

Ocena osiągnięcia naukowego pt. „Optyczne i elektryczne własności defektów w materiałach fotowoltaicznych Cu(In,Ga)Se₂ oraz SnS” i dorobku naukowo-badawczego, dydaktycznego, popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej dra inż. Aleksandra Wawrzyńca Urbaniaka ubiegającego się o stopień naukowy doktora habilitowanego

1. Sylwetka

Pan dr inż. Aleksander Wawrzyniec Urbaniak ukończył studia na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej w roku 2005, uzyskując stopień magistra inżyniera fizyki na podstawie pracy zatytułowanej „Zastosowanie metody pomiaru fotopojemności w badaniu struktur fotowoltaicznych ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se₂”. W 2010 roku uzyskał stopień naukowy doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki w oparciu o rozprawę doktorską zatytułowaną „Metastabilne rozkłady defektów w materiałach fotowoltaicznych Cu(In,Ga)Se₂”. W obu przypadkach promotorem była prof. dr hab. Małgorzata Iglason. Kariera zawodowa dra inż. A. W. Urbaniaka całkowicie wiąże się z Wydziałem Fizyki Politechniki Warszawskiej, gdzie w 2008 roku rozpoczął pracę jako asystent, a od stycznia 2011 roku do chwili obecnej jest zatrudniony jako adiunkt naukowo-dydaktyczny.

Działalność naukowa dra inż. A. W. Urbaniaka od początku była związana z optyczną i elektryczną charakteryzacją cienkich warstw CIGS i opartych na nich ogniw fotowoltaicznych. W ramach tych badań Habilitant prowadził szeroką współpracę z wieloma uniwersytetami i ośrodkami badawczymi w Europie. Współpracował m. in. z Angström Solar Centre (Uppsala University, Szwecja), Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (Stuttgart, Niemcy), Laboratory for Thin Films and Photovoltaics, Empa (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Szwajcaria), Laboratory of Photonics (University of Luxembourg, Luksemburg), Positron Annihilation Laboratory (Aalto University, Finlandia) oraz z Universitat Politècnica de València (Hiszpania). Równolegle prowadził pracę dydaktyczną, którą rozpoczął jeszcze przed uzyskaniem stopnia doktora.

2. Ocena osiągnięcia naukowego

Podstawą ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego jest cykl ośmiu prac naukowych (numerowanych w Autoreferacie od H1 do H8) pod wspólnym tytułem „Optyczne i elektryczne własności defektów w materiałach fotowoltaicznych Cu(In,Ga)Se₂ oraz SnS”. Prace zostały opublikowane w latach 2011-2018, a więc już po doktoracie i przed złożeniem wniosku o nadanie stopnia doktora habilitowanego. Ich łączny Impact Factor wynosi **17,382**, a sumaryczna liczba cytowań na dzień 20.04.2019 to **41** w/g Web of Science i **53** w/g Scopus. Spośród ośmiu prac jedna, mianowicie H5, nie została opublikowana w czasopiśmie znajdującym się w bazie JCR. Pozostałe prace ukazały się w renomowanych czasopismach z bazy JCR: jedna w Solar Energy Materials & Solar Cells, jedna w Journal of Physics: Condensed Matter oraz 5 w Thin Solid Films. Prace te są wieloautorские, liczba autorów wynosi 7 (trzy prace), 5 (trzy prace) i 4 (1 praca). W pracach opublikowanych w czasopismach z bazy JCR, Habilitant jest pierwszym autorem, a swój procentowy udział w nich szacuje na 80 %. Wyjątek stanowi jedna praca, w której nazwisko dra inż. A. W. Urbaniaka pojawia się na drugiej pozycji z szacowanym udziałem równym 50 %. Z deklaracji złożonych przez współautorów prac (w sumie 19 osób) wynika, że prawie wszyscy mieli udział w przygotowaniu ogniw/próbek do badań, ale tylko

niektórzy uczestniczyli w przeprowadzaniu pomiarów (1 osoba) lub je samodzielnie przeprowadzili (5 osób: P. Szaniawski – pomiary admitancyjne, M. Marzantowicz – pomiary AFM, A. Krysztopa – pomiary PICTS, K. Macielak – pomiary PICTS, T. Sall – pomiary XRD). W dyskusji wyników brało udział zaledwie pięć osób (prof. dr hab. Małgorzata Igalson, prof. Susanne Siebentritt, dr Fabian Pianezzi, Stefanie Spiering, Stephan Bücheler). Deklaracje złożone przez współautorów nie są w sprzeczności z deklaracją dra inż. A. W. Urbaniaka, że jego udział w 6 z ośmiu prac cyklu publikacji polegał na wykonaniu pomiarów/części pomiarów, opracowaniu koncepcji pracy, przygotowaniu i napisaniu artykułu. W takiej sytuacji, nawet przy dużej liczbie współautorów, wkład pierwszego autora może sięgać 80 %.

Przedmiotem cyklu publikacji są defekty w dwóch rodzajach półprzewodnikowych warstw, a mianowicie Cu(In,Ga)Se_2 oraz SnS . Pierwszy rodzaj to warstwy stosowane jako absorber w cienkowarstwowych ogniwach fotowoltaicznych CIGS. Są to warstwy intensywnie badane od wielu lat. Drugi natomiast to warstwy, które nie były dotychczas tak intensywnie badane, ale mogą znaleźć zastosowanie jako absorbery w cienkowarstwowych ogniwach fotowoltaicznych. Sześć z ośmiu prac habilitacyjnego cyklu publikacji dotyczy warstw CIGS, a dwie ostatnie omawiają własności warstw SnS . Związek między tymi dwiema grupami prac jest dość słaby, gdyż stosuje się w nich inną metodologię. W pierwszym przypadku uwaga skupiona była na interpretacji widm pojemności warstw, złączy Schottky'ego i ogniw CIGS oraz wpływu sodu na własności elektryczne, w tym fotowoltaiczne, tych ogniw. Szczególna uwaga zwrócona była na defekty związane z domieszkowaniem oraz wynikające z tego procesu stany pułapkujące nośniki ładunku. W drugim przypadku badania dotyczyły przede wszystkim własności optycznych, w szczególności absorpcji światła z zakresu przejść pasmo-pasmo i fotoluminescencji, warstw SnS .

Na podstawie przedstawionej dokumentacji można stwierdzić, że prace dotyczące warstw CIGS są kontynuacją badań podjętych już w czasie studiów i prowadzonych do dnia dzisiejszego, gdyż praca magisterska dra inż. A. W. Urbaniaka dotyczyła pomiaru widm fotopojemności ogniw CIGS, a praca doktorska dotyczyła rozkładu defektów w warstwach CIGS. Można też zauważyć, że ta tematyka była już wcześniej prowadzona przez prof. dr hab. Małgorzatę Igalson, a dr inż. A. W. Urbaniak wyraźnie poszerzył interpretację efektów obserwowanych w widmie pojemności, wprowadzając lekkie poliamidowe podłoża, zmieniając rodzaje elektrod i stosując domieszkowanie sodem różnymi metodami. Habilitant zastosował również nowe, których wcześniej nie stosował, metody badawcze ogniw CIGS, takie jak DLCP (Drive Level Capacitance Profiling), DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) czy PICTS (Photo-Induced Current Transient Spectroscopy).

W szczególności można zauważyć, że praca H1 przedstawia widma fotoprzewodnictwa i fotopojemności warstw Cu(In,Ga)Se_2 i CuGaSe_2 naniesionych na szlane podłoże. Otrzymane wyniki wskazują na istnienie dużej koncentracji głębokich poziomów pułpkowych z energią bliską środkowi przerwy energetycznej CGS. Stany te są związane z naturalnymi defektami w chalkopirytach. Praca H2 dotyczy natomiast ogniw CIGS/CdS, gdzie podłożem jest folia poliamidowa, a warstwa CIGS była domieszkowana sodem na różnych etapach nanoszenia. Tu analizowane są widma rzeczywistej składowej zespolonej pojemności. W widmach tych autorzy dostrzegają efekt dwóch poziomów domieszkowych, jeden związany z powierzchnią i drugi związany z głębokim stanem pułpkowym. W pracy H3 przedstawione są wyniki badań ogniw CIGS na poliamidowym podłożu. Ogniw były domieszkowane sodem, przy czym domieszkowanie przeprowadzono różnymi metodami na różnych etapach nanoszenia warstw. Dzięki temu możliwa była dyskusja o korelacji między koncentracją dziur a ilością sodu w czasie naparowania i roli defektów na granicach ziaren w obniżaniu koncentracji swobodnych dziur. Ponadto, przedstawiony jest wpływ domieszkowania sodem na parametry fotowoltaiczne badanych ogniw. W kolejnej pracy, H4, dyskutowany jest wpływ tylnego kontaktu na widma pojemnościowe ogniw CIGS. Jako tylni kontakt zastosowano Mo lub Pt. Tu zauważa się, że podobny, jak w przypadku stanów pułpkujących nośniki ładunku, efekt obserwowany na widmach pojemnościowych może być wynikiem rezystancji kontaktów. Przedstawiony jest również wpływ tych

kontaktów na parametry fotowoltaiczne ogniw. W pracy H5 kontynuowana jest dyskusja o widmach pojemności ogniw CIGS z tylnym kontaktem Mo lub Pt, wyznaczane są profile C-V i dalej rozkład koncentracji ładunku przestrzennego w funkcji odległości od złącza. Dyskutowane są również bariery potencjału dla kierunku przewodzenia. Praca ta przedstawia również charakterystyki prądowo-napięciowe w obszarze fotowoltaicznym. Prezentowane są parametry fotowoltaiczne ogniw z różnymi warstwami buforowymi i różnymi kontaktami. Autorzy zauważają, że odpowiedź związana z defektem o głębokości 0,25 eV jest wynikiem deficytu sodu przy górnym kontakcie, a nie wynikiem rezystancji tylnej elektrody. Ponadto, ogniwa na podłożu platynowym, mimo obniżenia bariery i zwiększenia domieszkowania, mają niższe wartości V_{oc} i J_{sc} od tych, które są zaopatrzone w tylni kontakt Mo. Najszersza dyskusja poziomów defektowych w warstwach CIGS jest przeprowadzona w pracy H6. Analizowane są wyniki otrzymane na cienkich warstwach CIGS, na złączach Schottky'ego Al/Cu(In,Ga)Se₂ oraz na fotowoltaicznych ogniwach CIGS. W sumie w układach tych obserwuje się aż sześć „sygnałów”, przy czym tylko pięć jest związanych z defektami. Trzy z nich pochodzą z objętości warstwy (dwa poziomy pułapek elektronowych i jeden poziomy pułapek dziurowych), a dwa pochodzą z pułapek elektronowych znajdujących się przy międzypowierzchni Cu(In,Ga)Se₂/CdS.

Prace H7 i H8 dotyczą badań cienkich warstw SnS wytworzonych metodą pirolizy natryskowej i domieszkowanych indem (w przypadku H7) lub wanadem (w przypadku H8). Prezentowane wyniki dotyczą pomiarów struktury krystalicznej techniką XRD, morfologii powierzchni techniką AFM, absorpcji warstw oraz fotoluminescencji. W pracy H7 przedstawiona jest również przewodność właściwa. W obu przypadkach na podstawie badań widm absorpcji szacowana jest szerokość przerwy energetycznej badanych warstw, a na podstawie fotoluminescencji badane są przejścia związane z domieszką. Ponadto, na podstawie widm fotoluminescencji autorzy sugerują istnienie przestrzennie zlokalizowanych defektów biorących udział w bezpromienistej rekombinacji. W pracach H7 i H8 nie przedstawiono żadnych wyników pomiaru widm pojemnościowych. Tak więc wcześniej rozwinięta dla warstw CIGS technika badań defektów nie została zastosowana do warstw SnS.

W Autoreferacie dr inż. A. W. Urbaniak jasno stawia cel badań warstw CIGS pisząc: „celem prezentowanego cyklu publikacji było uporządkowanie informacji o głębokich defektach w ogniwach CIGS oraz eksperymentalna weryfikacja istniejących modeli sygnałów obserwowanych za pomocą spektroskopii pojemnościowej”. I generalnie można powiedzieć, że taki cel właśnie jest realizowany w pracach H1-H6. W pracach zakłada się różne przyczyny występowania defektów obserwowanych w widmach pojemności uzyskanych dla różnych temperatur, a na podstawie zgodności modeli z własnościami obserwowanymi doświadczalnie wnioskuje się o słuszności przyjętego modelu. Przy czym analiza jest oparta na wielu technikach pomiarowych, takich jak spektroskopia fotoprzewodnictwa i fotopojemności, spektroskopia pojemnościowa dla różnych temperatur, charakterystyka fotowoltaiczna ogniw, pomiary pojemności w funkcji napięcia stałego przy zadanej częstotliwości, charakterystyki prądowo-napięciowe dla różnych temperatur, pomiary niestacjonarnej spektroskopii głębokich stanów oraz pomiary spektroskopii prądu indukowanego oświetleniem. **Metody badań stosowane przez dra inż. A. W. Urbaniaka są odpowiednie, a wnioski, które przedstawia, mają istotne znaczenie dla rozwoju cienkowarstwowych ogniw fotowoltaicznych CIGS.**

Pewien niedosyt budzi jedynie fakt pominięcia w prezentowanych wynikach doświadczalnych oraz w przeprowadzanej dyskusji drugiej składowej admitancji, w postaci składowej urojonej zespolonej pojemności lub składowej rzeczywistej admitancji, tj. konduktancji. W pracy H4 można jedynie przeczytać, że „the phase angle between real and imaginary parts of impedance was in all the measerment above 75°”, co może sugerować, iż możliwy jest inny niż 90° kąt fazowy między składową rzeczywistą i urojoną impedancji. Bardzo mało też uwagi poświęca się w pracach cyklu oraz w Autoreferacie pojemności obszaru zubożonego przy złączu CIGS/CdS, a przecież jego obecność musi również determinować widma pojemnościowe ogniwa. W Autoreferacie można jedynie przeczytać, że „profile koncentracji ładunku przestrzennego zmierzone dla $f_{ac} < e_T$ oraz dla $f_{ac} > e_T$ są w przypadku

sygnału N1 (w pracy H2 oznaczonego jako poziom A), wyłącznie przeskalowane o stałą wartość szerokości obszaru zubożonego ΔW , a przeliczone profile koncentracji ładunku przestrzennego pokrywają się”.

Badania warstw SnS, które zostały przedstawione w pracach H7 i H8 dotyczą jedynie widm XRD, widm absorpcji, fotoluminescencji i zależności konduktywności od temperatury. Na ich podstawie analizowana jest krystaliczność warstw, krawędź absorpcji i rodzaj przerwy energetycznej oraz obecność przestrzennego rozkładu defektów biorących udział w bezpromienistej rekombinacji. Oceniany jest wpływ domieszki indowej (H7) oraz wanadowej (H8) na wymienione własności. Nie są natomiast badane własności ogniw fotowoltaicznych opartych na warstwach SnS. Ponadto, w przeciwieństwie do warstw CIGS, dr inż. A. W. Urbaniak nie formułuje wyraźnie w Autoreferacie celu podjęcia tych badań. **Jednak biorąc pod uwagę, że materiał ten wydaje się być obiecującym materiałem do zastosowań w ogniwach fotowoltaicznych oraz fakt, że badania tych warstw pod kątem fotowoltaiki nie były dotychczas szeroko prowadzone, uważam, że również te prace można uznać za istotne dla rozwoju cienkowarstwowej fotowoltaiki.**

Z obowiązku recenzenta muszę jednak zauważyć, że Autoreferat zawiera kilka sformułowań, które budzą moje zastrzeżenia. Na przykład, „łapiąc dziurę defekt taki może ją wyemitować lub złapać elektron pochodzący ze strony n- złącza”, albo zamiast o prędkości termicznej nośników ładunku w paśmie Habilitant w Autoreferacie pisze o „prędkości termicznej emitowanych nośników ładunku”. Niezrozumiałe jest również użyte w Autoreferacie pojęcie „termoemisji jonowej Richardsona”, gdyż w pracy H6 jest przywołana jedynie „klasyczna” termoemisja Richardsona. Ponadto, w Autoreferacie występują pojedyncze zdania, które budzą wątpliwość co do relacji przyczynowo-skutkowej. Takim zdaniem jest na przykład „sygnały N1 i N2 substancjonalnie różnią się pod kątem ich wpływu na koncentrację ładunku przestrzennego w absorberze” lub zdanie „sygnał N2 powoduje spadek koncentracji dziur w obszarze bliskim międzypowierzchni CdS/Cu(In,Ga)Se₂ co może być interpretowane jako ich wychwyty”.

3. Ocena dorobku naukowego

Łączna liczba publikacji Habilitanta wynosi **21**, ale tylko **16** stanowią prace opublikowane w czasopiśmie z bazy czasopism JCR. Cztery prace zostały opublikowane w materiałach konferencyjnych, a jedna w Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences. Jedenaście prac Habilitanta zostało opublikowanych w Thin Solid Films, dwie w Solar Energy Materials and Solar Cells i po jednej w Journal of Applied Physics, w Physical Review B – Condensed Matter and Materials Physics i oraz w Journal of Physics Condensed Matter. Są to znaczące czasopisma naukowe, w których prezentowane są wyniki badań naukowych i prowadzona jest dyskusja naukowa m. in. na temat cienkowarstwowych ogniw fotowoltaicznych oraz materiałów w nich stosowanych. Sumaryczny Impact Factor publikacji wynosi **38,665**, a sumaryczna liczba cytowań artykułów Habilitanta wynosiła **227** w/g Web of Science i **285** w/g Scopus na dzień 27.03.2019. Zadeklarowany, procentowy udział dra inż. A. W. Urbaniaka w pracach opublikowanych w czasopiśmie z bazy JCR wynosi od 10% do 90%, a średnio 52%. Indeks Hirscha Habilitanta wynosił **7** w/g Web of Science, a **9** w/g Scopus na dzień 27.03.2019.

W ciągu jedenastu lat swojej pracy zawodowej dr inż. A. Urbaniak był wykonawcą w czterech projektach badawczych 7. Programu Ramowego, w jednym projekcie NCN oraz kierownikiem dwóch grantów dziekańskich. Uczestniczył również w jedenastu międzynarodowych konferencjach i warsztatach naukowych, przedstawiając prezentację ustną (6 razy) lub plakatową (5 razy). Za działalność naukową trzy razy został nagrodzony nagrodą zespołową JM Rektora Politechniki Warszawskiej.

W mojej ocenie parametry bibliometryczne, udział w projektach badawczych i aktywność konferencyjna są na odpowiednim poziomie dla osób kandydujących do stopnia doktora habilitowanego.

4. Ocena dorobku dydaktycznego, popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej

Działalność dydaktyczną dr inż. A. W. Urbaniak prowadzi od roku 2008, tj. od początku zatrudnienia na Politechnice Warszawskiej. Początkowo prowadził tylko ćwiczenia i laboratoria, a obecnie ma już w swoim *portfolio* również wykłady z Fizyki 1, Elementów Fizyki Współczesnej, Joniki i Fotoniki oraz wykład z Fotowoltaiki prowadzony w języku angielskim. Habilitant był promotorem 3 prac inżynierskich i 1 magisterskiej pracy dyplomowej. W roku 2009 dr inż. A. W. Urbaniak wygłosił referat na konferencji Young Scientists Tutorial, MRS Spring Meeting, San Francisco, na zaproszenie organizatorów.

Habilitant podejmował również działalność popularyzatorską. Dwukrotnie brał udział w Festiwalu Nauki, w 2004 roku i 2008 roku. W 2019 roku brał udział w programie „tutoring” dla najzdolniejszych licealistów.

Dr inż. A. W. Urbaniak prowadzi szeroką współpracę międzynarodową. Współpracował z czterema uniwersytetami i czterema ośrodkami badawczymi z Europy Zachodniej oraz z jednym uniwersytetem w Chile. Odbił też kilka staży zagranicznych. Jak sam podaje, jeszcze przed uzyskaniem stopnia magistra inżyniera przebywał przez 11 miesięcy na stażu naukowym w Angström Solar Centre, Uppsala, Szwecja. Po doktoracie odbył 4 zagraniczne, krótkoterminowe staże naukowe, trwające od trzech dni do dwóch miesięcy. Habilitant przeprowadzał również pomiary na synchrotronie ESRF w Grenoble i na synchrotronie SOLARIS w Krakowie.

Od roku 2014 dr inż. A. W. Urbaniak wykonał 20 recenzji artykułów naukowych, wszystkie dla renomowanych czasopism z bazy JCR.

Dorobek dydaktyczny, popularyzatorski i współpraca międzynarodowa Habilitanta jest duży i oceniam go wysoko.

5. Podsumowanie

Na podstawie analizy ośmiu prac składających się na Osiągnięcie Naukowe i Autoreferatu mogę stwierdzić, że dr inż. Aleksander Wawrzyniec Urbaniak jest dobrym specjalistą w zakresie cienkowarstwowych ogniw fotowoltaicznych, w szczególności w zakresie własności elektrycznych cienkich warstw absorberowych, takich jak CIGS i SnS. Wszystkie prace Habilitanta świadczą o dobrej znajomości narzędzi stosowanych do charakteryzacji optycznych i elektrycznych własności defektów w cienkich warstwach półprzewodnikowych. Prace cyklu są dobrze napisane, zawierają szczegółową analizę otrzymanych rezultatów i stanowią istotny wkład w rozwój cienkowarstwowych ogniw fotowoltaicznych. Łączny dorobek Habilitanta, jak już wcześniej napisałam, uważam za odpowiedni do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego. Do tego dorobek dydaktyczny, popularyzatorski i współpracę międzynarodową oceniam wysoko. **W tej sytuacji, mimo pewnych uwag wcześniej przytoczonych, wnioskuję o nadanie Panu dr inż. Aleksandrowi Wawrzyńcowi Urbaniakowi stopnia doktora habilitowanego Nauk Fizycznych.**



Grażyna Jarosz