

dr hab. Tomasz Błachowicz, Prof. PŚ
Instytut Fizyki – Centrum Naukowo-Dydaktyczne
Politechnika Śląska
ul. S. Konarskiego 22B
44-100 Gliwice

Recenzja w postępowaniu habilitacyjnym dr inż. Aleksandra Urbaniaka

Recenzję napisano na podstawie umowy zawartej pomiędzy wykonawcą a Politechniką Warszawską oraz Wydziałem Fizyki, reprezentowanym przez Dziekana, Prof. dr hab. Mirosława Karpierza.

1. Informacje podstawowe o habilitancie

Dr inż. Aleksander Urbaniak jest absolwentem kierunku fizyka na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej, gdzie uzyskał tytuł mgr inż. w roku 2005, a następnie stopień doktora nauk fizycznych w roku 2010 na podstawie przedstawionej rozprawy doktorskiej p.t. „Metastabilne rozkłady defektów w materiałach fotowoltaicznych Cu(In,Ga)Se₂” na tym samym wydziale. Dalsze prace badawcze, po otrzymaniu stopnia doktora, były kontynuacją badań prowadzonych w trakcie realizacji doktoratu. Wpłynęło to korzystnie na jednorodny rozwój naukowy kandydata, szczególnie w zakresie stosowanych metod eksperymentalnych, testowanych materiałów fotowoltaicznych oraz dogłębnej interpretacji otrzymanych wyników. Przedmiotem recenzowanego wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego jest spójny tematycznie zestaw ośmiu publikacji.

Habilitant pracuje nieprzerwanie w tej samej grupie badawczej, związanej z Wydziałem Fizyki Politechniki Warszawskiej od roku 2008, przechodząc przez kolejne etapy zatrudnienia na stanowisku asystenta, starszego referenta w programie

FP7 oraz na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego od początku roku 2011. Posiada bardzo dobre doświadczenie dydaktyczne – prowadzi ćwiczenia i laboratoria. Bierze aktywny udział w działaniach upowszechniających naukę.

2. Informacja o przyjętym sposobie oceny

Miarodajna ocena dostarczonej do recenzji dokumentacji nie jest trudna. Jest ona przygotowana w sposób ogólnie poprawny. Wybrany do oceny dorobku cykl 8-miu publikacji jest spójny tematycznie - publikacje oznaczone są symbolami od H1 do H8. Aktywność badawcza kandydata skupia się na analizie odtworzenia realnej struktury energetycznej wielowarstwowych struktur fotowoltaicznych w układzie CIGS (prace H1-H6), a także prezentuje dwie prace (H7-H8), w których badana jest modna ostatnio warstwa SnS, która może w przyszłości znaleźć zastosowanie w komercyjnych ogniwach fotowoltaicznych, pod warunkiem osiągnięcia zadowalającej sprawności na poziomie 20 %.

W pracach od H1 do H8, bez H1 i H5, habilitant jest ich pierwszym autorem. Wskazuje to na dużą samodzielność w prowadzeniu badań, która rozwinęła się w ciągu 8 lat od daty uzyskania doktoratu.

Przedstawiony do oceny jednotematyczny cykl prac powstał po uzyskaniu stopnia doktora, to jest w latach 2011-2018. Sumaryczny impact factor 8-ciu publikacji wynosi 17.382. Podany w autoreferacie indeks Hirscha habilitanta wynosi 7. Po sprawdzeniu bazy Web of Science (wynik z tzw. All Databases) indeks ten wynosi jednak 6. Podana przez habilitanta łączna ilość cytowań wynosi: 227 a bez autocytowań 213 (dane z 27.03.2019). Wyniki na dzień 29.01.2020, w dostępnej dla piszącego tę recenzję bazie, są jednak znacząco mniejsze, odpowiednio: 215 i 193. Poza tym serwis Web of Science podaje 16 indeksowanych publikacji z zasobów All Databases na dzień pisania recenzji. Habilitant podaje w autoreferacie łączną liczbę 21 publikacji, z czego 13 po uzyskaniu stopnia doktora, nie wskazując, czy publikacje te są indeksowane przez Web of Science. Wyrażna rozbieżność w podawanym przez habilitanta dorobku może budzić pewne zdziwienie, której pochodzenie jest trudne do wyjaśnienia. Autor autoreferatu zawarł poza tym uwagę, że w bazie Web of Science nie uwzględniono znaczącej liczby jego cytowań. Tego rodzaju wyjaśnienie

uważam za niezasadne. Baza ta bowiem dysponuje bardzo sprawnym systemem reklamacyjnym, który pozwala na wprowadzenie szybkich poprawek do zgłaszanych błędów i nieścisłości. Ponieważ jednak wskaźniki bibliometryczne, w opinii recenzenta, nie powinny być głównym wyznacznikiem ocenianego dorobku – są to wskaźniki pozornie ilościowe, obarczone logiką rozmytą, oraz są bardzo zależne są od uprawianej szczegółowej dyscypliny naukowej - przedstawiony dorobek uważam za zadowalający i wystarczający to tego, aby podlegał ewaluacji w ramach przedstawionego wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego w dziedzinie nauk fizycznych, w dyscyplinie fizyka.

Pewną niedoskonałość w dorobku habilitanta stanowi brak wykazanych zgłoszeń patentowych lub uzyskanych patentów, co dla pracownika politechniki powinno być pewnym wyzwaniem.

Kandydat odbył kilka staży naukowych w dobrych ośrodkach zagranicznych o ustalonej renomie, co przyczyniło się do ustanowienia trwałej współpracy naukowej. Ponadto, habilitant uczestniczył w realizacji siedmiu projektów o charakterze lokalnym i europejskim (FP7). Dr inż. Aleksander Urbaniak jest osobą rozpoznawalną w środowisku zagranicznych naukowców, co uwidacznia się w zlecaniu mu recenzji licznych artykułów w znanych czasopismach o zasięgu światowym.

Zanim jednak przejdę do oceny przedstawionego cyklu publikacji chciałem przedstawić kilka ogólnych uwag edytorskich, również częściowo związanych z powyższymi uwagami o rozbieżności w podanych w autoreferacie wartościach wskaźników bibliometrycznych. Autoreferat zawiera mnóstwo błędów gramatycznych i stylistycznych, które wprowadzają szereg niejasności podczas lektury kolejnych stron. Innymi słowy, autoreferat jest przygotowany niedbale. Przykładowo, na stronie 5-tej, autor odnosi się do pojęcia pasma, definiując płytkie poziomy energetyczne, nie pisząc jasno, czy ma na myśli pasmo przewodnictwa, czy pasmo walencyjne. Dalej, na stronie 6-tej, autor pisze, że schemat z rys. 1 jest uproszczony i nie uwzględnia dwóch cech. W kolejnych zdaniach nie jest jasne o jakie dwie cechy chodzi. Można się jedynie domyślać, że chodzi o niejednorodność przerwy energetycznej, z jednej strony, oraz o powstawanie warstwy przejściowej MoSe₂ na molibdenowej warstwie

podłoża, z drugiej strony. Kwestię odmiany przez przypadki nie będę dalej komentował.

3. Ocena jednotematycznego cyklu publikacji będącego podstawą osiągnięcia naukowego, podlegającego ocenie – publikacje oznaczone jako H1 – H8.

Kandydat uzyskał doktorat z fizyki w roku 2010. Data ta stanowi istotne odniesienie dla chronologii pojawiania się publikacji w kolejnych latach.

Publikacja H1, p.t. „Sub-bandgap photoconductivity and photocapacitance in CIGS thin films and devices”, wieloautorska, gdzie kandydat jest jej współautorem, wydana w *Thin Solid Films* (519, pp. 7489-7492) ukazała się w roku 2011. Autorzy nawiązują do otrzymanych wcześniej, przez innych badaczy, rezultatów czysto teoretycznych, wskazujących na istnienie głębokich poziomów energetycznych, związanych z defektami, leżących około 1 eV powyżej pasma walencyjnego w polikrystalicznych materiałach typu CIGS oraz CGS. Autorzy dokonali pomyślniej, eksperymentalnej weryfikacji przewidywań poprzez pomiary fotopojemności i fotoprzewodnictwa w strukturach wykonanych dzięki współpracy międzynarodowej. Autorzy słusznie wykazali, że otrzymane wyniki i ich interpretacja nie pozwala na dokładne określenie położenia poziomów energetycznych leżących w obszarze przerwy energetycznej rozważanych materiałów. Tak więc, istotną nowością pracy jest eksperymentalna weryfikacja przewidywań teoretycznych i ich krytyczna ocena.

Publikacja H2, gdzie kandydat jest jej pierwszym autorem, wieloautorska, powstała we współpracy międzynarodowej, p.t. „Defect spectroscopy of Cu(In,Ga)Se₂-based thin film solar cells on polyimide substrate”, wydana w *Thin Solid Films* (535, pp. 314-317), ukazała się w roku 2013. Z góry należy stwierdzić, że jest to praca wyróżniająca się pośród innych osiągnięć habilitanta. Autor, wraz ze współpracownikami, dokonał po raz pierwszy najbardziej dojrzałej i racjonalnej interpretacji fizycznej pochodzenia sygnałów otrzymanych w spektroskopii admitancyjnej, w strukturach fotowoltaicznych, warstwowych na bazie materiałów CIGS. W pracy wskazano, w sposób jednoznaczny, dwojakie pochodzenie mierzonych sygnałów; z międzypowierzchni CIGS/CdS oraz z defektów objętościowych struktury. Tak więc po raz pierwszy powiązано mierzone sygnały

z konkretnymi poziomami energetycznymi, a co ważne, z ich przestrzennym ułożeniem w strukturze warstwowej ogniwa fotowoltaicznego.

Publikacja H3, p.t. „Effects of Na incorporation on electrical properties of Cu(In,Ga)Se₂-based photovoltaic devices on polyimide substrates” została opublikowana w roku 2014, w czasopiśmie wydawnictwa Elsevier, Solar Energy Materials & Solar Cells 128, pp. 52-56. Praca nawiązuje do poprzednio badanych materiałów CIGS, posiada wyraźny aspekt aplikacyjny i technologiczny, nie rezygnuje jednak z głębokiej analizy i podstawowego rozumienia zjawisk związanych ze znaczeniem jonu sodowego, ułożonego w obszarze podłoża poliamidowego, dla wydajności pracy komórki fotowoltaicznej. W pracy testowano różne scenariusze modyfikacji składu materiałowego warstw, pod kątem zawartości sodu. Habilitant, będący wiodącym autorem publikacji, stawia tezę, popartą przeglądem danych literaturowych i własnymi wynikami prac eksperymentalnych zawartymi w artykule, o wpływie technologii wytwarzania ogniw na elektryczne właściwości granic ziaren materiałowych, a w konsekwencji, na wynikającą z tego koncentrację nośników dziurowych w fotoogniwie. Wyniki pracy należy uznać za oryginalne, wnoszące znaczący wkład do rozwoju wiedzy na temat kontrolowanego technologicznie wzrostu wydajności fotowoltaicznej ogniw typu CIGS.

Publikacja H4, opublikowana w tym samym roku co publikacja H3, w Thin Solid Films 574, pp. 120-124, p.t. „Capacitance spectroscopy of Cu(In,Ga)Se₂-based solar cells with a Pt back electrode” jest niejako uzupełnieniem publikacji H3, która analizowała wpływ jonu sodowego na wydajność fotoogniwa, w obszarach związanych z podłożem, w warstwowej strukturze ogniwa fotowoltaicznego CIGS. W obecnej pracy o charakterze metrologicznym, przeprowadzono analizę porównawczą dotyczącą rodzaju informacji otrzymanej w spektroskopii pojemnościowej, jeśli jako tylną elektrodę fotoogniwa stosować; albo warstwę molibdenową, albo platynową. Autorzy koncentrując się na metodologii pomiaru admitancyjnego i podają w konkluzji zalecenia dla właściwej interpretacji danych eksperymentalnych. W pracy zaobserwowano dwa, dominujące sygnały o charakterze schodkowym, znane w doniesieniach naukowych jako N₁ oraz N₂. Po dokonaniu szerokiego przeglądu literaturowego, zawierającego niekiedy wykluczające się interpretacje otrzymanych wyników, autorzy pracy dokonują właściwej klasyfikacji

pochodzenia mierzonych zmian sygnałów, jako związanych z procesami wielofononowymi, które można zaobserwować m. in. w spektroskopii ramanowskiej. Nie tylko zresztą w tej pracy, właściwa interpretacja, wiążąca otrzymane spektroskopowo sygnały N_1 i N_2 z jednoznacznym umiejscowieniem ich pochodzenia w strukturze fotowoltaicznej – głównie pochodzenia defektowego - jest znaczącym i oryginalnym osiągnięciem habilitanta.

Publikacja H5, jakkolwiek nawiązująca do przednim badań, analizuje strukturę warstwową ogniwa fotowoltaicznego z punktu widzenia zjawisk transportu z założonym rozkładem barier potencjału. Habilitant w tejże pracy nie jest jej głównym autorem. Z punktu widzenia chronologii powstawania artykułów, opisanych w autoreferacie, publikacja H5 ukazała się w materiałach konferencyjnych organizacji IEEE, jako pokłosie 37 Konferencji Specjalistów Fotowoltaicznych, która odbyła się w Seattle (WA), w Stanach Zjednoczonych w połowie roku 2011, a więc przed pracami H2, H3 i H4. Tytuł pracy „Barriers for current transport in CIGS structures” dobrze oddaje jej zawartość. Co należy podkreślić, praca ma charakter eksperymentalny a nie teoretyczny, aczkolwiek autorzy uzyskali również wyniki symulacyjne opublikowane w innych, swoich artykułach, na podstawie rezultatów otrzymanych najpóźniej w roku 2010, czyli jeszcze w okresie, kiedy był finalizowany doktorat habilitanta. W pracy pojawia się wstępna, jeszcze niepełna analiza pochodzenia sygnału N_1 . Jako ważny wyniki prac badawczych należy uznać dostarczenie hipotezy aplikacyjnej o wyższości podłoża molibdenowego nad platynowym, ze względu na redukcję rekombinacji międzywarstwowej dla materiału podłożowego ogniwa.

Publikacja H6 z roku 2016 p.t. „Defect levels in Cu(In, Ga)Se₂ studied using capacitance and photocurrent techniques” ukazała się J. Phys.: Condensed Matter 28, 215801 (9pp). Habilitant jest jej pierwszym autorem. Artykuł stanowi pewnego rodzaju podsumowanie kilkuletnich wysiłków badawczych zespołu kandydata – niejednokrotnie we współpracy z ośrodkami zagranicznymi – nad dostarczeniem pełnej interpretacji struktury energetycznej ogniwa fotowoltaicznych typu CIGS lub podobnych, z uwzględnieniem stanów wprowadzanych przez defekty. Praca przedstawia również krytyczną analizę stosowania admitancyjnych spektroskopii poziomów głębokich w badaniu wielowarstwowych struktur CIGS. Czyni to,

porównując wyniki badań otrzymanych metodami spektroskopii głębokich poziomów pochodzenia defektowego (DLTS), zmodyfikowanej spektroskopii DLTS z użyciem zaporowo spolaryzowanego impulsu napięciowego (reverse-bias DLTS, RDLTS), oraz indukowanej impulsem świetlnym prądowej spektroskopii stanów energetycznych (PICTS). Pomiary prowadzono w szerokim zakresie temperatur od 150 K do 260 K. Zastosowanie tak szerokiego podejścia do eksperymentu zaowocowało wprowadzeniem klasyfikacji zawierającej sześć rodzajów sygnałów. Pewne z nich posiadały cechy związane z historycznymi już sygnałami, oznaczanymi jako N_1 i N_2 . Wydaje się, że autor dostarczył w końcu wyważoną interpretację powstawania tych sygnałów, jako takich, których pochodzenie jest dosyć złożone, zależne od historii laboratoryjnej próbki, czyli sposobu jej przechowywania i testowania. Bardzo zasadnym wydaje się, że nazwanie tychże sygnałów „ N_1 -related” i „ N_2 -related” (N-podobne sygnały; w dowolnym tłumaczeniu na język polski). Osiągnięty wynik pracy, powinien w końcu być traktowany przez społeczność naukową, jako w miarę zakończone zagadnienie i nie będzie w przyszłości traktowany przez różne zespoły badawcze jako pretekst do produkcji niekończących się sesji pomiarowych i konferencyjnych.

Rok 2017 to formalny początek nowego okresu badawczego habilitanta zawarty w pracy H7 p.t. „Opto-electrical characterisation of In-doped SnS thin films for photovoltaic applications” opublikowanej w Thin Solid Films 636, pp. 158-163. Praca ta stanowi więc kolejny krok naprzód w rozwoju naukowym kandydata, zwłaszcza wobec wyraźnego, przeglądowego charakteru poprzedniej pracy H6, dotyczącej struktur CIGS. Obecny artykuł dotyczy związku SnS, posiadającego wiele zalet: nietoksyczność w porównaniu z kadmem, duża dostępność w cyny w porównaniu do galu czy telluru oraz niższe koszty wytwarzania. Badania nad zastosowaniem związku SnS w fotowoltaice trwają już od kilkudziesięciu lat. Przewidywana teoretycznie wskazują na możliwość uzyskania wydajności ogniwa na poziomie 20%, czyli porównywalnie do otrzymanych w praktyce wydajności ogniwa CIGS. Dotychczasowe prace eksperymentalne ze związkiem SnS, w zależności od zastosowanych warstw buforowych i podłoża, dają wydajność na poziomie 4.5%. Autorzy pracy przeprowadzili szereg pomiarów, głównie z wykorzystaniem fotoluminescencji oraz charakteryzacji strukturalno-materiałowej (XRD, AFM) cienkiej warstwy SnS, również domieszkowanej indem. Jakkolwiek wyniki pracy nie

mają przełomowego charakteru, to jednak dostarczają wstępnych wyników do dalszych badań wpisujących się w wytwarzanie ogniw słonecznych, np. w postaci struktury CZTS.

Praca H8, opublikowana w roku 2018, jest kontynuacją nowo podjętego wątku na badaniem nowych materiałów fotowoltaicznych związanych ze związkami SnS. Habilitant nie jest jej pierwszym autorem. Artykuł ukazał się w *Thin Solid Films* 664, pp. 60-65. W trakcie badań zastosowano tę samą technologię rozpylania pyrolitycznego, co w pracy H7, tym razem jednak warstwy domieszkowano wanadem. Charakter obecnej pracy wskazuje na pewien postęp w rozumieniu zjawisk zachodzących podczas optycznego wzbudzenia materiału. Autorzy, po przeprowadzeniu wnikliwej analizy danych literaturowych, głównie otrzymanych z symulacji numerycznych, zaproponowali oryginalny schemat struktury energetycznej badanego związku, również takiej, w której wprowadza się stany defektowe w obszarze przerwy energetycznej półprzewodnika. Tego rodzaju analiza jest niewątpliwie nowatorska i jest związane ze swego rodzaju specjalizacją i doświadczeniem grupy badawczej habilitanta w zakresie głębokiego zrozumienia realnej struktury energetycznej wielowarstwowych struktur fotowoltaicznych. Praca na dzień pisania obecnej recenzji ma jedno cytowanie. Praca H7 ma ich już sześć. Temat związany z SnS jest zatem wart kontynuowania.

4. Podsumowanie oryginalnych, najważniejszych osiągnięć naukowych

Do głównych osiągnięć habilitanta należy zaliczyć, poczynając od najważniejszych, następujące wyniki prac naukowych:

- I. Właściwe i głębokie zrozumienie fizycznej lokalizacji defektów w strukturach fotowoltaicznych CIGS i związane z tym przyporządkowanie sygnałów spektroskopowych, otrzymanych z wykorzystaniem metod admitancyjnych w ogniwach fotowoltaicznych.
- II. Wykazanie, że interpretacja tzw. sygnałów N_1 i N_2 nie jest wcale uniwersalna. Przykładowo, w pracy H6 pokazano, że sygnał N_1 nie pochodzi z warstwy CdS, ale z odpowiednio przygotowanego złącza Schottkiego.

- III. Praca H6 jest ponadto, w ocenie recenzenta, zbiorem i podsumowaniem najważniejszych osiągnięć habilitanta, w której zidentyfikowano nie tylko sygnały podobne do N_1 i N_2 , ale dokonano selektywnego rozróżnienia sygnałów pochodzących z poszczególnych obszarów międzypowierzchniowych i objętościowych struktur CIGS.
- IV. W pracy H4 potwierdzono doświadczalnie istnienie bariery potencjału pomiędzy warstwą podłoża molibdenowego z resztą materiału w formie kontaktu nieomowego. Wątek ten przewija się zresztą również w pracy H5.
- V. Wyniki symulacji numerycznych barier potencjału powstających na granicy ziaren materiału w strukturach CIGS, zawarte w pracy H3, jest wkładem oryginalnym do rozwoju nauki.

5. Osiągnięcia w zakresie działań dydaktycznych i organizacyjnych

Habilitant posiada bardzo bogate doświadczenie w prowadzeniu zajęć dydaktycznych. Jego aktywność, w tym zakresie, obejmowała prowadzenie ćwiczeń tablicowych, laboratoriów i wykładów. Zajęcia te były prowadzone dla studentów innych wydziałów Politechniki Warszawskiej w zakresie fizyki ogólnej oraz dla studentów kierunku fizyka. Co ważne, zajęcia dla fizyków oraz ogólnie zajęcia wykładowe dotyczyły tematyki zaawansowanej, takiej jak fizyka współczesna, fotonika, czy fotowoltaika. Wszystko to wskazuje na dużą samodzielność kandydata w tym zakresie i predysponuje go do podejmowania coraz bardziej odpowiedzialnych wyzwań dydaktycznych. Ponadto, co jest szczególnie ważne, to zdolność pełnienia przez habilitanta funkcji promotora pracy magisterskiej i trzech prac inżynierskich. Kandydat sprawował ponadto bezpośrednią opiekę na laboratoriach specjalistycznych w zakresie fotoniki i fizyki ciała stałego.

W stopniu wystarczającym habilitant uczestniczył też w działaniach upowszechniających naukę (DUN). Polegało to na udziale w organizowanych festiwalach nauki oraz na włączeniu się w program mentorski dla zdolnych uczniów szkół średnich.

6. Ocena końcowa

Biorąc pod uwagę wszystkie wymienione powyżej fakty, stwierdzam, że dorobek naukowy i inne formy aktywności zawodowej dr inż. Aleksandra Urbaniaka spełniają wymagania stawiane w Ustawie (Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 3 czerwca 2016 – Dz. U. 2016, poz. 882, Rozporządzenie MNiSW z dnia 26 września 2016 roku – Dz. U. z dnia 30 września 2016 roku, poz. 1586).

Przedstawiony we wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego dorobek dr inż. Aleksandra Urbaniaka o nadanie stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk fizycznych, dyscyplinie fizyka, oceniam pozytywnie i wnoszę o dopuszczenie go do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

Tomasz Ptachowicz