwałości i o większej gęstości upakowania danych, natomiast terahercowy zakres dynamiki spinowej umożliwia znaczne skrócenie procesu zapisu informacji. Ta właśnie silna presja aplikacyjna zaowocowała znaczącą intensyfikacją badań materiałów antyferromagnetycznych w wielu laboratoriach na świecie. Stanowiła również inspirację dla Autorki, która postawiła sobie za cel zbadanie wpływu naprężenia mechanicznego na modyfikację struktury magnetycznej w antyferromagnetycznych warstwach tlenku niklu (NiO) oraz tlenku kobaltu (CoO).

W rozdziale 1 Autorka opisała podstawowe właściwości antyferromagnetyków, skupiając się między innymi na oddziaływaniu nadwymiany, determinującym

uporządkowanie antyferromagnetyczne w materiałach tlenkowych takich jak NiO czy CoO, oraz na mechanizmach anizotropii magnetycznej. Przedstawiła też najważniejsze właściwości NiO oraz CoO, zwracając uwagę na wielofazowe uporządkowanie magnetyczne tych materiałów, wynikające z dystorsji sieci krystalograficznej, zachodzącej poniżej temperatury Néela.

Rozdział 2 mgr inż. Weronika Janus poświęciła przedyskutowaniu wybranych metod sterowania zmianami stanu magnetycznego antyferromagnetyków. W oparciu o doniesienia literaturowe omówiła w kolejnych podrozdziałach: (1) oddziaływanie zewnętrznego pola magnetycznego, sprzężenie wymienne na interfejsie ferromagnetyk / antyferromagnetyk, zjawisko *exchange bias* oraz sprzężenie typu *spin-flop*; (2) wpływ prądu elektrycznego; (3) wzbudzenia optyczne z wykorzystaniem femtosekundowych impulsów laserowych; (4) naprężenia mechaniczne wywołane albo niedopasowaniem stałych sieci warstw sąsiadujących z warstwą antyferromagnetyczną, albo podkładką z materiału piezoelektrycznego, zmieniającego parametry sieciowe wskutek przykładanego napięcia.

W rozdziale 3 Autorka omówiła właściwości podłoża piezoelektrycznego o składzie:  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ , oznaczanego skrótowo jako PMN-PT. Ciekawą cechą tego materiału jest możliwość uzyskania dwóch różnych charakterystyk odkształceniowych, w zależności od kierunku przełączenia polaryzacji, pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego: albo odkształcenia nietrwałego, znikającego po wyłączeniu pola elektrycznego, albo trwałego, zachowywanego po wyłączeniu pola.

Rozdział 4 mgr inż. Weronika Janus poświęciła technikom preparacji próbek i technikom badawczym, wykorzystywanym podczas przygotowywania rozprawy doktorskiej, i przedstawiła kolejno: epitaksję z wiązek molekularnych (MBE), dyfrakcję rentgenowską (XRD), dyfrakcję niskoenergetycznych elektronów (LEED), magnetoptyczny efekt Kerra (MOKE), spektroskopię absorpcyjną promieniowania rentgenowskiego (XAS), magnetyczny dichroizm kołowy promieniowania rentgenowskiego (XMCD), magnetyczny dichroizm liniowy promieniowania rentgenowskiego (XMLD) i rentgenowską mikroskopię fotoelektronową (X-PEEM).

W rozdziale 5, Autorka zaprezentowała wyniki badań układu Fe/NiO osadzonego metodą epitaksji z wiązek molekularnych na podłożu MgO(001): w jednym przypadku bezpośrednio, a w drugim pośrednio, z przekładką Cr. W oparciu o pomiary wykonane z wykorzystaniem spektroskopii absorpcyjnej promieniowania rentgenowskiego na próbkach o następującym pełnym składzie: MgO(3nm)/Fe(1nm)/NiO(0.5÷4nm)/Cr(20nm)/MgO oraz MgO(3nm)/Fe(1nm)/NiO(0.5÷4nm)/MgO, jednoznacznie udowodniła, że zaobserwowany

liniowy rentgenowski dichroizm związany jest z antyferromagnetycznym uporządkowaniem warstwy NiO, a nie z obniżeniem symetrii pola krystalicznego. W kolejnym kroku, spreparowawszy próbkę z warstwą chromu w kształcie klina o składzie: MgO(3nm)/Fe(1nm)/NiO(2.1nm)/Cr(0÷8nm)/MgO i zbadawszy ją za pomocą dyfrakcji niskoenergetycznych elektronów oraz magnetycznego rentgenowskiego dichroizmu liniowego, Autorka stwierdziła, że naprężenia epitaksjalne generowane w warstwie NiO przez warstwę buforową Cr o różnej grubości, powodują – przy niewielkich grubościach Cr – ustawienie momentów magnetycznych Ni prostopadłe do powierzchni warstwy (naprężenia rozciągające), a przy większych grubościach Cr (>3.5 nm) – równoległe do powierzchni warstwy (naprężenia ściskające). W następnym etapie Autorka – na bazie pomiarów przeprowadzonych z wykorzystaniem magnetycznego rentgenowskiego dichroizmu kołowego oraz liniowego – wykazała, iż pomiędzy warstwami Fe i NiO występuje sprzężenie typu *spin-flop*, czyli że momenty magnetyczne w warstwie Fe są zorientowane prostopadłe do momentów magnetycznych warstwy NiO (przy czym w obu warstwach leżą one w płaszczyźnie) i że ta indukowana jednoosiowa anizotropia w warstwie NiO maleje wraz ze wzrostem grubości warstwy NiO i przy grubości NiO równej 3.7 nm staje się już praktycznie niewidoczna. Uzyskane przez siebie wyniki eksperymentalne Autorka jakościowo potwierdziła wynikami symulacji wykonanych za pomocą oprogramowania Crispy. W kolejnym kroku, po przeprowadzeniu pomiarów krzywych histerez warstwy Fe z wykorzystaniem podłużnego magnetoptycznego efektu Kerra, Autorka stwierdziła, że w przypadku układu Fe/NiO(2nm)/MgO pole koercji jest znacznie mniejsze od pola koercji w układzie Fe/NiO(1.9nm)/Cr i wyjaśniła ten efekt silniejszym oddziaływaniem momentów magnetycznych warstwy żelaza skierowanych równoległe do płaszczyzny warstwy z płaszczyznowymi momentami magnetycznymi NiO w układzie NiO/Cr, niż w układzie NiO/MgO, charakteryzującym się poza-płaszczyznowymi momentami w warstwie NiO. Silniejsze oddziaływanie warstwy Fe z warstwą NiO wymaga przyłożenia większego pola do uzyskania zmiany kierunku magnetyzacji w warstwie Fe. W wyniku analogicznych pomiarów krzywych histerezy warstwy Fe w układzie Fe/NiO(1÷4nm)/Cr Autorka wykazała, że – powyżej grubości NiO równej 3nm – sprzężenie *spin-flop* zanika i pojawia się efekt *exchange bias*. Warto dodać, iż większość wyników zaprezentowanych w rozdziale 5 została zamieszczona w publikacji oznaczonej w bibliografii numerem [22]: A. Koziół-Rachwał, M. Ślęzak, M. Zajac, P. Drózd, W. Janus, M. Szpytma, H. Nayyef, and T. Ślęzak, Control of spin orientation in antiferromagnetic NiO by epitaxial strain and spin–flop coupling, APL Mater. 8, 061107 (2020); doi: 10.1063/5.0011736 (100 pkt., IF=6.1).

W rozdziale 6 mgr inż. Weronika Janus przedstawiła wyniki badań trzech układów, osadzonych obok siebie metodą epitaksji z wiązek molekularnych na jednej podkładce MgO o orientacji (001). Najbardziej rozbudowany układ miał skład następujący: MgO(3nm)/Fe(2nm)/NiO(2nm)/MgO(0÷10nm,20nm)/Cr(20nm)/MgO; następny nie zawierał warstwy żelaza: MgO(3nm)/NiO(2nm)/MgO(0÷10nm,20nm)/Cr(20nm)/MgO, a w ostatnim nie osadzono ani wierzchniej warstwy żelaza ani ułożonej poniżej warstwy MgO: NiO(2nm)/MgO(0÷10nm,20nm)/Cr(20nm)/MgO. W efekcie Autorka mogła zbadać właściwości magnetyczne warstwy NiO w funkcji grubości położonej pod spodem klinowej warstwy MgO dla trzech różnych przypadków górnego sąsiedztwa warstwy NiO: 1) Fe, 2) MgO, i 3) powietrza, co skrótowo zostało oznaczone jako odpowiednio: 1) Fe/NiO, 2) MgO/NiO oraz 3) NiO. W oparciu o wyniki pomiarów przeprowadzonych z wykorzystaniem magnetycznego rentgenowskiego dichroizmu liniowego, podłużnego magnetoptycznego efektu Kerr'a oraz dyfrakcji niskoenergetycznych elektronów, Autorka wykazała, że we wszystkich trzech przypadkach Fe/NiO, MgO/NiO oraz NiO, dla niewielkich grubości MgO momenty magnetyczne warstwy NiO skierowane są w płaszczyźnie (naprężenia ściskające), a dla większych grubości MgO pojawiają się prostopadle do powierzchni składowe momenty magnetycznych w warstwie NiO (naprężenia rozciągające). W kolejnym etapie Autorka – na podstawie pomiarów magnetycznego rentgenowskiego dichroizmu liniowego i kołowego oraz symulacji – stwierdziła, że w przypadku skrajnych wartości grubości klinowej warstwy MgO, tzn. dla układów Fe/NiO/Cr/MgO oraz Fe/NiO/MgO(20nm)/Cr/MgO, namagnesowanie w warstwie Fe leży w płaszczyźnie próbki i że w przypadku układu Fe/NiO/Cr/MgO jest prostopadłe do płaszczyznowych momentów magnetycznych warstwy NiO, natomiast w przypadku układu Fe/NiO/MgO(20nm)/Cr/MgO jest podobnie, ale w warstwie NiO pojawiają się jeszcze dodatkowe domeny o momentach magnetycznych posiadających dużą składową prostopadłą do powierzchni warstwy. W następnym kroku – po dokonaniu analizy obrazów zarejestrowanych z wykorzystaniem rentgenowskiej mikroskopii fotoelektronowej sprzężonej z magnetycznym liniowym i kołowym dichroizmem rentgenowskim dla dwóch układów: Fe/NiO/MgO(1nm)/Cr/MgO oraz Fe/NiO/MgO(20nm)/Cr/MgO – Autorka potwierdziła występowanie sprzężenia wymiennego pomiędzy warstwami Fe i NiO, a w przypadku drugiego układu zaproponowała model struktury domenowej charakteryzujący się niejednorodnością wzdłuż grubości warstwy NiO. W modelu tym domeny płaszczyznowe znajdują się w górnej części warstwy NiO (bliżej warstwy Fe), a domeny z dużymi prostopadłymi składowymi momentów magnetycznych – w dolnej części warstwy NiO (bliżej warstwy MgO). W kolejnym etapie Autorka zbadała wpływ

warstwy żelaza na anizotropię warstwy NiO, przeprowadzając pomiary na układzie o różnej grubości warstwy żelaza: Fe(0.2;0.8;1.8;3.0nm)/NiO(2nm)/MgO(8.5nm)/Cr(20nm)/MgO, z wykorzystaniem magnetycznego dichroizmu rentgenowskiego liniowego i kołowego. Okazało się, że o ile warstwa Fe o grubości 0.2 nm nie wykazuje właściwości ferromagnetycznych, w związku z czym nie istnieją w tym przypadku oddziaływania wymienne, które indukowałyby anizotropię jednoosiową w warstwie NiO, to o tyle w przypadku warstw Fe o grubościach większych od 0.8 nm, ich właściwości ferromagnetyczne są już wyraźne i generują – poprzez sprzężenie *spin-flop* – jednoosiową anizotropię magnetyczną w warstwie NiO tym silniejszą, im grubsza jest warstwa Fe. Warto zauważyć, iż większość wyników zaprezentowanych w rozdziale 6 została zamieszczona w publikacji oznaczonej w bibliografii numerem [23]: W. Janus, T. Ślęzak, M. Ślęzak, M. Szpytma, P. Drózd, H. Nayyef, A. Mandziak, D. Wilgocka-Ślęzak, M. Zajac, M. Jugovac, T. O. Menteş, A. Locatelli, and A. Kozioł-Rachwał, Tunable magnetic anisotropy of antiferromagnetic NiO in (Fe)/NiO/MgO/Cr/MgO(001) epitaxial multilayers, Scientific Reports 13, 4824 (2023) (140 pkt, IF=4.6).

W rozdziale 7 mgr inż. Weronika Janus udowodniła możliwość sterowania właściwościami magnetycznymi dwu-warstwy Fe/CoO za pomocą odwrotnego efektu piezoelektrycznego. Badania przeprowadziła na specjalnie w tym celu przygotowanej próbce o składzie: Pt(3nm)/Fe(5nm)/CoO(10nm)/Cr(20nm)/PMN-PT(0.5mm)/Cr(10nm)/Au(60nm). W próbce tej dwie warstwy chromu, umieszczone po obu stronach warstwy piezoelektrycznej PMN-PT, pełniły rolę elektrod. Poprzez napięcie elektryczne przykładane do tych elektrod Autorka mogła zmieniać rozmiary warstwy piezoelektrycznej i w konsekwencji generować naprężenia mechaniczne w Fe/CoO. Autorka – w oparciu o pomiary histerez wykonywane z wykorzystaniem podłużnego magnetoptycznego efektu Kerra w różnych temperaturach – stwierdziła, że: 1) warstwa Fe ma słabą jednoosiową anizotropię magnetyczną płaszczyznową, 2) warstwa CoO w niskich temperaturach jest uporządkowana antyferromagnetycznie, a powyżej 300 K traci to uporządkowanie, 3) momenty magnetyczne warstw Fe i CoO są ze sobą sprzężone, 4) w temperaturze 80 K zależność pola koercji od napięcia przykładanego do elektrod wykazywała swoistą histerezę, umożliwiając uzyskanie dwóch różnych wartości pola koercji przy zerowym napięciu w zależności od znaku wcześniej przyłożonego napięcia (przykładowo  $H_C \approx 610$  Oe po wcześniejszym przyłożeniu  $U = -300$  V i  $H_C \approx 555$  Oe po wcześniejszym przyłożeniu  $U = +300$  V), 5) w temperaturze 330 K pole koercji nie wykazywało żadnej zależności od napięcia przykładanego do elektrod. Po wykonaniu pomiarów z wykorzystaniem dyfrakcji rentgenowskiej Autorka wykazała, że zastosowana

przez nią warstwa piezoelektryczna miała charakterystykę histerezoową i po wyłączeniu pola elektrycznego zachowywała jeden z dwóch stanów odkształcenia, zależny od znaku ostatnio przyłożonego napięcia. To odkształcenie wpływało – poprzez naprężenia – na stan anizotropii magnetycznej warstwy CoO, a poprzez sprzężenie pomiędzy warstwami CoO i Fe – również na właściwości magnetyczne warstwy Fe (widoczne w postaci zależności pola koercji od napięcia).

Podsumowując powyższy przegląd merytorycznej zawartości rozprawy doktorskiej mgr inż. Weroniki Janus, muszę z całym przekonaniem stwierdzić, że wyniki uzyskane przez Autorkę są bardzo wartościowe i aktualne, bowiem dotyczą nowej i perspektywicznej dziedziny badawczej współczesnej fizyki magnetyzmu, jaką jest spintronika antyferromagnetyków. Autorka wykazała się znakomitym opanowaniem nowoczesnych metod preparatyki układów cienkowarstwowych, biegłością w posługiwaniu się wieloma wyrafinowanymi technikami badawczymi oraz szeroką znajomością podstaw teoretycznych badanych efektów, co pozwoliło jej na rzetelne przebadanie właściwości strukturalnych i magnetycznych własnoręcznie przygotowanych próbek, na odpowiednią interpretację uzyskanych wyników (w wielu przypadkach ze wsparciem modelowań numerycznych) i na ich rzeczowe porównanie z doniesieniami literaturowymi. W rezultacie mgr inż. Weronika Janus osiągnęła postawiony sobie ambitny cel i udowodniła na konkretnych przykładach układów wielowarstwowych, że możliwe jest sterowanie stanem magnetycznym warstw antyferromagnetycznych za pośrednictwem naprężenia epitaksjalnego, sprzężenia magnetycznego z wierzchnią warstwą ferromagnetyczną oraz naprężenia generowanego przez warstwę piezoelektryczną, poddaną działaniu napięcia elektrycznego. Pozwala mi to na sformułowanie stwierdzenia, że rozprawa doktorska mgr inż. Weroniki Janus stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Uzyskane przez Autorkę wyniki mogą być wykorzystane praktycznie przy opracowaniu nowych nośników pamięci magnetycznej.

Merytoryczna materia rozprawy jest – w mojej ocenie – bardzo solidna. Kolejno po sobie następujące etapy badawcze realizowane przez Autorkę były przemyślane i logiczne, uzyskane wyniki zostały wprawnie opracowane i zaprezentowane w sposób klarowny, a znajomość literatury przedmiotu, widoczna w dyskusji uzyskanych rezultatów, okazała się imponująca. W sposób szczególnie zaciekały mnie obrazy struktur domenowych w warstwie Fe albo NiO, zarejestrowane z wykorzystaniem rentgenowskiej mikroskopii fotoelektronowej sprzężonej z magnetycznym dichroizmem rentgenowskim kołowym albo liniowym, zamieszczone na stronie 98. Obrazy te stanowią spektakularny przykład

selektywnego obrazowania przestrzennych rozkładów magnetyzacji w wierzchniej warstwie ferromagnetycznej, gdy do obrazowania wykorzystywane są wiązki promieniowania rentgenowskiego spolaryzowanego kołowo, albo w położonej o kilka nanometrów niżej warstwie antyferromagnetycznej, w przypadku zastosowania wiązek promieniowania spolaryzowanego liniowo.

Podczas całościowej analizy eksperymentalnej zawartości rozprawy, zauważyłem problem, którego nie potrafiłem rozwiązać w oparciu o informacje zawarte w tekście. Otóż o ile w rozdziałach 5 i 6 Autorka skoncentrowała się na NiO, to o tyle w rozdziale 7, do badań z piezoelektrykami, wybrała inny materiał antyferromagnetyczny – CoO. Jakie argumenty przemawiały za takim właśnie rozwiązaniem? W moim odczuciu cała rozprawa zyskałaby wiele na spoistości, gdyby Autorka konsekwentnie cały czas wykorzystywała w swoich badaniach jeden materiał antyferromagnetyczny.

W rozprawie udało mi się znaleźć kilka niedociągnięć merytorycznych. Oto one:

M1. Na stronie 71, na rysunku 5.6 (b) widoczne są dwie krzywe, z których jedna oznaczona jest niebieską ciągłą linią opisaną w legendzie jako „Ni/MgO,  $\gamma=70^\circ$ ”, a druga, przesunięta trochę w prawą stronę, oznaczona jest niebieską przerywaną linią opisaną w legendzie jako „Ni/MgO,  $\gamma=0^\circ$ ”. Te same krzywe znajdują się w pracy [22] na rysunku 2 (b), ale w pracy [22] na rysunku 2 (b) przesunięta w prawo jest krzywa oznaczona jako „Ni/MgO,  $\gamma=70^\circ$ ”. W związku z tym pojawia się naturalne pytanie: który z tych dwu przywołanych powyżej rysunków odpowiada rzeczywistości?

M2. Na dole strony 74 rozpoczyna się zdanie zawierające następujące stwierdzenie: „Zgodnie z literaturą, jeśli dla zastosowanej geometrii pomiaru  $\Delta RL_2 < 0$ , to momenty magnetyczne w NiO leżą w płaszczyźnie warstwy [15], [148], natomiast gdy  $\Delta RL_2 > 0$ , momenty magnetyczne NiO posiadają dominującą składową prostopadłą do płaszczyzny [15], [148]”. Na rysunku 5.10(b), przedstawiającym zależność  $\Delta RL_2$  od grubości Cr, widać, że parametr  $\Delta RL_2$  jest większy od zera tylko w przypadku pierwszego punktu, odpowiadającemu grubości chromu bliskiej zero, natomiast dla pozostałych punktów, czyli dla grubości chromu większych od ok. 0.5 nm, parametr  $\Delta RL_2$  jest mniejszy od 0. Zgodnie więc z zacytowanym wyżej stwierdzeniem, momenty magnetyczne powinny leżeć w płaszczyźnie w przypadku grubości chromu większych od ok 0.5 nm. Wbrew temu, Autorka stwierdza na dole strony 75, że momenty magnetyczne w NiO leżą w płaszczyźnie dla grubości chromu większych od 3.5 nm. Jakie dodatkowe argumenty przemawiają za tym, że zacytowane wyżej stwierdzenie literaturowe nie może być zastosowane wprost w tym przypadku?

M3. Na stronie 105, w siódmej linijce od dołu, jest takie zdanie: „*Niepokryta warstwą CoO część próbki umożliwiła dostęp do dolnej elektrody Cr.*” To zdanie jest o tyle mylące, że z opisu preparacji próbki wynika, że chodzi tu o elektrodę wcześniej określoną jako elektroda górna.

M4. Na stronie 109, w pierwszej linijce od dołu, zaczyna się następujące zdanie: „*Dwa różne stany koercji Fe: wysoki  $H_C(+300 V) = 278 V Oe$  i niski  $H_C(-300 V) = 312 V$  pozostały niemal niezmiennie ...*” Oczywiście pole koercji powinno być wyrażone w Oe a nie w „*V Oe*” czy też „*V*”. Gdy już poprawi się jednostki to należy skorygować jeszcze jedną rzecz: stan z większym polem koercji powinien być nazwany stanem wysokim (312 Oe), a stan z mniejszym polem koercji – stanem niskim (278 Oe), a więc odwrotnie niż to zostało ujęte w powyższym zadaniu.

Na zakończenie dorzucę jeszcze kilka zdań dotyczących formalnej oceny rozprawy. Układ rozprawy jest – moim zdaniem – naturalny i logiczny i nie budzi żadnych zastrzeżeń. Autorka najpierw wyjaśniła teoretyczne podstawy badanych efektów, następnie opisała wykorzystane narzędzia preparacyjne i badawcze, i wreszcie zaprezentowała i zinterpretowała wyniki swoich badań. Cała rozprawa robi wrażenie dobrze przemyślanej i uporządkowanej. Napisana jest w sposób jasny i czytelny, wszystkie zdania są zrozumiałe. O dużej staranności edytorskiej Autorki świadczy brak błędów gramatycznych i tylko kilka zaledwie błędów literowych, jakie udało mi się znaleźć w całej rozprawie. Natomiast z przykrością muszę stwierdzić, że spory bałagan wkradł się do numeracji rysunków i do kodowania kolorami krzywych na wykresach. Utrudnia to czytanie pracy i wymaga dodatkowego wysiłku w celu zsynchronizowania opisu w tekście z rysunkami. Oto zauważone przeze mnie usterki formalne:

F1. Na stronie 60, w szóstym wierszu od góry, w zdaniu: „*Rysunek 4.12 przedstawia diagram rozszczepienia pasm 3d w obecności pola krystalicznego ...*” znajduje się błędny numer rysunku. Powinno być: „*Rysunek 4.13 ...*”

F2. Na stronie 73, znajdują się odwołania do nieistniejących w rozprawie rysunków 5.8 (a), 5.8 (b) i 5.8 (c). Powinny w tym miejscu być odwołania do rysunków o numerach 5.9(a), 5.9(b) i 5.9(c).

F3. Na stronie 80, w szóstym wierszu od góry, znajduje się zdanie: „*Zależność  $RL_2(\varphi)$  wyznaczona dla Fe/NiO(1.4nm)/Cr (rys. 5.16, jasnoniebieska krzywa) ma wyraźnie zaznaczone ekstrema ...*” Natomiast w czwartym wierszu od dołu jest takie zdanie: „*Dla grubszej badanej warstwy NiO (rys 5.16, granatowa krzywa) wartość stosunku  $RL_2$  pozostała niemal niezmienna wraz ze zmianą kąta azymutalnego  $\varphi$ .*” Na rysunku 5.16 wyraźnie widać, że to granatowa krzywa ma



wyraźne ekstrema, a jasnoniebieska zmienia się mało, a więc kodowanie kolorów krzywych na rysunku jest dokładnie odwrotne niż to sygnalizuje opis w tekście. Kolory zostały również pomyłone w podpisie rysunku 5.16.

F4. Na stronie 81, w drugim wierszu od góry, znajduje się błędne odwołanie do rysunku 5.16, zamiast do rysunku 5.17.

F5. Na stronie 81, w drugim wierszu od dołu, znajdują się błędne odwołania do rysunku 5.6, i do rysunku do 5.15, jasnoniebieska krzywa. W tym miejscu powinny znajdować się odwołania do rysunku 5.7 i do rysunku 5.16, granatowa krzywa.

F6. Na stronie 82, w ósmym wierszu od góry, znajduje się błędne odwołanie do rysunku 5.6, zamiast do rysunku 5.7.

F7. Na stronie 95, w podpisie rysunku 6.9, w drugim wierszu od góry, widnieją błędne nazwy paneli: (b) i (c). Poprawne nazwy powinny być odpowiednio: (c) i (d).

F8. Na stronie 103 wypisany jest błędny numer rysunku: 6.14. Rysunek ten w sposób oczywisty powinien mieć numer 6.16.

F9. Na stronie 107, w dolnym akapicie, znajduje się opis krzywych histerezy pokazanych na rysunku 7.4 i zmierzonych w 330 K (pętla czarna) i 80 K (pętla czerwona). Na rysunku 7.4 kodowanie kolorów jest dokładnie odwrotne niż w tekście: pętla zmierzona w 330 K jest czerwona, a w 80 K – czarna.

W podsumowaniu recenzji stwierdzam co następuje: ponieważ merytoryczną zawartość rozprawy doktorskiej mgr inż. Weroniki Janus oceniam bardzo wysoko i ponieważ od strony formalnej rozprawa jest akceptowalna, to niniejszym wyrażam moją jednoznacznie pozytywną ocenę całej rozprawy doktorskiej. Rozprawa niezbitnie świadczy – moim zdaniem – o posiadaniu przez mgr inż. Weronikę Janus odpowiedniej ogólnej wiedzy teoretycznej w zakresie fizyki i o umiejętności samodzielnego prowadzenia przez nią badań naukowych.

W konkluzji recenzji stwierdzam, że – w mojej opinii – przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Weroniki Janus spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, określone w *Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Weroniki Janus do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

