

28.02.2025, Katowice

Dr hab. inż. Mateusz Koziół prof. P. Ś.
Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej
ul. Krasińskiego 8
40-019 Katowice

Recenzja pracy doktorskiej

Michaliny Nowakowskiej – Malczyk

pod tytułem

**Wpływ temperatury i pola elektrycznego na właściwości
monokrystalicznego tytanianu sodowo – bizmutowego $\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$**

przygotowanej pod kierunkiem:

dr hab. Andrzeja Kruka

oraz

dr Kamili Kluczewskiej – Chmielarz, prof. UKEN

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Uniwersytetu Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie.

Podstawa prawna recenzji: art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.).

Doktorantka uzyskała tytuł magistra fizyki w dniu 22 czerwca 1979 r. na Wydziale Matematyczno-Fizycznym Wyższej Szkoły Pedagogicznej im. Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie.

Recenzent nie posiada wiedzy dotyczącej ewentualnego wcześniejszego ubiegania się Doktorantki o stopnie naukowe.

Recenzent nie posiada wiedzy dotyczącej kariery zawodowej i innych elementów życiorysu Doktorantki.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

Ogólna charakterystyka i rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy oceny właściwości monokrystalicznego tytanianu sodowo-bismutowego, skrótowo nazywanego w pracy NBT, w warunkach zróżnicowanej temperatury oraz zróżnicowanego zewnętrznego pola elektrycznego. Oprócz oceny szeregu właściwości materiału, Autorka przeanalizowała również stan i stabilność jego faz krystalograficznych w określonych zakresach temperaturowych oraz określiła mechanizmy przewodnictwa elektrycznego w tymże materiale w określonych warunkach. Podjęcie tematu badawczego wydaje się być celowe, gdyż NBT może posłużyć do opracowania nowych materiałów piezoelektrycznych i innych smart-materiałów, które m.in. mogą zastąpić najpowszechniej stosowany obecnie piezoelektryk, czyli PZT (cyrkonian-tytanian ołowiu). Związek ten jest w wielu przypadkach aplikacji szkodliwy ze względu na zawartość dużej ilości ołowiu. Autorka zaproponowała NBT jako potencjalnego konkurenta dla PZT w gamie zastosowań funkcjonalnych. W dobie intensywnego rozwoju techniki wykorzystującej smart-materiały (materiały funkcjonalne lub inteligentne) badania takie mają duże znaczenie i ich podjęcie jest jak najbardziej uzasadnione. Szczególnie, przy bardzo obszernej i rzetelnej realizacji – o czym w dalszych rozdziałach recenzji.

Układ pracy jest prawie klasyczny. Pierwszy jest spis treści, streszczenia polskie i angielskie oraz wykaz oznaczeń i terminów. Główny wywód zaczyna się od rozdziału obejmującego wstęp i cel pracy. Potem następuje część teoretyczna i następnie część doświadczalna. Meritum wieńczy podsumowanie i wnioski. Po nich jest bibliografia, a następnie spis rysunków i spis tabel. Na końcu Autorka zamieściła wykaz swoich współautorskich publikacji oraz wykaz konferencji w których uczestniczyła. Całość obejmuje 155 stron.

Część teoretyczna zawiera elegancki opis podparty solidną bibliografią, świetnie wprowadzający czytelnika w tematykę rozprawy. Szczegółowe uwagi afirmatywne oraz krytyczne dotyczące tej części rozprawy zawarłem w następnym rozdziale recenzji.

Część praktyczna, klasycznie dla prac badawczych, zaczyna się od opisu otrzymania materiału do badań. Autorka zaznacza, że wytworzenie monokrystalicznego NBT odbyło się we współpracy z Uniwersytetem w Dnieprze. Opis otrzymania i przetworzenia materiału monokrystalicznego jest syntetyczny, ale w pełni wyczerpujący. Następnie znajduje się omówienie użytych metod i urządzeń pomiarowych, po którym Autorka rozprawia się analitycznie z uzyskanymi wynikami w ramach aż pięciu rozdziałów – na 72 stronach. Bardzo solidne podsumowanie jest niezbędne dla usystematyzowania wszystkich przeprowadzonych analiz, nie dało się też uniknąć bardzo obszernych wniosków.

Wstępne zapoznanie się z rozprawą pozostawia bardzo pozytywne wrażenie, widoczna jest staranność i poważne podejście Autorki do edycji swojego dzieła.

Uwagi ogólne do rozprawy

Ogólny bardzo dobry obraz rozprawy nie ulega szczególnej aberracji przy dokładniejszym zagłębieniu się w tekst. Niemniej jednak, przy tworzeniu tak obszernego dzieła Autorka nie miała szans uniknąć pewnych potknięć, które recenzent ma obowiązek (subiektywnie) przedstawić. Ogólne uwagi przedstawiam poniżej, szczegółowe w kolejnych rozdziałach.

Zaczynając od początku – bardzo dobrze, że Autorka zamieściła (obszerny) wykaz oznaczeń i pojęć. Szkoda, że oznaczenia i pojęcia nie są ułożone alfabetycznie, gdyż korzystanie ze spisu jest przez to mocno utrudnione.

Streszczenie rozprawy jest za długie! Niepotrzebna jest w nim np. dość obszerna wstawka dotycząca światowego postępu. To bardziej pasowałoby już do części teoretycznej.

Po streszczeniu Autorka zamieściła wstęp połączony ze sformułowanym celem pracy, potem część teoretyczną i następnie część doświadczalną. Z reguły cel i zakres pracy są zamieszczane na początku części doświadczalnej pracy (ale nie jest to konieczne). Również trafność sformułowanego celu pracy jest trochę dyskusyjna. W mojej opinii zbadanie czegoś to nie jest dobry cel doktoratu. Doktorat nie może być po prostu raportem z badań, a tak sformułowany cel właśnie to sugeruje – szczęśliwie, wbrew porządnym analizom zawartym w treści części praktycznej rozprawy. Najpewniej lepsze byłoby pojęcie „ocena” niż „zbadanie”. I dalej, zamiast „podjęcie badań” lepsze byłoby „określenie przyczyny”. Dyskusja akademicka. Poza tym, cel pracy jest prosty, jasny i precyzyjny. Po zdefiniowaniu celu Autorka podała – również jasno i przejrzysto – motywację podjęcia badań: chęć zastąpienia w określonej grupie aplikacyjnej ołowiu mniej szkodliwym bizmutem. W rozdziale wprowadzającym przedstawiono także prosty, kompaktowy i zrozumiały dla czytelnika zakres pracy. Jest to chwalebne.

W głównym wywodzie rozdziały nie zaczynają się od nowej strony. Oszczędność miejsca? Na początku części teoretycznej Autorka bardzo elegancko i jasno przedstawiła podstawowe informacje na temat polaryzacji w dielektrykach. Dalej jest bardzo fajny i rzetelny opis historii odkrywania ferroelektryków z cytowaniem fundamentalnych publikacji oraz świetne syntetyczne przedstawienie zagadnienia perowskitów. Kolejny bardzo dobry opis teoretyczny dotyczy przewodzenia dielektryków w warunkach wstrzykiwania nośników ładunku – na szczególne uznanie zasługuje tu komentarz do rysunku 7. Finalnie, część teoretyczną rozprawy kończy Autorka jednocześnie prostym i wyczerpującym wywodem na temat temperaturowych przemian fazowych w badanym monokrystalicznym perowskicie NBT. Cały wywód w części teoretycznej jest zapisany bardzo elegancko i praktycznie bez błędów edycyjnych/typograficznych. Widać dużą staranność i dbałość Autorki o tekst. Imponuje niezaburzona logika i spójność z częścią eksperymentalną.

Część praktyczna (eksperymentalna) rozprawy rozpoczyna się od opisu uzyskania monokryształu NBT metodą Czochralskiego, z następnym wykończeniem uzyskanych próbek i ich przetworzeniem dla konkretnych metod badań (cięcie, nakładanie elektrod). Opis jest skromny, ale zawiera wszystkie konieczne informacje. Autorka zwraca przy tym uwagę na szczegóły i bierze pod uwagę szeroki wachlarz czynników. Przykładowo, opisując dobór elektrod, oprócz kwestii technicznych (złote elektrody nie tworzyły dobrego połączenia z kryształem) uwzględniła też koszt i dostępność danego rozwiązania, co pozwoliło jednoznacznie wybrać elektrody srebrne jako optymalne.

Dobór metod spektroskopowych oceny monokryształów jest bardzo szeroki. Jest m.in. DSC, XRD, EDS, spektroskopia Ramana. Część metod pozwala analizować tylko specyficzne cechy lub zmiany w materiale, ale niektóre (np. XRD i Raman) pozwalają przeanalizować podobne cechy, co umożliwia potwierdzenie przyjętych interpretacji i przez to zwiększa wartość naukową badań.

W analizie wyników Autorka pokazała bardzo znaczącą dogłębność prowadzonych rozważań i dużą kompetencję w ocenie. Przykładem może być zawarta na stronach 56 - 57 dyskusja wyników XRD, gdzie Autorka świadomie interpretuje szerokość i rozszczepienie pików

sygnałowych jako efekt powstania naprężeń w kryształach spowodowanych przemianą fizyczną lub też jako zaburzenie centrosymetrii fazy. Innym przykładem bardzo dobrego wywodu analitycznego zakończonego konkretnym wnioskiem jest przeprowadzona w rozdziale 7.2 ocena rodzaju i gęstości pułapek N_t (opisanych wcześniej teoretycznie w rozdziale 2.3.2). Jeszcze innym przykładem jest solidny wywód w rozdziale 7.4 dotyczący stałoprądowych pomiarów depolaryzacji monokryształu zwieńczony wyznaczeniem ładunku depolaryzacji – czyli sprowadzeniem zagadnienia do najprostszej fundamentalnej wielkości fizycznej.

Ogólnie, całość części praktycznej rozprawy cechuje ogromne bogactwo wyników uzyskanych dużą ilością metod. Każdy pomiar posłużył do wyliczenia maksymalnej ilości możliwych wielkości i do wyciągnięcia maksimum wniosków. Moja bardziej szczegółowa ocena merytoryczna badań jest zawarta w następnym rozdziale recenzji.

Zarówno dla części teoretycznej, jak i doświadczalnej Autorka w bardzo odpowiedzialnie i bardzo rzetelnie dobrała konieczną bibliografię. Nie mam zastrzeżeń zarówno do jakości źródeł, jak i do ich zastosowania we wprowadzeniu i w dyskusji. Ich łączna ilość to 165 pozycji (powinno być 164 – o czym niżej), obejmują głównie artykuły naukowe, ale i liczne podręczniki oraz strony internetowe. Rozstrzał czasowy źródeł jest dość spory, ale zdecydowana większość to dzieła z tego stulecia. Co do uzasadnienia użycia każdego ze źródeł nie mam wątpliwości.

Sam spis bibliografii zawiera liczne błędy. Przykładowo, w opisie [107] Autorka podaje nazwę źródła „Research Gate”, tymczasem powinno to być renomowane czasopismo „ACS Applied Materials & Interfaces”. Z kolei opis [123] stanowi kontynuację opisu [122]. Przy tak eleganckim głównym wywodzie błędy takie szczególnie uwierają recenzenta.

Autorka zestawiała na końcu rozprawy 16 publikacji swojego współautorstwa. 10 z nich zostało wykorzystanych w rozprawie, w tym kilka (np. [6] i [7]) zawierało znaczną część wyników zawartych w rozprawie. Jest to korzystne, świadczy bowiem o wcześniejszym krytycznym spojrzeniu zewnętrznych recenzentów, którzy uznali wyniki za wartościowe i nadające się do publikacji – należy podkreślić! – w bardzo renomowanych czasopismach. Wzmacnia to wartość naukową tychże wyników i bardzo dobrze świadczy o Autorce – nie miała problemu z wystawieniem swoich wyników na niezależną krytykę.

W tekście zdarzają się literówki (niewykazane w dalszym rozdziale recenzji) lub fragmenty ewidentnie wynikające ze skrótów myślowych Autorki, ale są one – jak na ponad 150-stronową rozprawę – naprawdę liczne. Kilka szczegółowych wybranych niedociągnięć językowych zestawilem w dalszej części recenzji.

Po dokładnym przestudiowaniu rozprawy potwierdzam bardzo pozytywne wrażenie, które wywarła ona na mnie.

Znaczenie pracy i zawarta w niej innowacja naukowa

Jak już wspomniałem wcześniej praca ma znaczenie i wykazuje potencjał aplikacyjny monokryształu NBT jako substytutu dla materiału PZT. Pomimo, że Autorka korzysta ze znanego i sprawdzonego aparatu metodycznego, to użycie go w tak szerokim wymiarze w stosunku do jednego wybranego materiału, kompilacja wyników i wzajemne ich konfrontowanie skutkujące wysokiej jakości oryginalnymi, jednoznacznymi wnioskami należy uznać za znaczącą innowację naukową.

Spośród licznych osiągnięć uzyskanych na podstawie przeprowadzonych badań można wyszczególnić kilka wybranych.

Badania dielektryczne oraz impedancyjne wraz z wyznaczeniem modułu elektrycznego pozwoliły na zidentyfikowanie mechanizmu relaksacyjnego działającego w NBT jako relaksacji Debye'a. Stwierdzono obecność przewodnictwa jonowego dwóch rodzajów: jeden wewnątrz kryształu i drugi przyelektrodowy. Zaobserwowany proces relaksacji wskazuje na polaryzację ładunku przestrzennego - wakansów tlenowych i elektronów zlokalizowanych na jonach tytanu. Nie przez klasyczny mechanizm dipolowy.

Stwierdzono też, że wygrzewanie monokryształu skutkuje wzrostem i uporządkowaniem domen, spolaryzowaniem obszarów niepolarnych. Redukuje to relaksację i dyspersję dielektryczną oraz obniża przenikalność elektryczną monokryształu.

Autorka wykazała też, że polaryzacja monokrystalicznego NBT powoduje wzrost uporządkowania struktury krystalicznej. Zewnętrzne pole elektryczne o odpowiednio wysokim natężeniu wywołuje w badanym monokryształu stan polaryzacji zbliżony do jednodomenowego.

Zaobserwowana duża histereza termiczna przenikalności elektrycznej badanego materiału występująca w zakresie temperatur, w których współistnieją fazy romboedryczna i tetragonalna jest wynikiem długoczasowej relaksacji strukturalnej, związanej z powolną przemianą fazową. Wiąże się ona z pochłanianiem i oddawaniem energii przez materiał, co nie jest precyzyjnie wyjaśnione (jest to przedmiot jednego z moich pytań do Autorki).

Autorka wyliczyła gęstość objętościową pułapek N_t (wstrzykiwanie nośników) występującą w badanym materiale dla wybranych temperatur w oparciu o prawo Ohma oraz prawo Motta-Gurney'a – odpowiednio dla niższych i wyższych wartości temperatury oraz pola elektrycznego.

Niezwykle interesującym i oryginalnym osiągnięciem w pracy jest kompleksowy opis przewodnictwa elektrycznego w monokryształu NBT. Zasadniczym mechanizmem jest przeskok (ang. hopping) małych polaronów. Zdolność do termicznej aktywacji nośników ładunku elektrycznego skutkuje ułatwionym wstrzykiwaniem nośników z elektrod i nadaje materiałowi wyraźne cechy półprzewodnika. W zakresie wyższej temperatury występuje przewodnictwo zgodne z teorią space-charge-limited current (SCLC). Przy dalszym wzroście temperatury rośnie liczba wakansów tlenowych, co przekłada się na wzrost przewodnictwa zmiennoprądowego. Zwiększa się też koncentracja nośników ładunku elektrycznego i ich ruchliwość. Pojawia się przewodnictwo jonowe. Zdefektowanie materiału stanowi źródło głębokich stanów pułapkowych, w których uwięzione są nośniki ładunku. Wzbudzenie tych nośników następuje przez przyłożone wysokie pole elektryczne i ciepło. Odpowiednio znaczny wzrost koncentracji ładunków równowagowych (dziur i elektronów) może prowadzić do pojawienia się ładunku przestrzennego.

W pracy określono też rozmiar, kształt i uporządkowanie domen dielektrycznych w procesie grzania i chłodzenia. W szczególności obserwacja struktury domenowej monokryształów NBT w procesie grzania (strona 69) jest innowacyjna – do tej pory obserwacje takie prowadzono tylko podczas chłodzenia. Stwierdzono, że NBT jest polarny dla zakresu temperatury do 290°C. Dość ciekawym elementem badań w pracy jest ocena przebiegu zmian temperaturowych modułu Y (Younga). Autorka wykazała znaczny spadek modułu w przedziale temperatur 25 – 310 st.C. Uzasadnia to ewolucją zawartości faz romboedrycznej i tetragonalnej w materiale. Autorka nie przedstawia jednak metodyki wyznaczenia modułu Y ani warunków (naprężeniowych) w jakich go wyznaczyła. Żądanie wyjaśnienia tej kwestii przez Autorkę zawarłem w dalszej części recenzji.

Podsumowując część badawczą pracy i pozycjonując ją w ramach globalnego stanu wiedzy należy podkreślić, że zagadnienie transportu ładunku elektrycznego w NBT i materiałach na jego bazie jest rzadko poruszane w badaniach doświadczalnych i w analizie teoretycznej. W związku z tym, istnieje luka w piśmiennictwie na temat prądu polaryzacji, depolaryzacji i charakterystyk prądowo–napięciowych tego materiału. Przeprowadzenie badań w tym zakresie jest więc ważne dla nauki.

W bardziej ogólnym ujęciu przeprowadzone badania bardzo dobrze pokazują też przykład zmiany właściwości fizycznych materiału pod wpływem przemian alotropowych.

Koncepcja programu badawczego zrealizowana w ramach recenzowanej rozprawy jest innowacyjna i wartościowa. Po dokładnym zapoznaniu mogę bez wątpliwości stwierdzić, że **przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.**

Szczegółowe uwagi krytyczne

Pomimo wysokiej jakości stworzonego wywodu i dużej staranności przy jego zapisie Autorka nie ustrzegła się błędów i nieścisłości. Uwagi dotyczące ewidentnych błędów, jak i mniej lub bardziej subiektywnych niejasności zamieściłem poniżej, dzieląc je na trzy sekcje. Druga z nich zawiera uwagi o odniesienie się do których zobowiązuję Autorkę najpóźniej w dniu obrony.

Szczegółowe uwagi merytoryczne nie wymagające komentarza Autorki:

- Strona 26 – prawdopodobnie powinno być „Rys. 3” zamiast „Rys. 7”.
- Rysunek 5 – Autorka mogła zaznaczyć strzałkami kierunki poszczególnych linii na pętli.
- Rysunek 13 można było powiększyć – pokazuje efekt dość ciężkiej roboty technologicznej, więc należało się pochwalić. Podobnie rysunki 14 i 15.
- Strona 49: dziwne, że w przypadku tak zaawansowanego i drogiego materiału Autorka użyła do rozpuszczenia elektrod acetonu 99,5%, czyli zanieczyszczonego.
- Strona 52: Autorka nie sprecyzowała który (wcześniej opisany) rodzaj próbek był wykorzystany do pomiarów transmitancji.
- Być może, należało zrobić np. tabelę zestawiającą rodzaje próbek z oznaczeniami i odpowiadające im typy pomiarów.
- Rysunek 39a – brak skali na osi pionowej.

Szczegółowe uwagi merytoryczne wymagające wyjaśnienia ze strony Autorki:

- Strona 51: Dlaczego szybkość grzania i chłodzenia na kalorymetrze wynosiła akurat 10 st.C/min, a na mikroskopie polaryzacyjnym 7 st.C/min? Po czym, pomiary elektryczne

wykonywano przy 1,5 st.C/min. Proszę o uzasadnienie, dlaczego nie zunifikowano szybkości grzania przy wyznaczaniu różnych parametrów.

- Na stronie 71: „Warto zwrócić uwagę na znaczną histerezę temperaturową w zakresie współlistnienia faz romboedrycznej i tetragonalnej”. Czy histereza temperaturowa oznacza, że materiał pochłonął ciepło podczas cyklu temperaturowego? Jeżeli tak, to jak zostało ono przez materiał „zagospodarowane”? Bardzo proszę o wyjaśnienie tej kwestii. Pętla histerezy termicznej pojawia się też na rysunkach 64 i 65, czy przyczyny i mechanizmy „zagospodarowania” energii są analogiczne jak w przypadku opisanym na stronie 71?
- Jakie według Autorki jest znaczenie i do czego mogą być wykorzystane wyniki badań monokryształu NBT prowadzone przy temperaturze powyżej 200 st.C? Powyżej tej temperatury materiał traci właściwości ferroelektryczne, a np. pomiary przewodnictwa/oporu prowadzono w temperaturze aż do 600 st.C.
- Bardzo proszę Autorkę o szczegółowe objaśnienie mi „oddziaływania elektromechanicznego między obszarami polarnymi a ferroelastyczną niepolarną matrycą”, wzmiankowanego w rozdziale 11, które ma być przyczyną specyficznych zmian modułu Younga (rysynki 64 i 65). Jest dla mnie niepojęte, że mamy do czynienia jednocześnie z intensywnym spadkiem modułu do temperatury ok. 300 st.C (praktycznie jak w polimerach; intensywność tego spadku jest charakterystyczna raczej dla materiału o wiązaniach fizycznych, a nie chemicznych), a następnie jego wzrostem! Skąd bierze się ten intensywny spadek, a następnie wzrost modułu Younga? Dodatkowo proszę wyjaśnić i opisać jaką metodą wyznaczono moduł Younga i w jakim stanie naprężenia był badany materiał. Proszę nie ograniczać się do odesłania mnie do bibliografii :)
- Jaki właściwie jest praktyczny aspekt uzyskanych wyników? Na co wskazują? Co Autorka planuje dalej robić w zakresie badań monokryształów NBT? Czy ma jakąś realną koncepcję aplikacyjną dla tych materiałów? W podsumowaniu rozprawy jest tylko bardzo ogólny zapis w przedmiotowej kwestii.
- Jak wypada pod względem potencjału aplikacyjnego przebadany monokryształ NBT w porównaniu z komercyjnym PZT?

Szczegółowe uwagi edycyjne/typograficzne (nie wymagające komentarza Autorki):

- Strona 15: „Badania materiału w jego krystalicznej postaci jest nie do przecenienia”.
- Strona 19: „ładunek elektrycznym”.
- Strona 27: „kątem. [17].”.
- Rysunek 9 – chyba ucięło górę, zostało stwierdzenie bez podmiotu „obrotowego i pionowego”.

- Strona 42, 43 i dalej: „dystorsje” – czy nie lepiej było użyć słowa „zniekształcenia”? W języku polskim dystorsja opisuje jedną z wad układów optycznych oraz uraz kolana, ale sieci krystalicznych raczej nie.
- Strona 48: „dwu etapowo”.
- Rysunek 36 – obrazy powinny być powiększone – układ kolumnowy zamiast szeregowego.
- Rysunek 37 – obrazy powinny być powiększone.
- Rysunek 39 c, e, f – za dużo tych cyfr w liczbach przy skali.

Podsumowanie oceny rozprawy

Mimo pewnej (relatywnie niewielkiej) ilości uwag krytycznych, przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska autorstwa pani mgr Michaliny Nowakowskiej – Malczyk prezentuje bardzo wysoki poziom i świadczy o wykonanej solidnej robocie w przedmiotowym zakresie oraz o nabytym warsztacie badacza. Nie mam też wątpliwości, że przedstawiona rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki w dyscyplinie fizyka oraz wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktorantkę.

3. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie fizyka.

Ze względu na niezwykle szeroki zakres przeprowadzonych badań, który, przy wykazaniu przez Autorkę dużej rzetelności i staranności bardzo znacząco poszerza istniejącą bazę wiedzy w zakresie właściwości fizycznych monokryształów perowskitowych, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy przez Radę Dyscypliny.



.....
(podpis recenzenta)