

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

Warszawa, 30 kwietnia 2017 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka Maciaszka
pt. „Modelowanie efektu metatrwałego fotoprzewodnictwa w
półprzewodnikach z rodziny $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ ”**

Niniejsza recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka Maciaszka pt. „Modelowanie efektu metatrwałego fotoprzewodnictwa w półprzewodnikach z rodziny $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ ” dokonana została biorąc pod uwagę znowelizowaną Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 nr 65 poz.595 oraz Dz. U. 2016 poz.882 i poz.1311), jak również Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. 2016 poz.1586).

Rozprawa doktorska mgr inż. Marka Maciaszka ma formę maszynopisu książki, co jest jedną z form rozpraw dopuszczanych przez Ustawę i jest opatrzona wymaganym ustawowo streszczeniem w języku angielskim.

Podjęte przez mgr inż. Marka Maciaszka badania przedstawione w rozprawie doktorskiej stanowią wkład do badań prowadzonych w szeregu laboratoriów na świecie w tematyce rozcieńczonych półprzewodników z rodziny chalkopirytów I-III-VI₂, a mianowicie związków $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$, stosowanych powszechnie w fotowoltaice. Badania tych materiałów cieszą się dużym zainteresowaniem ze względu na ich charakter zastosowawczy, ale tematyka ta jest również interesującym zagadnieniem poznawczym, przede wszystkim ze względu na obecność metastabilnych defektów, tzw. centrów DX. Przełomowe wyniki dotyczące zjawiska metastabilności pojawiły się w tej tematyce 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.

Wobec ograniczonych zasobów paliw kopalnych, negatywnego wpływu zwiększającej się emisji dwutlenku węgla do atmosfery oraz problemów ze składowaniem odpadów promieniotwórczych z elektrowni atomowych, energia słoneczna stanowi niewątpliwie najbardziej przyszłościowe i praktycznie niewyczerpywalne źródło energii dla ludzkości. Generowana obecnie energia elektryczna z promieniowania słonecznego zaspokaja niewiele ponad 1% naszych potrzeb, ale fotowoltaika stanowi najszybciej rozwijaną metodę pozyskiwania energii w ostatnich latach. Złącza fotowoltaiczne wytwarzane z wykorzystaniem związku $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$, zwanego często CIGS należą do kategorii fotowoltaiki cienkowarstwowej (*thin film solar cells*). Cienkość warstwy aktywnej pozwala na zastosowania na podłożach giętkich. Półprzewodnikowy materiał CIGS o prostej przerwie energetycznej i w związku z tym wysokim współczynnikiem absorpcji, pełniący rolę absorbera, pozwala na konstrukcje fotowoltaiczne mające grubości warstwy aktywnej rzędu kilku mikrometrów, co pozytywnie wpływa na koszty ogniw. Dodatkowo, niskotemperaturowe metody wytwarzania tego materiału (rozpylanie, tzw. sputtering lub naparowywanie) są znacznie tańsze niż tradycyjne technologie krzemowe, a wszystkie składniki struktur fotowoltaicznych CIGS: miedź, ind, gal i selen są powszechnie dostępne. W skali laboratoryjnej złącza CIGS posiadają rekord wydajności w kategorii fotowoltaiki cienkowarstwowej (22,6% Zentrum für Sonnenenergie - und Wasserstoff-Forschung lub 23,3% z koncentratorem National Renewable Energy Laboratory (NREL); dane według NREL „Best Research-Cell Efficiencies” na dzień 18 kwietnia 2017r. <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>) i przewyższają nieco laboratoryjne wydajności innych cienkowarstwowych struktur fotowoltaicznych, wytwarzanych na bazie CdTe oraz są sporo wyższe od wydajności struktur na bazie amorficznego krzemu. W masowej produkcji wydajności ogniw CIGS są mniejsze, na poziomie 15%, ale wyraźnie rosną w ostatnich latach. Ponadto obecny lider w produkcji modułów słonecznych na bazie CIGS, japońska firma Solar Frontier, oferuje produkty wolne od wszelkich metali ciężkich, takich jak kadm, czy ołów, co podnosi atrakcyjność produktu. Wszelkie prace mające na celu poprawę technologii są tym bardziej skuteczne, im lepsze jest zrozumienie podstaw właściwości stosowanych materiałów, a jednym z ważniejszych efektów, mających również wpływ na wydajność fotowoltaiki CIGS, są zachodzące w złączach zjawiska metastabilne. Od lat wiadomo, że w złączach CIGS można wywołać światłem wzrost napięcia obwodu otwartego oraz czynnika wypełnienia – zmiany te stowarzyszone są ze wzrostem koncentracji akceptorów i przewodnictwa złącz CIGS.

Zjawiska te przez dłuższy czas pozostawały niezrozumiałe. Wiele informacji dotyczących zachowań metastabilnych CIGS, jak i podstawowych defektów obecnych w tych materiałach, wniosły prace prowadzone na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej przez grupy naukowe skupione wokół prof. dr hab. Małgorzaty Igalson i prof. dr hab. inż. Rajmunda Bacewicza. Do grup tych dołączyło z sukcesami młodsze pokolenie, wśród nich promotor pomocniczy recenzowanej pracy doktorskiej, znakomity naukowiec dr inż. Paweł Zabierowski. Publikacje Politechniki Warszawskiej, dobrze znane na świecie, były wielokrotnie cytowane i stały się ważną inspiracją dla przełomowej pracy z 2006 r. grupy teoretycznej Alexa Zungera z National Renewable Energy Laboratory w Golden, Colorado (*S. Lany, A. Zunger, Light- and bias-induced metastabilities in Cu(In,Ga)Se₂ based solar cells caused by the (V_{Se}-V_{Cu}) vacancy complex, J. Appl. Phys. 100, 113725 (2006)*), sugerującej związek zjawisk metastabilnych z kompleksem dwuluk selenu i miedzi, V_{Se}-V_{Cu}. Tematyka CIGS jest w dalszym ciągu rozwijana na Politechnice Warszawskiej we współpracy z najlepszymi ośrodkami europejskimi pracującymi w tym zakresie.

Praca doktorska pana mgr. inż. Marka Maciaszka pt. „Modelowanie efektu metatrwałego fotoprzewodnictwa w półprzewodnikach z rodziny Cu(In,Ga)Se₂” jest pracą teoretyczną, dotyczącą ilościowego opisu struktury dwóch defektów naturalnych typu centrów DX w półprzewodnikach Cu(In,Ga)Se₂, a mianowicie kompleksu V_{Se}-V_{Cu} oraz antypołożeniowego defektu III_{Cu}, jak również wpływu tych defektów na wyniki podstawowych pomiarów charakteryzujących zachowanie ogniw na bazie CIGS. Mgr inż. Marek Maciaszek dokonał głębokiej analizy złącza CIGS/CdS w celu zrozumienia zachodzących w takich strukturach zjawisk metastabilnych wywołanych oświetleniem lub przykładowym napięciem. Wyniki swoje zestawiał przede wszystkim z modelami przełomowych prac Lany’ego i Zungera. Na podstawie swoich obliczeń sformułował szereg praktycznych wskazówek dla osób prowadzących eksperymenty, jak należy je poprawnie interpretować oraz w jakich warunkach należy je prowadzić, aby można było uzyskać wiarygodne wartości koncentracji defektów metastabilnych. Cenną stroną pracy jest stałe odnoszenie się do wyników eksperymentów (przeprowadzonych przez innych), przez co rozważania teoretyczne mają mocny sens praktyczny.

W rozprawie doktorskiej pana mgr inż. Marka Maciaszka znajdujemy kolejno:

1. Streszczenie pracy w języku polskim i angielskim.
2. Wstęp, w którym Autor przedstawia skrótowo motywację i cel pracy oraz w ogólnym zarysie jej zawartość.

3. Dziewięć rozdziałów - w pierwszych pięciu zawarte są istotne informacje dla prezentowanych w ostatnich trzech rozdziałach wyników obliczeń Autora. Rozdziały te zawierają kolejno:
- Rozdział 1. Wprowadzenie do problematyki fotowoltaiki: zasadę działania ogniw słonecznych i istotę ich najważniejszego parametru – wydajności oraz opis budowy ogniw słonecznych na bazie CIGS i ich typowe parametry.
 - Rozdział 2. Wyczerpujące z punktu widzenia potrzeb pracy omówienie problematyki defektów w półprzewodnikach: klasyfikację defektów ze względu na ich wymiarowość, klasyfikację defektów punktowych, wpływ defektów na swobodne nośniki, problem relaksacji sieci z omówieniem istoty centrów typu DX, przewidywania teoretyczne i wyniki eksperymentalne dotyczące metastabilnych defektów w materiałach CIGS.
 - Rozdział 3. Omówienie metody eksperymentalnej profilowania CV wraz z opisem wpływu obecności głębokich defektów na profile CV.
 - Rozdział 4. Omówienie aktualnego stanu wiedzy dotyczącego defektów metastabilnych w materiałach CIGS – podsumowanie publikowanych dotąd wyników eksperymentalnych, zestawienie ich z przewidywaniami modelu Lany'ego i Zungera. W rozdziale tym Autor streścił również najważniejsze wyniki swojej pracy magisterskiej, dotyczące wpływu kompleksu dwuluk $V_{Se}-V_{Cu}$ na koncentrację dziur w stanie równowagowym w strukturze ogniwa na bazie CIGS. Ważnym wnioskiem pracy magisterskiej było, że kompleks dwuluk $V_{Se}-V_{Cu}$ nie może być traktowany jako typowy donor, czy akceptor, gdyż obie konfiguracje defektu są obecne i wpływają na koncentrację dziur. Autor pokazał, że istotna jest znajomość parametru f_A opisującego ilość kompleksów w konfiguracji akceptorowej. W rozdziale tym znalazł się również opis programu SCAPS (współautorstwo jednej z publikacji świadczy o udziale dr inż. Pawła Zabierowskiego w rozwoju tego oprogramowania), używanego do symulacji ogniw cienkowarstwowych, w tym również tych na bazie CIGS z uwzględnieniem defektów metastabilnych. Program pozwala na symulowanie charakterystyk CV, zależności pojemności od częstotliwości i wydajności kwantowej.
 - Rozdział 5. Omówienie metod ab initio w zastosowaniu do badania defektów w półprzewodnikach, które Autor wykorzystał w części swojej rozprawy doktorskiej. Idea metody teorii funkcjonału gęstości (tzw. DFT – Density Functional Theory) oraz stosowane przybliżenia przedstawione zostały w sposób bardzo dydaktyczny, z uwzględnieniem najnowszych metod służących między innymi przewycięzeniu

problemów z otrzymywaniem zbyt małej przerwy energetycznej. Równie ładny jest opis metody wyznaczania energii tworzenia defektu, zawierający omówienie stosowanych przybliżeń, skutki tych przybliżeń i stosowane poprawki. Tym samym Autor pokazał, że wykonane przez niego obliczenia nie były tylko czystym wykorzystaniem istniejącego oprogramowania.

- Rozdział 6. Przedstawienie motywacji i celu podjętych prac przedstawionych w rozprawie doktorskiej. Autor odnosi się przede wszystkim do niezadowolającego stanu wiedzy na temat właściwości elektrycznych $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$.

- Rozdział 7. Omówienie wyników własnych obliczeń związanych z badaniem ilościowych przewidywań modelu Lane'go i Zungera, dotyczącego kompleksu dwuluk $\text{V}_{\text{Se}}\text{-V}_{\text{Cu}}$, dla efektu metatrwałego fotoprzewodnictwa, w szczególności kinetyk tworzenia i relaksacji stanu metastabilnego. Autor zestawiał wyniki eksperymentalne związane z zależnością przewodności CIGS w funkcji temperatury i natężenia oświetlenia dla próbek oświetlanych w różnych temperaturach, uzyskane w grupie prof. Igalson. Pokazał, że model Lane'go i Zungera może tłumaczyć eksperymentalne zależności koncentracji dziur po oświetleniu od temperatury oraz od natężenia oświetlenia, o ile założy się przekrój czynny na wychwyt elektronów mniejszy niż 10^{-18} cm^2 , co jest wielkością nietypowo małą – badane defekty w różnych półprzewodnikach mają wartości przekrojów czynnych w granicach 10^{-16} do 10^{-14} cm^2 . Autor uważa, że można to interpretować jako istnienie niezależnego od temperatury dodatkowego czynnika spowalniającego konwersję defektu dwuluk $\text{V}_{\text{Se}}\text{-V}_{\text{Cu}}$ z konfiguracji donorowej do konfiguracji akceptorowej. Ponadto wyniki jego obliczeń wskazują na rozbieżność z modelem Lane'go i Zungera obserwowanej zależności koncentracji dziur od natężenia oświetlenia, kiedy stan metastabilny tworzony jest w niskiej temperaturze. Nie przedstawia wytłuczenia tej rozbieżności.

- Rozdział 8. Przedstawienie czynników zaburzających pomiar koncentracji defektów metastabilnych – Autor formułuje wnioski na podstawie swoich obliczeń dotyczących procesu relaksacji zachodzącej w trakcie obniżania temperatury, jak i obliczeń odtwarzających charakterystyki CV dla różnych parametrów charakteryzujących warstwę CdS (koncentracja swobodnych elektronów, grubość), tworzącą złącze z CIGS w ogniwach. Autor pokazuje wpływ szeregu scenariuszy chłodzenia (w szczególności tempa chłodzenia) i oświetlania złącz na bazie CIGS na dokładność wyznaczenia koncentracji metastabilnych defektów dwuluk $\text{V}_{\text{Se}}\text{-V}_{\text{Cu}}$. Udziela bezcennych wskazówek dla eksperymentatorów, w jaki sposób wyznaczać koncentrację dziur i co faktyczne

oznacza wyznaczona wielkość. Ponadto pokazuje, jak należy interpretować standardowo prowadzone pomiary CV, wyznaczające wartość domieszkowania.

- Rozdział 9. Omówienie obliczeń dotyczących metastabilnych właściwości defektu Ga_{Cu} . Autor przedstawił metodę i wyniki obliczeń dotyczących energii tworzenia różnych stanów ładunkowych defektu Ga_{Cu} (oraz jego kompleksu z luką, jak również dwuluką V_{Cu}) w konfiguracji podstawieniowej oraz w konfiguracji DX w zależności od energii Fermiego, oraz podał energie równowagowych przejść między tymi stanami. W obliczeniach swoich wyszedł poza istniejące rachunki dla tego defektu i wyznaczył diagram konfiguracyjny dla Ga_{Cu} oraz przeanalizował różne scenariusze zmiany konfiguracji defektu między konfiguracją podstawieniową a konfiguracją DX. Na zakończenie przedyskutował możliwy związek defektu Ga_{Cu} ze znanym efektem dla ogniw na bazie CIGS, tzw. red-on-bias, polegającym na metastabilnym wzroście akceptorów w okolicy międzypowierzchni CIGS/CdS w ogniwie spolaryzowanym ujemnie i podświetlonym czerwonym światłem.

4. Zakończenie, zawierające wskazówki dla prowadzących eksperymenty związane z ogniwami na bazie CIGS oraz podsumowanie wyników pracy doktorskiej.
5. Wykaz publikacji Autora, zawierający 7 pozycji w czasopismach z listy JCR (z czego w sześciu pan mgr inż. Marek Maciaszek jest pierwszym autorem) oraz 2 publikacje pokonferencyjne (obie z panem mgr inż. Markiem Maciaszkiem jako pierwszym autorem).
6. Bibliografię, zawierającą 137 pozycji.

Praca doktorska pana mgr inż. Marka Maciaszka powinna być oceniana w kontekście istniejących modeli teoretycznych i obliczeń związanych z całą gamą zjawisk dotyczących metastabilności ogniw na bazie CIGS, obserwowanych pod wpływem oświetlenia i przyłożonego napięcia. Przegląd tej wiedzy w sposób wyczerpujący przedstawiony został w pracy doktorskiej. W literaturze główną rolę w występowaniu efektu metatrwałego fotoprzewodnictwa przypisuje się kompleksowi $\text{V}_{\text{Se}}-\text{V}_{\text{Cu}}$, zaś inny efekt metastabilności, wspomniany wyżej tzw. red-on-bias, przypisuje się antypołożeniowemu defektowi Ga_{Cu} . Praca doktorska mgr. inż. Pawła Maciaszka nie wprowadza w tych poglądach wielkiej rewolucji, raczej kolejny raz potwierdza, że modele te są generalnie zasadne dla opisu zachowań ogniw na bazie CIGS. Waga pracy leży natomiast w bardzo rzetelnej analizie wykonanych przez innych eksperymentów i przeprowadzeniu obliczeń starających się uwzględnić możliwe zakresy parametrów materiałów ogniw oraz możliwe scenariusze

typowych pomiarów charakterystyk elektrycznych i CV. Autor nie podjął się łatwego zadania. Podstawowym problemem ogniw na bazie CIGS jest tania technologia, prowadzenie procesów w warunkach odbiegających zasadniczo od równowagi termodynamicznej, co w efekcie daje materiał polikrystaliczny, zdeformowany, z dalekim od atomo-gładkich międzypowierzchni; do tego dochodzi dyfuzja sodu ze szklanego podłoża. W rezultacie właściwości i CIGS i CdS są trudne do kontroli i mało powtarzalne. Nie jest to zatem łatwy materiał do badań i wyciągania ogólnych wniosków. Praca doktorska mgr. inż. Pawła Maciaszka daje silne narzędzie do rąk doświadczalników, pokazuje jak należy prowadzić i interpretować eksperymenty, żeby wyznaczone parametry były wiarygodne. Jestem pełna podziwu dla rzetelności przedstawionych badań, wykazujących głębokie zrozumienie problemów ogniw na bazie CIGS. Autor pokazał też znakomite opanowanie zastosowania dostępnych zaawansowanych oprogramowań, co pozwoliło mu przeprowadzić tak szeroką analizę rozważanych defektów, wychodząc od energii tworzenia ich różnych stanów ładunkowych w konfiguracjach podstawieniowych i DX, przez konstrukcje diagramów konfiguracyjnych do bardzo dogłębnych studiów profili CV, włączających niejednorodny rozkład akceptorów w warstwie CIGS.

Praca doktorska mgr. inż. Pawła Maciaszka zawiera nowe spostrzeżenia, z których za najważniejsze uważam:

- stwierdzenie nietypowo niskiej wartości przekroju czynnego na wychwytywanie elektronu przez kompleks dwuluk $V_{Se}-V_{Cu}$, co jak uważa Autor można interpretować istnieniem niezależnego od temperatury dodatkowego czynnika spowalniającego konwersję konfiguracji donorowej defektu do akceptorowej. Jest to ciekawy wynik fizyczny, uzyskany dzięki dogłębnej analizie obliczeniowej istniejących danych eksperymentalnych, a dotychczas niezauważony;

- wyznaczenie diagramu konfiguracyjnego dla defektu Ga_{Cu} , dogłębne zbadanie właściwości metastabilnych tego defektu i konstruktywny głos w dyskusji nad związkiem tego defektu z efektem red-on-bias;

- przeprowadzenie dogłębnej analizy złącz CIGS/CdS, która dostarcza obszernych, wspomnianych wyżej wskazówek dla eksperymentatorów prowadzących badania właściwości elektrycznych ogniw na bazie CIGS, przede wszystkim technikami fotoprądu i charakterystyki CV.

Praca doktorska pana mgr. inż. Marka Maciaszka nie jest łatwa do czytania. Zawiera wiele rozważań w różnych zakresach parametrów, wiele szczegółów, które często są trudne

do śledzenia i wymagają maksymalnej koncentracji czytającego. Trudno jest jednak postawić tu zasadniczy zarzut, bo praca dotyczy kapryśnych defektów, które w zależności od warunków pomiarowych zmieniają swoje konfiguracje i te zmiany dotyczą tylko części ich. Jestem więc pełna podziwu dla Autora pracy, który podjął się rozwiązywać tak skomplikowane i żmudne problemy, uporządkował obraz ogniów na bazie CIGS i znalazł przedziały parametrów, w których można stosować konkretny model. Jak wspominałam wyżej ogniwa CIGS/CdS ze względu na brak powtarzalności technologii nie są atrakcyjnym obiektem badawczym i praca pana mgr. inż. Marka Maciaszka jest pierwszą znaną mi tak dogłębną analizą ich właściwości. Brakuje mi trochę następnego kroku Autora, jakim naturalnie jest analiza problemu (przy tak dogłębnym zrozumieniu) w jaki sposób efekty metastabilności przekładają się na wydajność całkowitą i wydajność kwantową ogniów. To zagadnienie jest bardzo ważne z punktu widzenia zastosowań i myślę, że Autor podejmie je w swojej dalszej pracy naukowej. Jest do tego znakomicie przygotowany. Autor używa wielu oznaczeń, które są zawsze rzetelnie wytłumaczone przy pierwszym użyciu. Wielką jednak szkoda, że Autor nie zrobił listy stosowanych oznaczeń na początku lub końcu rozprawy, co znacznie ułatwiłoby jej czytanie. Niestety czasem różne wprowadzone oznaczenia odnoszą się do tej samej wielkości. Co więcej konfuzyj powoduje rozważanie ogniów raz w konfiguracji CdS/CIGS, a gdzie indziej w konfiguracji CIGS/CdS (patrz np. rys. 3.1 i 8.7 oraz wszelkie rozważania dotyczące złącza z wyszczególnieniem jego obszarów).

W pracy znalazłam drobne błędy merytoryczne. Defekty antypołożeniowe wbrew stwierdzeniu Autora nie muszą występować w formie kompleksów. Lepszym określeniem dla podziału defektów na płytkie/głębokie jest stosowanie nazewnictwa wodoropodobne/zlokalizowane, gdyż słowo „głęboki” kojarzy się z dużą energią jonizacji, a przecież zlokalizowane defekty miewają i poziomy rezonansowe z pasmami. Na str. 118 Autor mówi o zaniżonej koncentracji N_{cv} – wielkość ta jest odczytywana z eksperymentu, więc nie może być zaniżona, czy zawyżona. Na str. 113 nie jest jasne, czy Autor mówiąc o większym ujemnym napięciu ma na myśli jego wartość, czy wartość bezwzględną. We wzorze (7.33) jest drobny błąd, który w dalszych rachunkach został skorygowany. Dużym problemem dla mnie jest brak oszacowania przez Autora ilości wydzielanego ciepła przy proponowanych metodach podświetlania próbek oraz wpływu tego procesu na stabilność temperatury ogniwa. Opisany eksperyment w rozdziale 7.1 zawiera zbyt mało szczegółów takich, jak np. oświetlenie monochromatyczne (jeśli tak, to jaka długość fali), czy światłem białym, jak

istotna jest absorpcja dla natężenia światła w głębszych warstwach ogniwa, no i oczywiście jak istotne są wspomniane efekty związane z podgrzewaniem próbek przez oświetlenie.

Praca napisana jest dobrym językiem, nie zawiera praktycznie błędów interpunkcyjnych, a w całej pracy znalazłam tylko około trzech literówek. Jedyna uwaga, która mam w zakresie języka pracy to to, że Autor zamiast słowa „interfejs” powinien używać słowa „międzypowierzchnia”. Słowo „interfejs” weszło do języka polskiego, ale jak dotąd jedynie w przypadku urządzeń elektronicznych oraz pojęć stosowanych w programowaniu. Duży problem miałam z rysunkami zawartymi w pracy. Podpisy przy wykresach są często wykonane bardzo małą czcionką, niektóre kolory niewiele się różnią, co sprawia, że ich analiza wymaga dużo cierpliwości. Na rys. 9.4 wspomniana w podpisie niebieska kula jest moim zdaniem czarna, lub co najmniej granatowa, a niebieskie są atomy miedzi. Z rysunkiem tym miałam też inny problem, gdyż konfiguracje podstawieniowa i DX defektu zobrazowane są w innych orientacjach, co powinno być jasno zaznaczone.

Na zakończenie uwag – trochę szkoda, że przy tak obszernej pracy podsumowanie nie zostało wydzielone (osobny rozdział) i trochę rozszerzone.

Są to jednak drobne uchybienia, które nie podważają znacząco wartości przedstawionej mi do recenzji pracy.

Wyniki pracy doktorskiej zostały już częściowo opublikowane w czterech pracach w czasopiśmie z listy JCR. Dorobek publikacyjny pana mgr. inż. Marka Maciaszka obejmuje według bazy Web of Science 8 pozycji, z czego pierwsza, związana z doktoratem, cytowana była 7 razy. Ogólna liczba cytowań wynosi 19 (11 bez autocytowań), a indeks Hirsha 3. Są to naprawdę dobre wyniki na tym etapie kariery naukowej. Trochę brakuje mi bardziej szczegółowych informacji o prezentacjach konferencyjnych.

Podsumowując recenzję uważam, że przedstawiona mi praca doktorska pana mgr. inż. Marka Maciaszka, przygotowana pod opieką promotora i promotora pomocniczego stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego teoretycznego opisu złącz fotowoltaicznych na bazie CIGS oraz wykazuje bardzo dobre opanowanie warsztatu teoretycznego Autora w zakresie badań defektów w półprzewodnikach i strukturach ogniw słonecznych. Praca spełnia zatem warunki stawiane pracom doktorskim, podane w znowelizowanej Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 nr 65 poz.595 oraz Dz. U. 2016 poz.882 i poz.1311).

W związku z tym wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Marka Maciaszka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Ponadto wnioskuję o wyróżnienie pracy. Argumenty związane ze znaczeniem pracy dla badań nad złączami na bazie CIGS są podane w różnych miejscach tej recenzji. Doktorat, jak napisałam, nie zawiera przełomowych wyników, ale jest przykładem bardzo solidnej i potrzebnej nauce pracy. Autor przeprowadził wiele ważnych dla eksperymentatorów zaawansowanych obliczeń, wymagających opanowania trudnego warsztatu teoretycznego i daje cenne wskazówki doświadczalnikom, bez których interpretacja pomiarów elektrycznych i CV jest często niepoprawna. Praca jest również znakomitym dogłębnym przeglądem aktualnego stanu wiedzy dotyczącej ogniów na bazie CIGS. Na zakończenie chciałabym też przypomnieć, że wyniki zawarte w doktoracie zostały częściowo opublikowane w dobrych czasopismach; tematyki doktoratu dotyczą 4 publikacje w czasopismach z listy JCR (jedna z nich jest w druku) i dwa z tych czasopism mają tzw. impact factor około 4. Rzetelność i poziom naukowy przeprowadzonych badań zasługują na wyróżnienie.



Maria Kamińska