

Poznań, 2.01.2024 r.

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

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Weroniki Janus  
pt. „Modulacja właściwości magnetycznych nanostruktur antyferromagnetycznych  
sterowana zmianą naprężenia”**

Rozprawa doktorska mgr inż. Weroniki Janus dotyczy wytwarzania i charakteryzacji epitaksjalnych układów cienkowarstwowych ferromagnetyk(FM)/antyferromagnetyk(AFM), w których poprzez modyfikację naprężenia i oddziaływania wymiennego typu Exchange Bias (EB) na międzywierzchni FM/AFM kontrolowany jest tzw. wektor Néela, czyli kierunek ustawienia momentów magnetycznych warstwy AFM. Zagadnienie to jest obecnie intensywnie badane, gdyż materiały AFM mogą zostać wykorzystane do zapisu i przetwarzania informacji. Mają one wiele zalet w porównaniu z warstwami FM, np.: ich stan magnetyczny jest niewrażliwy na działanie zewnętrznego pola, nie są źródłem pól rozproszonych, co pozwala zwiększyć gęstość zapisu, ponadto wykazują THz częstotliwości rezonansowe, co daje możliwość zwiększenia prędkości przetwarzania danych. Pojawiło się już wiele pomysłów na urządzenia bazujące na aktywnych elementach wykonanych z materiałów AFM, jednakże nadal poszukuje się efektywnych metod pozwalających sterować wektorem Néela i w tę tematykę wpisuje się ten doktorat. Badania zaprezentowane w rozprawie zostały wykonane na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica (AGH) w Krakowie i były finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki (Grant No. 2020/38/E/ST3/00086) oraz w ramach grantu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego: „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” AGH. Promotorem pracy jest dr hab. Anna Kozioł-Rachwał.

Rozprawa doktorska ma klasyczny układ i składa się ze wstępu, siedmiu rozdziałów, w tym trzech rozdziałów poświęconych badaniom własnym, podsumowania oraz obszernej bibliografii obejmującej 157 pozycji.

We wstępie Autorka zawarła motywację swoich badań i zwróciła uwagę na przydatność warstw AFM w nowo rozwijającej się dziedzinie spintroniki antyferromagnetycznej, która bazuje na kontroli stanu magnetycznego AFM. Stan ten może być kontrolowany optycznie, elektrycznie, zmianą naprężenia lub poprzez oddziaływania wymienne EB. W tej części rozprawy jasno został sformułowany cel badań, którym było wykorzystanie zmiany naprężenia do modyfikacji struktury magnetycznej epitaksjalnych warstw NiO i CoO. Oprócz naprężania stosowano również oddziaływanie wymienne EB pomiędzy spinami FM i AFM, nie tylko do modyfikacji ustawienia momentów magnetycznych w warstwie AFM, ale również do wsparcia odczytu tego stanu, który głównie rejestrowany był technikami synchrotronowymi.

W rozdziale pierwszym mgr Janus opisała kluczowe, z punktu widzenia uporządkowania ferromagnetycznego i antyferromagnetycznego, oddziaływanie wymienne pomiędzy sąsiadującymi spinami oraz oddziaływanie nadwymiany, które jest pośrednim oddziaływaniem dalekozasięgowym odpowiedzialnym za antyferromagnetyzm w układach tlenkowych, tj. MnO, CoO, NiO. Następnie Doktorantka skupiła się na właściwościach magnetycznych i strukturalnych CoO i NiO, gdyż tylko te dwa materiały są badane w rozprawie. Zwraca również uwagę na występowanie domen

antyferromagnetycznych, których obecność jest istotnym elementem interpretacji uzyskanych wyników.

W rozdziale drugim mgr Janus szczegółowo opisała sposoby kontroli stanu magnetycznego antyferromagnetyków. Zagadnienie to jest szczególnie istotne gdyż, w przypadku układów ferromagnetycznych często stosuje się pole magnetyczne do zapisu informacji. W materiałach AFM nie jest to możliwe w rozsądnych granicach wartości pola magnetycznego stosowanego do zapisu informacji, dlatego poszukuje się innych metod umożliwiających zmianę ustawienia wektora Néela, którego wyróżniony kierunek stanowić będzie o logicznym „0” i „1”. Pole to można znacząco obniżyć stosując układy sprzężone wymiennie na międzywierzchni FM/AFM. Wtedy niewielkie pola magnetyczne mogą obrócić kierunek namagnesowania warstwy FM, a w wyniku sprzężenia, które musi być dostatecznie duże, nastąpi obrót spinów w warstwie AFM. Doktorantka również odniosła się do najnowszych badań pokazujących, że obrót kierunku namagnesowania FM można osiągnąć zmianą temperatury, co w połączeniu z oddziaływaniem EB, powoduje zmianę orientacji momentów magnetycznych AFM bez zewnętrznego pola. To pokazuje, jak ważne jest oddziaływanie wymienne na międzywierzchni FM/AFM, co zostało bardzo wyraźnie podkreślone i opisane w rozprawie. Opis tego oddziaływania uwzględnia również ortogonalne sprzężenie pomiędzy AFM i FM nazywane spin-flop, które w rozprawie jest również wykorzystywane do określania stanu magnetycznego warstw AFM poddanych naprężeniu. Zmiany naprężenia uzyskiwano poprzez niedopasowanie stałej sieci podłoża i warstwy, co w przypadku warstw epitaksjalnych jest relatywnie łatwe do osiągnięcia poprzez odpowiedni dobór nanoszonych materiałów. Takie niedopasowanie może indukować dystorsję tetragonalną prowadząc do zmiany kierunku magnetycznej anizotropii w warstwie AFM i do reorientacji jej momentów magnetycznych. Do zmiany kierunku wektora Néela w AFM wykorzystuje się również zmianę naprężenia pochodzącą od podłoża piezoelektrycznych, które pod wpływem pola elektrycznego zmieniają swoje wymiary. W rozdziale drugim Doktorantka omówiła również dwie inne metody sterowania kierunkiem wektora Néela, tj. wykorzystanie spinowo-orbitalnego momentu siły oraz reorientację momentów magnetycznych AFM wywołaną krótkimi impulsami światła emitowanego przez laser.

W rozdziale trzecim mgr Janus krótko opisała zagadnienia związane z właściwościami  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  (PMN-PT), gdyż w kolejnych częściach pracy materiał ten był wykorzystywany do indukowania naprężenia polem elektrycznym. Jest to piezoelektryk, którego struktura krystaliczna zależy od temperatury i zawartości PT, przy czym zawartością PT można również sterować właściwościami piezoelektrycznymi tego materiału.

Przytoczone rozdziały zawierają trafnie dobrany zakres informacji dobrze wprowadzający czytelnika w zagadnienia związane z dysertacją. Przedstawione informacje są skondensowane do niezbędnego minimum przy zachowaniu jasnej, przejrzystej i zrozumiałej formy. Takie wprowadzenie w tematykę nie jest wcale łatwe, a Doktorantce udało się to znakomicie. To pokazuje, że mgr inż. Weronika Janus posiada szeroką wiedzę teoretyczną w zakresie układów cienkowarstwowych i modyfikacji ich właściwości magnetycznych.

W rozdziale 4 czytelnik zapoznaje się z metodami eksperymentalnymi stosowanymi w rozprawie. W pierwszej kolejności opisany jest wzrost epitaksjalny warstw i wpływ niedopasowania sieciowego na naprężenie. Doktorantka zwraca również uwagę na napięcie powierzchniowe jako jeden z głównych czynników determinujących rodzaj wzrostu warstw i omawia różne scenariusze wzrostu z nim związane. Jest to szczególnie istotne w kontekście zastosowanej techniki nanoszenia warstw. Doktorantka przygotowywała warstwy stosując epitaksję z wiązki molekularnej w komorach zapewniających ultra wysoką próżnię. Komory te są wyposażone również w dyfraktometr

niskoenergetycznych elektronów (LEED), umożliwiającą uzyskanie informacji dotyczących periodyczności sieci krystalicznej. Pomiar prowadzone z wykorzystaniem LEED pozwalają na określenie orientacji krystalograficznej, wyznaczenie płaszczyznowej stałej sieci oraz innych cech powierzchni (np. pojawienie się nadstruktury). Inną technikę dyfrakcyjną jaką zastosowała Doktorantka to dyfrakcja rentgenowska, która wykonana została w Laboratorium Badań Strukturalnych, Katedry Elektroniki Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji AGH i była używana do badań właściwości strukturalnych warstw nanoszonych na piezoelektryczne podłoże PMN-28%PT(001).

Do badań magnetycznych Doktorantka zastosowała głównie metody synchrotronowe wsparte pomiarami magnetoopiecznymi. Pomiar synchrotronowe wykonywane były w Narodowym Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS na linii badawczej PIRX dedykowanej do pomiarów spektroskopowych oraz na linii DEMETER wyposażonej w fotoemisyjny mikroskop elektronowy (PEEM). Techniki synchrotronowe doskonale sprawdzają się w charakteryzacji właściwości magnetycznych warstw ferromagnetycznych, ale również antyferromagnetycznych. Dlatego zastosowano magnetyczny dichroizm kołowy (XMCD) i liniowy (XMLD) promieniowania X. Pomiar takie są bardzo czasochłonne i wymagają starannie przygotowanych próbek oraz precyzyjnie zaplanowanych eksperymentów. Doskonałym uzupełnieniem tych pomiarów były metody magnetoopieczne pozwalające lepiej zrozumieć i wyjaśnić efekty fizyczne występujące w badanych układach. Moim zdaniem eksperymentalne metody zostały bardzo dobrze dobrane do zrealizowania celów rozprawy, a poszczególne etapy eksperymentów synchrotronowych i pomiarów magnetoopiecznych dobrze zaplanowane i zrealizowane.

W kolejnych trzech rozdziałach opisane są wyniki własnych badań, a każdy z tych rozdziałów rozpoczyna się od jasnego i klarownego opisu preparatyki warstw. Opisy te zawierają schematyczne przedstawienie układów warstwowych co pozwala na zorientowanie się jakiego układu dotyczy określony opis badań. Doktorantka rozpoczyna badania od weryfikacji czy obserwowane zmiany intensywności widma XAS na krawędzi  $L_2$  Ni zmierzone z liniową polaryzacją promieniowania dla dwóch kątów padania wiązki X (0 i 70 stopni) są związane z sygnałem magnetycznym czy naturalnym dichroizmem liniowym promieniowania X. Jest to niezwykle ważny element badań, gdyż pozwala sprawdzić czy obserwowane efekty są związane z uporządkowaniem AFM warstw NiO. Badania te prowadzono w szerokim zakresie temperatur (80-390K) dla dwóch układów Fe/NiO/Cr/MgO(001) oraz Fe/NiO/MgO(001) o stałej grubości warstwy NiO (2,1nm). W oparciu o te wyniki i dane literaturowe, stwierdzono, że obserwowany w obu układach dichroizm jest związany ze stanem antyferromagnetycznym warstwy NiO. W kolejnym kroku przeprowadzono badania w funkcji grubości warstwy NiO dla dwóch temperatur 300 i 390 K. Na ich podstawie wywnioskowano, że dla wszystkich badanych grubości dichroizm związany jest z magnetycznym uporządkowaniem warstwy AFM. Dla ultra cienkiej warstwy NiO (~0,7nm) taki wniosek jest dość zaskakujący, gdyż doniesienia literaturowe, na których bazuje Doktorantka (praca [88]), wskazują, że warstwa NiO o zbliżonej grubości (5ML czyli około 0,8nm) wykazuje właściwości AFM jedynie poniżej 300K. Stąd niezbędne jest wyjaśnienie, skąd wynikają obserwowane właściwości AFM tej warstwy w wyższej temperaturze (390K)? Do dalszych badań, które miały na celu określenie orientacji momentów magnetycznych w NiO wybrano grubość 2,1nm. Warstwy NiO naniesiono na podłoże MgO pokryte Cr o zmiennej grubości, a całość pokryto Fe o grubości 1nm. Dla takich układów, wykorzystując LEED, śledzono zmianę płaszczyznowej stałej sieci warstw Cr wraz ze wzrostem jej grubości. Uzyskane wyniki pozwoliły wykazać, że wraz ze wzrostem grubości warstwy Cr w warstwie NiO następuje reorientacja momentów magnetycznych od kierunku prostopadłego do kierunku w płaszczyźnie próbki. Powiązano to ze zmianą stałej sieci Cr (wraz ze

wzrostem grubości maleje jej stała sieci), a tym samym założono, że indukowane jest naprężenie w warstwie NiO, które w konsekwencji wymusza reorientację spinową. Szkoda, że w pracy nie pokazano bezpośrednich pomiarów zmiany naprężenia w warstwie NiO, w taki sam sposób jak zrobiono to dla Cr. Nie mniej jednak, uważam, że uzyskane wyniki są bardzo cenne i wartościowe, gdyż pokazują możliwość sterowania kierunkiem orientację wektora Néela poprzez inżynierię naprężenia.

W kolejnej części skupiono się na analizie pomiarów XMCD i XMLD w celu określenia wzajemnych ustawień wektora namagnesowania Fe i kierunku momentów magnetycznych w NiO o dwóch różnych grubościach (1,4nm i 3,7nm). Wyniki tych badań, pokazały, że momenty magnetyczne Ni w warstwie o grubości 1,4 nm ustawione są równoległe do kierunku NiO[1-10], a w Fe równoległe do Fe[100]. Takie ustawienie momentów magnetycznych NiO zostało również potwierdzone w symulacjach wykonanych z wykorzystaniem programu Crispy. To oznacza, że momenty magnetyczne Fe i NiO są ustawione względem siebie prostopadłe, wskazując na obecność oddziaływania typu spin-flop. Wyróżnionego kierunku spinów Ni w płaszczyźnie warstwy NiO nie zaobserwowano dla grubszej warstwy (3,7nm), założono więc, że jednoosiowa anizotropia w AFM wymuszona sprzężeniem typu spin-flop słabnie wraz ze wzrostem grubości NiO. Biorąc pod uwagę, że orientacja spinów w NiO silnie zależy od obecności naprężenia, pojawia się pytanie czy relaksacja naprężenia w grubszej warstwie NiO nie może prowadzić do zmiany ustawienia spinów? Taką interpretację mogą sugerować wyniki, pokazana w pracy Doktorantki, gdzie znajdujemy silną asymetrię kątowych zależności stosunku  $RL_2$  dla warstwy NiO w układzie Fe/NiO(3.7)/MgO (Fig. 4d w [22]). Liczę, że Doktorantka wyjaśni to podczas obrony.

W kolejnej części sprawdzono jak ułożenie momentów magnetycznych w warstwie NiO wpływa na proces przemagnesowania warstwy Fe. Przeanalizowano pętle histerezy dla Fe/NiO/MgO(100) i Fe/NiO/Cr/MgO(100) i wykazano, że wraz ze wzrostem grubości NiO rośnie pole koercji, przy czym jest ono zawsze mniejsze w przypadku układów Fe/NiO/MgO. Powiązano to ze zmianą wartości sprzężenia na interfejsie Fe/NiO w zależności od magnetycznego stanu AFM. Założono, że płaszczyznowe momenty magnetyczne AFM mogą silniej oddziaływać z momentami magnetycznymi Fe zwiększając tym samym wartość pola koercji. Zmianę siły oddziaływania i jego typ można również śledzić analizując wartości  $H_{EB}$ . Taka analiza została przeprowadzona dla warstw Fe/NiO( $d_{NiO}$ )/Cr/MgO(001), która w połączeniu z pomiarami XMLD pozwoliła powiązać brak  $H_{EB}$  dla warstw poniżej 3nm grubości NiO z obecnością ortogonalnego sprzężenia, czyli sprzężenia typu spin-flop. Szkoda, że w rozprawie nie pojawiły się wyniki pomiarów  $H_{EB}$  dla warstw Fe/NiO( $d_{NiO}$ )/MgO, które pomogły by w pełniejszej interpretacji wpływu stanu magnetycznego NiO na przemagnesowanie warstwy Fe. Jest to szczególnie istotne, że w tym układzie dominuje prostopadła do płaszczyzny składowa momentów magnetycznych Ni, a więc również występuje ortogonalne ułożenie spinów Fe i Ni. Liczę, że takie porównanie zostanie przedstawione na obronie i przedyskutowane.

W rozdziale 6 przebadano strukturę magnetyczną NiO w układzie NiO/MgO( $d_{MgO}$ )/Cr/MgO(001) nie przykrytym i przykrytym warstwą MgO lub Fe. Wykazano, że grubości przekładki MgO powoduje zmianę struktury spinowej NiO ze względu na zmianę naprężenia. Bardzo ciekawy wynik pokazano na Rys 6.4 obrazujący dodatkowy wpływ obecności warstwy Fe na ustawienia momentów magnetycznych NiO. Widać, że gdy układ przykryty jest Fe, reorientacja spinów w NiO zachodzi dla mniejszej grubości MgO, co wskazuje na dodatkowy czynnik wymuszający reorientację spinową oddziaływaniem wymiennym na interfejsie Fe i NiO. Ten wniosek został również potwierdzony w badaniach warstw przykrytych Fe o różnej grubości. Dla ultra cienkiego Fe nie zaobserwowano asymetrii kąta azymutalnego, co powiązano z brakiem ferromagnetyzmu warstwy Fe, a tym samym braku sprzężenia EB. Te eksperymenty przeprowadzono dla grubości MgO, dla której  $\Delta RL_2$

jest bliski 0, co pozwoliło ładnie pokazać wpływ warstwy Fe na ustawienie spinów w NiO. Szkoda, że nie pokuszono się o pomiary dla warstw z inną grubością MgO, co w moim odczuciu mogło by pomóc w określeniu, który czynnik w indukowaniu reorientacji spinowej jest dominujący (oddziaływanie wymienne czy naprężenie). Pewien niedosyt pozostawia również fakt, że w rozprawie nie pokazano procesu przemagnesowania warstw Fe w polu magnetycznym zorientowanym np. w kierunku [010] i towarzyszących temu procesowi zmiany orientacji momentów magnetycznych w warstwie NiO. Zgodnie z wcześniejszymi wnioskami momenty NiO powinny ustawiać się prostopadle do kierunku spinów Fe. O tych pomiarach Doktorantka wspomina w swojej publikacji w APL Materials, twierdząc, że obserwowano takie wzajemne ustawienie („*After switching the magnetization of Fe by 90°, the NiO spins rotated by 90° (not shown)*”). Niestety w tej publikacji, te wyniki też się nie pojawiły, a w mojej ocenie są one istotne dla potwierdzenia obecności silnego oddziaływania pomiędzy Fe i NiO. Dlatego liczę, że doktorantka pokaże je na obronie i omówi.

W rozprawie pojawiają się dodatkowo wyniki z mikroskopu PEEM-XMCD i XMLD, które potwierdzają ortogonalne ustawienie spinów warstwy Fe i NiO oraz wspomagają interpretację o zmianie ustawienia domen magnetycznych w NiO związanych ze zmianą naprężenia. Zastosowanie mikroskopowych technik synchrotronowych wymagało od Doktorantki przeprowadzenia bardzo trudnych i czasochłonnych pomiarów, które moim zdaniem dostarczają bardzo wielu ciekawych i wartościowych wyników pozwalających uzupełnić wcześniejsze wnioski.

W rozdziale 7 przedstawiono badania dotyczące możliwości kontroli stanu magnetycznego dwuwarstw Fe/CoO naniesionych na piezoelektryczne podłoże PMN-PT(001) napięciem przykładanym pomiędzy dolną i górną elektrodę PMN-PT. W pomiarach MOKE prowadzonych w szerokim zakresie temperatur zaobserwowano wyraźną zmianę stanu magnetycznego warstwy Fe (zmiana  $H_c$  i  $H_{EB}$ ) pod wpływem przyłożonego napięcia, ale tylko do temperatury bliskiej temperatury Néela. To wskazuje, że za zmianę stanu magnetycznego Fe odpowiada uporządkowanie antyferromagnetyczne CoO. W tej części nie wykonano bezpośrednich pomiarów ustawiania spinów w CoO podczas przykładania napięcia; ale na podstawie wyników prezentowanych w rozdziale 5 i 6 można oczekiwać, że zmiana naprężenia wywołana zmianą wymiarów piezoelektryka wpłynie na stan magnetyczny CoO. Na podstawie pomiarów XRD wykazano, że w funkcji napięcia pojawiają się zmiany naprężenia. Ta zmiana może tłumaczyć reorientację kierunków ustawienia spinów w warstwie CoO, która, na skutek sprzężenia z warstwą Fe, powoduje zmiany pola  $H_c$  w funkcji przykładanego napięcia.

Rozprawa kończy się skondensowanym podsumowaniem, zawierającym najważniejsze konkluzje z uzyskanych wyników. Zwięźle i precyzyjnie zostały one przedstawione w sześciu punktach i odzwierciedlają omówione wcześniej wyniki.

W rozprawie jest niewiele błędów edytorskich i interpunkcyjnych. Pracę czyta się płynnie i jest napisana zrozumiałym językiem. Tabele i rysunki przygotowane są bardzo starannie, z niewielkimi wyjątkami (np. w podpisie na rysunku 5.3 pomyłono opis poszczególnych linii prezentowanych na rysunkach). Pomimo wymienionych drobnych niedoskonałości rozprawy, uważam, że zawiera ona ważne wyniki, a cel rozprawy został osiągnięty. Warto również podkreślić, że Doktorantka zastosowała bardzo nowoczesne, a zarazem bardzo czasochłonne i trudne badania stanu magnetycznego antyferromagnetyków. Przeprowadzona analiza danych eksperymentalnych wspartych dobrze dobranymi symulacjami pokazuje, że mgr inż. Weronika Janus jest doskonale przygotowana do samodzielnej pracy badawczej, a jej dorobek naukowy jest bardzo bogaty (jest współautorem 12 publikacji w czasopiśmie z listy filadelfijskiej dotyczących magnetycznych układów cienkowarstwowych, a dwie z nich są ściśle związane z rozprawą). Rozprawa stanowi spójną formę prezentacji wyników i przedstawia logiczny ciąg podejmowanych kroków badawczych. To pozwoliło

uzyskać zamierzony cel rozprawy, który uważam za ambitny i ważny z punktu widzenia licznych zastosowań. Obecnie w wielu ośrodkach naukowych prowadzone są badania nad opracowaniem metody sterowania ustawieniem momentów magnetycznych w warstwach AFM. Opanowanie tej umiejętności i zrozumienie mechanizmów umożliwiających taką kontrolę pozwoli stworzyć elementy czynne do przetwarzania informacji, których prędkość działania znacznie przekroczy możliwości obecnie spotkanych rozwiązań. Niestety nie dysponujemy obecnie wieloma technikami pozwalającymi na prowadzenie badań takich materiałów, dlatego uważam, że uzyskane wyniki są nie tylko istotne z punktu widzenia kontroli stanu antyferromagnetycznego, ale pokazują również sposób detekcji tego stanu metodami, które są dostępne w większości zespołów badawczych pracujących z cienkimi warstwami magnetycznymi. To może przyspieszyć postęp technologiczny w dziedzinie spintroniki antyferromagnetycznej, dlatego wyniki zawarte w rozprawie zasługują na wyróżnienie.

**Podsumowując, rozprawa doktorska mgr inż. Weroniki Janus pt. „Modulacja właściwości magnetycznych nanostruktur antyferromagnetycznych sterowana zmianą naprężenia” dotyczy kontroli stanu magnetycznego i anizotropii magnetycznej warstw AFM. Przedstawione w rozprawie zagadnienia są ważne z punktu widzenia wytwarzania urządzeń, w których warstwa AFM będzie stanowić aktywny element przetwarzania lub zapisu danych, co niesie ze sobą szereg wcześniej omawianych zalet. Przedstawione w rozprawie wyniki zbliżają nas do zrozumienia mechanizmów pozwalających zmieniać orientację momentów magnetycznych antyferromagnetyka i co również ważne kontrolować te zmiany z wykorzystaniem metod magnetooptycznych. Biorąc pod uwagę przytoczoną wcześniej ocenę poszczególnych części rozprawy, stwierdzam, że spełnione są wymagania ustawowe stawiane kandydatom do stopnia doktora. W związku z tym wnioskuję o dopuszczanie mgr inż. Weroniki Janus do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauki ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie Nauki Fizyczne i wnoszę o wyróżnienie rozprawy.**

