



UNIwersytet  
Warszawski

Wydział Fizyki

Prof. dr hab. Maria Kamińska  
Wydział Fizyki  
Uniwersytetu Warszawskiego  
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa  
tel. (022) 55 32 767

WYDZIAŁ  
FIZYKI

Warszawa, 8 czerwca 2023 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej pani mgr. Anieli Czudek**  
**pt. „Impact of Alkali Element Doping on the Electrical Characteristics of**  
**Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Solar Cells and Thin Films”**

Niniejsza recenzja rozprawy doktorskiej pani mgr. Anieli Czudek pt. „Impact of Alkali Element Doping on the Electrical Characteristics of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Solar Cells and Thin Films” dokonana została biorąc pod uwagę Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Zgodnie z tą Ustawą wymogi co do rozprawy doktorskiej, obowiązujące Doktoranta i w szczególności odnoszące się do jego przypadku są według art. 187 następujące:

1. „ Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej....”
2. „Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej...”
3. „Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, ...”
4. „Do rozprawy doktorskiej dołącza się streszczenie w języku angielskim, a do rozprawy doktorskiej przygotowanej w języku obcym również streszczenie w języku polskim....”

W przedstawionej recenzji ustosunkuję się do tych wymogów. W recenzji postaram się też wypełnić wymogi postawione przede mną w Umowie z Politechniką Warszawską.

**Rozprawa doktorska pani mgr. Anieli Czudek ma formę pracy pisemnej i zawiera wyniki jej badań naukowych prowadzonych pod opieką Prof. dr. hab. Małgorzaty Igalson z**

ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa  
tel.: (22) 55 32 767  
e-mail: Maria.Kaminska@fuw.edu.pl

Politechniki Warszawskiej. Praca badawcza Doktorantki wpisuje się w obszar nauk fizycznych i inżynierii materiałowej, zastosowanych w zakresie najistotniejszych potrzeb współczesnego świata – ekologicznych, wydajnych i tanich źródeł energii. Te potrzeby przybrały szczególnie na sile w ostatnich latach wobec zmian klimatycznych, wyczerpywania się źródeł zasobów kopalnych i wojny w Ukrainie. Aktualnie najszybciej rozwijaną metodę pozyskiwania energii stanowi fotowoltaika. Podjęte przez panią mgr. Anielę Czudek prace badawcze przedstawione w rozprawie doktorskiej stanowią istotny wkład w zrozumienie wpływu parametrów procesu technologicznego na działanie cienkowarstwowych ogniw słonecznych należących do tzw. II generacji (zwanej również „*thin film solar cells*”), w których jednym z materiałów warstwy aktywnej jest rozcieńczony półprzewodnik z rodziny chalkopirytów I-III-VI<sub>2</sub>, a mianowicie związek Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>, tzw. CIGS. Ogniwa tej generacji są już od lat na rynku, ale wciąż trwają prace nad poprawą ich parametrów. Jest wiele zalet tych ogniw, które sprawiają, że ich pozycja na rynku fotowoltaicznych jest bardzo dobra, z perspektywami rozwoju. CIGS, półprzewodnik o prostej przerwie energetycznej, zatem wysokim współczynniku absorpcji i pełniący rolę absorbera pozwala na konstrukcje fotowoltaiczne o grubości warstwy aktywnej rzędu kilku mikrometrów, co pozytywnie wpływa na koszty ogniw. Dodatkowo, niskotemperaturowe metody wytwarzania tego materiału (metoda odparowywania lub metoda rozpylania magnetronowego) są znacznie tańsze niż tradycyjne technologie krzemowe, wszystkie składniki struktur fotowoltaicznych CIGS są powszechnie dostępne, a również te nietoksyczne ogniwa podlegają recyklingowi w prawie 100%. W skali laboratoryjnej złącza CIGS posiadają rekord wydajności w kategorii fotowoltaiki cienkowarstwowej (23,6%, europejska firma Evolar); dane według NREL „Best Research-Cell Efficiencies” na dzień 9 czerwca 2023r. (<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>). W masowej produkcji wydajności ogniw CIGS są mniejsze, na poziomie 18%, ale wyraźnie rosną w ostatnich latach.

Obok aspektu aplikacyjnego, tematyka chalkopirytów I-III-VI<sub>2</sub> jest interesująca naukowo, przede wszystkim ze względu na obecność metastabilnych defektów, tzw. centrów DX. Przełomowe wyniki dotyczące modelu zjawiska metastabilności CIGS pojawiły się w pierwszej dekadzie tego wieku, ale wciąż wiele zachowań zarówno materiału, jak i wytwarzanych na ich bazie ogniw, jest niezrozumiałych i co roku publikowanych jest sporo prac w tej dziedzinie. Drugim ciekawym aspektem badawczym ogniw CIGS ostatnich lat jest wpływ granic ziaren i pasywacja występujących w ich obrębie defektów na działanie ogniw. To zagadnienie ma

znacznie szerszy wymiar i wkracza również w problemy ogniw słonecznych III generacji, których warstwy aktywne, podobnie do CIGS otrzymywane są tanimi technologiami w formie ziaren. W ostatnich latach coraz więcej prac badawczych dotyczy problemu granic ziaren w ogniwach perowskitowych i organicznych, ich wpływu na sprawność, powtarzalność technologii i stabilność ogniw. W przypadku ogniw CIGS problemy granic ziaren przeplatają się z defektami metastabilnymi.

Cenny wkład w rozwój wiedzy na temat defektów i metastabilności CIGS wniosły prace prowadzone na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej przez grupę badawczą prof. dr hab. Małgorzaty Igalson, promotorki ocenianej Doktorantki. Publikacje Politechniki Warszawskiej, dobrze znane są w świecie naukowym, były cytowane tysiące razy i znacząco przyczyniły się do powiązania zjawisk metastabilnych w CIGS z kompleksem dwuluk selenu i miedzi,  $V_{Se}-V_{Cu}$ . Prof. dr hab., Małgorzata Igalson pracuje w tematyce materiałów i ogniw CIGS od lat dziewięćdziesiątych, współpracując z najlepszymi ośrodkami europejskimi technologii ogniw cienkowarstwowych. Grupa prof. Igalson wyspecjalizowała się w technikach pojemnościowych badań materiałów i ogniw oraz odpowiednich metodach modelowania i obliczeniowych, co w zestawieniu z możliwościami technologicznymi zagranicznych współpracowników daje niezwykle cenne, odkrywcze rezultaty. **W tę tradycję wpisuje się również praca doktorska pani mgr. Anieli Czudek, która podjęła bardzo aktualny i ważny problem fotowoltaicznych ogniw CIGS, dotyczący zrozumienia roli domieszkowania ich metalami alkalicznymi i celem jej pracy były badania w tym kierunku. Cel ciekawy naukowo i ważny z punktu widzenia aplikacji ogniw słonecznych CIGS.** Od około trzydziestu lat powszechnie wiadomo, że dodatek sodu poprawia znacząco sprawność ogniw CIGS. Efekt ten, odkryty przypadkowo przy okazji użycia szkła sodowego w konstrukcji ogniw, pozostaje wciąż nie do końca zrozumiały. Wyniki Doktorantki uzyskane w trakcie wykonywania pracy doktorskiej wnoszą istotny wkład w rozwój naszej wiedzy w tym temacie. Różne wątki związane z rolą metali alkalicznych pojawiały się dotąd w literaturze, ale praca doktorska pani mgr. Anieli Czudek jest pierwszą tak kompleksową pracą, dającą bardzo dogłębny obraz fizyczny zachodzących procesów. **Praca zawiera: (i) wyniki niestandardowych eksperymentów z wykorzystaniem technik prądowych i pojemnościowych, włącznie z podświetlaniem i zmianami temperatury, w szczególności pozwalających na badania struktur ogniw i porównywanie ich właściwości z samymi materiałami CIGS, (ii) wnikliwą**

interpretację wyników tych eksperymentów i (iii) modelowanie polikrystalicznej struktury ogniw przez ziarna z wysoką koncentracją defektów na ich granicach, skutkujących tworzeniem się warstw zubożonych przy powierzchni ziaren. Ten sposób podejścia do problemu jest jak najbardziej właściwy i oceniam go bardzo wysoko.

W rozprawie doktorskiej pani mgr. Anieli Czudek, napisanej w języku angielskim, znajdujemy kolejno:

- **Streszczenie pracy w języku polskim** (spełnione wymaganie ustawowe) i angielskim.

- Informacje wstępne (rozdziały 1-5). Autorka przedstawiła potrzebę podjętych badań – problem zmian klimatu. Opisała możliwości fotowoltaiki i pracę ogniw słonecznych. Przedstawiła technologię ogniw CIGS wraz z aktualnym stanem wiedzy na temat defektów, ich roli w efektach metastabilnych oraz wstępną wiedzę na temat struktury materiałów CIGS, problemu granic ziaren i wpływie metali alkalicznych na pracę ogniw.

- Rozdział 6, który zawiera motywację pracy doktorskiej, główne pytania, które postawiła przed sobą Doktorantka oraz wyszczególnienie materiałów i struktur, które badała.

- Rozdział 7, który zawiera opis stosowanych metod eksperymentalnych, zarówno dla badań materiałów CIGS, jak i ogniw. Najważniejsze to pomiary przewodnictwa, które Doktorantka stosowała do badań materiałów CIGS oraz metoda pojemnościowa DLCP (Drive Level Capacitance Profiling), pozwalająca na otrzymanie profili domieszkowania w ogniwach słonecznych CIGS. Obie techniki Doktorantka stosowała w pomiarach w funkcji temperatury.

- Rozdział 8 z opisem mierzonych próbek i stosowanych technik eksperymentalnych. Próbki (materiały CIGS i odpowiednie ogniwa CIGS) wytworzone zostały w grupie dr. Rolanda Wuerz w Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) i tam wstępnie scharakteryzowane pod względem zawartości sodu i potasu w pomiarach SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy), jak również parametrów ogniw z charakterystyk prądowo napięciowych.

- Rozdział 9, w którym Autorka opisała otrzymane rezultaty badań materiałów CIGS i odpowiednich ogniw słonecznych CIGS dla próbek z różnymi koncentracjami sodu i potasu, w stanie zrelaksowanym i metastabilnym. Rozważyła też wpływ wygrzewania w atmosferze selenu oraz zmian koncentracji miedzi.

- Rozdział 10 z dyskusją otrzymanych wyników. Autorka bardzo wnikliwie przeanalizowała bogaty materiał doświadczalny, wprowadzając też model pasywacji granic ziaren i zestawiając go z wynikami pomiarów.

- Rozdział 11 zawierający konkluzje z przeprowadzonych badań oraz opis proponowanej kontynuacji prac w kierunku pogłębienia zrozumienia wpływu metali alkalicznych na właściwości materiałów i ogniów CIGS.

- Bogatą bibliografię, zawierającą 178 dobrze dobranych pozycji.

- Listę publikacji i prezentacji konferencyjnych Doktorantki, również spis projektów, w których brała udział.

- Spis rysunków i Tabel pracy doktorskiej.

- Bardzo wygodny dla czytających spis użytych symboli i skrótów, choć niestety brak jest w nim niektórych symboli użytych w pracy.

- Dwa dodatki dotyczące odpowiednio parametrów zastosowanych w symulacjach barier na granicach ziaren oraz detali charakterystyk prądowo napięciowych ogniów CIGS i ich analizy.

**Ten układ rozprawy doktorskiej jest jak najbardziej właściwy i pozwala zapoznać się z motywacją pracy, aktualnym stanem nauki w obszarze dotyczącym doktoratu i prześledzić wyniki Doktorantki oraz ich analizę. Zastosowane piśmiennictwo oceniam też jako dobrze dobrane.**

Największą wartością pracy doktorskiej pani mgr. Anieli Czudek jest moim zdaniem wiele istotnych i pionierskich wniosków dotyczących wpływu metali alkalicznych na zachowanie materiałów CIGS i ogniów słonecznych CIGS, uzyskanych dzięki rzetelnym badaniom przeprowadzonym na bardzo dużej liczbie próbek, różniących się w systematyczny i dobrze zaplanowany sposób parametrami, przede wszystkim koncentracjami sodu i potasu. Takie podejście do badań materiałów CIGS jest nowe w literaturze, w której brak jest systematycznych równoczesnych studiów materiału CIGS i ogniów na ich bazie w funkcji koncentracji i zestawienia domieszkowania dwoma różnymi metalami alkalicznymi. **Doktorantka przejawia wielki dar prezentowania dużej liczby danych doświadczalnych w taki sposób, że wnioski i zależności eksperymentalne widać jak na dłoni. Ma też talent dydaktyczny i potrafi te dane analizować i przedstawiać w dobrze dobranej kolejności, która pozwala na uporządkowane śledzenie kolejnych istotnych wyników przeprowadzonych**

**eksperymentów.** Świadczy to o dużej dojrzałości naukowej Doktorantki i jej umiejętnościach wychwytywania najważniejszych trendów w zachowaniu badanych materiałów.

Jako recenzenta zachwyca mnie wybór materiałów do badań, który dawał duże możliwości porównawcze i pozwalał oddzielać wpływ jednych efektów od innych. Bardzo istotną była możliwość porównania zachowania zarówno w stanach zrelaksowanych, jak i metastabilnych samych warstw CIGS i zachowania warstw CIGS w strukturze ogniów, przy utrzymaniu takich samych parametrów technologicznych procesów otrzymania tych warstw. Domieszkowanie sodem i potasem dawało możliwość porównania dwóch metali alkalicznych i przeprowadzone zostało w sposób przemyślany, już po depozycji materiału CIGS, aby ograniczyć wpływ tych domieszek na morfologię próbek, tak istotną dla badań dotyczących granic ziaren. W zespole prof. Małgorzaty Igalson Doktorantka dysponowała znakomitym warsztatem eksperymentalnym do przeprowadzenia swoich badań, mogąc dobrze charakteryzować, również w funkcji temperatury, właściwości zarówno warstw, jak i ogniów CIGS.

W efekcie uzyskała bardzo ogólne wnioski dotyczące roli, jaką odgrywają metale alkaliczne w poprawie pracy ogniów CIGS. Za jako najważniejsze wnioski z pracy badawczej pani mgr. Anieli Czudek uważam:

- wykazanie, że domieszkowanie sodem i potasem prowadzi do analogicznych efektów zwiększenia przewodności materiałów CIGS oraz obniżenia energii aktywacji przewodnictwa, przy czym dla uzyskania tego samego efektu potrzeba około 4 razy więcej potasu niż sodu. Doktoranta analizując te efekty udowodniła, że pozytywny wpływ na parametry elektryczne materiałów CIGS mają w ogólności metale alkaliczne i że obecność metali alkalicznych w CIGS wpływa zarówno na zwiększenie koncentracji nośników, jak i zwiększenie ich ruchliwości (aktywowanej termicznie), a pozytywny wpływ dotyczy materiału samej warstwy CIGS, a nie jej międzypowierzchni z sąsiednimi warstwami w ogniwie.

- wykazanie na bazie przeprowadzonych pomiarów dla różnie domieszkowanych metalami alkalicznymi warstw CIGS wprost proporcjonalności metatrwałego fotoprzewodnictwa do przewodnictwa w stanie zrelaksowanym w zakresie prawie ośmiu rzędów wielkości, co pokazuje jednakowy mechanizm wpływu metali alkalicznych na parametry elektryczne w stanie zrelaksowanym, jak i w stanie metastabilnym.

- wytłumaczenie wpływu domieszkowania metalami alkalicznymi modelem pasywacji przez nie defektów na granicach ziaren warstwy CIGS, w którym to modelu przy powierzchni ziaren wskutek defektów zgromadzonych na granicach ziaren tworzą się warstwy zubożone, powodujące powstanie barier zmniejszających koncentracje nośników i również ich ruchliwość. Model ten dobrze opisuje wyniki eksperymentalne, co świadczy o tym, że główna rola metali alkalicznych w poprawie przewodnictwa CIGS i parametrów otrzymywanych ogniw na bazie tego materiału ma miejsce na granicach ziaren, tworzących się w procesie technologicznym naparowywania materiału.

Oprócz tych, głównych moim zdaniem osiągnięć pracy, zawiera ona jeszcze obserwacje szeregu mniejszej wagi, choć istotnych dla technologii ogniw efektów, które Doktorantka nie zostawia w zawieszeniu, ale wyjaśnia fizycznymi obrazami zjawisk, często podając możliwe alternatywne tłumaczenia. Praca jest bardzo „dopracowana”, a Doktorantka w jej ostatniej części podaje jeszcze propozycje dalszych kierunków badań w zakresie podjętej tematyki.

**Praca doktorska mgr. Anieli Czudek oprócz dużej wartości poznawczej niesie informacje istotne dla zastosowań ogniw słonecznych na bazie CIGS. Pozwala zrozumieć istotę wpływu metali alkalicznych na właściwości ogniw, ponadto podaje szereg konkretnych informacji ważnych dla technologów wytwarzających ogniwa, jak np. zakresy koncentracji metali alkalicznych, które dają pożądane efekty wzrostu sprawności ogniw w różnych metodach ich wytwarzania.**

Praca doktorska pani mgr. Anieli Czudek napisana jest dobrym i zrozumiałym językiem angielskim i czyta się ją ogólnie bardzo dobrze. Szata graficzna pracy jest bardzo dobra. Jedyne zastrzeżenie, jakie mam, to w większości rysunki są trochę małe, w szczególności miałam problemy z rozróżnieniem symboli na rysunkach 10.1 i 10.2. Wadą jest brak odwołania w tekście do szeregu rysunków (np. 2.1, 3.1, 5.2, 5.3, 7.1, 8.1, 8.2, 9.6, 10.2 itd.).

**Poniżej wyliczam niektóre z drobnych błędów znalezionych w pracy:**

Streszczenie str.v linijka 21 – „po” zamiast „o”;

str.v linijka 22 – błędne sformułowanie;

str.4 linijki 4 i 5 - logiczniej byłoby przedstawić w odwrotnej kolejności (przyczyna – skutek); ponadto w tym rozdziale powinna być wspomniana III generacja ogniów, w której nie ma złącz pn;

str.7 linijka 4 – wspomniany powyżej tej linijki krzem amorficzny nie ma przerwy prostej, a jego wysoka absorpcja ma inną przyczynę...;

str. 19 linijka 8 – chyba wbrew opisowi oświetlanie próbki jest kontynuowane przez cały proces chłodzenia;

str.18 linijka 7 i 18 - odwołanie do niewłaściwego rysunku;

str.21 linijka 9 – brak „be”;

str.23 Rys. 5.1 – mocno nieaktualny;

str.29 linijka 15 – złe sformułowanie;

str.29 linijka 20 zamiast „its” powinno być „of”;

str.34 linijka 7 i dalej – wzory wymagają komentarza lub referencji;

str.36 ostatnia linijka – niepoprawny symbol;

str.36 linijka 7 – nie rozumiem sformułowania „time-independent”, co w takim razie zależy od czasu?;

str.45 linijka 20 – co to jest „GT”?;

str.50 Table 7 i następne tabele – brak jednostek dla zawartości Na i K;

str.55 od linijki 9 – należy jasno odróżnić temperaturę pomiaru i temperaturę wygrzewania;

str.82 linijka 10 u – powinien być podany numer referencji;

str.89 linijka 5 – niepotrzebne „a”;

str. 98 linijka 8 – słowo „withing” błędne;

str.99 linijka 4 – powinno być „In Figure 10.29..”.

Jeśli chodzi o stronę merytoryczną pracy, to jest ona na znakomitym poziomie. Doktorantka podchodzi bardzo rzetelnie do otrzymanych wyników eksperymentalnych i buduje obraz barier energetycznych na granicach ziaren i zaleczania stanów defektowych przez metale alkaliczne. Jeśli nawet wskazuje problemy trudne do zrozumienia do końca, to zatrzymuje się nad nimi i prowadzi dyskusję. Jedyne, czego może trochę mi brakować, to lepsze uszczegółowienie obrazu z defektami punktowymi na granicach ziaren, może wspomnienia też więcej o tlenie, który według aktualnego stanu wiedzy też jest istotny dla właściwości ogniów. Ale to są zagadnienia, które nie były w głównym nurcie pracy Doktorantki.



Powyższe drobne uchybienia nie zmieniają mojego niezwykle pozytywnego zdania o całości pracy doktorskiej, która przedstawia bardzo znaczącą wartość naukową. Powiedziałabym nawet, że jest bardzo dużym, solidnym fundamentem dla rozumienia roli metali alkalicznych w modyfikacji materiału CIGS i pracy ogniw, zbudowanym dla międzynarodowego środowiska badaczy ogniw CIGS, ale również badaczy zajmujących się innymi ogniwami II i III generacji o strukturze polikrystalicznej.

Zaprezentowany przez Doktorantkę dorobek publikacyjny obejmuje 8 prac w czasopismach z bazy Web of Science, z których w trzech jest pierwszą autorką. Czasopisma, w których publikuje mają wysokie tzw. Impact Factor (IF), w szczególności jej prace jako pierwszej autorki opublikowane zostały w czasopismach o IF od powyżej 2 do 4.5; inne prace mają jeszcze wyższy IF. Prace z dorobku publikacyjnego Doktorantki cytowane były 67 razy, a jej indeks H wynosi 4. Ponadto Doktorantka jest współautorką rozdziału dotyczącego charakterystyk prądowo napięciowych w książce o perowskitowych ogniwach słonecznych wydawnictwa Elsevier. Taki dorobek publikacyjny jest znakomity jak na jej etap kariery naukowej.

Podsumowując recenzję uważam, że przedstawiona mi praca doktorska pani mgr. Anieli Czudek, przygotowana pod opieką promotorki Prof. dr. hab. Małgorzaty Igalson z Politechniki Warszawskiej **stanowi oryginalne rozwiązanie problemów naukowych dotyczących wpływu domieszkowania metalami alkalicznymi na właściwości materiałów i ogniw słonecznych CIGS**. Doktorantka wniosła istotny wkład w zrozumienie wpływu parametrów procesu technologicznego dotyczących domieszkowania metalami alkalicznymi na właściwości ogniw cienkowarstwowych na bazie materiałów chalkopirytowych. W oparciu o swoje obszerne prace eksperymentalne i modelowanie dokonała głębokiej analizy problemów związanych z ziarnami i ich granicami w strukturze warstwy aktywnej CIGS oraz roli metali alkalicznych w pasywacji defektów na granicach ziaren, wykazując się głęboką wiedzą, umiejętnością analizy danych oraz zrozumieniem odpowiednich procesów fizycznych w materiałach półprzewodnikowych. Na tej podstawie można stwierdzić, że **Doktorantka zaprezentowała ogólną wiedzę teoretyczną, umiejętności eksperymentalne i modelowania procesów fizycznych oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w zakresie fizyki i inżynierii materiałowej**. Jej praca doktorska spełnia zatem warunki stawiane pracom doktorskim, podane w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce

(Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). W związku z tym wnoszę o dopuszczenie pani mgr. Anieli Czudek do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Ponadto wnioskuję o wyróżnienie pracy. Ma ona istotne znaczenie dla zrozumienia działania ogniw słonecznych ze złączami na bazie CIGS, w szczególności roli metali alkalicznych w znaczącej poprawie sprawności tych ogniw. Doktorat jest przykładem bardzo solidnej i potrzebnej pracy zarówno nauce, jak jej aplikacjom, począwszy od właściwego wyboru szerokiego materiału do badań, przez niestandardowe eksperymenty i modelowanie służące opisowi wyników, aż wreszcie zrozumienie fizycznej natury obserwowanych zjawisk. Praca bez wątplenia buduje solidny, pionierski fundament dla zrozumienia roli metali alkalicznych w materiale polikrystalicznym, otrzymywanym tanią technologią naparowania. Głęboka analiza szerokiego spektrum wyników, wykonana mistrzowsko, z dużą intuicją naukową i nieprzeciętnym kunsztem wyszukiwania podstawowych trendów we właściwościach materiałowych, dała w wyniku naprawdę istotny wkład w rozwój badań nad materiałami CIGS, który już jest zauważony na arenie międzynarodowej, a nie wątpię, że znaczenie tej wiedzy będzie mocno rosło. Znaczenie pracy wychodzi poza obszar materiałów CIGS – jest także ważne dla innych materiałów otrzymywanych w formie polikrystalicznej tanimi technologiami, jak choćby materiały perowskitowe dla ogniw słonecznych. Na zakończenie chciałabym też przypomnieć, że wyniki zawarte w doktoracie zostały częściowo opublikowane w bardzo dobrych czasopismach, tematyki doktoratu dotyczy bezpośrednio 6 publikacji w czasopismach z listy JCR o wysokim tzw. Impact factor, z których trzech Doktorantka jest pierwszą autorką. Wysoki poziom naukowy, aktualna tematyka, rzetelność i istotny wkład w rozwój nauki światowej przeprowadzonych badań zasługują na wyróżnienie.



Maria Kamińska