

**Recenzja osiągnięcia naukowego oraz ocena dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego dr. inż. Aleksandra Urbaniaka w związku z postępowaniem o nadanie mu stopnia doktora habilitowanego**

**1. Uwagi ogólne**

Dr inż. Aleksander Urbaniak urodził się 13 sierpnia 1981 r. W roku 2005 ukończył studia na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej, uzyskując stopień magistra inżyniera nauk w zakresie fizyki technicznej. W 2010 r. uzyskał stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Promotorem pracy doktorskiej pt. „Metastabilne rozkłady defektów w materiałach fotowoltaicznych Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>” była prof. dr hab. Małgorzata Igalson z Wydziału Fizyki PW. Od 2008 r. jest zatrudniony na Wydziale Fizyki PW, najpierw na stanowisku asystenta a od 2011 r, na stanowisku adiunkta naukowo - dydaktycznego.

**2. Ocena osiągnięcia naukowego**

Dr inż. Aleksander Urbaniak jako osiągnięcie naukowe pt. „Optyczne i elektryczne własności defektów w materiałach fotowoltaicznych Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> oraz SnS” przedstawił cykl 8 (H1 – H8) powiązanych tematycznie artykułów naukowych. 7 prac zostało opublikowane w latach 2011-2018 w międzynarodowych czasopismach recenzowanych indeksowanych w bazie JCR (Journal Citation Reports): 5 w Thin Solid Films (prace (H1, H2, H4, H7, H8), 1 w Solar Energy and Solar Cells– (praca H3), 1 w Journal of Physics Condensed Matter – (praca H6) oraz 1 w materiałach konferencyjnych 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2011 Seattle (praca H5)

Są to publikacje współautorskie, jak to zwykle bywa w przypadku badań wymagających korzystania z zaawansowanych metod otrzymywania badanych układów oraz stosowanych technik pomiarowych, dostępnych wyłącznie w wyspecjalizowanych ośrodkach badawczych.

Na wiodącą lub co najmniej bardzo ważną rolę Habilitanta w publikacjach stanowiących osiągnięcie naukowe wskazuje fakt, że w 6 z 8 artykułów jest on pierwszym autorem.

Ponadto wynika to wprost z oświadczeń Habilitanta oraz pozostałych współautorów zgłoszonych prac. Dr. inż. Aleksander Urbaniak określa swój udział procentowy udział w tych pracach od 30% i 50% (odpowiednio prace H5 i H1), do 80% (pozostałe prace - załącznik 5). Odnosząc się do swojej roli w pracach H1 i H5 swój udział Habilitant określa ją jako polegającą na wykonaniu pomiarów (lub części pomiarów), przygotowaniu wykresów (lub części wykresów) i dyskusji. Natomiast swój udział w każdej z pozostałych prac określa następująco: *wykonanie pomiarów, koncepcja pracy, przygotowanie i napisanie artykułu* (załącznik 5). Te stwierdzenie są spójne z oświadczeniami innych współautorów, którzy swój udział w pracach, w których Habilitant szacuje swój wkład na 80%, określają jako polegający głównie na przygotowaniu próbek pomiarowych (załącznik 4).

Głównym obszarem zainteresowań naukowych Habilitanta są elektryczne i optyczne właściwości materiałów fotowoltaicznych. Właściwości te są głównie determinowane przez defekty w strukturze krystalicznej tych materiałów. Rola defektów struktury w badanych przez Habilitanta materiałach fotowoltaicznych jest motywem przewodnim przedstawionego przez Niego osiągnięcia naukowego (cyklu publikacji H1-H8). W pracach H1-H6 przedstawiono wyniki badań dotyczących związku  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  (oznaczane jako CIS, CGS, CIGS) oraz ogniw słonecznych bazujących na tym związku, natomiast prace H7 i H8 dotyczą rezultatów badań nad ostatnio proponowanym materiałem do zastosowania w ogniwach fotowoltaicznych - SnS.

Prace Habilitanta mają głównie charakter doświadczalny. Prowadził również symulacje komputerowe, które konfrontował z danymi eksperymentalnymi. Do eksperymentalnego wyznaczenia właściwości badanych materiałów fotowoltaicznych wynikających z ich domieszkowania zastosował wiele różnych technik badawczych typowych dla obszaru fizyki ciała stałego, takich jak np. dyfraktometria rentgenowska (XRD), mikroskopia sił atomowych (AFM), optyczne pomiary transmisyjne, odbiciowe i fotoluminescencyjne, efekt Halla, pomiary fotoprądów. Jednak najważniejsze rezultaty Jego prac związane są z użyciem trzech specjalistycznych technik ukierunkowanych w szczególności na badanie właściwości głębokich poziomów domieszkowych: pomiarów pojemnościowych – spektroskopii admitancyjnej (AS), niestacjonarnej spektroskopii głębokich poziomów (deep-level transient spectroscopy - DLTS) oraz niestacjonarnej spektroskopii fotoprądu (photo-induced current transient spectroscopy – PICTS). Techniki te pozwalają otrzymać informacje o defektach wytwarzających głębokie poziomy energetyczne odpowiedzialne za pułapowanie nośników ładunku elektrycznego lub będące centrami rekombinacji. Użycie tych technik pomiarowych



pozwoiliło Habilitantowi m.in. na wykonanie badañ umoŹliwiaj¹cych weryfikacj¹ istniej¹cych pi¹ciu modeli opisuj¹cych natury defektów zwi¹zanych z sygna³ami (oznaczonymi A i B lub N1 i N2 – od uNknown) obserwowanymi w pomiarach wykonanych na ogniwach CIGS przy zastosowaniu spektroskopii. Modele te nie znajdowa³y dotychczas jednoznacznego potwierdzenia doœwiadczonego, co m.in. zwi¹zane jest z duŹ¹ liczb¹ moŹliwych defektów struktury (duŹ¹ liczb¹ pierwiastków w badanych uk³adach) odpowiedzialnych za wspomniane sygna³y. Wyjaœnienie natury tych sygna³ów ma duŹe znaczenie poznawcze i praktyczne w obszarze badawczym zwi¹zanym z ogniwami s³onecznymi CIGS, i temu zagadnieniu najwi¹cej uwagi poœwi¹ci³ dr. inŹ. Aleksander Urbaniak w swoich publikacjach habilitacyjnych.

Spoœród najwaŹniejszych oryginalnych wyników badañ Habilitanta odnosz¹cych si¹ do poszczególnych prac zwi¹zanych z CGIS na wyróŹnienie zas³uguj¹:

- dokonanie, w pracy H1, charakteryzacji optycznej defektów w CGS i CIGS , w tym m.in. wykazanie wyst¹powania fotoprzewodnictwa zwi¹zanego z przejœciem optycznym z pasma walencyjnego do stanów usytuowanych ok. 0.8-0.9 eV ponad tym pasmem.
- wykazanie (praca H2), w pomiarach admitancyjnych na ogniwach CIGS, wyst¹powania dwóch poziomów defektowych. Na podstawie dyskusji dotycz¹cej koncentracji wolnych noœników oraz wyników badañ fotopr¹dów stwierdzono, Źe moŹliwe jest przypisanie jednego z tych poziomów (A) stanom defektowym, pochodz¹cym z obszaru interfejsu pomi¹dzy warstw¹ buforow¹ CdS i warstw¹ absorpcyj¹ Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> w ogniwie CIGS, a drugiego stanom znajduj¹cym si¹ w obj¹toœci CIGS.
- wykazanie (praca H4) obecnoœci obydwu sygna³ów (N1 i N2) w pomiarach admitancyjnych na ogniwach CIGS niezaleŹnie od rodzaju tylnego kontaktu: omowego (Pt) czy nieomowego (Mo). Ten wynik pozwoli³ wyeliminowaæ przypisanie sygna³ów N1 i N2 wy³¹cznie istnieniu bariery na tylnej elektrodzie. Dodatkowo wykazano, Źe spe³nienie zaleŹnoœci Meyera – Neldela zwi¹zane jest z udzia³em fononów w zjawisku wychwytu noœników.
- wykazanie (praca H5), Źe Źród³em bariery potencja³u w ogniwach CIGS z warstw¹ buforow¹ CdS moŹe byæ przednia elektroda, a œciœlej stany defektowe po stronie n z³¹cza na interfejsie ZnO/CdS. Istnienie tej bariery ma wp³yw na ograniczenie pr¹du w kierunku przewodzenia w temperaturach niskich.

- wykazanie (praca H6), że w badaniach pojemnościowych można zaobserwować nie dwa lecz cztery sygnały. Badania przedstawione w tej pracy dotyczą szerokiego zakresu układów: ogniwa CIGS, same warstwy  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ , złącza Schottky'go  $\text{Al/Cu(In,Ga)Se}_2$ . Zaobserwowanie dodatkowych sygnałów związane było z zastosowaniem dodatkowych, poza spektroskopią admitancyjną, technik badawczych, a mianowicie DLTS i PICTS. Praca ta dostarczyła też najwięcej informacji dotyczących natury defektów związanych z sygnałami N1 i N2. Wykazano m.in., że żaden z wymienionych sygnałów nie jest związany z warstwą buforową CdS, gdyż sygnały te występują też w przypadku złącz Schottky'ego. Wykazano, że trzy z obserwowanych sygnałów związane są z pułapkami nośników mniejszościowych (dwa z nich tworzą sygnał N2 a jeden N1), jeden z pułapką nośników większościowych. Zaproponowano też najbardziej prawdopodobną interpretację zaobserwowanych sygnałów: sygnały N2 pochodzą od defektów podstawieniowych  $\text{In}_{\text{Cu}}$  lub  $\text{Ga}_{\text{Cu}}$ , a sygnał N1 może być związany z wymrażaniem się ruchliwości dziur w  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ . Natomiast czwarty sygnał pochodzi z głębokiego poziomu związanego z defektem objętościowym, np. luką indową czy też galową. Obsadzenie pułapek mniejszościowych określano przy zastosowaniu programu symulacyjnego SCPAS 1D. Dokonano również analizy otrzymanych wyników w kontekście istniejących modeli. Te kompleksowe badania przedstawione w pracy H6 uważam za najważniejsze osiągnięcie zaprezentowane w pracy Habilitanta.
- w pracy H3 zbadano wpływ domieszkowania sodem na koncentrację dziur w ogniwach CIGS. Zastosowano różne metody domieszkowania: źródłem sodu była warstwa Mo:Na pełniąca rolę tylnej elektrody w ogniwie, lub związek NaF, z którego naporowywano absorber w różnych stadiach jego otrzymywania, w tym po wytworzeniu absorbera. W rezultacie otrzymano wzrost koncentracji dziur niezależnie od metody domieszkowania. Przedyskutowano możliwe mechanizmy tego wzrostu. Stwierdzono, że najbardziej prawdopodobny mechanizm związany jest z wpływem sodu na defekty na granicach ziaren, powodujący obniżenie barier potencjału. Zaproponowany model został wsparty obliczeniami komputerowymi przy zastosowaniu programu SCAPS 1D. Wydaje się jednak, że nie można eliminować możliwości znajdowania się sodu we wnętrzu ziaren,
- ważnym osiągnięciem pracy H7 jest określenie parametrów strukturalnych cienkich warstw, otrzymanych metodą pirolizy natryskowej, stosunkowo mało zbadanego materiału fotowoltaicznego SnS domieszkowanego indem. Określono strukturę krystaliczną SnS, wykazano występowanie skośnej przerwy energetycznej oraz prostej o



wartościach odpowiednio ok. 1,05 eV i powyżej 1,5 eV, niezależnych od stopnia domieszkowania. Negatywnym rezultatem przeprowadzonych badań, w kontekście możliwości zastosowania tego materiału w ogniwach słonecznych, jest to, że domieszkowanie indem nie spowodowało zwiększenia koncentracji dziur,

- w pracy H8 przeprowadzone badania podobne do tych w pracy H7 – tutaj domieszką był wanad – wykazały występowanie w tym materiale dodatkowych przejść optycznych. Wykazano, że domieszkowanie wanadem zwiększa absorpcję a dodatkowe poziomy energetyczne nakładają się z pasmem przewodnictwa, a więc nie powodują wzrostu fotoprądu.

Podsumowując ocenę osiągnięcia naukowego chciałbym podkreślić:

- a) spójność tematyczną – ściśle określony przedmiot badań, kompleksowość, komplementarność i staranność przeprowadzonych badań,
- b) dobór (zaawansowanych) metod badawczych i staranność wykonania eksperymentów,
- c) uzupełnienie eksperymentu o symulacje numeryczne,
- d) wszechstronną analizę wyników przeprowadzonych eksperymentów w zestawieniu z wynikami i interpretacjami innych autorów.

Z przekonaniem stwierdzam więc, że przedstawione wyniki systematycznych badań prowadzonych przez dr. inż. Aleksandra Urbaniaka poszerzają znacznie naszą wiedzę o właściwościach fizycznych materiałów fotowoltaicznych, głównie  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  i bazujących na nich cienkowarstwowych ogniw słonecznych i wnoszą istotny wkład w rozwój fizyki ciała stałego. Nie ulega wątpliwości, że przedstawione osiągnięcie naukowe stanowi znaczący i oryginalny dorobek naukowy Habilitanta.

### **3. Dorobek naukowy, dydaktyczny i organizacyjny**

Dr inż. Aleksander Urbaniak ma znaczący dorobek naukowy, organizacyjny i dydaktyczny. W trakcie swojej pracy na Wydziale Fizyki PW wykazywał dużą aktywność naukową. Jest współautorem 21 publikacji naukowych, w tym 17 artykułów naukowych w recenzowanych czasopismach naukowych z bazy JCR oraz 4 w materiałach w materiałach konferencyjnych (załącznik 5). Osiem spośród tych artykułów ukazało się przed doktoratem, a 13 po doktoracie, co dokumentuje znaczną aktywność naukową Habilitanta po uzyskaniu stopnia doktora. Artykuły te były cytowane 227 razy według bazy Web of Science (odpowiednio 285

wg bazy Scopus). Indeks Hirscha dorobku publikacyjnego Habilitanta według tych baz wynosi odpowiednio  $h=7$  i 9. Są to parametry przyzwoite, jak na wczesny etap rozwoju kariery naukowej. Liczbowo dorobek naukowy dr inż. Aleksandra Urbaniaka nie jest imponujący, ale opublikowane przez Niego prace badawcze, w szczególności te, które zostały przedstawione jako osiągnięcie naukowe mają dużą wartość naukową.

Habilitant ma na koncie 12 prezentacji konferencyjnych. Z załączonych materiałów wynika, że wygłosił 7 wykładów (w tym 1 na zaproszenie organizatora) na dużych konferencjach naukowych, m.in. na konferencjach z serii MRS Spring Meeting.

Dr inż. Aleksander Urbaniak był i jest aktywny w przygotowywaniu i realizacji projektów badań naukowych zarówno w Polsce jak i na forum międzynarodowym. Świadczy o tym lista czterech projektów międzynarodowych w ramach FP7 (VII Europejski Program Ramowy), których był wykonawcą. Był też wykonawcą jednego grantu krajowego finansowanego przez NCN (polsko – niemiecki projekt badawczy Beethoven) oraz kierownikiem dwóch grantów dziekańskich (załącznik 7).

Pomimo młodego wieku Habilitant jest już rozpoznawalny i ceniony w środowisku krajowym i międzynarodowym zajmującym się ogniwami fotowoltaicznymi. Współpracuje z wieloma naukowymi ośrodkami zagranicznymi: Angström Solar Centre (Uppsala, Szwecja), ZSW - Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff - Forschung Baden – Württemberg (Stuttgart, Niemcy), EMPA - Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (Dübendorf, Szwajcaria), HZB – Helmholtz-Zentrum Berlin (Berlin, Niemcy) Positron Annihilation Laboratory (Aalto University, Espoo, Finlandia), Laboratory of Photovoltaics (University of Luxembourg, Luxemburg), UPV - Universitat Politècnica de València (Walencja, Hiszpania), University of Nantes, Institut des Matériaux (Nantes, Francja) Laboratory of electrochemistry (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile). W niektórych z tych ośrodków odbył staże badawcze (11-to miesięczny w Uppsali i 1-no miesięczny w Esspo) lub krótkoterminowe pobyty (załącznik 7).

O solidnej pozycji naukowej dr. inż. Aleksandra Urbaniaka świadczy również fakt, że ma na swoim koncie recenzje artykułów, m.in. w takich czasopismach naukowych jak: Thin Solid Films, Solar Energy Materials and Solar Cells, Solar Energy, Applied Physics A, Acta Materialia, Photonics Review, Journal of Renewable and Sustainable Energy (załącznik 7).



Za swoją działalność naukową dr inż. Aleksander Urbaniak został nagrodzony trzema Nagrodami zespołowymi JM Rektora PW. Otrzymał również nagrodę za najlepszy plakat na konferencji EMRS Spring Meeting 2012 (Strasbourg, Francja).

Na osiągnięcia o charakterze dydaktycznym dr. inż. A. Urbaniaka składają się m.in.: prowadzenie trzech wykładów specjalistycznych na trzech wydziałach Politechniki Warszawskiej, w tym w języku angielskim na Wydziale Fizyki, ćwiczeń rachunkowych oraz laboratoryjnych na różnych wydziałach PW oraz opieka nad popularyzatorskimi inicjatywami studentów.

Do działalności organizacyjnej Habilitanta można zaliczyć opiekę oraz organizację wybranych specjalistycznych zajęć laboratoryjnych na Wydziale Fizyki PW.

### **Podsumowanie**

Nie mam wątpliwości, że zarówno udokumentowane osiągnięcia naukowe jak i aktywność naukowa, dydaktyczna i organizacyjna dr. inż. Aleksandra Urbaniaka dowodzą, że jest w pełni ukształtowanym, dojrzałym, twórczym i samodzielny pracownikiem naukowym. Przedstawione do recenzji osiągnięcie naukowe zaprezentowane w cyklu ośmiu współautorskich publikacji powiązanych tematycznie pt. „Optyczne i elektryczne własności defektów w materiałach fotowoltaicznych  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  oraz  $\text{SnS}$ ” jest dobrze udokumentowane, opublikowane w uznanych czasopismach międzynarodowych. Habilitant ma już ugruntowaną pozycję w międzynarodowym środowisku naukowym.

**Biorąc pod uwagę przedstawione osiągnięcie naukowe oraz dotychczasowy dorobek Habilitanta uważam, że spełnione są z nadwyżką ustawowe warunki wymagane do uzyskania stopnia naukowego doktora habilitowanego. Dlatego z całym przekonaniem wnoszę o dopuszczenie dr. inż. Aleksandra Urbaniaka do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.**

