

Prof. dr hab. Marek Wasiucionek

Warszawa, 30 stycznia 2020

Wydział Fizyki

Politechnika Warszawska

Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

## RECENZJA W SPRAWIE POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO

DR. INŻ. PAWŁA ZABIEROWSKIEGO

### 1. Uwagi ogólne

Dr inż. Paweł Zabierowski w 1997 r. ukończył studia na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, uzyskując stopień magistra inż. nauk fizycznych w zakresie fizyki technicznej. W tym samym roku rozpoczął studia doktoranckie na Wydziale FTiMS PW. Stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki uzyskał w 2002 r. na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej na podstawie rozprawy pt. *„Badanie zjawisk elektronowych w obszarze międzypowierzchni w strukturach fotowoltaicznych Zn/CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> z wykorzystaniem metody DLTS”*. Promotorem rozprawy był prof. dr hab. Rajmund Bacewicz.

W 2002 r. Habilitant został zatrudniony na Wydziale Fizyki PW na stanowisku adiunkta, na którym pracuje do dzisiaj. Równolegle, w latach 2001-2009, pracował w Polsko-Japońskiej Wyższej Szkole Technik Komputerowych w Warszawie. Na wczesnym etapie swojej działalności naukowej na Wydziale Fizyki PW odbył zagraniczne staże naukowe w prestiżowych europejskich ośrodkach aktywnych w zakresie fotowoltaiki: w Zürichu (ETH, 1998) i w Stuttgarcie (Institut für Physikalische Elektronik, Universität Stuttgart, 1999). W latach następnych prowadził działalność naukową we współpracy z szeregiem europejskich grup badawczych, m.in. z Francji (Université de Nantes), Niemiec (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Stuttgart), Szwajcarii (EMPA, Zurich), Szwecji (Ångström Laboratory, Uppsala Universitet) i Włoch (Università degli Studi di Verona). Efektem tej współpracy jest szereg wspólnych publikacji naukowych.

Dr inż. Paweł Zabierowski jest współautorem 36 artykułów naukowych w międzynarodowych recenzowanych czasopismach naukowych z bazy JCR (Journal Citation Reports). Prace te były cytowane 560 razy (496 bez autocytowań). Aktualny indeks Hirscha dorobku publikacyjnego Habilitanta wynosi  $h=14$  (wg. Web of Science, 30 stycznia 2020).

Jest ponadto współautorem dwóch rozdziałów w anglojęzycznej monografii wydanej przez Wiley-VCH (poz. [1],[2] w punkcie C załącznika 5) oraz jedynym autorem jednego rozdziału w anglojęzycznej monografii opublikowanej przez Nova Science Publishers (Załącznik 5, poz. [PZ2]).

O stałej aktywności naukowej Habilitanta świadczy fakt znacznego powiększenia dorobku publikacyjnego po uzyskaniu stopnia doktora: 5 prac przed doktoratem (tj. przed 2002 r., a 31 po doktoracie, przy czym nie bez znaczenia jest tu fakt, że okres po doktoracie obejmuje 17 lat.

Dr inż. P. Zabierowski przedstawiał wyniki swoich badań na konferencjach międzynarodowych (USA, Francja, Szwecja, Niemcy, Japonia, Chiny, Turcja, Meksyk) i krajowych. Jego dorobek konferencyjny obejmuje 15 referatów, w tym 10 referatów zaproszonych i 2 referaty plenarne, oraz 7 plakatów (Załącznik 5, punkt III.B). Habilitant brał czynny udział w ośmiu projektach badawczych, głównie międzynarodowych lub krajowych wspomagających współpracę międzynarodową, finansowanych m.in. w ramach Programu Ramowego UE, NCBiR i NCN. W projektach tych pełnił rolę kierownika (3), głównego wykonawcy (3), eksperta zewnętrznego (1) i wykonawcy (1). Wszystkie te projekty dotyczyły cienkowarstwowych ogniw słonecznych CIGS.

O ustalonej pozycji dr. inż. P. Zabierowskiego w międzynarodowym środowisku naukowców zajmujących się tematyką ogniw fotowoltaicznych, a w szczególności ogniw chalcogenidkowych, świadczy m.in. fakt powierzenia mu funkcji przewodniczącego obszaru badawczego „*Device Properties, Modeling and Defects Characterization*” na cyklicznych konferencjach IEEE PVSC w USA w 2011 i 2014 r.

Habilitant był recenzentem dwóch zagranicznych rozpraw doktorskich: w Belgii i w Estonii. Dwukrotnie był członkiem komisji przewodów doktorskich we Francji, na Université de Nantes. W Polsce był promotorem pomocniczym w dwóch zakończonych w 2017 r. przewodach doktorskich na Wydziale Fizyki PW (oba doktoraty obronione z wyróżnieniem).

Habilitant ma też ważne osiągnięcia dydaktyczne: był m.in. laureatem konkursu „Złota Kreda” na Wydziale Mechatroniki PW, przez szereg lat był członkiem Komisji Programowej Wydziału Fizyki, opracował programy kilku przedmiotów na studiach I i II stopnia. Brał też udział w działaniach popularyzujących fizykę, a w szczególności tematykę ogniw słonecznych, wśród szerszej publiczności (młodzieży szkół średnich i uczestników Uniwersytetu Trzeciego Wieku PW). Był opiekunem 6 prac magisterskich i 2 prac inżynierskich na Wydziale Fizyki PW.

Jeśli chodzi o działalność organizacyjną na rzecz Wydziału i macierzystej Uczelni, to obejmowała ona głównie sprawy dydaktyczne (ustalanie, zatwierdzanie i opiniowanie programów kształcenia), ale także koordynację badań fotowoltaicznych na Uczelni (Załącznik 5, punkty III.E i III.I).

Należy podkreślić zdecydowanie ponadstandardowe doświadczenie dr. inż. P. Zabierowskiego w realizowaniu zadań badawczych we współpracy z zagranicznymi, głównie europejskimi, grupami badawczymi, m.in. takimi jak: Université de Nantes (Francja), University of Uppsala (Szwecja), czy Gent University (Belgia) (Załącznik 5, punkt III.H).

## **2. Ocena osiągnięcia naukowego**

Dr inż. Paweł Zabierowski jako osiągnięcie naukowe pt. „Badanie wpływu defektów metastabilnych na wybrane charakterystyki elektryczne cienkowarstwowych ogniw słonecznych opartych na  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ ” przedstawił ciąg 9 tematycznie powiązanych prac naukowych opublikowanych w latach 2008-2019. Osiem ze współautorskich artykułów ([PZ1], [PZ3]-[PZ9]) zostało opublikowanych w międzynarodowych specjalistycznych czasopismach recenzowanych indeksowanych w bazie JCR (Journal Citation Reports), natomiast autorska praca [PZ2] jest 30-stronicowym rozdziałem w monografii „Thin Film Solar Cells: Current Status and Future Trends” (Nova Science Publ., 2011). Wszystkie te publikacje bardzo dobrze spełniają warunek spójności tematycznej, gdyż już nawet w tytułach wszystkie one zawierają wyrażenie „ $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ ” lub „CIGSe” (czyli akronim od  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ ) zawarte w tytule osiągnięcia naukowego.

W Załączniku 4 Habilitant jasno określił swoją rolę, a także oszacował procentowy udział w realizacji i w pisaniu tekstu każdej publikacji wchodzącej w skład osiągnięcia naukowego. Zgodnie z własnymi deklaracjami, dr. inż. P. Zabierowski był pomysłodawcą badań w każdej publikacji wchodzącej w skład osiągnięcia naukowego, a swój udział w merytorycznej części badań ocenił w zakresie od 30% [PZ8] do 100% [PZ2]. Te deklaracje są spójne z oświadczeniami wszystkich współautorów odnośnych publikacji (Załącznik 4), którzy jako swój wkład do publikacji wymieniają m.in. wykonanie określonych pomiarów, udział w dyskusji, współudział w analizie wyników, współudział w redagowaniu tekstu publikacji itp. Przedstawione w Załączniku 4 oświadczenia własne Habilitanta i oświadczenia współautorów jednoznacznie wskazują na wiodącą rolę dr. inż. P. Zabierowskiego w pracach wchodzących w skład

osiągnięcia naukowego. W uzupełnieniu należy dodać, że wszystkie badania prowadzone przez dr. inż. P. Zabierowskiego były prowadzone na wysokiej jakości materiałach i ogniwach fotowoltaicznych CIGSe pozyskanych ze współpracujących ośrodków zagranicznych.

Z formalnego punktu widzenia słabszą stroną artykułów przedstawionych we wniosku jest umiarkowany poziom (mierzony indeksem IF) części czasopism, w których opublikowano te artykuły. Indeks ten w przypadku dwóch publikacji wynosił  $IF=7,15$  [PZ9] i  $IF=3,89$  [PZ6], podczas gdy dla pozostałych publikacji wynosił około 2 (Załącznik 5, punkty I i II). Przy tej okazji chciałbym wyrazić opinię, że czasopisma takie jak Thin Solid Films (Elsevier) czy Journal of Applied Physics (American Institute of Physics), mimo niewysokiej wartości wyznaczanego algorytmicznie współczynnika IF, od lat mają swoją ustaloną dobrą pozycję wśród czasopism naukowych specjalizujących się m.in. w dziedzinie fotowoltaiki. Ponadto należy zauważyć, że artykuły Habilitanta w tych czasopismach także zostały zauważone przez środowisko i były wielokrotnie cytowane, m.in.: praca [PZ1] (J.Appl.Phys.;  $IF(2008)=2,16$ ) ma 53 cytowania.

Tematyka defektów w fotowoltaicznych ogniwach CIGSe, którą Habilitant zajmuje się konsekwentnie od wielu lat, jest ważna nie tylko z poznawczego, ale może przede wszystkim z praktycznego punktu widzenia. Dzieje się tak dlatego, że cienkowarstwowe ogniwa CIGSe mają szereg zalet w porównaniu z innymi typami ogniw fotowoltaicznych, w tym wysoką sprawność, czy możliwość taniego nakładania na duże powierzchnie różnych materiałów podłożowych. Jednakże ich główną wadą stojącą na drodze do upowszechnienia tego typu ogniw są metastabilne efekty wywołane długotrwałym oświetleniem lub polaryzacją złącza, ograniczające praktyczną sprawność ogniw. Jak wykazały badania, między innymi prowadzone przez Habilitanta, te niekorzystne efekty są spowodowane obecnością defektów. Natura tych defektów, mechanizmy ich tworzenia oraz ich wpływ na metastabilność zachowania się ogniw CIGSe wciąż nie są dostatecznie znane. Ich poznanie i zbadanie jest przedmiotem prac Habilitanta, przedstawionych jako osiągnięcie naukowe.

Motywnym przewodnym cyklu publikacji dr. inż. P. Zabierowskiego ([PZ1]-[PZ9]) było systematyczne zbadanie wpływu poziomu domieszki galem cienkowarstwowych struktur CIGSe na koncentrację i charakter występujących w nich defektów elektronowych. Jeśli chodzi o naturę defektów, powodujących ww. efekty metastabilne, to wiadomo, również m.in. dzięki pracom Habilitanta, że są to głównie pary luk  $V_{Se}-V_{Cu}$  lub kompleksy  $III_{Cu}-2V_{Cu}$  (gdzie  $III=Ga, In$ ). Defekty te wprowadzają do przerwy energetycznej CIGSe dodatkowe

poziomy domieszkowe, które lokalnie, w zależności od położenia poziomu Fermiego, mogą mieć charakter poziomów akceptorowych lub donorowych. Wiadomo ponadto, że ww. defekty struktury w pobliżu złącza bufor-CIGSe powodują wyraźny wzrost koncentracji ładunku ujemnego, a z dala od tego złącza, w materiale objętościowym, działają jako kompensujące donory. Te efekty powodują, że rozkład ładunku wewnątrz złącza jest niejednorodny, a w dodatku zmienny w czasie. Zbadanie profilu rozkładu ładunku elektrycznego w materiale CIGSe przynosi wiele informacji nt. źródeł efektów metastabilnych w złączach CIGSe.

Aby osiągnąć założony ww. cel naukowy Habilitant wykorzystywał szereg specjalistycznych metod eksperymentalnych, w tym głównie: zależności pojemnościowo-napięciowe (C-V) ogni i spektroskopia głębokich poziomów (DLTS). Prowadził także numeryczną symulację wpływu rozkładu ładunku elektrycznego w ogniwie na parametry ogniwa. Użyte przez dr. inż. P. Zabierowskiego metody pojemnościowe są szeroko stosowane w badaniach półprzewodników. Także spektroskopia DLTS ma już swoją mocną pozycję w badaniach głębokich stanów domieszkowych w półprzewodnikach.

Habilitant uszeregował prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego wg klucza tematycznego. Prace [PZ1]-[PZ5] dotyczą badań ww. defektów metodami pojemnościowymi i techniką niestacjonarnej spektroskopii głębokich poziomów (DLTS), natomiast prace [PZ6]-[PZ9] koncentrują się na analizie mechanizmów ograniczających sprawność ogniw CIGSe.

Jak wiadomo z badań nad ogniwami CIGSe, jednym z najważniejszych czynników wpływających na występowanie efektów metastabilnych jest obszar kontaktu bufor-CIGS, gdzie buforem jest zwykle CdS, ale może to być także Zn(O,S). Podstawową trudnością w poznaniu roli tego obszaru w generowaniu metastabilności ogniw jest problem z kontrolą tego obszaru pod względem składu chemicznego czy struktury pasmowej. Skomplikowane zagadnienia dotyczące wpływu tego obszaru na defekty metastabilne zostały zbadane i szczegółowo przeanalizowane w pracach [PZ6]-[PZ9], wchodzących w skład osiągnięcia naukowego.

W dalszej części recenzji chciałbym odnieść się do poszczególnych publikacji składających się na osiągnięcie naukowe.

W pracy [PZ1] zbadano wpływ głębokich defektów na zależności napięciowo pojemnościowe (C-V) ogniw CIGSe. Użyto metod spektroskopii admitancyjnej i profilowania pojemnościowego (DLCP). Stany metastabilne generowano za pomocą odpowiedniego naświetlania ogniw bądź ich polaryzowania w kierunku zaporowym. Najważniejszymi oryginalnymi osiągnięciami tej pracy są konkluzje, poparte symulacjami numerycznymi, że: 1) tzw. stany  $N_1$  mogą występować w obszarze złącza lub mieć charakter objętościowy, związany z kompensującymi donorami, 2) metody C-V i DLCP dają tę samą informację o przestrzennym rozkładzie ładunku elektrycznego oraz 3) analiza zbadanych zależności C-V wymaga zachowania dużej ostrożności, i uwzględnienia wszystkich możliwych czynników - powierzchowna lub pośpieszna interpretacja tych zależności może prowadzić do zupełnie fałszywych wniosków.

W wyniku badań w pracy [PZ2] sformułowano kryterium pozwalające stwierdzić, czy metastabilne zmiany właściwości elektrycznych ogniw CIGSe w danych warunkach są spowodowane defektami  $I_{Cu}$  czy  $V_{Se}$ . Innym ważnym osiągnięciem tej pracy było zaobserwowanie korelacji między profilami ładunku przestrzennego i charakterystykami I-V.

W pracy [PZ3] zbadano metodą DLPC serie ogniw CIGSe o różnej zawartości Cd oraz Na. Wyznaczono koncentracje kompleksów defektowych ( $V_{Se}-V_{Cu}$ ) płytkich domieszek. Pokazano również, jak modelowo uwzględniać wpływ głębokich domieszek na tzw. *zjawisko PPC* (*persisting photoconductivity*), występujące w ogniwach CIGSe, zauważone po raz pierwszy przez grupę prof. Małgorzaty Igalson z Wydziału Fizyki PW. Dr inż. P. Zabierowski jest od wielu lat ważnym członkiem tej grupy.

Praca [PZ4] koncentrowała się na badaniach ogniw CIGSe metodami DLTS i C-V w celu określenia przyczyny i struktury sygnału  $N_1$  widocznego na wykresach zależności C-V i DLTS w funkcji temperatury. Zaproponowano oryginalny model teoretyczny, w którym m.in. główne cechy zmierzonych sygnałów  $N_1$  przypisano oddziaływaniom między głębokimi defektami  $I_{Cu}$  a swobodnymi dziurami.

W pracy [PZ5] zaproponowano oryginalny tzw. dwudiodowy model pozwalający na symulację widm DLTS w przypadku występowania podwójnej bariery. Analiza wyników tych symulacji pozwoliła na stwierdzenie, że właściwości transportowe ładunku w obecności takiej bariery są różne od tych spotykanych w przypadku emisji termoelektronowej.

Praca [PZ6] była poświęcona badaniom wpływu przestrzennego rozkładu kompleksów defektowych  $V_{Cu}-V_{Se}$  na zjawiska metastabilne w ogniwach CIGSe. Między innymi wykazano w niej, w wyniku analizy rezultatów eksperymentalnych popartej symulacjami numerycznymi, że rozkład ładunku jest silnie zależny od domieszkowania bufora i położenia poziomu Fermiego. Wskazano także na szereg innych czynników, które mogą mieć większy lub mniejszy wpływ na efekty metastabilne.

W publikacji [PZ7] przedstawiono wyniki badań fotoluminescencyjnych w celu scharakteryzowania złącza p-n w ogniwach CIGSe. W rezultacie analizy widm fotoluminescencyjnych wykazano jakościowo, że są one skorelowane z rozkładem pola elektrycznego w obszarze ładunku przestrzennego absorbera.

Pracę [PZ8] poświęcono badaniu przyczyn specyficznego zjawiska znanego jako „red-blue effect”. Przeprowadzone badania zależności pojemnościowych oraz charakterystyk I-V ogniw CIGSe pozwoliły stwierdzić, że podstawową przyczyną ww. zjawiska jest wstrzykiwanie dziur generowanych przez wysokoenergetyczne fotony z obszaru bufora do warstwy absorbenta, a następnie ich wychwyt przez głębokie domieszki.

W pracy [PZ9] zbadano ogniwa CIGSe z użyciem nowego bufora – zamiast standardowego CdS zastosowano bufor Zn(O,S,OH) wytworzony tzw. metodą CBD (*Chemical Bath Deposition*). Stwierdzono, że choć użycie tego bufora może prowadzić do wyższej sprawności i lepszej stabilności ogniwa CIGSe, to aktualnie jego parametry użytkowe wykazują duży rozrzut i są silnie zależne od konkretnego ogniwa. W wyniku przeprowadzonych badań zapostulowano m.in., że stabilność tego typu ogniw można osiągnąć przez zwiększenie grubości warstwy bufora oraz zwiększenie oporności warstwy i-ZnO.

### **3. Ocena istotnej aktywności naukowej**

Dr inż. Paweł Zabierowski w trakcie całej swojej pracy naukowej konsekwentnie prowadził badania nad cienkowarstwowymi ogniwami fotowoltaicznymi CIGSe. Publikacje, wystąpienia konferencyjne na prestiżowych konferencjach, referaty zaproszone, współpraca z czołowymi europejskimi ośrodkami zajmującymi się tą tematyką świadczą najlepiej o pozycji naukowej, jaką Habilitant osiągnął w środowisku fotowoltaicznym. Analiza jego publikacji, nie tylko tych składających się na osiągnięcie naukowe, ale i pozostałych wymienionych w Załączniku 5,

pozwała stwierdzić dbałość Habilitanta o precyzyjny plan prowadzonych badań, staranność prowadzenia pomiarów, precyzyjną analizę i dogłębną dyskusję wyników i bardzo wyważone formułowanie wniosków.

Podsumowując tę część recenzji, uważam, że dotychczasowa aktywność i dorobek naukowy dr. inż. P. Zabierowskiego potwierdzają jego predyspozycje do pracy naukowej, zdolność do pogłębionej krytycznej analizy wyników eksperymentów, oraz umiejętność twórczej pracy zarówno samodzielnej, jak i w różnych, także międzynarodowych, grupach badawczych.

#### 4. Podsumowanie

W mojej opinii udokumentowane we wniosku osiągnięcie naukowe oraz aktywność naukowa, dydaktyczna i organizacyjna dr. inż. Pawła Zabierowskiego dowodzą, że jest on w pełni ukształtowanym, dojrzałym, twórczym i samodzielnym pracownikiem naukowym. Przedstawiony do recenzji jako osiągnięcie naukowe cykl 9 oryginalnych powiązanych tematycznie publikacji pt. „Badanie wpływu defektów metastabilnych na wybrane charakterystyki elektryczne cienkowarstwowych ogniw słonecznych opartych na  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ ” jest dobrze udokumentowany, opublikowany w uznanych czasopismach międzynarodowych. Habilitant ma ugruntowaną pozycję w międzynarodowym środowisku naukowym. Wskazują na to parametry powszechnie wykorzystywane do oceny pracy naukowej takie, jak m.in.: liczba dotychczasowych publikacji 36, w tym 31 po doktoracie, liczba cytowań 560 (496 bez autocytowań) czy wartość indeksu Hirscha  $h=14$ . Wskazuje na to również powierzenie mu przez międzynarodowe środowisko fotowoltaików ważnych i odpowiedzialnych funkcji, takich jak: przewodniczący obszaru badawczego (konferencje w USA), ekspert w projekcie (Francja), recenzent rozpraw doktorskich (Belgia, Estonii), profesor wizytujący (Francja) (Załącznik nr 5).

Biorąc powyższe fakty pod uwagę, uważam, że przedstawione we wniosku osiągnięcie naukowe oraz dotychczasowy dorobek Habilitanta spełniają wszystkie warunki wymagane do uzyskania stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk fizycznych w dyscyplinie fizyka. Dlatego wnoszę o dopuszczenie dr. inż. Pawła Zabierowskiego do dalszych etapów procedury habilitacyjnej.

