

Warszawa, 27 lipca 2023 r.

prof. dr hab. Andrzej Wawro
Instytut Fizyki PAN w Warszawie

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Pawlaka pt.: *Multiferroiczne złącza tunelowe oparte na BTO/LSMO sterowane prądem spinowym*

Przedmiotem niniejszej oceny jest rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Jakuba Pawlaka zatytułowana: *Multiferroiczne złącza tunelowe oparte na BTO/LSMO sterowane prądem spinowym*. Została ona wykonana na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej pod kierownictwem naukowym prof. dra hab. inż. Marka Przybylskiego i prof. dra hab. Witolda Piskorza, którzy pełnili rolę promotorów.

Recenzowana rozprawa poświęcona jest epitaksjalnym strukturom cienkowarstwowym osadzonym na podłożu z tytanianu strontu (STO) i wytworzonym w głównej mierze z materiałów tlenkowych (perowskitów): manganianu lantanu domieszkowanego strontem (LSMO) i tytanianu baru (BTO). W tego typu układach występuje szeroka gama zjawisk fizycznych, które obecnie nie są jeszcze w pełni poznane i wyjaśnione. Dlatego też struktury te są przedmiotem intensywnego zainteresowania licznych grup badawczych. Przed tego rodzaju materiałami rysuje się również szeroka perspektywa zastosowań praktycznych w konstrukcji nowoczesnych urządzeń elektronicznych (spintronicznych) o wysokim stopniu miniaturyzacji oraz zredukowanym zużyciu energii.

LSMO jest w określonych warunkach przewodzącym materiałem ferromagnetycznym, a BTO izolatorem ferroelektrycznym. W badanej konfiguracji warstwowej mogą one wytworzyć multiferroiczne (połączenie właściwości ferromagnetycznych i ferroelektrycznych) złącze tunelowe składające się z magnetycznych okładek oddzielonych ferroelektryczną barierą. Przez takie złącze może przepływać prąd elektryczny zależny od wzajemnej orientacji namagnesowania elektrod i polaryzacji elektrycznej bariery. Istotną zaletą tego typu struktur jest możliwość sterowania przepływającym prądem elektrycznym bez stosowania zewnętrznego pola magnetycznego, którego generacja znacznie zwiększa gabaryty urządzenia, ogranicza skalę miniaturyzacji i wymaga dostarczenia relatywnie dużej energii. Kontrolę orientacji wzajemnego namagnesowania elektrod można uzyskać za pomocą transferu momentu magnetycznego przepływających elektronów, wykorzystując zjawiska STT (*spin transfer torque*) i SOT (*spin-orbit torque*). Polaryzację bariery można z kolei łatwo regulować za pomocą przyłożonego pola elektrycznego.

Postawionym przez doktoranta celem badań opisanych w rozprawie było uzyskanie multiferroicznego złącza tunelowego pracującego w temperaturze pokojowej oraz sterowanie jego pracą bez stosowania zewnętrznego pola magnetycznego. Na jego realizację składały się bardziej szczegółowe zagadnienia, takie jak: uzyskanie optymalnej struktury krystalicznej czy określenie wpływu morfologii zastosowanego podłoża STO i warunków osadzania warstw na właściwości magnetostatyczne transportowe. Złącza te powinny mieć optymalną architekturę, pracować w temperaturze pokojowej w reżimie prądu spinowego. W kontekście złożoności

zagadnienia wyznaczone cele były bardzo ambitne. Należy również podkreślić, że podjęta tematyka zawarta jest w światowym nurcie badań prowadzonych w dziedzinie spintroniki – nowej gałęzi elektroniki wykorzystującej nie tylko ładunek elektryczny, ale również moment magnetyczny (spin) elektronów do kontroli ich przepływu.

Rozprawa doktorska ma formę szczegółowego opisu podejmowanych zagadnień wzbogaconego pięcioma opublikowanymi pracami współautorstwa doktoranta. Rozpoczyna się ona oświadczeniem autora dotyczącym jego własnego wkładu i rzetelności naukowej oraz promotorów zgłaszających gotowość pracy do recenzji. Po nim pojawia się lista podziękowań autora rozprawy oraz zestaw projektów, z których finansowane były opisane w dysertacji badania. Należy zauważyć, że autor rozprawy kierował projektem Narodowego Centrum Nauki w konkursie Preludium. W dalszej kolejności przedstawiony jest zestaw stosowanych skrótów, bardzo pomocny w sprawnym czytaniu rozprawy, lista publikacji współautorstwa doktoranta i spis treści.

Merytoryczna część rozprawy podzielona jest na siedem rozdziałów. W rozdziale 1 przedstawione są cele pracy. Rozdział 2 wprowadza czytelnika w podstawowe zagadnienia fizyczne, którym poświęcona jest rozprawa, i ich aspekty aplikacyjne. Kolejny rozdział nakreśla dotychczasowy stan wiedzy w dziedzinie prowadzonych badań doktorskich. Zawiera on zarówno opis dotychczas osiągniętych wyników oraz historycznego ich rozwoju. Zaczyna się od określenia idei spintroniki. Następnie charakteryzuje magnetyczne złącze tunelowe (MTJ) z uwzględnieniem magnetostatyki i struktury elektronowej cienkich warstw oraz stosowanych metod obliczeniowych (teoria funkcjonału gęstości, DFT). W dalszej kolejności przybliżone są zjawiska pozwalające na sterowanie pracą złącza tunelowego (STT i SOT). Później następuje wprowadzenie do ferroelektrycznych złączy tunelowych (FTJ). Multiferroiczne złącza tunelowe (MFTJ) wykazują połączone właściwości dwóch wcześniej omawianych złączy MTJ i FTJ. W tym podrozdziale bardzo szczegółowo scharakteryzowane są strukturalne i elektronowe właściwości dwóch podstawowych zastosowanych materiałów LSMO i BTO. Rozdział 4 poświęcony jest użytym technikom badawczym: wytwarzania warstw metodą impulsowej ablacji laserowej (PLD), odbiciowej dyfrakcji elektronów o wysokiej energii (RHEED), magnetometrii (VSM), magnetycznym pomiarom transportowym, pomiarom rezonansu ferromagnetycznego oraz harmonicznego efektu Halla. Rozdział ten kończą uwagi dotyczące obliczeń numerycznych DFT. Wyniki badań i ich dyskusja zawarte są w rozdziale 5. Ich dokładniejsze omówienie znajduje się w dalszej części niniejszej recenzji. Rozdział 6 przedstawia zwarte wnioski i perspektywy planowanych badań. Ostatni, opatrzony numerem 7, jest spisem 249 pozycji literaturowych cytowanych w rozprawie.

Uzyskane wyniki zostały przedstawione w postaci opublikowanych już prac uzupełnionych opisem rezultatów jeszcze nieopublikowanych. Ich przegląd rozpoczne od zawartości tych artykułów.

Praca [A1] poświęcona jest analizie strukturalnej powierzchni podłoża STO, na którym hodowano układy warstwowe będące przedmiotem badań opisanych w rozprawie. Jakość powierzchni podłoża ma kluczowe znaczenie, bowiem determinuje wzrost i jakość struktury krystalicznej tych układów. Główna uwaga skupiona była na identyfikacji domen TiO_2 , których obecność świadczy o dobrze wykształconej powierzchni. Technika badawczą był RHEED, a analizie został poddany uzyskany obraz dyfrakcyjny zawierający prążki dyfrakcyjne powstałe w wyniku rozprośzeń

elastycznych i linii Kikuchi zarówno braggowskie, jak i rezonansowe. Zasadnicza część artykułu zawiera opis powszechnie stosowanej teorii dyfrakcji elektronowej zmodyfikowanej poprzez wprowadzenie uproszczeń do formuł analitycznych oraz modyfikacji opisu linii rezonansowych. Modyfikacje te mogą być stosowane do powierzchni płaskich. Warunek ten został spełniony w badanych układach. Uzyskane eksperymentalnie obrazy dyfrakcyjne porównane zostały z ich symulacjami wykonanymi w oparciu o zaproponowany model. W czasie analizy uwzględnione zostało zjawisko grupowania się prążków Bragga i linii rezonansowych. Praca kończy się wnioskiem, że w przypadku wysokiej jakości powierzchni podłoża STO pojawiają się dwa rodzaje linii Kikuchego, których obecność może być uniwersalna również w przypadku powierzchni innych perowskitów.

W pracy A[2] analizowane są właściwości magnetyczne warstwy LSMO w kontekście parametrów jej osadzania (ciśnienie tlenu w trakcie procesu i po jego zakończeniu) oraz jakości powierzchni podłoża STO (szorstkość, występowanie tarasów) przygotowanego trzema różnymi metodami. Najgładsza powierzchnia podłoża została uzyskana wskutek zastosowania najbardziej inwazyjnego procesu jej przygotowania. Powielenie obecności tarasów podłoża na powierzchni wyhodowanej warstwy LSMO jest dowodem na jej wzrost typu warstwa po warstwie. Wysoka jakość struktury krystalicznej i interfejsu została potwierdzona w badaniach XRD. Namagnesowanie warstwy LSMO układa się w jej płaszczyźnie, ale obecność tarasów indukuje anizotropię magnetyczną z osią łatwą zorientowaną równolegle do krawędzi tarasów. Zaobserwowano, że pole anizotropii rośnie wraz z szorstkością powierzchni. Zależność ta została wytłumaczona pojawieniem się dipolowego mechanizmu oddziaływania. Właściwości magnetyczne warstwy LSMO również zależą od obecności tlenu w czasie procedury jej wytwarzania, która wpływa na relację ilości jonów Mn^{3+} i Mn^{4+} . Niedobór zawartości tlenu powoduje obniżenie namagnesowania nasycenia oraz wzrost pola anizotropii.

Publikacja A[3] opisuje proces przemagnesowania złącza tunelowego STO/LSMO/BTO/MgO/LSMO. Modyfikacja bariery tunelowej polegająca na dodaniu innego izolatora MgO miała na celu wzmocnienie efektu TER. Dobra jakość struktury krystalicznej została potwierdzona w badaniach TEM. Głównym przekazem tej pracy było występowanie antyrównoległej orientacji namagnesowania obu elektrod LSMO w pewnym zakresie przyłożonego pola magnetycznego. Uzyskanie tego efektu było możliwe dzięki odmiennej koercji obu warstw różniących się grubościami. Właściwość ta pozwala na potencjalną regulację przepływu prądu przez złącze za pomocą efektów wpływających na orientację namagnesowania elektrod.

Odmiennej rodzaj złącza multiferroicznego został przedstawiony w pracy A[4]. Jedną z elektrod została wykonana z metalu ferromagnetycznego – Fe (konfiguracja Fe/BTO/LSMO). W celu wykonania pomiarów transportowych badane warstwy zostały poddane procesom litograficznym. Podobnie jak w poprzednim układzie (praca A[3]) w pewnym zakresie pola wzajemna orientacja namagnesowania była antyrównoległa. Pomiarzy TMR przeprowadzone w temperaturze pokojowej pokazały raczej słaby efekt sięgający wartości 0,4%. Natomiast efekt CMR był silniejszy (ok. 3%) i wyraźnie dominował nad TMR ze względu na wysokooporowy stan LSMO w temperaturze pokojowej. Znacznie silniejszy wkład tunelowy pochodził od efektu TER – pomiary prądowo-napięciowe pokazały poziom 270%. Komplementarna metoda określenia TER poza impulsem prądowym pokazała nadal wysoką, choć nieco niższą wartość, równą

100%. Efekty tunelowe dość silnie zależały od temperatury pomiaru. W niskich temperaturach (17K) TMR osiągał poziom 16%, natomiast CMR istotnie malał, prowadząc do dominacji TMR. Należy nadmienić, że na właściwości MFTJ wpływa nie tylko temperaturowa zależność przewodnictwa LSMO, ale również oporu bariery BTO, które prowadzą do niemonotonicznej zależności oporu złącza MFTJ. Badania rezonansu magnetycznego wykorzystującego efekt diody spinowej pokazały dwie różne linie przypisane poszczególnym elektrodom. Oszacowane tłumienie wyznaczone dla warstwy LSMO w badanym układzie (0,002) było porównywalne z wartością uzyskaną dla pojedynczych epitaksjalnych warstw i potwierdziło jej wysoką jakość krystaliczną w bardziej złożonych strukturach

Kolejna konfiguracja złącza MFTJ była analizowana w pracy A[5]. Jedna z okładek została wykonana z Co oraz dodano warstwę Pt. W ten sposób stworzono układ, w którym można badać wpływ efektów wynikających ze sprzężenia spinowo-orbitalnego (Pt) na zachowanie złącza. Badania magneto-transportowe tak zespolonej elektrody metalicznej pokazały, że jej namagnesowanie ułożone jest w płaszczyźnie warstwy. Wyznaczono parametr spinowego efektu Halla (SHE) oraz wykryto występowanie magnetooporu anizotropowego i związanego z SHE. Dalsze badania objęły część złączową. Podobnie jak w złączu opisanym w pracy A[4], efekt CMR był związany z elektrodą LSMO i najsilniej manifestował się w okolicy temperatury Curie. Efekt TMR zmierzony został jedynie w temperaturach poniżej 200 K i nie był widoczny w temperaturze pokojowej. Obniżenie temperatury z pokojowej do 10 K dramatycznie wzmocniło o trzy rzędy wielkości efekt TER. Badania dynamiki rezonansowej całego układu przeprowadzone zostały również w funkcji temperatury. Z jej obniżaniem sygnał pochodzący od warstwy Co nieoczekiwanie malał, natomiast pojawił się od spodniej elektrody LSMO. Takie zachowanie autorzy przypisali złożeniu dwóch efektów: spinowego pompowania w warstwie LSMO i odwrotnego spinowego efektu Halla w złożonej elektrodzie Pt/Co. Wyniki zaprezentowane w pracy A[5] zostały uzupełnione w materiałach dodatkowych raportujących wyniki badań strukturalnych, magnetostatycznych oraz magnetooporowych.

Opisowe fragmenty rozdziału 5, znajdujące się pomiędzy opublikowanymi artykułami, zawierają wprowadzenia do ich treści i uzupełnia uzyskane wyniki, które nie zostały opisane w tych pracach. Pokazano (podrozdział 5.1.3), że supersieci LSMO/BTO z większą ilością powtórzeń również zachowują wysokiej jakości strukturę krystaliczną. Bardziej szczegółowe porównanie właściwości magnetycznych elektrod LSMO hodowanych na podłożu STO i składnikach złożonej bariery: BTO i MgO, zostało przedstawione w podrozdziale 5.2.2. Zawiera on opis obliczeń DFT wyznaczających energie różnych stanów magnetycznych LSMO w zależności od parametru sieciowego zmieniającego się pod wpływem występujących naprężeń. Kolejnym opisanym zagadnieniem jest dynamika magnetyczna warstw LSMO rosnących na różnych buforach (STO, BTO i MgO), z której wyznaczono współczynniki tłumienia. Podrozdział 5.2.3 zawiera wyniki pomiarów magnetooporowych. Przewodnictwo LSMO silnie zależy od występujących w nim złożonych oddziaływań elektronowych. Wyniki obliczeń DFT pokazują gęstości stanów elektronowych dla różnych uporządkowań magnetycznych i rodzajów jonów. Określono również zależność CMR w funkcji temperatury dla warstw LSMO osadzanych na różnych buforach. Zaproponowany model fenomenologiczny sugeruje istotny wpływ dwóch czynników: koercji i temperatury Curie.

Podrozdział 5.3.1 podaje receptę na złożone procesy litograficzne umożliwiające wytworzenie nanostruktur do pomiarów transportowych.

Przedstawiona do oceny rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Jest ona poświęcona strukturom warstwowym zbudowanym z materiałów tlenkowych i metali, które wykazują złożony charakter multiferroicznych złączy tunelowych zawierających ferromagnetyczne elektrody i ferroelektryczną barierę. W przedstawionej rozprawie jej autor opisuje wyniki postępujących badań zaprojektowanych w sposób systematyczny i logiczny, poczynając od analizy strukturalnej podłoża STO i określenia właściwości pojedynczej elektrody LSMO osadzonej na tym podłożu. W dalszej kolejności przedstawia właściwości złącza LSMO/BTO/MgO/LSMO, a następnie modyfikuje jego strukturę poprzez zamianę jednej z elektrod na wykonaną z Fe i w postaci podwójnej warstwy Pt/Co. Pierwsza modyfikacja ma na celu uproszczenie procesu litografii, które skutkuje poprawą jakości złącza tunelowego, a także uzyskanie asymetrii jego architektury prowadzącej do wzrostu TER. Dwuwarstwowa struktura elektrody metalicznej (Pt/Co) miała z kolei umożliwić wystąpienie efektów SOT. Należy podkreślić, że złożoność obserwowanych właściwości analizowanych struktur tunelowych oprócz aspektów poznawczych tworzy obiecujące perspektywy dla zastosowań praktycznych. Namagnesowanie elektrod i polaryzacja bariery, wpływające na przepływ prądu elektrycznego, mogą być regulowane bez obecności zewnętrznych pól, co umożliwia istotną miniaturyzację tego rodzaju urządzeń oraz redukcję dostarczonej energii.

W zasadzie wszystkie cele badań doktorskich, wymienione w początkowej części niniejszej recenzji, zostały osiągnięte. Czytając część opisową, odniosłem wrażenie, że chwilami ambicja badawcza doktoranta wykraczała poza zakres raportowanych wyników. We wszystkich pracach doktorskich A[1-5] kandydat jest pierwszym współautorem, a w trzech z nich – autorem korespondencyjnym. Cztery z nich zostały opublikowane w czasopiśmie o wysokim czynniku wpływu (*impact factor*): *Materials* – 3,8 oraz *Adv. Electron. Mater.* – 6,9 (praca upowszechniona w portalu *arXiv* w dniu pisania recenzji była już opublikowana w tym czasopiśmie). Dla każdej pracy doktorant jasno precyzował jego wkład oraz rzetelnie informował o badaniach prowadzonych przez współpracowników. Dlatego też opublikowane artykuły są wieloautorskie, co jest zjawiskiem standardowym w przypadku tak szeroko zakrojonych badań. Wszystkie powyższe aspekty świadczą o bardzo istotnym udziale doktoranta w przygotowaniu tych prac, jego rzetelności naukowej oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Należy tu wspomnieć, że był on kierownikiem własnego projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w konkursie Preludium. Jestem przekonany, że autor ocenianej rozprawy powinien uzyskać stopień naukowy doktora nauk fizycznych.

Doktorant posiada głęboką wiedzę teoretyczną z zakresu prowadzonych badań. W rozdziale 3 przedstawił bardzo szczegółowo przegląd stanu wiedzy zarówno w kontekście historycznym, jak również obecnie prowadzonych badań. Informacje tam zawarte niejednokrotnie wychodziły poza zakres opisanych w rozprawie badań. Przykładem mogą być: oddziaływania RKKY, Dzyaloshinskii-Moriya, a także szczegółowy opis teorii elektronowych ciała stałego i oddziaływań wymiennych. Choć takie podejście wydłużało pracę recenzenta, to część tę również oceniam wysoko jako spójną kondensację wiedzy szczególnie przydatnej dla osób niezaznajomionych z tą

dziedziną i młodych naukowców rozpoczynających przygodę ze spintroniką. Cytowana literatura jest bardzo obszerna, obejmuje szeroki przedział czasowy i liczy 249 pozycji.

Zastosowane metody eksperymentalne były bardzo różnorodne. W ramach prowadzonych badań wytworzono złożone układy warstwowe, analizowano ich strukturę, określono właściwości magnetostatyczne, transportowe oraz rezonansowe. Przy tak szerokim zakresie eksperymentu konieczne było zastosowanie wysokopróżniowej metody wytwarzania próbek (PLD) oraz licznych technik pomiarowych pozwalających na analizę: struktury powierzchniowej (RHEED, AFM), objętościowej (XRD, EBSD), właściwości magnetostatycznych (VSM), magnetotransportowych (metody dwu- i czterosondowe) i dynamicznych (VNA-FMR). Należy też wspomnieć o konieczności zastosowania technik litograficznych w celu wykonania nanostruktur do badań transportowych. Jestem przekonany, że doktorant jest z nimi dobrze zaznajomiony, nawet jeśli niektórych pomiarów nie wykonywał osobiście. Potwierdza to szczegółowy ich opis w rozdziale 4.

Na uwagę zasługuje również wysoka edytorska jakość rozprawy: czytelny jej układ, przygotowanie tabeli używanych akronimów, dobry język. Tym niemniej znalazłem nieliczne jej niedoskonałości wymienione poniżej:

- > kilkanaście literówek i nieprawidłowych sformułowań gramatycznych,
- > str. 22 – brak wspomnienia w tym miejscu o regule Hunda,
- > str. 33, 59 i 128 – użycie słowa „zapinowane”. Wydaje się, że „kotwiczenie” byłoby lepszym określeniem,
- > str. 80, wzór (4.11) – używanie wielkości M_{eff} przy braku wspomnienia, że jest ono powiązane z anizotropią, bardziej naturalnym wydaje się stosowanie wielkości H_{eff} (np. wzór (3.20) na str. 33),
- > str. 131 – nie jest jasne, którym strukturom odpowiadają wymienione stałe tłumienia,
- > str. 145-146 – brak zgodności opisu procedury litograficznej (str. 145 punkt (4) – osadzanie Ti i Au) z rysunkiem 50 na str. 146 (górne elektrody Fe), błędnie zaznaczony schemat pomiarowy w części 8; rysunek ten odpowiada dopiero opisowi na str. 152,
- > str. 148 – określenie „niecałe” nie jest za bardzo fizyczne.

Wymienione niedociągnięcia nie mają jednak istotnego wpływu na jakość rozprawy.

W czasie czytania rozprawy pojawiły się następujące pytania. Mam nadzieję, że w trakcie obrony rozprawy doktorant odniesie się do nich.

1. Czy są inne dowody, oprócz pętli histerezy pokazanych na rys. 4 w pracy A[3] oraz na rys. 2(a) w pracy A[4], że namagnesowanie elektrod jest rzeczywiście ustawione antyrównoległe (antyferromagnetycznie)? Efekt nie jest bardzo silny i być może przemagnesowanie warstw występuje z lekkim opóźnieniem polowym, odchylając się wzajemnie o relatywnie niewielki kąt. Taki proces mógłby tłumaczyć słaby efekt TMR.
2. W pracy A[2] pokazany jest wpływ struktury schodkowej powierzchni podłoża STO na anizotropię magnetyczną warstwy LSMO. W strukturach tunelowych, opisanych

w późniejszych pracach, nie jest on w ogóle rozważany, choć zawsze spodnia elektroda LSMO była osadzana na buforze STO w ten sam sposób. Dlaczego?

3. Wartość liczbowa anizotropii magnetycznej (dodatnia) została podana jedynie w materiałach uzupełniających pracy A[5], rys. S7. Jaki model anizotropii został przyjęty, jaka jest konwencja znaków i co oznacza parametr K (stała anizotropii efektywnej czy po uwzględnieniu efektów od magnesowania?)? Zazwyczaj wartości dodatnie przyjmuje się dla namagnesowania prostopadłego, a w opisywanych złączach namagnesowanie elektrod ułożone jest w ich płaszczyźnie.
4. Ciekawszym przypadkiem wydają się złącza tunelowe z prostopadłym do płaszczyzny elektrod namagnesowaniem. Czy są perspektywy na uzyskanie takiej konfiguracji w tego typu systemach?

Przechodząc do wniosków końcowych, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Pawłaka pt.: *Multiferroiczne złącza tunelowe oparte na BTO/LSMO sterowane prądem spinowym*, wykonana w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauk fizycznych, spełnia wszystkie wymogi formalne zapisane w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 20 lipca 2018 r. (Art. 187). Mając na względzie kontekst merytoryczny i formalny, **wnioskuję o dopuszczenie** mgr inż. Jakuba Pawłaka do dalszych etapów postępowania w celu nadania mu stopnia doktora nauk fizycznych.

Sugeruję również rozważenie nadania **wyróżnienia** tej pracy. Przemawia za tym: bardzo aktualna jej tematyka, zawierająca nowatorski aspekt poznawczy i aplikacyjny, ciekawe i wartościowe wyniki opublikowane w czterech pracach zamieszczonych w renomowanych czasopismach z listy JCR, pierwsza pozycja kandydata na liście autorskiej we wszystkich jego pracach doktorskich, status autora korespondencyjnego w trzech z nich, szerokie omówienie zjawisk fizycznych związanych z tematyką dysertacji oraz staranna szata edytorska rozprawy.

Andrzej
Waldemar
Wawro

Elektronicznie
podpisany przez
Andrzej Waldemar
Wawro
Data: 2023.07.27
16:00:22 +02'00'
