

Kraków, 12.05.2022r.

Prof. dr hab. Tomasz Stapiński
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica
w Krakowie
Instytut Elektroniki
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Konrada Wiśniewskiego

Pt. Wpływ niepożądanych barier dla transportu nośników ładunku na charakterystyki elektryczne cienkowarstwowych ogniw słonecznych

Promotor:

Pan dr hab. inż. Paweł Zabierowski

Problematyka rozprawy

Jednym z wyzwań cywilizacyjnych obecnego stulecia jest rozwój technologii związanych z efektywnym gospodarowaniem energią oraz poszukiwaniem najbardziej wydajnych źródeł zielonej energii. Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Konrada Wiśniewskiego pt. „Wpływ niepożądanych barier dla transportu nośników ładunku na charakterystyki elektryczne cienkowarstwowych ogniw słonecznych” w swojej tematyce wpisuje się w obszar badawczy związany z fotowoltaiką z wyraźnym ukierunkowaniem na dyscyplinę naukową fizyka. Odniesienie się Autora w pracy do szeregu zagadnień w dziedzinie nauk fizycznych i zjawisk obserwowanych w dziedzinie nauk ścisłych świadczy o szerokim i dojrzałym spojrzeniu na postawiony problem naukowy. Autor skoncentrował się na zjawiskach transportu elektrycznego w strukturach polikrystalicznych cienkowarstwowych ogniw słonecznych z absorberem $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGSe) tzw. CIGS. Badania dotyczyły wpływu barier (np. złącze Schottky'ego lub aktywne elektrycznie granice ziaren) występujących w ogniwach CIGS na prowadzone pomiary elektryczne w metodzie spektroskopii głębokich defektów (ang. Deep Level Transient Spectroscopy - DLTS). Pan mgr inż. Konrad Wiśniewski skoncentrował się na hipotezie tylnego kontaktu w ogniwie CIGS wprowadzając zmodyfikowaną koncepcję mechanizmu transportu nośników o charakterze dyfuzyjnym przez dodatkową barierę. Wyniki przeprowadzonych badań wskazały dodatkowo, że pochodzenie bariery występującej w ogniwie może być zarówno od granic ziaren w absorberze jak i od tylnego kontaktu. Wyniki badań eksperymentalnych były zgodne z zaproponowanym przez Autora

modelem ogniwa CIGS. Pan mgr inż. Konrad Wiśniewski przeprowadzi dwuwymiarowe symulacje metodą elementów skończonych, gdzie uwzględniono granice ziaren zlokalizowanych w poprzek i wzdłuż kierunku przepływu prądu w strukturze fotowolticznej. Recenzent z uznaniem dostrzega bardzo ważny (pośredni) związek obiektu badań Pana mgr inż. Konrada Wiśniewskiego z potencjalnym pozytywnym jego wpływem na realizację zasady zrównoważonego rozwoju, o której mowa w art. 8 Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 1303/2013.

Charakterystyka rozprawy

Rozprawa ukazała się w formie zwartej i posiada oryginalny układ. Rozprawa ukazała się w formie wydania książkowego Politechniki Warszawskiej Wydziału Fizyki w 2022 roku ze wskazaniem dyscypliny naukowej (nauki fizyczne dziedzina nauk: nauki ścisłe i przyrodnicze). Językiem rozprawy jest język polski. Rozprawa doktorska składa się ze 190 stron i ma prawidłowy układ edytorski, a jej struktura jest przejrzysta. Przytoczona bibliografia jest w pełni wystarczająca dla naświetlenia problematyki i zawiera 108 pozycji w większości z kilku ostatnich lat wydanych w liczących się czasopismach naukowych, z czego Pan mgr inż. Konrad Wiśniewski powołuje się na 1 publikację, której jest pierwszym autorem (Wiśniewski, K., Urbaniak, A. and Zabierowski, P. (2019) "Exploration of the two-diode model of deep level transient spectroscopy signal originating from secondary barriers," *Thin Solid Films*, 674, pp. 76–81). Bibliografia świadczy o bardzo dobrym rozeznaniu literaturowym Autora w uprawianej przez Niego dyscyplinie naukowej oraz ukształtowanej pozycji naukowej. Rozprawa zawiera 11 rozdziałów, streszczenie oraz dodatek. Rozprawa nie zawiera wykazu najważniejszych skrótów, symboli i oznaczeń, co bez wątpienia byłoby przydatne.

Pierwszy rozdział obejmuje streszczenie a w rozdziale 2 Autor opisał motywację podjęcia tematyki rozprawy. W rozdziale 3 Pan mgr inż. Konrad Wiśniewski określił przedmiot badań i naświetlił znaczenie podstawowych zagadnień poruszanych w rozprawie. Opisał podstawy fizyczne ogniwa słonecznego oraz podał charakterystykę pojemnościowo napięciowo złącza p-n zjawisko. Odniósł się do czynników wpływających na charakterystykę prądowo napięciowa złącza. Opisał statystykę obsadzenia głębokich poziomów defektowych oraz wpływu ziaren na transport nośników prądu. Rozdział 4 poświęcony jest opisowi metod pomiarowych. Autor przybliżył istotę metody pojemnościowej spektroskopii głębokich poziomów oraz spektroskopii administracyjnej. Rozdział 5 poświęcony jest opisowi ogniwa słonecznego typu CIGS. Do swoich badań autor użył ogniw słonecznych typu CIGS otrzymanych w ramach współpracy naukowej z Uniwersytetem w Nantes. Rozdział 6 odnosi się do spektroskopii głębokich poziomów w ogniwach CIGS. Autor scharakteryzował sygnał N1 i podał modele literaturowe dla tego sygnału. Przedstawił również hipotezy tylnego kontaktu dla struktury CIGS. W rozdziale 7 Pan mgr inż. Konrad Wiśniewski przedstawił cel swojej pracy doktorskiej. Wyniki pomiarów z eksperymentu DLTS i ich interpretacja zostały przedstawione w rozdziale 8. W rozdziale 9 autor poszukuje

właściwego modelu tylnego kontaktu oraz struktury absorbera uwzględniającej występujące ziarna. W rozdziale 10 autor zamieścił wyniki symulacji stanów nieustalonych w ogniwach CIGS zawierających granice ziaren z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W rozdziale 11 zamieszczono podziękowania a rozdział 12 to Dodatek. Po kolejnych rozdziałach zamieszczono podsumowanie badań i przedstawiono wnioski z prowadzonych badań co stanowi bardzo przydatny element tekstu dysertacji.

Oryginalne osiągnięcia Autora

Należy zauważyć, iż Pan mgr inż. Konrad Wiśniewski podjął się trudnego zadania zbadania złożonej wielowarstwowej struktury ogniwa słonecznego a nie tylko wyodrębnionego materiału, co de facto samo w sobie stanowi duże wyzwanie dla naukowca. Jak opisano w rozdziale 8 przeprowadzono pomiary DLTS (cech sygnału N1) dla trzech ogniw słonecznych (dzięki uprzejmości prof. Nicolasa Barreau) w celu weryfikacji hipotezy tylnego kontaktu i opracowania najbardziej adekwatnego modelu. Autor uzyskał dla kolejnych ogniw bardzo interesujące widma RDLTS (Reverse Deep Level Transient Spectroscopy), co pozwoliło określić z wykresu Arrheniusa wartości energii aktywacji. Recenzent odczuwa jednak pewien niedosyt, gdyż Doktorant nie dokonał porównania wyników swoich badań dla kolejnych ogniw z wynikami badań charakterystyk prądowo-napięciowych wyprodukowanych ogniw słonecznych w laboratorium na Uniwersytecie w Nantes. Zapewne interesujące mogło być porównanie uzyskanych wartości energii aktywacji ze współczynnikiem wypełnienia FF (fill factor) wyliczonych z jasnych charakterystyk prądowo-napięciowych ogniw czy też innych parametrów np. dla obwodu zastępczego dwudiodowego modelu ogniwa słonecznego. Sam Autor wskazuje cytując „Sygnał N1 w bardzo dużym stopniu zależy od danej próbki (jest silnie zależny od metody wytwarzania ogniwa CIGS), a energia aktywacji może się zmieniać nawet pomiędzy 0.05eV a 0.3eV”. Powyższa uwaga krytyczna nie umniejsza osiągnięcia naukowego Pana mgr inż. Konrada Wiśniewskiego.

Autor przeprowadził weryfikację hipotezy o tylnym kontakcie poprzez przyjęcie uproszczonego układu zastępczego dla struktury zawierającej barierę potencjału na tylnym kontakcie oraz dla struktury dwóch diod przeciwstawnych. Autor krytycznie odniósł się do doniesień literaturowych dotyczących odróżnienia pochodzenia źródła sygnału DLTS od defektów punktowych i bariery na tylnym kontakcie. Autor przeprowadził pomiary charakterystyk pojemnościowo-napięciowych dla ogniwa CIGS i wyprowadził wzory na podział potencjału pomiędzy główną diodą p-n, a diodą związaną z tylnym kontaktem oraz wykazał, że nieomowy tylny kontakt może być źródłem występowania wygiętego profilu domieszkowania. Autor w swojej pracy działa wielowątkowo stawiając kolejne hipotezy i je w sposób dojrzały weryfikując.

Autor z dużą determinacją stara się znaleźć odpowiedni model tylnego kontaktu w ogniwach CIGS by odtworzyć uzyskane doświadczalnie sygnały. Osiągnięciem Autora było



też przeprowadzenie symulacji w celu określenia parametrów prądu dyfuzyjnego przez tylny kontakt i uzyskanie zgodności z eksperymentem. Interesujące okazały się rozważania poświęcone roli granic ziaren i ich usytuowania w materiale absorbera i ich wpływu na przepływ prądu. Pan mgr inż. Konrad Wiśniewski poświęcił swoją uwagę wpływowi światła na własności ogniwa. Efekt „nasiąkania światłem” (ang. light soaking) może utrzymywać się w czasie od kilku minut do nawet kilku dni w temperaturze pokojowej i powodować wzrost sprawności ogniwa CIGS. Autor tłumaczy również dlaczego w zaproponowanym swoim modelu sygnał N1 znika po ekspozycji światłem, wskazując na wzrost wartości domieszkowania w absorberze.

Autor dogłębnie analizował cechy sygnału N1 podając własną interpretację w oparciu o autorski model. Praca Pana mgr inż. Konrada Wiśniewskiego nie pozostanie bez echa, gdyż zaproponowany model pozwala na ilościową charakteryzację defektów w ogniwach słonecznych typu CIGS i lepsze poznanie złożonej fizyki defektów. Praca przyczynić się też może do wzrostu wydajności struktur fotowoltaicznych.

Pan mgr inż. Konrad Wiśniewski wykazał się również zdolnościami jako programista informatyk. Stworzył narzędzie numeryczne do obliczania stanów nieustalonych w cienkowarstwowych materiałach polikrystalicznych. Napisał program do numerycznego rozwiązywania równań dryfu-dyfuzji oraz równania Poissona, przy użyciu metody różnic skończonych i metody Newtona. Wykonał symulacje różnych konfiguracji: złącza Schottky’ego, złącza p-n, złącza p-n oraz złącza Schottky’ego, podłużnej i poprzecznej granicy ziaren.

W podsumowaniu działalności związanej z doktoratem Pana mgr inż. Konrada Wiśniewskiego zauważyć można bardzo dobre opanowanie techniki pomiarowej DLTS oraz interpretacji uzyskanych wyników jak i dużą determinację w poszukiwaniu modeli transportu nośników ładunku w ogniwach słonecznych typu CIGS. Recenzent zauważył, że niecytowana w dysertacji inna publikacja Pana mgr inż. Konrada Wiśniewskiego (*“Diffusion transport over grain-boundary barriers as the origin of N1 Deep Level Transient Spectroscopy signal in Cu(In,Ga)Se2 solar cells”*, Wiśniewski Konrad, Zabierowski Paweł, Thin Solid Films, 2021, vol. 721, s.1-7) również odnosi się do tematyki podjętej w doktoracie.

Mocne i słabe strony rozprawy

Nie ulega wątpliwości, iż fakt uprzedniego opublikowania części wyników składających się na doktorat Pana mgr inż. Konrada Wiśniewskiego w czasopiśmie z tzw. Listy filadelfijskiej świadczy o randze prowadzonych badań. Wspomniane dwie publikacje naukowe potwierdzają mocne strony doktoratu i merytoryczne przygotowanie doktoranta. Stawiając uwagę krytyczną w tekście recenzji recenzent nie ma wątpliwości, iż mocne strony rozprawy są dominujące.

Wnioski końcowe

Recenzent bardzo wysoko ocenia przedłożoną rozprawę doktorską. Autor w czasie realizacji swojej pracy doktorskiej wykazał się dużą intuicją jako naukowiec. Podkreśleniu zasługuje możliwość wykorzystania wyników badań dla rozwoju fotowoltaiki. Cel pracy został osiągnięty a recenzowana rozprawa doktorska posiada wysoki poziom naukowy i stanowi znaczący wkład w dyscyplinę naukową nauki fizyczne. Dojrzałość naukową Autora potwierdza fakt, iż wyniki prac były już opublikowane w czasopiśmie naukowym z listy filadelfijskiej (Thin Solid Films). **Reasumując stwierdzam, że cel pracy został osiągnięty, recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Konrada Wiśniewskiego posiada wysoki poziom naukowy i spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim. Na podstawie stosownej Ustawy wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.** Równocześnie, po przyjęciu publicznej obrony pracy doktorskiej Pana mgr inż. Konrada Wiśniewskiego, z uwagi na znaczenie wyników dla rozwoju dyscypliny naukowej składam wnioski o jej wyróżnienie.

Tomasz Stapiński

Handwritten signature of Tomasz Stapiński in blue ink, consisting of the name 'Tomasz Stapiński' written in a cursive style.