

Poznań 12 lipca 2023.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Pawlaka zatytułowanej „Multiferroiczne złącza tunelowe oparte na BTO/LSMO sterowane prądem spinowym”

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr. Jakuba Pawlaka dotyczy magnetycznych nanostruktur warstwowych wykorzystujących efekty spintroniczne. Struktury takie są aktualnie intensywnie badane ze względu na liczne, już wdrożone i perspektywiczne, zastosowania głównie w technologiach informatycznych. Jednym z najważniejszych elementów spośród nanostruktur spintronicznych są złącza tunelowe utworzone z elektrod ferromagnetycznych przedzielonych warstwą izolatora. W złączach takich wzajemna orientacja kierunków namagnesowania w elektrodach może być zmieniana pod wpływem pola magnetycznego lub prądu, a odczyt odbywa się poprzez pomiar oporności złącza. Pewną odmianą tego typu elementów są multiferroiczne złącza, w których bariera tunelowa wykonana jest z ferroelektryka, dzięki czemu oporność złącza zależy nie tylko od wzajemnej orientacji namagnesowania elektrod ferromagnetycznych, ale również od kierunku polaryzacji ferroelektryka, co wzbogaca zakres zastosowań takich złącz. W tym kontekście należy uznać, że rozprawa doktorska mgr. Jakuba Pawlaka poświęcona multiferroicznym złączom tunelowym dotyczy bardzo ważnych i aktualnych zagadnień.

Praca doktorska mgr. Jakuba Pawlaka jest bardzo obszerna (193 strony) i ma, moim zdaniem, nietypową formę. Praca jest napisana w języku polskim, a jej integralną część stanowi pięć anglojęzycznych publikacji, których Doktorant jest współautorem.

Układ pracy jest typowy. W pierwszym rozdziale doktorant określił ogólny cel pracy oraz w sześciu punktach cele szczegółowe. Z ich treści wynika, że dotyczą one nie tylko zagadnień związanych z technologią wytwarzania układów warstwowych z określonych materiałów oraz wytwarzania złącz tunelowych, ale również interpretacji pomiarów realizowanych z wykorzystaniem wielu komplementarnych metod badawczych.

Rozdział drugi zatytułowany „Wstęp” stanowi uzasadnienie wyboru tematyki rozprawy oraz wyboru materiałów z jakich wytwarzane były złącza tunelowe, których właściwości przedstawione są w głównej części pracy doktorskiej.

Opis stanu wiedzy w zakresie dotyczącym tematyki dysertacji jest przedstawiony w rozdziale trzecim, który liczy ponad pięćdziesiąt stron i składa się z sześciu podrozdziałów. Pierwszy z nich (rozdział 3.1) zawiera ogólne informacje dotyczące spintroniki. W tej części doktorant wyjaśnił jakich zagadnień dotyczy spintronika i przybliżył istotne pojęcia, jak np.: polaryzacja spinowa, prąd spinowy, gigantyczny magnetoopor.

Rozdział 3.2 dotyczy magnetycznych złącz tunelowych (MTJ). Pierwsza jego część zawiera podstawowe informacje związane z klasyfikacją materiałów magnetycznych (ze szczególnym uwzględnieniem materiałów ferromagnetycznych), oddziaływań wymiennych, anizotropii magnetycznej, dynamiki magnetyzacji i efektów magnetooporowych. Druga, zatytułowana „Magnetyzm elektrod a ich struktura elektronowa” poświęcona jest głównie modelom pozwalającym wyjaśnić właściwości magnetyczne LSMO, to jest najważniejszego materiału w badanych przez Doktoranta układach warstwowych. Opis zjawiska tunelowego magnetooporu (TMR) jest przedstawiony w rozdziale 3.2. Poza jego wyjaśnieniem zaprezentowano jak w perspektywie kilkudziesięciu lat, stosując różne materiały na ferromagnetyczne elektrody oraz różne rodzaje warstw

izolujących, uzyskiwano systematyczny wzrost wartości TMR. Podrozdział ten kończy opis konstrukcji i działania magnetooporowej komórki pamięci RAM (MRAM).

W rozdziale 3.3. Doktorant omówił przełączanie kierunku namagnesowania ferromagnetycznej warstwy przez płynący przez nią prąd elektryczny wykazujący spinową polaryzację nośników (efekt STT). Wyjaśniając podstawy fizyczne tego zjawiska mgr Pawlak opisał związaną z tym zagadnieniem dynamikę procesu magnetyzacji.

Przełączanie kierunku namagnesowania z wykorzystaniem prądu spinowego (efekt SOT) jest przedmiotem rozdziału 3.4. Wyjaśnienie efektu SOT Doktorant poprzedził omówieniem oddziaływania spin-orbita i spinowego efektu Halla będącego źródłem prądu spinowego.

W rozdziale 3.5 mgr Jakub Pawlak przybliżył najważniejsze informacje dotyczące materiałów ferroelektrycznych, a następnie omówił zasadę działania ferroelektrycznych złącz tunelowych (FTJ). Wiele uwagi poświęcił również materiałom stosowanym w takich strukturach.

Rozdział 3.6, stanowiący ostatnią część omówienia stanu wiedzy, poświęcony jest multiferroicznym złączom tunelowym (MFTJ). Wytworzenie tego typu złącz stanowiło nadrzędny cel pracy doktorskiej. Podobnie jak w przypadku złącz MTJ i FTJ również tutaj opisana została przez Doktoranta budowa i zasada działania MFTJ. Wiele uwagi poświęcono omówieniu właściwości materiałów, jakie wykorzystywane są w takich złączach, ze szczególnym uwzględnieniem manganianu lantanu domieszkowanego strontem (LSMO) oraz tytanianu baru (BTO).

Opis stanu wiedzy, ze względu na zakres tematyczny obejmujący wiele zagadnień, był niewątpliwie bardzo trudnym zadaniem. Uważam, że mgr Jakub Pawlak poradził sobie z nim bardzo dobrze, wykazując tym samym, że posiada ogólną wiedzę w zakresie dyscypliny nauki fizyczne. Chcę również podkreślić, że przedstawiony w rozdziale trzecim opis stanu wiedzy obejmuje nie tylko wyjaśnienie istotnych z punktu widzenia dysertacji zjawisk fizycznych i przykładów ich zastosowań, ale pokazuje także historię rozwoju spintroniki. Uważam, że mgr Pawlak trafnie dobrał zakres prezentowanego materiału ograniczając się do zagadnień istotnych z punktu widzenia interpretacji wyników własnych badań. Również trafnie wybrał literaturę (158 pozycji), z której korzystał podczas opracowania tej części rozprawy.

W rozdziale czwartym zatytułowanym „Techniki badawcze” Doktorant słusznie opisał jedynie te metody wytwarzania próbek i charakteryzacji ich właściwości, które realizował osobiście. Obejmują one: (i) osadzanie warstw metodą PLD z równocześnie prowadzoną kontrolą wzrostu z wykorzystaniem metody RHEED, (ii) procesy strukturyzacji warstw realizowane z wykorzystaniem litografii elektronowej i optycznej oraz innych niezbędnych w tym procesie urządzeń stanowiących wyposażenie pomieszczenia o podwyższonej czystości (cleanroom), (iii) pomiary właściwości magnetycznych z wykorzystaniem magnetometru z wibrującą próbką, (iv) pomiary magnetotransportowe, (v) pomiary dynamiki magnetyzacji realizowane z wykorzystaniem różnych metod (VNA-FMR, Spin-Torque-FMR, diodowy Spin-Torque, SOT-FMR), pomiary harmoniczne efektu Halla. Rozdział czwarty kończy podrozdział dotyczący obliczeń DFT, które Doktorant prowadził przy współpracy z Prof. Piskorzem, pełniącym funkcję drugiego promotora.

Rozdział czwarty zawiera, moim zdaniem, wszystkie niezbędne informacje dotyczące technologii wytwarzania badanych w pracy układów warstwowych i nanostruktur oraz metod ich charakteryzacji, jak również wspierających interpretację obliczeń DFT. W sposób szczególny chcę podkreślić trafność wyboru metody PLD do osadzania warstw wieloskładnikowych (BTO, LSMO). Na najwyższe uznanie zasługuje jednak wykorzystanie szerokiego spektrum pomiarów transportowych zastosowanych do scharakteryzowania statycznych i dynamicznych magnetycznych właściwości badanych złącz. W zakresie tych badań AGH ma wieloletnią tradycję i niewątpliwą pozycję lidera w Polsce i jednego z najsilniejszych ośrodków w Europie.

Prezentacja wyników własnych wraz z ich dyskusją stanowi treść rozdziału piątego. Jest on podzielony na trzy główne części obejmujące: (i) technologię wytwarzania warstw wraz z kontrolą ich jakości, (ii) opis właściwości cienkich warstw LSMO, (iii) badania różnego typu multiferroicznych złącz tunelowych.

Uzyskanie cienkich warstw LSMO i BTO o właściwościach atrakcyjnych dla zastosowań w złączach tunelowych stanowi trudny technologicznie problem, co Doktorant wykazał już w rozdziale 3.6 na podstawie badań literaturowych. W celu uzyskania epitaksjalnego wzrostu warstw niezbędny jest dobór odpowiedniego podłoża, jak również jego perfekcyjne przygotowanie. W tym przypadku podłoże stanowił SrTiO₃ (STO) charakteryzujący się stałymi sieciami zbliżonymi do LSMO i BTO. Natomiast sposób przygotowania podłoża zaczerpnięto z pracy Bachelet i inni (Appl. Phys. Lett. 2009). Ocena skuteczności procesu przygotowania podłoża prowadzono z wykorzystaniem metody dyfrakcji wysokoenergetycznych elektronów (RHEED) wraz z analizą linii Kikuchiego. Metoda ta została opisana w pracy A1 zatytułowanej „An Analysis of Kikuchi Lines Observed with a RHEED Apparatus for TiO₂-Terminated SrTiO₃ (001) Crystal”, opublikowanej w Materials 14 (2021) 7077. Praca ta w dominującej części poświęcona jest interpretacji zmierzonych obrazów RHEED w oparciu o zaproponowane metody obliczeniowe

Kontynuując omawianie zagadnień związanych z technologią wytwarzania warstw (rozdział 5.1) Doktorant omówił strukturę warstw BTO, LSMO i MgO osadzanych w warunkach zapewniających ich epitaksjalny wzrost. Wiele uwagi poświęcił precyzyjnemu określeniu grubości warstw, ich struktury krystalograficznej i szorstkości interfejsów. Należy tu podkreślić zastosowanie w badaniach wielu komplementarnych metod badawczych. Wymiernym efektem końcowym tego etapu badań jest optymalizacja procesu osadzania, co pozwoliło na wykonanie epitaksjalnych warstw LSMO/MgO/STO wykazujących wzrost typu warstwa po warstwie oraz charakteryzujących się niewielką szorstkością interfejsów. Mgr Pawlak wykonał również supersieci (LSMO/BTO)₆/STO, których struktura została określona z wykorzystaniem dyfrakcji rentgenowskiej oraz dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych.

W rozdziale 5.2 Doktorant zaprezentował wyniki swoich badań dotyczących właściwości magnetycznych i transportowych warstw LSMO. Część z nich, obejmująca właściwości magnetyczne została przedstawiona w dwóch publikacjach (prace A2 i A3). Pierwsza z nich pod tytułem „Surface-Step-Indiced Magnetic anisotropy in Epitaxial LSMO Deposited on Engineered STO Surfaces”, opublikowana w Materials 13 (2020) 4148, dotyczy określenia właściwości magnetycznych warstw LSMO osadzanych na podłożach STO przygotowanych do osadzania w różny sposób oraz wpływu ciśnienia parcjalego tlenu podczas osadzania warstw LSMO metodą PLD, jak również podczas schładzania próbki po tym procesie. Stosując różne metody przygotowania podłoża STO (100) wyciętego pod pewnym kątem względem płaszczyzny krystalograficznej uzyskano tarasową strukturę. Warstwa LSMO osadzana na takim podłożu odwzorowuje jego strukturę. Pomiar pętli histerezy wykazały, że oś łatwa jest zorientowana równolegle do krawędzi tarasów, a pole anizotropii wzrasta wraz ze wzrostem szorstkości. Druga ważna część tej publikacji dotyczy wpływu utleniania warstwy LSMO po procesie osadzania. Wykazano, że proces ten skutkuje degradacją właściwości ferromagnetycznych LSMO.

Omawiana praca (A2), zgodnie z informacjami w niej zawartymi, stanowi uzupełnienie wcześniejszych badań w zakresie magnetycznej anizotropii LSMO związanej z wicinalną strukturą STO (ref. 40 i 41 z pracy A2). Podobnie rezultaty dotyczące wpływu utleniania warstw LSMO były już wcześniej przedmiotem prac cytowanych w pracy A2 (ref. 45 i 46). Szkoda, że w omawianej publikacji nie wykazano w jakim stopniu prezentowane rezultaty wzbogaciły naszą wiedzę w zakresie anizotropii warstw STO/LSMO. Trochę nieoczekiwanym wynikiem jest dla mnie uzyskanie najmniejszej szorstkości podłoża STO dla najmniej inwazyjnej metody (płukanie w wodzie dejonizowanej) jego przygotowania. Inne uchybienie dotyczy metody osadzania. W części „2. Materials and Methods” jest

informacja, że osadzanie warstw realizowano z wykorzystaniem metody PLD. Natomiast z podpisu do rysunku 6. można wnioskować, że warstwy osadzone były metodą rozpylania jonowego (sputtering).

Kontynuując omawianie właściwości magnetycznych warstw LSMO mgr Pawlak przedstawił wyniki badań dla trzech typów warstw LSMO/STO, LSMO/BTO/STO i LSMO/MgO/STO. Wykazały one stosunkowo niewielkie różnice temperatury Curie dla poszczególnych układów warstwowych i wyraźnie większą koercję warstw LSMO osadzanych na buforze MgO niż w pozostałych dwóch przypadkach. Z pomiarów FMR określony został współczynnik tłumienia, który najmniejsze wartości wykazuje dla warstw LSMO osadzanych bezpośrednio na STO. Przy współpracy z Prof. Piskorzem (drugim promotorem pracy) Doktorant przeprowadził obliczenia DFT, które pokazały, że dla przyjętych parametrów preferowane jest uporządkowanie ferromagnetyczne. Nieco więcej uwagi mgr Pawlak poświęcił badaniom właściwości magnetycznych struktur LSMO/BTO/MgO/LSMO/STO, które zaprezentował w pracy A3 zatytułowanej 'Structure and Magnetism of LSMO/BTO/MgO/LSMTO opublikowanej w Acta Physica Polonica A, 133 (2018) 548. Wyniki badań dotyczące tego rodzaju układów warstwowych, pomimo prognozowanych atrakcyjnych dla zastosowań właściwości w szczególności wysokiej wartości tunelowego elektrooporu (TER), nie były dotychczas publikowane. Przyczyną tego prawdopodobnie były trudności związane z technologią wykonania takich struktur wykazujących pożądane parametry. Praca A3 stanowi istotny krok w kierunku głównego celu pracy doktorskiej mgr. Jakuba Pawlaka, którym jest wytworzenie złącza MFTJ. Jest tak dlatego, że badany w pracy A3 układ warstw mógłby być wykorzystany do wykonania MFTJ. W pracy A3 pokazano, że optymalizacja technologii wytwarzania warstw LSMO, BTO i MgO na podłożach STO pozwoliła na wytworzenie perfekcyjnie uporządkowanych układów warstwowych LSMO/MgO/BTO/LSMO, co wykazano z wykorzystaniem wysokorozdzielczej transmisyjnej mikroskopii elektronowej. Bardzo ważnym rezultatem badań magnetycznych było pokazanie, że T_C warstw LSMO jest o 25 K wyższa od temperatury pokojowej, a kształt pętli histerezy wykazuje sekwencyjne przemagnesowanie dolnej i górnej warstwy LSMO. Jest to jednym z warunków uzyskania efektu TMR w strukturach typu pseudo zawór spinowy.

Rozdział 5.2. kończy omówienie oporu i magnetooporu cienkich warstw LSMO. Badania te, podobnie jak wcześniej omówione badania właściwości magnetycznych, Doktorant przeprowadził dla warstw osadzanych na STO oraz na MgO/STO i BTO/STO. Badania oporu elektrycznego w funkcji temperatury pozwoliły wykazać korelację pomiędzy właściwościami magnetycznymi i elektrycznymi, w szczególności pomiędzy T_C i temperaturą przejścia metal-izolator. Interpretacja tych korelacji wsparta została obliczeniami DFT. Dominującym efektem magnetooporowym w warstwach LSMTO jest kolosalny magnetoopór (CMR). Doktorant przedstawił zależności CMR(H) dla temperatury w pobliżu T_C , jak również dla $T < T_C$ i $T > T_C$. Omawiając te zależności przywołał różne hipotetyczne interpretacje, wskazując jednocześnie na brak pełnego teoretycznego wyjaśnienia tego efektu. Niemniej, na podstawie prezentowanych zależności CMR(H,T), które dobrze opisuje fenomenologiczna formuła zaproponowana przez Kirchene (ref. 246) wykazał istnienie dwóch różnych efektów odpowiedzialnych za CMR w temperaturach poniżej i powyżej T_C .

Ostatnią część rozdziału związanego z prezentacją wyników własnych mgr Pawlak poświęcił multiferroicznemu złączom tunelowym. O tym, że jest to najważniejsza część pracy doktorskiej świadczy choćby to, że zagadnienia tu omawiane nawiązują bezpośrednio do tytułu rozprawy. W ramach tego rozdziału Doktorant omawia trzy typy złącz MFTJ: (i) LSMO/BTO/LSMO i LSMO/BTO/MgO/LSMO, (ii) Fe/BTO/LSMO, (iii) Pt/Co/BTO/LSMO.

Omówienie złącz LSMO/BTO/LSMO i LSMO/BTO/MgO/LSMO zawiera informację o procesie strukturyzacji warstw. Oprócz części opisowej przedstawiony jest graficzny schemat poszczególnych etapów (Rys.50). Jednak struktura warstwowa na nim przedstawiona odpowiada złączu złożonemu z warstw Fe/BTO/LSMO, czyli innemu niż dyskutowane w tym rozdziale (5.3.1.). Uchybienie to nie jest jednak istotne, natomiast bardzo ważnym efektem tych badań było porównanie procesu strukturyzacji z wykorzystaniem trawienia jonowego z metodą lift-off. Doktorant wykazał, że trawienie jonowe

destruktywnie wpływa na właściwości epitaksjalnych warstw BTO i LSMO, przy czym zastąpienie procesu strukturyzacji z wykorzystaniem trawienia jonowego procesem lift-off w układach warstwowych z dwoma elektrodami LSMO nie jest możliwe ze względu na wysoką temperaturę podłoża podczas osadzania warstwy LSMO.

Dla omawianych złącz Doktorant przedstawił zależności $R(V)$. W przypadku zależności pokazanej na Rys. 53, zmierzonej dla struktury LSMO/BTO/MgO/LSMO, w zakresie dodatnich wartości V widoczna jest histereza zależności $R(V)$. W zakresie ujemnych wartości punkty pomiarowe odpowiadają prawdopodobnie tylko jednemu kierunkowi zmian V , ale przy braku zaznaczenia kierunku zmian napięcia nie można tego jednoznacznie stwierdzić. Ostatnia część podrozdziału 5.3.1. dotyczy podwójnych złącz tunelowych. Nie zawiera ona jednak żadnego wyniku pomiaru takich złącz.

Złącza Fe/BTO/LSMO są opisane w rozdziale 5.3.2. dysertacji mgr. Pawlaka. Zastąpienie górnej warstwy LSMO warstwą Fe umożliwiło Doktorantowi zastosowanie w procesie strukturyzacji techniki lift-off, co pozwoliło na wyeliminowanie destrukcyjnego wpływu trawienia jonowego na strukturę warstwy BTO/LSMO. Wyniki badań strukturalnych, magnetycznych, tunelowego magnetooporu, tunelowego elektrooporu, oraz dynamiki procesu magnesowania zostały przedstawione w pracy A4 „Room-Temperature Multiferroicity and Magnetization Dynamics in Fe/BTO/LSMO Tunnel Junction” opublikowanej w *Advanced Electronic Materials* 8 (2022) 210574. Wykazano, że optymalizacja procesu osadzania, preparatyki podłoża STO i strukturyzacji z wykorzystaniem metody lift-off pozwoliła uzyskać złącza z epitaksjalną warstwą LSMO. W dużym stopniu dzięki temu w pomiarach elektrycznych obserwowano zmiany oporności układu zarówno w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego, czyli efekty TMR i CMR, jak również w funkcji napięcia, czyli efekt TER. Badania temperaturowe tych efektów pozwoliły Doktorantowi pokazać, że udział poszczególnych efektów jest funkcją nie tylko pola magnetycznego ale również temperatury. Ważnym rezultatem badań prezentowanych w pracy A4 jest pokazanie, że pomiary FMR przeprowadzone z wykorzystaniem efektu ST-FMR (dokładniej efektu Spin Torque Diode) wykazały niezależnie sygnał od warstwy Fe jak i LSMO. Liniowa zależność szerokości linii rezonansowej od częstotliwości dla pików związanego z warstwą LSMO pozwoliła na wyznaczenie tłumienia, którego wartość $\alpha = 0.002$ odpowiada epitaksjalnej warstwie LSMO. Należy zaznaczyć, że praca A4 jest pierwszą pracą, w której zaprezentowano multiferroiczność złącza tunelowego, którego jedną elektrodę stanowi warstwa LSMO.

Ostatni podrozdział rozprawy doktorskiej mgr. Jakuba Pawlaka, związany z omawianiem wyników badań własnych, dotyczy multiferroicznych złącz tunelowych Pt/Co/BTO/LSMO. W odróżnieniu od złącz omówionych w poprzednim podrozdziale, w których prąd płynący przez złącze dzięki efektowi STT generował dynamikę procesu magnesowania, w złączach będących przedmiotem zainteresowania w tym rozdziale dynamika magnesowania jest wynikiem efektu SOT, czyli prądu spinowego generowanego w warstwie Pt dzięki spinowemu efektowi Halla. Rezultaty badań zostały przedstawione w pracy A5 zatytułowanej „Spin Hall Induced Magnetization Dynamics in Multiferroic Tunnel Junction”, która w momencie składania pracy doktorskiej dostępna była w repozytorium ArXiv (2023), a obecnie jest opublikowana w renomowanym czasopiśmie *Advanced Electronic Materials* (IF 7.63). Podobnie jak w pracy A4, wykorzystano wcześniejsze doświadczenie Doktoranta w zakresie optymalizacji procesu osadzania i strukturyzacji warstw BTO/LSMO na podłożu STO. Górne warstwy Co i Pt wykonane zostały metodą rozpylania jonowego. Perfekcyjną strukturę warstw potwierdziły badania z wykorzystaniem HR-TEM z uzupełnieniem o profile rozkładu pierwiastków (analiza EDX). Ważnym rezultatem pracy A5 było zaobserwowanie w pomiarach SOT-FMR sygnału pochodzącego od elektrody LSMO, co zgodnie z sugestią autorów pracy jest wynikiem pompowania spinowego indukowanego polem Oerstedera oraz odwrotnym spinowym efektem Halla zachodzącym w górnej elektrodzie (Co/Pt).

Rozprawę doktorską mgr. Jakuba Pawlaka kończy rozdział 6. Zatytułowany „Konkluzje i perspektywy”, w którym wymienione są najważniejsze osiągnięcia badań. W szczególności dotyczy to wykonania

multiferroicznych złącz tunelowych wykorzystujących warstwę LSMO jako ferromagnetyczną elektrodę i BTO jako ferroelektryczną przekładkę, których właściwości wskazują na możliwe praktyczne zastosowania.

W pracy doktorskiej mgr. Jakuba Pawlaka występują nieliczne błędy redakcyjne, których część wymieniam z obowiązku recenzenta.

Str. 32. „Jednym z wykorzystywanych sposobów zmniejszenie potrzebnego prądu do zmiany kierunku namagnesowania elektrod jest ich podgrzanie [50].”

Str. 58. „Aktualne problemy badawcze w kontekście zastosowań urządzenia MFTJ w spintronice dotyczą różnych obszarów.”

Str. 58. „W kolejnym rozdziale 3.6.1 zostały opisane wykorzystywane w złączach MFTJ materiałach i ich własności.”

Str. 59. „Gdy sterowanie kierunkiem magnetyzacji złącza ma odbywać się z wykorzystaniem SOT (opisane w rozdziale 3.4.1), złącze wymaga dodatkowej warstwy z materiału wykazującego silne sprzężenie spin-orbita na warstwie ferromagnetyka [138].”

Str. 60. „Dodatkowo MgO znane jest z zastosowań w złączach MTJ, gdzie wykazuje swoje własności jako filtr spinowy, co przyczynia się do zwieszenia parametru TMR [42].”

W pracy stosowana jest jednostka ciśnienia Torr (np. na str. 71), która nie jest aktualnie obowiązująca.

W opisie procesu strukturyzacji Doktorant wprowadził nieznaną mi słowo „znanostrukuryzowany”. Domyślam się, że oznacza ono poddany strukturyzacji w skali nanometrycznej.

Zdarzają się też nieliczne błędy ortograficzne np.: Str. 107 „z optymalizować” zamiast zoptymalizować, str. 150 „nie możliwy” zamiast niemożliwy.

Na rysunku 40. brak opisu poszczególnych pików.

Wymienione powyżej uchybienia redakcyjne nie mają istotnego wpływu na ogólną pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej mgr. Jakuba Pawlaka.

Podsumowując recenzję chcę podkreślić, że najważniejsze wyniki badań Doktoranta zostały przedstawione w pięciu publikacjach. Tym samym oznacza to, że są to oryginalne wyniki badań i zostały pozytywnie ocenione przez recenzentów poszczególnych czasopism. We wszystkich tych pracach mgr Jakub Pawlak jest pierwszym autorem, a w trzech z nich również autorem wyznaczonym do korespondencji. Świadczy to o jego dominującej roli w ich powstaniu. Należy również podkreślić pozostały dorobek Doktoranta to jest dalsze pięć publikacji, które nie są związane z tematyką dysertacji. Zarówno praca doktorska jak i dotychczasowy dorobek naukowy świadczą o tym, że mgr Jakub Pawlak jest dobrze przygotowany do samodzielnej pracy naukowej.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr. Jakuba Pawlaka spełnia wymagania obowiązującej ustawy o stopniach naukowych i jednoznacznie kwalifikuje Doktoranta do stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauki fizyczne. W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie mgr. Jakuba Pawlaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

