

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba Pawlaka zatytułowanej:

**„Multiferroiczne złącza tunelowe oparte na BTO/LSMO  
sterowane prądem spinowym”**

wykonanej w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Jakuba Pawlaka dotyczy wytwarzania i badania właściwości wielowarstwowych struktur zbudowanych z manganianu lantanu domieszkowanego strontem (o składzie chemicznym  $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ , skrótowo oznaczanym jako LSMO) oraz tytanianu baru (o składzie chemicznym  $\text{BaTiO}_3$ , w skrócie BTO). Głównym celem pracy było – jak to ujął Autor – „uzyskanie złącza tunelowego wykazującego multiferroiczne własności w temperaturze pokojowej oraz sterowanie nim bez konieczności używania zewnętrznego pola magnetycznego”.

Rozprawa liczy łącznie 193 strony i złożona jest z 7 rozdziałów.

W rozdziale 1 Autor określił wspomniany powyżej główny cel pracy oraz wyodrębnił sześć celów szczegółowych. W mojej ocenie cel obrany przez Autora był bardzo ambitny, gdyż do jego osiągnięcia konieczne było przezwycięzenie wielu trudności technologicznych związanych najpierw z wytworzeniem dobrej jakości układów wielowarstwowych zawierających warstwy ferromagnetyczne i ferroelektryczne, a następnie z dodatkową nanostrukturyzacją tych układów i wytworzeniem kontaktów do pomiarów transportowych.

W rozdziale 2, stanowiącym wstęp, mgr inż. Jakub Pawlak podał motywację podjętych przez siebie badań, zwracając uwagę na możliwość zastosowania multiferroicznych złącz tunelowych w konstrukcji nowoczesnych, szybkich i energooszczędnych, pamięci komputerowych. Moim zdaniem duże szanse aplikacyjne w sposób wystarczający uzasadniają sensowność prac badawczych wykonanych przez Autora.

W rozdziale 3, zatytułowanym „Przegląd stanu wiedzy”, mgr inż. Jakub Pawlak opisał zagadnienia, efekty fizyczne, urządzenia i właściwości materiałów, wykorzystywane w rozprawie, takie jak: spintronika, tunelowy magnetoopór (TMR), magnetyczne złącze tunelowe (MTJ), efekt Spin-Transfer Torque (STT), złącze sterowane z wykorzystaniem STT,

sprzężenie spin-orbita, spinowy efekt Halla (SHE), efekt Spin-Orbit Torque (SOT), złącze sterowane z wykorzystaniem SOT, zjawisko ferroelektryczne, tunelowy elektroopór (TER), ferroelektryczne złącze tunelowe (FTJ), właściwości manganianu lantanu domieszkowanego strontem (w tym efekt kolosalnego magnetooporu (CMR), efekt Jahna-Tellera, oddziaływanie podwójnej wymiany, oddziaływanie nadwymiany oraz zjawisko rozdzielania faz), właściwości tytanianu baru, oraz multiferroiczne złącze tunelowe (MFTJ). W moim odczuciu lista zagadnień dogłębnie przestudiowanych przez Autora w oparciu o współczesną literaturę naukową jest wręcz imponująca i świadczy o zyskaniu ogromnej wiedzy teoretycznej w tematyce rozprawy.

Rozdział 4 Autor poświęcił technikom preparacji próbek i technikom badawczym, wykorzystywanym podczas przygotowywania rozprawy doktorskiej, i przedstawił kolejno: impulsową ablację laserową (PLD), odbiciową dyfrakcję wysokoenergetycznych elektronów (RHEED), litografię elektronową, litografię optyczną, magnetometrię z wibrującą próbką (VSM), pomiary magnetotransportowe, spektroskopię rezonansu ferromagnetycznego (FMR), szerokopasmową spektroskopię rezonansu ferromagnetycznego (VNA-FMR), Spin-Torque FMR (ST-FMR), Spin-Orbit Torque-FMR (SOT-FMR), pomiary harmoniczne Halla oraz obliczenia z wykorzystaniem teorii funkcjonału gęstości (DFT). W mojej ocenie lista technik opisanych przez Autora jest bardzo bogata i nie pozostaje mi w tym miejscu nic innego, jak tylko wyrazić podziw, że Autor większość tych technik potrafił osobiście wykorzystać podczas swoich badań.

W rozdziale 5, zatytułowanym „Wyniki badań i dyskusja”, Autor przedstawił uzyskane przez siebie osiągnięcia i przedyskutował je w kontekście dostępnej literatury światowej. Dużą część informacji zaprezentował w postaci kopii pięciu publikacji naukowych, wplecionych w treść rozdziału i oznaczonych numerami od [A1] do [A5]:

**[A1]** J. Pawlak, M. Przybylski, Z. Mitura, An Analysis of Kikuchi Lines Observed with a RHEED Apparatus for a TiO<sub>2</sub>-Terminated SrTiO<sub>3</sub> (001) Crystal, *Materials* 14 (22), 7077 (2021).

**[A2]** J. Pawlak, A. Żywczak, J. Kanak, M. Przybylski, Surface-Step-Induced Magnetic Anisotropy in Epitaxial LSMO Deposited on Engineered STO Surfaces, *Materials* 13 (18), 4148 (2020).

**[A3]** J. Pawlak, A. Żywczak, G. Szwachta, J. Kanak, M. Gajewska, M. Przybylski, Structure and magnetism of LSMO/BTO/MgO/LSMO multilayers, *Acta Phys. Pol. a* 133, 548-551 (2018).

**[A4]** J. Pawlak, W. Skowroński, A. Żywczak, M. Przybylski, Room-Temperature Multiferroicity and Magnetization Dynamics in Fe/BTO/LSMO Tunnel Junction, *Advanced Electronic Materials* 8 (1), 2100574 (2022).

[A5] J. Pawlak, W. Skowroński, Piotr Kuświk, Marta Gajewska, Fèlix Casanova, Marek Przybylski, Spin Hall Induced Magnetization Dynamics in Multiferroic Tunnel Junction, *Advanced Electronic Materials*, 2300122 (2023).

Każdą kopię Autor poprzedził krótką informacją dotyczącą swego indywidualnego wkładu w jej przygotowanie, a w przypadku artykułu [A5] – dołączył również opublikowane informacje uzupełniające. Ponieważ rozdział 5 jest niewątpliwie najważniejszą częścią rozprawy, to do oceny jego zawartości merytorycznej wrócę w dalszej części niniejszej recenzji.

W rozdziale 6, zatytułowanym „*Konkluzje i perspektywy*”, Autor podsumował wyniki swoich badań i wraził nadzieję, że stanowią one solidny fundament do dalszych prac nad złączami multiferroicznymi w Akademickim Centrum Materiałów i Nanotechnologii AGH, i że złącza tego typu mogą być wkrótce zastosowane w komercyjnej mikroelektronice.

W rozdziale 7 została umieszczona bibliografia, licząca 249 pozycji. Moim zdaniem lista odnośników literaturowych jest bardzo obszerna i świadczy o bardzo dobrym rozeznaniu Autora w literaturze przedmiotu.

Należy jeszcze dodać, że w części przedwstępnej rozprawa zawiera m. in.: (1) oświadczenie Autora o osobistym wykonaniu pracy doktorskiej oraz oświadczenie Promotorów o gotowości pracy do oceny przez recenzentów, (2) wykaz projektów badawczych wspierających wykonanie rozprawy, (3) wykaz używanych skrótów, (4) spis publikacji stanowiących integralną część rozprawy doktorskiej (czyli prac oznaczonych numerami od [A1] do [A5]), (5) spis innych publikacji Autora, liczący 5 pozycji, oraz (6) spis treści.

Przedstawiony powyżej układ rozprawy jest – moim zdaniem – naturalny i logiczny. Autor najpierw wyjaśnił teoretyczne podstawy efektów pojawiających się w badanych problemach, następnie opisał wykorzystane narzędzia preparacyjne i badawcze, i wreszcie zaprezentował i zinterpretował wyniki swoich badań. Cała rozprawa robi wrażenie dobrze przemyślanej i uporządkowanej. Chciałbym zwrócić w tym miejscu uwagę na umieszczone w tekście przez Autora liczne odsyłacze pomiędzy poszczególnymi fragmentami rozprawy, znakomicie ułatwiające znalezienie konkretnych, powiązanych ze sobą, informacji.

W mojej ocenie układ rozprawy nie budzi żadnych zastrzeżeń poza jednym bardzo widocznym brakiem, jakim jest brak streszczenia rozprawy w języku angielskim. Wymóg dołączenia takiego streszczenia jest wyraźnie określony w Art. 187 p.4 „*Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*”.

Wkomponowanie w treść rozprawy pięciu wieloautorskich publikacji [A1] ÷ [A5], opublikowanych w latach od 2018 do 2022 oznacza, że – zgodnie z Art. 187 p.3 „Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” – recenzowana rozprawa musi być postrzegana – przynajmniej w dużej części – jako „zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych” oraz jako „samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej”. W konsekwencji konieczne jest dokonanie oceny samodzielnego wkładu mgr inż. Jakuba Pawlaka w jej przygotowanie. W tym przypadku jest to sprawa o tyle prosta, że we wszystkich publikacjach nazwisko mgr inż. Jakuba Pawlaka rozpoczyna listę autorów, co domyślnie oznacza jego istotny autorski udział. Analiza treści oświadczeń mgr inż. Jakuba Pawlaka, zamieszczonych przed kopią każdej publikacji, pozwala mi na sformułowanie jednoznacznego wniosku o dominującym wkładzie mgr inż. Jakuba Pawlaka, który w przypadku wszystkich publikacji dokonał skomplikowanej i wieloetapowej preparatyki badanych obiektów, wykonał większość pomiarów za pomocą wielu wyrafinowanych technik badawczych i miał znaczący udział w przygotowaniu rękopisów.

Ponieważ publikacje od [A1] do [A5] zostały opublikowane w recenzowanych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym (praca [A5] ukazała się całkiem niedawno, bo 27 czerwca 2023), to wydaje się sprawą naturalną, aby każdej pozycji przypisać odpowiednią liczbę punktów z wykazu Ministerstwa Edukacji i Nauki oraz wskaźnik Impact Factor (IF). Wynik tej operacji przedstawiony jest w poniższej tabeli.

Publikacja	Czasopismo	Liczba punktów z wykazu MEiN*	IF**
[A1]	Materials	140	3.4
[A2]	Materials	140	3.4
[A3]	Acta Physica Polonica A	70	0.7
[A4]	Advanced Electronic Materials	140	6.2
[A5]	Advanced Electronic Materials	140	6.2

\*„Wykaz czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych” będący załącznikiem do Komunikatu Ministra Edukacji i Nauki z dnia 17 lipca 2023 r.

\*\* Journal Citation Reports 2022

Całkowita liczba punktów „ministerialnych” wynosi 630, a sumaryczny Impact Factor osiąga wartość 19.9. Liczby te są – w mojej ocenie – bardzo duże i świadczą o bardzo dobrej jakości całego zestawu publikacji włączonego do rozprawy doktorskiej. Ten fakt ma oczywiście istotne znaczenie dla oceny rozprawy.

Merytoryczna zawartość zasadniczej części rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Pawlaka, jaką jest rozdział 5, stanowi udokumentowanie kolejnych etapów dążenia do realizacji głównego celu pracy, jakim było wytworzenie złącza tunelowego o multiferroicznych właściwościach.

W pierwszym kroku, opisanym w publikacji [A1], Autor opanował technologię wytwarzania atomowo gładkich podłoży z tytanianu strontu  $\text{SrTiO}_3$  (w skrócie STO) z wykorzystaniem techniki PLD i wykazał, że analiza linii Kikuchiego, zarejestrowanych in-situ z zastosowaniem RHEED, jest skutecznym narzędziem umożliwiającym strukturalną charakteryzację materiału tlenkowego wytwarzanego w warunkach, w których osiągnięcie ultra wysokiej próżni nie jest możliwe.

W drugim etapie mgr inż. Jakub Pawlak ustalił optymalne parametry osadzania warstw BTO, LSMO i MgO na podłożu STO, przy których to parametrach następował epitaksjalny wzrost warstwa po warstwie (o czym świadczyły m.in. oscylacje intensywności plamek dyfrakcyjnych RHEED) a interfejsy charakteryzowały się dużą gładkością (czego dowodem były mniejsze od 1 nm szorstkości interfejsów STO/MgO oraz MgO/LSMO oszacowane na podstawie pomiarów wykonanych za pomocą reflektometrii rentgenowskiej (XRR)). Autor miał też możliwość dokładnej kontroli grubości osadzanych warstw. Dodatkowym testem opracowanego przez Autora procesu osadzania warstw było wytworzenie supersieci  $(\text{LSMO/BTO})_6/\text{STO}$  i potwierdzenie jej dobrej jakości m.in. poprzez zgodność rentgenogramów zarejestrowanych za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej (XSRD) z ich komputerową symulacją.

W kolejnym kroku, opisanym w publikacji [A2], Autor zbadał wpływ trzech różnych metod przygotowania podłoża STO i warunków osadzania na tym podłożu warstwy LSMO, na właściwości morfologiczne i magnetyczne warstwy LSMO. W oparciu o pomiary VSM, XRD and AFM wykazał związek pomiędzy anizotropią magnetyczną warstw LSMO i ich tarasową morfologią, wymuszoną podczas osadzania przez tarasy podłoża STO. Stwierdził też zależność anizotropii magnetycznej LSMO od szorstkości podłoża STO, jak również od zawartości tlenu podczas osadzania i schładzania próbki. Do dalszych badań wybrał metodę przygotowania podłoża i warunki tlenowe zapewniające uzyskanie optymalnych właściwości magnetycznych warstw LSMO.

W kolejnym etapie mgr inż. Jakub Pawlak zbadał wpływ cienkich warstw buforowych BTO i MgO na magnetyzację, temperaturę Curie, koercję i stałą tłumienia warstwy LSMO. Badania przeprowadził na trzech próbkach: LSMO/STO, LSMO/BTO/STO oraz LSMO/MgO/STO, przy czym grubość warstwy LSMO wynosiła w każdym przypadku około 25 nm, a grubości warstw buforowych – około 3 nm. W oparciu o pomiary VSM stwierdził, że

w przypadku próbek LSMO/STO i LSMO/BTO/STO zależności magnetyzacji od temperatury były bardzo podobne, natomiast w przypadku próbki LSMO/MgO/STO wartości magnetyzacji były trochę mniejsze. Temperatura Curie we wszystkich przypadkach wynosiła około 330 K. Pole koercji w temperaturze pokojowej dla próbek LSMO/STO i LSMO/BTO/STO wynosiło około 5 Oe, a dla trzeciej próbki było kilkukrotnie wyższe. Współczynnik tłumienia Gilberta wyznaczony za pomocą VNA-FMR wynosił 0.003 dla próbki LSMO/STO, 0.004 dla LSMO/BTO/STO oraz 0.009 dla LSMO/MgO/STO.

W kolejnym kroku, opisanym w publikacji [A3], Autor skoncentrował się na strukturalnych i magnetycznych badaniach wielowarstw o składzie LSMO(38nm)/MgO(2nm)/BTO(4nm)/LSMO(16nm)/STO. Z wykorzystaniem technik AFM i TEM wykazał po raz pierwszy, że epitaksjalny wzrost takiej wielowarstwy jest możliwy i to z ostrymi międzywarstwami. W oparciu o pomiary VSM stwierdził, że temperatura Curie próbki była większa od temperatury pokojowej i że dwie warstwy LSMO miały różne pola koercji, dzięki czemu można je przełączać niezależnie.

W kolejnym etapie mgr inż. Jakub Pawlak powrócił do badań próbek LSMO/STO, LSMO/BTO/STO oraz LSMO/MgO/STO, ale tym razem skupił się na badaniu ich właściwości transportowych. Wykonał pomiary oporu elektrycznego w funkcji temperatury, zarówno w zerowym polu magnetycznym, jak też w polu o indukcji 1T, uzyskując krzywe o charakterze typowym dla LSMO, a więc silnie rosnące wraz ze wzrostem temperatury do temperatury Curie i z lekkim spadkiem oporu powyżej tej temperatury. W temperaturze pokojowej opór próbki LSMO/MgO/STO był około dwa razy większy niż opór próbki LSMO/BTO/STO. Autor dokonał porównania wyników pomiarów z wynikami obliczeń DFT, uzyskując zadowalającą zgodność. Ponieważ opór w polu 1T był zauważalnie mniejszy niż w polu zerowym, Autor wykreślił wartości parametru opisującego kolosalny magnetoopór (CMR) w funkcji temperatury, uzyskując dla wszystkich trzech próbek wyraźne minimum w pobliżu temperatury Curie. Zmierzył także zależności CMR od pola magnetycznego dla trzech temperatur: 250 K, 320 K oraz 350 K.

W kolejnym kroku, Autor dokonał wieloetapowej nanostrukturyzacji wielowarstw LSMO(20nm)/BTO(4nm)/LSMO(10nm)/STO, uzyskując złącze tunelowe o wymiarach  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ . Warto zauważyć, że była to – jak przyznał Autor – pierwsza próba wielokrokowej nanostrukturyzacji perowskitowych wielowarstw w Akademickim Centrum Materiałów i Nanotechnologii AGH. Dla tego złącza Autor wykonał pomiar oporu elektrycznego w funkcji napięcia uzyskując typową charakterystykę tunelową, ale w temperaturze pokojowej nie zaobserwował ani efektu TMR, ani efektu TER. Złącze pracowało niestabilnie, co Autor

wyjaśnił poprzez – między innymi – nie do końca zoptymalizowany proces nanostrukturyzacji, a konkretnie przez destrukcyjny wpływ trawienia jonowego na epitaksjalne warstwy BTO i LSMO. Następna próba polegała na wytworzeniu złącza tunelowego o składzie LSMO(38nm)/MgO(2nm)/BTO(4nm)/LSMO(16nm)/STO i powtórzeniu pomiaru oporu elektrycznego w funkcji napięcia. Tym razem krzywa  $R(U)$  była asymetryczna i parametr TER osiągnął wartość 1000%. Brak jednak było efektu TMR i złącze działało niestabilnie. Te obie nie do końca udane próby zaowocowały dwoma pozytywnymi skutkami: (1) pozwoliły na dokonanie pewnych dodatkowych korekt w skomplikowanym procesie wytwarzania złącz, (2) przekierowały uwagę Autora na złącza tunelowe z górną elektrodą wykonaną z metalu. W przypadku takich złącz w procesie litografii nie było konieczne stosowanie trawienia jonowego.

W pierwszym finalnym etapie, opisanym w publikacji [A4], mgr inż. Jakub Pawlak wytworzył i przebadął multiferroiczne złącza tunelowe o składzie Fe(15nm)/BTO(3nm)/LSMO(35nm)/STO i o rozmiarach planarnych  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ . W oparciu o pomiary RHEED i TEM stwierdził, że podkładka STO była atomowo gładka i że proces wzrostu miał charakter epitaksjalny warstwa po warstwie. Na podstawie pomiarów magnetooporowych wykazał występowanie efektu CMR (przy dużych wartościach pola magnetycznego) oraz efektu TMR (w małych wartościach pola), osiągającego 0.4% w temperaturze pokojowej i 16% w temperaturze 17K. W oparciu o pomiary elektrooporowe wykazał występowanie efektu TER o wartości 270 %. Na bazie pomiarów FMR wykazał istnienie dwóch częstotliwości rezonansowych związanych z elektrodami Fe i LSMO, i dla warstwy LSMO określił wartość współczynnika tłumienia równą 0.002.

W drugim finalnym etapie, opisanym w publikacji [A5], Autor wytworzył i przebadął multiferroiczne złącza tunelowe o składzie Pt/Co/BTO(3.5nm)/LSMO(30nm)/STO i o trzech różnych rozmiarach planarnych  $10\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$  (do pomiarów efektu Halla),  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  oraz  $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$  (do pomiarów TMR i TER). W jednej serii próbek grubość platyny wynosiła 5nm, a grubość kobaltu zmieniała się w zakresie od 1 do 4nm, a w drugiej serii grubość platyny zmieniała się w zakresie od 0 do 10nm, a grubość kobaltu była stała i wynosiła 1.5nm. W oparciu o pomiary TEM Autor stwierdził epitaksjalny wzrost warstw LSMO i BTO i trochę mniej uporządkowane warstwy Co i Pt, osadzone metodą rozpraszania magnetronowego. W oparciu o pomiary EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) wykazał istnienie ostrych granic pomiędzy warstwami LSMO, BTO i Co, oraz niewielkie zmieszanie atomów pomiędzy warstwami Co i Pt. Na podstawie pomiarów techniką SOT-FMR wykazał występowanie spinowego efektu Halla w podwójnej warstwie Pt/Co i związanego z nim efektu SOT oraz

określił parametry magnetyczne warstwy kobaltu (w tym między innymi efektywną magnetyzację dla różnych grubości warstwy Co). W trakcie pomiarów magnetooporowych zaobserwował, w temperaturach niższych od temperatury pokojowej, niewielką wartość parametru TMR. W oparciu o pomiary elektrooporowe wykazał występowanie efektu TER o wartości 1000 % w temperaturze pokojowej. Efekt ten silnie wzrastał wraz z obniżeniem temperatury, osiągając 4 rzędy wielkości w  $T=10K$ .

Podsumowując przegląd merytorycznej zawartości rozprawy doktorskiej, muszę z całym przekonaniem stwierdzić, że wyniki uzyskane przez mgra inż. Jakuba Pawlaka są bardzo wartościowe i aktualne, bowiem dotyczą ważnej tematyki badawczej współczesnej fizyki magnetyzmu, jaką jest z jednej strony optymalizacja materiałów magnetycznych do różnych zastosowań w burzliwie rozwijającej się spintronice, a z drugiej strony opracowanie technologii wytwarzania mikrouządzeń o określonych funkcjonalnościach. Doskonale opanowanie przez mgra inż. Jakuba Pawlaka nowoczesnych metod preparatyki próbek, biegłe posługiwanie się wieloma wyrafinowanymi technikami badawczymi i imponująca znajomość teoretycznych podstaw skomplikowanych zjawisk spinowych, pozwoliła mu na swobodne eksperymentowanie z osadzaniem cienkowarstwowych struktur złożonych z bardzo wymagających materiałów tlenkowych, na ich dodatkową strukturyzację, na rzetelne wykonanie pomiarów ich właściwości strukturalnych, magnetycznych i transportowych, na odpowiednią interpretację uzyskanych wyników i na ich rzeczowe porównanie z doniesieniami literaturowymi. W efekcie mgr inż. Jakub Pawlak osiągnął postawiony sobie ambitny cel i wytworzył muliferroiczne złącza tunelowe o bardzo ciekawych właściwościach i o ogromnym potencjale aplikacyjnym, związanym głównie z zapisem i przechowywaniem informacji. Bez cienia wątpliwości stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Jakuba Pawlaka stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i to problemu bardzo złożonego, do którego rozwiązania niezbędne były szczególne umiejętności i ogromna pracowitość.

Zawartość merytoryczną rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba Pawlaka oceniam bardzo wysoko, biorąc oczywiście pod uwagę także wspomniany wcześniej dominujący wkład mgra inż. Jakuba Pawlaka w osiągnięcie wyników zaprezentowanych w rozprawie w formie publikacji [A1] ÷ [A5]. Ponieważ wyniki swoich badań Autor przedstawił w rozprawie w sposób bardzo uporządkowany i klarowny, niniejszym wyrażam moją jednoznacznie pozytywną ocenę całej rozprawy doktorskiej, która niezbitnie świadczy – moim zdaniem – o



posiadaniu przez mgra inż. Jakuba Pawlaka odpowiedniej ogólnej wiedzy teoretycznej w zakresie fizyki i o umiejętności samodzielnego prowadzenia przez niego badań naukowych.

Na zakończenie recenzji wymienię usterki, które udało mi się zauważyć w rozprawie, natury zarówno merytorycznej jak i formalnej.

Niedociągnięcia związane z zawartością merytoryczną są następujące:

M1. Na stronie 67, pod podpisem rysunku 28 jest następujące zdanie: „*Jak widać na powyższym diagramie (Rysunek 28 a), najwyższą temperaturę Curie wynoszącą 350 K LSMO osiąga dla domieszkowania strontem  $x=0,33$* ”. Czytając to zdanie i patrząc na wskazany diagram można doznać dysonansu poznawczego, bowiem na diagramie wyraźnie widać, że maksimum obszaru fioletowego przypada dla  $x=0.4$ .

M2. Na stronie 111, na rysunku 39 zauważalny jest brak: (1) legendy opisującej krzywe (na podstawie zaszumienia można się domyślić, że niebieska krzywa jest krzywą eksperymentalną), (2) jednostek wielkości fizycznych w tabelce.

M3. W rozprawie daje się zauważyć brak jednolitej konwencji nazewnictwa układów wielowarstwowych. W rozdziale 5.2.2 na stronie 127 znajdujemy zdanie: „*Wytworzono trzy rodzaje próbek: LSMO/STO, LSMO/BTO/STO oraz LSMO/MgO/STO, o grubości LSMO około 25 nm, a grubości warstw buforowych około 3 nm.*” Tutaj nazwa zaczyna się od górnej warstwy, a podkładka wymieniona jest na końcu. W tym samym rozdziale na stronie 132, czytamy: „*Mając to wszystko na uwadze, przeprowadzono szczegółowe badania warstw LSMO/BTO/MgO/LSMO, których efektem była publikacja [A3].*” Takie samo oznaczenie występuje w tytule pracy [A3], a w tejże pracy w podpisie Fig.2 mamy podany pełny skład: „*b)The structure of the sample is STO/LSMO/BTO/MgO/LSMO.*” A więc podkładka jest wymieniona na początku, a górna warstwa na końcu. W pracach [A4] i [A5] podkładka ponownie kończy wyliczanie składników próbek.

M4. Na stronach 140 i 141 w kilku miejscach można spotkać zapis: „*pola magnetycznego  $H=1 T$* ” lub „*pola  $H=1 T$* ”. Jest to zapis daleki od ścisłości fizycznej, bowiem symbol „H” powszechnie używany jest w naukach fizycznych do określenia natężenia pola magnetycznego, wyrażanego w amperach na metr (A/m). Natomiast w teslach (T) wyraża się indukcję pola magnetycznego, oznaczaną tradycyjnie symbolem „B”, a także wielkość „ $\mu H$ ”, czyli natężenie pola magnetycznego pomnożone przez przenikalność magnetyczną próżni (bowiem w próżni  $B=\mu_0 H$ ).

M5. Na stronie 148 znajduje się następujący tekst: „*Przedstawione poniżej charakterystyki  $I(V)$  oraz  $R(V)$  próbki LSMO/BTO/MgO/LSMO (Rysunek 53) obarczone są więc dużą*

niepewnością pomiarową. Jednakże widoczna jest pętla histerezy, świadcząca o istnieniu efektu TER.” Patrząc na rysunek 53 można zauważyć co najmniej dwie niezgodności z powyższym fragmentem tekstu, bowiem: (1) na rysunku 53 jest zależność tylko  $R(V)$ , (2) na rysunku 53 nie widać pętli histerezy, tylko punkty rozrzucone wzdłuż kilku krzywych. Być może łatwiej byłoby zobaczyć jakiś zarys histerezy, gdyby punkty pomiarowe zarejestrowane przy różnych kierunkach zmian napięcia były w jakiś sposób wyróżnione, albo gdyby dodany był schematyczny kształt oczekiwanej histerezy.

Usterki formalne i językowe (gramatyczne, stylistyczne i literowe) są następujące (w większości przypadków nie podaję propozycji korekty, tylko w zacytowanych fragmentach zdań wskazuję wytłuszczoną czcionką to, co jest w moim odczuciu nie tak jak trzeba):

F1. Strona 21, 9. wiersz od dołu: „*pasma ... mogą być przesunięte na energii*” (błąd stylistyczny, a może skrót myślowy albo lokalny żargon laboratoryjny?)

F2. Strona 25, 2. wiersz od dołu: „... wprowadzenia dodatkowej dyskretnej *współrzędnej dwóch wartościach*.” (błąd literowy, brakuje „o” przed „dwóch”)

F3. Na stronie 42, w 9. i 3. wierszu od dołu podane są niekompletne odnośniki do rozdziału 3.4. Chodzi oczywiście o rozdział 3.4.3.

F4. Stroniam 46, zdanie: „*Pierwsze ultracienkie warstwy ferroelektryczne (w temperaturze pokojowej), rzędu kilku komórek elementarnych (~2 nm), uzyskano na początku lat 2000. w perowskitach [92].*” brzmiałoby o wiele lepiej, gdyby przed słowem „*rzędu*” dodać frazę „*o grubości*”.

F5. Strona 57, 18. wiersz od dołu: „... *jego moc tego wynosi 21 MW*” (błąd stylistyczny)

F6. Strona 58, 3. wiersz od dołu: „*W kolejnym rozdziale 3.6.1 zostały opisane wykorzystywane w złączach MFTJ materiałach i ich własności.*” (błąd gramatyczny)

F7. Stronie 60, 19. wiersz od dołu: „... *przyczynia się do zwieszenia parametru TMR ...*” (błąd dwuliterowy)

F8. Strona 61, 1. wiersz od góry: „*Związki TMO o wzorze chemicznym  $ABO_3$  i grupie przestrzennej  $P6mm$  (co przedstawia Rysunek 23) nazywane są **one** perowskitami.*” (błąd stylistyczny)

F9. Strona 129, 7. wiersz od góry: „*Zwiększenie temperatury Curie może pozwolić **podnieć** parametr TMR.*” (błąd literowy)

F10. Strona 129, 8. wiersz od góry: „*Zaś cienka **przekład** LSMO o przejściu fazowym metal-izolator ...*” (błąd literowy)

F11. Strona 129, 17. wiersz od góry: „*Jedynym realizowalnym podejściem **wydaję** się więc analiza teoretyczna, ...*” (błąd literowy)

F12. Strona 137, 8. wiersz od góry: „*Jak pokazuje literatura **opór** przypadku próbki ...*”  
(błąd literowy, brakuje „w” przed „przypadku”)

F13. Strona 137, ostatnie zdanie w pierwszym akapicie: „*Charakter **zmierzonych** krzywej jest typowy dla LSMO [208].*” (błąd gramatyczny)

F14. Strona 175, ostatnie zdanie w trzecim akapicie: „*Podejmując badania, w pierwszej kolejności **przyłożono szczególną uwagę** do ...*” (błąd stylistyczny)

F15. Strona 177, 9. wiersz od góry: „*Zamiast trawienia w celu nanostrukturyzacji górnej elektrody, kontaktów, **jaki i** warstwy izolującej...*” (błąd literowy)

Wymienione powyżej niedociągnięcia – co pragnę wyraźnie zaznaczyć – nie miały istotnego wpływu na moją pozytywną ocenę całej rozprawy.

Reasumując stwierdzam, że – w mojej opinii – przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Jakuba Pawlaka z naddatkiem spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o:

- (1) dopuszczenie mgra inż. Jakuba Pawlaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego,
- (2) wyróżnienie przygotowanej przez mgra inż. Jakuba Pawlaka rozprawy doktorskiej, ze względu na osiągnięcie bardzo wartościowych wyników opublikowanych w pięciu czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym.

*Marek Kisielewski*

