

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Konrada Wiśniewskiego
pt.: „Wpływ niepożądanych barier dla transportu nośników ładunku na charakterystyki
elektryczne cienkowarstwowych ogniw słonecznych”**

wykonanej na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem
dr hab. inż. Pawła Zabierowskiego

Praca doktorska mgr inż. Konrada Wiśniewskiego jest pracą naukową na miarę XXI wieku. Doktorant podjął się zadania ambitnego dotyczącego zweryfikowania obecnego stanu wiedzy w zakresie szeroko pojętych defektów i granicy ziaren występujących w fotowoltaice cienkowarstwowej i zaproponowania nowej interpretacji obserwowanych zjawisk fizycznych, niejednokrotnie wchodząc w polemikę z dotychczasowymi doniesieniami literaturowymi.

Z całym przekonaniem można stwierdzić, iż mgr inż. Konrad Wiśniewski to naukowiec-wizjoner z bardzo dobrze opanowanym warsztatem naukowym i szeroką wiedzą literaturową w zakresie ogniw cienkowarstwowych typu CIGS. Dodatkowo na wyróżnienie zasługuje fakt, bardzo dobrze opanowanej wiedzy przez Doktoranta i zastosowanie jej w praktyce w zakresie metodologii badań naukowych. Praca obejmuje wszystkie aspekty procesu poznania myślowego, czyli analizę i syntezę, dedukcję i indukcję, porównanie i przeciwstawianie oraz uogólnianie i wnioskowanie. Doktorant ukierunkował swój tok myślenia we właściwym kierunku i przedstawił w pracy rzetelną i wielopłaszczyznową analizę problemu wpływu na pomiary elektryczne niepożądanych barier występujących w polikrystalicznych cienkowarstwowych ogniwach słonecznych. Wszystkie etapy procesu badawczego zostały dogłębnie przeanalizowane poprzez właściwe sformułowanie problemu, hipotezy badawczej, planu badawczego, a następnie wykonanie i analiza badań oraz podsumowanie. Na wyróżnienie zasługuje od strony metodologicznej także fakt, iż Doktorant – jako pasjonat nauki bezwzględnie ma świadomość i pewnego rodzaju niedosyt po rozwiązaniu problemu badawczego będącego przedmiotem dysertacji, toteż identyfikuje nowe problemy badawcze i proponuje inicjację nowych procesów badawczych.

Rozprawa doktorska została napisana w języku polskim i obejmuje 190 stron, zilustrowana jest 93 rysunkami oraz 1 tabelą. Spis literatury zawiera 110 pozycji literaturowych z okresu 1973-2021 w tym 1 rozprawę doktorską Maciaszek M. z 2017 (Modelowanie efektu metatrwałego fotoprzewodnictwa w półprzewodnikach z rodziny $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$) i pracę promotora z 2001, gdzie nie podano źródła (Badanie zjawisk elektronowych w obszarze międzypowierzchni w strukturach fotowoltaicznych $\text{ZnO CdS Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ z wykorzystaniem metody DLTS).

Praca doktorska składa się z streszczenia, 10 rozdziałów, ogólnych przemyśleń i podziękowań oraz dodatku. Pracę czyta się bardzo dobrze. Każdy rozdział przedstawia obecny stan wiedzy w temacie, identyfikację luk badawczych i próbę ich zapelnienia poprzez wyniki obliczeń matematycznych i numerycznych w szerokim zakresie oraz w wąskim zakresie

eksperymentów laboratoryjnych. Każdy rozdział to swoistego rodzaju „przygoda” naukowa z nowym poruszonym w pracy zagadnieniem, stawianie nurtujących obecnie naukowców pytań oraz propozycja odpowiedzi na nie. Wartością dodaną pracy jest fakt, iż rozdziały kończą się podsumowaniem każdego zagadnienia i stawianiem kolejnych pytań. Dojrzałość naukowa Doktoranta przebija się przez całą pracę.

Cel pracy został sformułowany w rozdziale 7 jako próba wyjaśnienia i zrozumienia sposobu działania niepożądanych barier dla transportu nośników ładunku na obserwowany w ogniwach CIGS sygnał N1 i na charakterystyki pojemnościowo-napięciowe i prądowo-napięciowe. Przeprowadzone analizy i opracowane rozwiązania teoretyczne i symulacje zawarto w rozdziałach 8-10.

Rozdział 1: *Słowo wstępne* wprowadza czytelnika w zagadnienia rozprawy i trafnie Doktorant proponuje podtytuł dysertacji w formie pytań o treści: „*Co może się kryć pod pojęciem pojemności w urządzeniach półprzewodnikowych?*” czy „*Jak poprawnie zinterpretować pomiary pojemności w ogniwie fotowoltaicznym?*”. Doktorant trafnie konkluduje, iż obecnie trwa swoistego rodzaju wyścig w osiąganiu coraz to wydajniejszych ogniw słonecznych, aczkolwiek wielokrotnie są to wartości które nie są do powtórzenia w kolejnych procesach produkcyjnych. Dlatego wymagana jest standaryzacja i normalizacja procesu wytwarzania i pomiaru ogniw słonecznych. Ponadto Doktorant wzmiankuje o istotnych czynnikach jakimi są zmiana składu chemicznego kompozycji, proporcji czy też fakt iż wiele zjawisk występujących w poszczególnych warstwach w ogniwie słonecznym nakłada się i interpretacja efektów występujących w całym wielozłączowym ogniwie jest trudna, aczkolwiek nie niemożliwa. Dlatego tak istotna jest dbałość o powtarzalność całego procesu produkcyjnego ogniw słonecznych: od syntezy materiałów poprzez analizę właściwości do konstrukcji wyrobu użytkowego.

Doktorant wymienia ogniwa CIGS jako te od których oczekuje się kolejnych wzrostów sprawności, aczkolwiek należałoby wspomnieć iż jest to uniwersalny trend obowiązujący w fotowoltaice zarówno organicznej jak i nieorganicznej.

Doktorant używa stwierdzenia, cytując: „... *ale już w drugiej niewiele innej próbce ten opis nie pasuje.*” Nie jest to precyzyjne stwierdzenie, proszę o wyjaśnienie co znaczy określenie niewiele innej próbce. Wiadomym jest fakt, iż z punktu widzenia technologii każda zmiana w składzie kompozycji, czy technologii wytwarzania poszczególnych warstw może mieć decydujący wpływ na parametry fotowoltaiczne ogniw słonecznych.

Rozdział 2: *Motywacje* wprowadza czytelnika, aczkolwiek na poziomie bardzo ogólnym w zagadnienia od strony aplikacji fotowoltaiki wymieniając jako wiodącą obecnie technologię BIPV i wspominając o ogniwach tandemowych w tym z koncentratorami i fotowoltaice organicznej. Doktorant ma świadomość, iż aby zrozumieć istotę zjawisk występujących w ogniwach CIGS – będących przedmiotem szerokiej analizy w dysertacji – potrzebna jest synergia teorii z eksperymentem. Doktorant wymienia dostępne techniki badawcze stosowane w nauce do analizy i interpretacji właściwości ogniw CIGS.

Zabrakło w rozdziale *Motywacje* informacji o ogniwach kesterytowych czy też ogniwach hybrydowych typu CIGS/perowskity, które obecnie są przedmiotem zainteresowań wielu grup badawczych na świecie zarówno w aspekcie badań podstawowych jak i aplikacyjnych.

Rozdział 3: *Najważniejsze zależności i informacje* składa się z 7 podrozdziałów i opisuje efekt fotowoltaiczny zarówno poprzez równania matematyczne, a także przedstawia charakterystykę pojemnościowo-napięciową złącza pn analizując wpływ niejednorodnego

domieszkowania, czy stężenia tzw. głębokich defektów oraz wpływu granic ziaren na transport nośników prądu w materiale polikrystalicznym.

Bezwzględnie rozdział wzbogaciłyby informacje o wpływie rodzaju materiału i rodzaju domieszki na parametry elektryczne ogniw słonecznych. Świadomość synergii między istotą wpływu technologii/chemii na obserwowane zjawiska fizyczne w konstruowanych ogniwach słonecznych jest elementem kluczowym do właściwej interpretacji procesów zachodzących na złączach w ogniwie.

Rozdział 4: *Metody pomiarowe* opisuje stosowane techniki badawcze, czyli pomiar pojemności oraz pojemnościową spektroskopię głębokich defektów (DLTS) i odwrotną RDLTS, a także spektroskopię admitancyjną (AS). Interesujące jest spojrzenie Doktoranta na metodę DLTS jako na transformatę Laplace.

Zabrakło informacji o stosowanej podczas wykonywania pomiarów aparaturze badawczej.

Rozdział 5: *Opis ogniwa CIGS* jest bardzo ubogi i porusza głównie zagadnienia dotyczące granic ziaren i pomiarów elektrycznych w ogniwach CIGS. Nie podano informacji czy Doktorant miał możliwość uczestniczyć w procesie wytwarzania ogniw CIGS i jakie ogniwa były przedmiotem badań w dysertacji, o jakiej architekturze, czy takiej jak przedstawiono na rys. 5-1 (zdjęcie SEM z pracy Poortmans i Arkhipov, 2006).

Niestety, ponownie Doktorant stwierdza, cytując „... *Bez konieczności wnikania w techniczne detale.*” Proszę o wyjaśnienie tego stwierdzenia. Ponownie stwierdzam, że technologia ma kluczowe znaczenie przy interpretacji obserwowanych efektów fizycznych.

Proszę również o doprecyzowanie stwierdzenia, cytując „... *dane z próbek wytworzonych wiele lat temu.*”. Wiadomym jest, iż zagadnienia związane z stabilnością, trwałością ogniw słonecznych są kwestią kluczową dla aspektów aplikacyjnych w fotowoltaice. Proszę o informacje odnośnie stabilności czasowej i atmosferycznej ogniw CIGS.

Rozdział 6: *Spektroskopia głębokich poziomów w ogniwach CIGS* poświęcony jest charakterystyce sygnału N1, który w szczególności obserwowany jest w ogniwach CIGS i którego interpretacja jest problematyczna od ponad 20 lat. Istotą dysertacji jest próba zrozumienia powodu powstawania sygnału N1 poprzez analizę porównawczą klasycznej teorii DLTS z eksperymentem dla zakresu kinetyki pojemności podczas przejść 0V – 1V (DLTS) i -1V – 0V (RDLTS). Na podkreślenie zasługuje fakt dokonania przez Doktoranta bardzo szczegółowej analizy danych literaturowych odnośnie dostępnych modeli literaturowych sygnału N1 i próba interpretacji własnej czterech dostępnych teorii, czyli:

1. Przyczyną powstawania sygnału N1 są rozciągłe energetycznie stany na interfejsie pomiędzy warstwą CdS a absorberem (1998, badania metodami DLTS i AS).
2. Zaprzeczeniem powyższej interpretacji jest praca z 2003, gdzie autorzy zastosowali modyfikację metody AS - technikę DLCP (*drive level capacitance profiling*) do pomiarów ogniw CIGS wykazując, iż DLCP nie jest wrażliwa na stany na między-powierzchni na głównym złączu, a jednocześnie możliwa jest rejestracja sygnału N1.
3. W 2010 stwierdzono, że identyfikowane za pomocą metody AS zmiany pojemności w funkcji częstotliwości należy tłumaczyć nie poprzez poziomy defektowe, ale przez aktywowane termicznie przewodnictwo domieszkowe. Przy czym pominięto analizę sygnału DLTS.
4. Hipoteza „tylnego kontaktu” z 2010 została zaproponowana do wytłumaczenia wyników badań otrzymanych metodą AS wraz z próbą opisu sygnału DLTS (2011-2015). Sformułowano pytanie, które w niniejszej dysertacji pełni rolę przewodnią,

czyli „*Jak dodatkowa bariera może wpłynąć na zachowanie się pojemności całego układu po nagłej zmianie przyłożonego do niego napięcia?*”.

Doktorant, analizując poszczególne teorie odrzuca teorie 1 i 2 natomiast w odniesieniu do teorii 3 stwierdza, iż bardzo dobrze tłumaczy wyniki AS (w tym nieliniowy wykres Arrheniusa) i stawia pytanie odnośnie możliwości wytłumaczenia wyników DLTS i jednocześnie informując, iż niestety odpowiedź jest negatywna jak przedstawiono szczegółowo w podrozdziale 8.2. Podrozdział 6.3 poświęcił Doktorant omówieniu hipotezy tylnego kontaktu trafnie rozpoczynając analizę od zrozumienia działania poszczególnych elementów układu (złącza pn i Schottky'ego).

Rozdział 8: *Wyniki* Doktorant poświęcił szczegółowej analizie modelu tylnego kontaktu z uwypukleniem zarówno zalet jak i wad. Doktorant trafnie zauważył, iż niezbędna jest modyfikacja teorii tylnego kontaktu w celu zmniejszenia rozbieżności między eksperymentem a teorią. Doktorant analizuje wyniki dla trzech próbek ogniwi CIGS (A-C), które wytworzone zostały na Uniwersytecie w Nantes w procesie jednoetapowym. Zabrakło informacji o architekturze badanych ogniwi i różnicy między próbkami o kodach A, B, C szczególnie biorąc pod uwagę sformułowany przez Doktoranta wniosek w podsumowaniu rozdziału 8: „*Sygnal N1 w bardzo dużym stopniu zależy od danej próbki (jest silnie zależny od metody wytwarzania ogniwi CIGS), a energia aktywacji może się zmieniać nawet pomiędzy 0,05 a 0,3 eV.*”. Zabrakło informacji o otrzymanych parametrach fotowoltaicznych dla analizowanych próbek A-C (Jsc, Uoc, FF, PCE).

Przeprowadzona przez Doktoranta symulacja wpływu transportu hoppingowego na sygnał DLTS (8.2) wykazała, że nie można dopasować danych teoretycznych (sygnałów opartych na teorii przewodnictwa domieszkowanego) do danych eksperymentalnych i tym samym teoria 3 zaprezentowana w rozdziale 6.2 została obalona przez Doktoranta stwierdzeniem, iż teoria oparta na ograniczeniu prędkości z jaką relaksuje warstwa zubożona nie pozwala na wytłumaczenie mechanizmu powstawania sygnału N1.

Podrozdział 8.3 przedstawia numeryczną analizę hipotezy o tylnym kontakcie. Doktorant argumentuje podjęte działania stwierdzeniem, iż rozwiązanie numeryczne może w sposób bardziej precyzyjny zdefiniować wszystkie warunki występujące podczas eksperymentu DLST oraz umożliwić jego symulację. Informacje na temat szczegółowych obliczeń zawarto w artykule Doktoranta z 2019. Zabrakło, krótkiego podsumowania odnośnie wyników przedstawionych w artykule. Wyniki symulacji zamieszczono w podrozdziale 8.4. Zastosowano do obliczeń program Mathematica przy wykorzystaniu funkcji NDSolve. Doktorant na podstawie przeprowadzonych symulacji stwierdza, iż symulacja w sposób jakościowy zgadza się z eksperymentem. Wyróżnia cztery podobieństwa które zaobserwował, a które nie były możliwe do wyjaśnienia w hipotezach dotyczących sygnału N1 (podrozdział 6.2). Proszę o wyjaśnienie informacji podanej w podpisie rys. 8-16: „*Dane eksperymentalne zostały pomnożone przez 8*”.

Ponadto, Doktorant stwierdza, iż na podstawie otrzymanych wyników i przeprowadzonej dyskusji, iż najistotniejszą w interpretacji obserwowanych zjawisk jest teoria tylnego kontaktu. Aczkolwiek w kolejnym zdaniu konkluduje, iż dogłębna analiza eksperymentu i symulacji wykazuje istotne różnice pomiędzy wynikami eksperymentalnymi a teorią jednocześnie proponując nowe spojrzenie na postawiony problem z uwzględnieniem powtarzalności pomiaru DLTS, kształtem sygnału i wartością energii aktywacji. Obserwuje bardzo niską wartość energii aktywacji sygnału eksperymentalnego równą 0,09 eV. Przedstawia propozycje otrzymania najlepszego dopasowania dla energii aktywacji sygnałów eksperymentalnego i teoretycznego gdy nastąpi drastyczne zmniejszenie prądu nasycenia tylnego kontaktu oraz gdy nastąpi zmniejszenie pojemności, co jak sam Doktorant stwierdza

nie ma sensu fizycznego. Podsumowując, Doktorant wysuwa wniosek iż zatem wytłumaczenie istnienia sygnału N1 musi się wiązać z innymi warunkami transportu niż zaproponowali to Eisenbarth i współpracownicy, 2010 i Lauwaert i współpracownicy, 2011. Ponadto, Doktorant świadomie bazując na napisanym programie w środowisku Mathematica proponuje dodatkowe analizy modelu i skorelowanie ich z danymi literaturowymi poprzez wprowadzenie tzw. kryterium demarkacyjnego, analizę amplitudy sygnału DLTS w zależności od czasu trwania impulsu, czy analizę podczas stanów stacjonarnych oraz wpływ oświetlenia poprzez tzw. defekty metastabilne. Doktorant stwierdza, iż hipoteza tylnego kontaktu pozwala w sposób jakościowy na potwierdzenie eksperymentu z symulacjami teoretycznymi, aczkolwiek nie pozwala na otrzymanie zgodności ilościowej. Jest to intrygujące stwierdzenie, iż zazwyczaj naukowcy dążą do zgodności teorii z eksperymentem w ujęciu ilościowym. Proszę o wyjaśnienie tego stwierdzenia.

W podrozdziale 8.5.4. Doktorant analizuje wpływ oświetlenia na działanie ogniów CIGS i obserwowane efekty. Odczuwa się pewien niedosyt przy analizie tych informacji biorąc pod uwagę fakt, iż zasada działania ogniów słonecznych opiera się na konwersji energii światła słonecznego na energię elektryczną i jest efektem pożądanym dla działania ogniów słonecznych. Zabrakło, klarowności w prezentowanej koncepcji oraz analizy wpływu rodzaju źródła światła, odległości ogniwa od źródła światła oraz czasu naświetlania na zanik sygnału N1.

Rozdział 8 kończy Doktorant trafnym podsumowaniem i pytaniem o treści: „*czy jest możliwe takie udoskonalenie teorii dwudiodowej, aby poradzić sobie z 3 wyzwaniem: niski czynnik przedeksponencyjny, mała amplituda i zanikanie sygnału N1 po oświetleniu?*” zgrabnie przechodząc do zagadnień omówionych w rozdziale 9: *Poszukiwanie właściwego modelu*.

Niedosyt budzi brak odniesienia opracowanego rozwiązania teoretycznego w korelacji do warunków naturalnych (przy szerokim zakresie zmienności globalnego natężenia nasłonecznienia i temperatury pracy modułów/ogniów CIGS), co było by pomostem tłumaczącym związek między zjawiskami fizycznymi, zachodzącymi w strukturze cienkowarstwowego ogniwa fotowoltaicznego, a zmiennymi warunkami meteorologicznymi oraz wpływ tych zmian na parametry użytkowe gotowych modułów do aplikacji praktycznych. W jaki sposób zaproponowane przez Doktoranta interpretacje dotyczące sygnału N1 w ogniwach CIGS można przenieść ze skali mikro (laboratoryjnej) do skali makro (technologicznej, produkcyjnej). Jak proces przeskalowania technologii wpływa na proponowaną interpretację obserwowanych zjawisk w ogniwach CIGS? Homogeniczność powierzchni i obecność defektów jest tzw. piętą Achillesową przy przeskalowaniu technologii wytwarzania poszczególnych warstw w ogniwie słonecznym.

Rozdział 9: *Poszukiwanie właściwego modelu* Doktorant zatytułował z świadomością, iż zadanie którego się podjął do realizacji w dysertacji nie jest łatwe dlatego sformułowanie „poszukiwanie” a nie znalezienie oddaje w pełni zarówno złożoność tematu jak i dojrzałość i wiedzę Doktoranta w zakresie poszukiwań właściwej interpretacji danych. Doktorant słusznie stwierdza, iż niniejszy rozdział jest próbą przewyciężenia trudności opisanych w poprzednich rozdziałach i stawia kolejne pytanie o treści: „*Jak zachować główne cechy modelu dwudiodowego, jednocześnie uzyskując, w dopasowaniach do eksperymentu sensowne parametry fizyczne?*”. Doktorant przeprowadził kolejne symulacje w celu określenia takich parametrów opisujących prąd dyfuzyjny przez tylny kontakt, aby otrzymać zgodność symulacji z eksperymentem. Proszę, o doprecyzowanie stwierdzenia „*Podczas obliczeń uwzględniono fakt, że efektywna ruchliwość w materiale polikrystalicznym może różnić się o kilka rzędów wielkości od tej wynikającej z parametrów materiału.*” Proszę o informację

odnośnie uwzględnionego błędu pomiaru. Proszę o komentarz do stwierdzenia pod rys. 9-1 „*Sygnal doświadczalny został zwiększony 9 krotnie*” i faktu otrzymania zbyt dużej amplitudy w symulacjach w porównaniu z eksperymentem. Proszę o komentarz do zastosowanego różnego mnożnika dla parametrów na rys. 9-2.

Na wyróżnienie zasługuje część dysertacji poświęcona analizie dwóch rodzajów granic ziaren (podłużne i poprzeczne) i próba interpretacji obserwowanych efektów fizycznych w połączeniu z właściwościami materiału polikrystalicznego (absorbera) w oparciu analizę danych literaturowych i wyniki własne otrzymane za pomocą opracowanego autorskiego programu przez Doktoranta, dostępnego na githubie Doktoranta. W podrozdziale 9.2. Doktorant stawia istotne, najważniejsze pytanie podsumowujące dysertację i odpowiada na nie twierdząco. Czyli, możliwe jest uzyskanie takich parametrów ziaren i granic ziaren, które pozwalałyby na wyjaśnienie bardzo niskich wartości prądu nasycenia tylnego kontaktu dla modelu dwudiodowego i eksperymentu DLTS. Dodatkowo, Doktorant udowadnia, iż taki prąd nasycenia będzie zachowywał się tak samo wraz ze zmianą temperatury podobnie jak prąd nasycenia tylnego kontaktu i otrzymał taką samą wartość energii aktywacji na wykresie Arrheniusa. Aczkolwiek, Doktorant konkluduje, iż pomimo otrzymanych zgodności, należy otrzymane wyniki traktować jako badania wstępne oparte na wielu przybliżeniach i mające według Doktoranta służyć głównie do wykazania sensowności zastosowanego podejścia, w którym źródłem sygnału N1 są niepożądane bariery występujące w ogniwie CIGS. Dlatego, w kolejnym podrozdziale 9.2.6 *Pro futuro* przedstawia wizję przyszłych symulacji i kroków badawczych w celu dokładniejszej interpretacji sygnału N1, wśród których wymienia: opracowanie bardziej ogólnej teorii w celu obliczenia struktur niesymetrycznych, gdy ziarna są zubożone tak aby otrzymać dane teoretyczne zgodne z eksperymentem.

Proszę o ustosunkowanie się do zagadnienia dotyczącego wpływu rodzaju absorbera na charakterystyki prądowo-napięciowe ogniw CIGS i sygnał N1.

Rozdział 10: *Program do dwuwymiarowej symulacji stanów nieustalonych w ogniwach CIGS* zamyka całość zagadnień poruszanych w dysertacji będąc zdaniem Doktoranta największym z wyzwania, których się podjął podczas realizacji pracy doktorskiej. Autorski program napisany przez Doktoranta oparty jest na programach Harmona i w wersji końcowej zawiera ponad 14 000 linijek kodu. Znajduje się na githubie Doktoranta.

Proszę o komentarz do podanych informacji odnośnie wymiarów ogniwa zastosowanych do symulacji numerycznej (powierzchnia 0,5 cm², grubość 2 μm) oraz o informacje na temat wymiarów ogniwa omawianego w poprzednim rozdziale 9. Jak rozmiar ogniwa przekłada się na otrzymywane wyniki symulacji?

Proszę o doprecyzowanie stwierdzenia na stronie 167: „... *wpłynięciem w ten obszar elektronów z materiału donorowego...*” Proszę o analizę wpływu rodzaju materiału donorowego na charakterystyki prądowo-napięciowe w ogniwie CIGS oraz o szczegółową interpretację rys. 10-20 z uwzględnieniem różnego stężenia defektów na granicy ziaren.

Rozdział 10 Doktorant kończy podsumowaniem i wizją przyszłych planów naukowych.

Recenzowana praca doktorska jest przygotowana w sposób staranny i dokładny. Zauważone błędy edytorskie i kolokwializmy (np. *koncentracja* (strona 17), raczej powinno być stężenie, *poświecimy światłem* (strona 21), *koncentracje swobodnych nośników gwałtownie urywają się* (strona 22), *odpięcie poziomu* (strona 35), *ogonach Debye'a* (strona 51), *nachylenia proces* (strona 77), raczej powinno być prostej, *poświecenie na ogniwo* (strona 108), *wiszących wiązań* (strona 132), *problem „stopu”* (strona 153), *zbieganie funkcji* (strona 153), nie ujmują jakości niniejszej pracy.

Bezwzględnie Doktorant wykazał, iż jego dociekliwość naukowa i właściwa analiza postawionych problemów zaskutkowały przesunięciem granic poznania naukowego w analizowanej tematyce co jest niezmiernie istotne w rozwoju nauki. Czytając pracę ma się wrażenie, iż Doktoranta cechuje pożądanym w nauce dualizm naukowy. Z jednej strony dociekliwość i polemika, a czasami nawet negacja z postawionymi dotychczas tezami w świecie nauki, a z drugiej strony pokora i świadomość iż tylko praca zespołowa, interdyscyplinarność może doprowadzić do pełnego sukcesu. Można, śmiało stwierdzić cytując R. Feynmana (noblistę z fizyki w 1965), iż dla mgr inż. Konrada Wiśniewskiego nauka jest przyjemnością poznawania.

Podsumowując, pomimo wyrażonych powyżej zastrzeżeń uważam, że Pan mgr inż. Konrad Wiśniewski udowodnił sformułowaną tezę pracy poprzez zidentyfikowanie problemów i realizację poszczególnych zadań badawczych, tym samym osiągając założone cele dysertacji. Uwagi, które nasunęły mi się w trakcie czytania rozprawy nie mają zasadniczego wpływu na moją pozytywną ocenę pracy. Doktorant jest współautorem 1 publikacji naukowej w czasopiśmie *Thin Solid Films* z roku 2019 (*Exploration of the two-diode model of deep level transient spectroscopy signal originating from secondary barriers*), która jest cytowana w dysertacji na stronie 85 w podrozdziale 8.3 *Numeryczna analiza hipotezy o tylnym kontakcie*. Ponadto, Doktorant legitymuje się dwoma publikacjami z lat 2020-2021, w tym jednej monoautorskiej, aczkolwiek nie wspomina o tych pracach w dysertacji (Wiśniewski, K., Zabierowski, P. *Diffusion transport over grain-boundary barriers as the origin of NI deep level transient spectroscopy signal in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells*, *Thin Solid Films* 2021, 721, 138540. oraz Wiśniewski, K., *Interpretation of a capacitance in polycrystalline solar cells: Time domain simulations*, *Proceedings of the International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, NUSOD, 2020, 2020-September*, pp. 47–48, 9217680). We wszystkich pracach Doktorant jest pierwszym autorem.

Reasumując, stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Konrada Wiśniewskiego pt.: *Wpływ niepożądanych barier dla transportu nośników ładunku na charakterystyki elektryczne cienkowarstwowych ogniw słonecznych* spełnia wymogi formalne stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę do Rady Naukowej Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie jej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jednocześnie ze względu, na jakość dysertacji wnoszę do Rady Naukowej Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej o wyróżnienie pracy doktorskiej.

Agnieszka Iwan