

Warszawa, dnia 31. października 2019 r.

Prof. dr hab. Grzegorz Karczewski
Instytut Fizyki PAN
w Warszawie

Recenzja osiągnięcia naukowego pt.:
„Struktury złączowe wykorzystujące cienkie warstwy tlenku cynku otrzymane techniką Osadzania Warstw Atomowych (ALD)”
oraz ocena istotnej aktywności naukowej
dr. Tomasza Aleksandra Krajewskiego,
ubiegającego się o nadanie stopnia doktora habilitowanego

Niżej przedstawiona recenzja osiągnięcia naukowego oraz ocena aktywności naukowej dr. Tomasza Aleksandra Krajewskiego wykonane zostały w oparciu od następujące dokumenty wymagane przez Ustawę z dnia 14. marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz.U. z 2016r. poz.882ze zmianami w Dz.U. z 2016r. poz. 1311) oraz Rozporządzenie ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1. września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego (Dz.U. Nr 196, poz. 1165):

- autoreferat, którego zasadniczą częścią jest opis osiągnięcie naukowego pt.: ”Struktury złączowe wykorzystujące cienkie warstwy tlenku cynku otrzymane techniką Osadzania Warstw Atomowych (ALD)”,
- cykl siedmiu publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe będące podstawą wystąpienia o nadanie stopnia naukowego,
- oświadczeń współautorów tych publikacji,
- życiorys naukowy dr Krajewskiego
- wykaz opublikowanych prac naukowych
- opis osiągnięć dydaktycznych, organizacyjnych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki,
- dokument potwierdzający uzyskanie stopnia doktora nauk fizycznych.

Stwierdzam, że dokumentacja jest kompletna, prawidłowo i starannie przygotowana. Zgodnie z kryteriami określonymi w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego moja recenzja będzie złożona z dwóch części: oceny jego aktywności naukowej i innych osiągnięć zawodowych oraz recenzji osiągnięcia naukowego habilitanta.

1. Oceny aktywności naukowej i innych osiągnięć zawodowych dra Tomasza Aleksandra Krajewskiego

Dr Tomasz Krajewski związany jest z Instytutem Fizyki PAN od 01.10 2007 r., najpierw jako student Studium Doktoranckiego, potem od 01.10.2011 r. jako pracownik zatrudniony początkowo na stanowisku fizyka a od 01. 12. 2015 r. na stanowisku adiunkta. Stopnie naukowe magistra oraz doktora dr Krajewski uzyskał w IF PAN w 2007 i 2012 roku. Dotychczasowa praca naukowa dr. Krajewskiego skoncentrowana była niemal wyłącznie na badaniach własności transportowych warstw i struktur tlenku cynku wytwarzanych metodą ALD, o czym świadczą tematy rozprawy magisterskiej, doktorskiej i habilitacyjnej, odpowiednio: „Badania elektryczne warstw tlenku cynku otrzymywanych w niskotemperaturowym procesie ALD”, „Właściwości elektryczne cienkich warstw tlenku cynku otrzymywanych w procesie osadzania warstw atomowych (ALD)” i „Struktury złączowe wykorzystujące cienkie warstwy tlenku cynku otrzymane techniką Osadzania Warstw Atomowych (ALD)”. Dr Krajewski jest zatem bardzo doświadczonym specjalistą w tej wąskiej dziedzinie.

Na dorobek naukowy dr. Krajewskiego, według bazy WoS, składa się z ok. 50 publikacji cytowanych łącznie ponad 850 razy (ok. 730 razy bez autocytowań). Po uzyskaniu stopnia doktora w pod koniec 2012 r., dr Krajewski opublikował ok. 20 publikacji, przed doktoratem było ich aż 30. Dr Krajewski jest autorem bądź współautorem bardzo wielu (ponad 100) prezentacji konferencyjnych prezentowanych zarówno w formie plakatów, jak i referatów ustnych. Cztery z prezentacji konferencyjnych, z tego trzy po uzyskaniu stopnia doktora, były referatami zaproszonymi. Indeks Hirsha dr. Krajewskiego równy jest 17. Przytoczone powyżej dane statystyczne świadczą o dużej aktywności publikacyjnej Habilitanta, choć pewien niepokój budzi wyraźnie mniejsza aktywność publikacyjna po uzyskaniu doktoratu niż przed nim.

Prace naukowe Habilitanta nie włączone do cyklu habilitacyjnego skupiają się również na badaniach, głównie metodami transportowymi, warstw i struktur na bazie ZnO. W szczególności, część tych prac dotyczy pomiarów własności prostujących heterozłącz ZnO:As/GaN oraz ZnO/p-4H-SiC. Inna grupa prac dotyczy konstrukcji komórek fotowoltaicznych w oparciu o złącze ZnMgO/p-Si.

Bardzo pozytywną stroną aktywności zawodowej dr. Krajewskiego jest współautorstwo trzech zgłoszeń patentowych i patentów. Wszystkie dotyczą technologii struktur na bazie ZnO.

Należy wspomnieć również, że dr Krajewski był wykonawcą w pięciu projektach badawczych, a w szóstym, projektem SONATA, kierował w latach 2014-2017. Niestety, ta niezwykle ważna aktywność w pozyskiwaniu funduszy na badania w ostatnich latach znacznie osłabła, ponieważ realizacja ostatniego zadania badawczego, w którym Habilitant

był wykonawcą skończyła się przed ponad dwoma laty (październik 2017). Jako pracownik tej samej instytucji naukowej mam wielką nadzieję, że po uzyskaniu stopnia doktora habilitowanego, dr Krajewski zintensyfikuje swoje starania w kierunku pozyskiwania środków na badania.

Prócz aktywności badawczej Dr Krajewski zaangażowany był w działalność dydaktyczną, popularyzatorską i organizacyjną. W ramach działalności dydaktycznej od roku 2008 prowadzi semestralne zajęcia laboratoryjne dla studentów IV roku Fizyki w Szkole Nauk Ścisłych UKSW oraz od 2012 roku semestralne zajęcia w ramach laboratorium Osadzania Warstw Atomowych dla studentów specjalności Inżynieria Nanostruktur na Wydziale Fizyki UW. Ponadto pełnił on funkcję promotora pomocniczego mgr. Singurenko. W ramach działalności popularyzatorskiej Habilitant pełnił funkcję opiekuna naukowego laureata Konkursu „First Steps to Nobel Prize in Physics” oraz opiekował się uczestnikami warsztatów organizowanych przez Krajowy Fundusz na Rzecz Dzieci.

Jeśli chodzi o działalność organizacyjną to w 2018 r. dr Krajewski był sekretarzem Komitetu Naukowego Międzynarodowej Konferencji „10th International Workshop on Zinc Oxide and Other Oxide Semiconductors (IWZnO-2018), organizowanej i koordynowanej przez Instytut Fizyki. Habilitant wykonuje jest aktywny również w działalności na rzecz środowiska fizyków recenzując artykuły przeznaczone do publikacji w różnych czasopismach naukowych.

Reasumując część dotyczącą dorobku naukowego dr. Tomasza Aleksandra Krajewskiego stwierdzam, że dorobek ten jest wystarczający do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego.

2. Recenzja osiągnięcia naukowego pt.: „Struktury złączowe wykorzystujące cienkie warstwy tlenku cynku otrzymane techniką Osadzania Warstw Atomowych (ALD)”

Osiągnięciem naukowym dr. Tomasza Aleksandra Krajewskiego będącym podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego jest cykl 7-miu publikacji pod wspólnym tytułem „Czynniki wpływające na własności transportowe cienkich warstw i struktur opartych na wybranych materiałach szeroko-przerwowych otrzymywanych techniką Atomic Layer Deposition (ALD)”. Wspólnym mianownikiem tych publikacji jest fakt, że są to prace eksperymentalne i wszystkie prócz pracy H7 dotyczą warstw i struktur wytwarzanych metodą ADL na bazie ZnO. Wspólna jest również metodyka raportowanych badań, mianowicie dominujące były metody transportu elektrycznego, choć do wstępnej charakteryzacji autor używał metod mikroskopowych (AFM), optycznych i np. SIMS. Wszystkie publikacje cyklu opublikowane zostały w czasopismach z listy filadelfijskiej, takich jak Journal of Alloys and Compounds (2), Journal of Applied Physics (1), Semiconductor Science and Technology (1)

etc., których czynniki wpływu mieszczą się w przedziale $3.8 > IF > 1.1$. Dr Krajewski jest pierwszym autorem 3 publikacji i swój udział w ich powstaniu ocenia na 60%; w pozostałych 4 publikacjach na ok. 40%. Zgodnie z zasadami etyki naukowej habilitant przeprowadził szczegółową analizę swego wkładu w poszczególne publikacje wykazując, że we wszystkich był on autorem pomiarów elektrycznych oraz ich interpretacji, w większości był autorem ogólnej koncepcji i pomysłu badań, brał udział w opracowaniu wyników i redakcji publikacji

W pierwszej pracy cyklu [H1] habilitant badał niedomieszkowane warstwy ZnO otrzymane w procesie ALD w niskich temperaturach 100-200 C. Analizowane były przede wszystkim widma luminescencji takich warstw przed i po ich kontrolowanym wygrzewaniu. Na tej podstawie autorzy podjęli próbę identyfikacji głównych defektów samoistnych determinujących właściwości niedomieszkowanych warstw ZnO osadzanych w temperaturze 100 – 200 C metodą ALD.

W drugiej pracy cyklu [H2] badane były również niedomieszkowane warstwy ZnO, ale w bardziej złożonych strukturach, mianowicie w heterozłączach ZnO/GaN. W tych badaniach zastosowane zostały typowe metody używane do badań złączy półprzewodnikowych, mianowicie analizowane były charakterystyki I-V i C-V, również w zależności od częstotliwości napięcia. Na tej podstawie autorzy określili energię 4 głębokich stanów defektowych w warstwach ZnO i przypisali im konkretne defekty punktowe – luki cynku i tlenu.

Dwie kolejne prace cyklu habilitacyjnego [H3 i H4] poświęcone są badaniom homozłącz wykonanych z ZnO. Struktury te wytwarzane były w jednym procesie wzrostu ALD. Autorzy uważają, że były to złącza p-n. Stronę typu n złącza tworzyła warstwa ZnO hodowana była w niskiej (130 C) bez domieszkowania, natomiast wytworzenie warstwy typu p wymagało domieszkowania azotem oraz aktywacji termicznej domieszki azotowej po wzroście. Przy okazji autorzy odkryli, że prostujące własności takich złączy można znacznie polepszyć umieszczając cienką warstwę Al_2O_3 pomiędzy warstwami typu n i p. Praca H4 jest dość prostą kontynuacją pracy H3. Opisane w niej jest również wytwarzanie i prosta charakteryzacja homozłączy ZnO, ale warstwę typu p otrzymano w wyniku jednoczesnego domieszkowania azotem i aluminium. Przy jednoczesnym domieszkowaniu azotem i aluminium tworzyło się złącze bez potrzeby dodatkowej aktywacji termicznej po wzroście.

Obiektem badań dr. Krajewskiego raportowanych w następnych pracach [H5 i H6] były złącza typu metal-izolator-półprzewodnik Ag-HfO₂-ZnO. Autorzy skupili się na pomiarach i analizie charakterystyk I-V w funkcji grubości warstwy HfO₂. Prace H5 i H6 różnią się tym, że w pierwszej kontakty do diody Ag-HfO₂-ZnO skonfigurowane były w tzw. geometrii poziomej a w pracy H6 w konfiguracji pionowej. Ponadto w pracy [H5] analizę charakterystyk I-V przeprowadzono poprzez dopasowanie zmodyfikowanego równania Shockleya-Reeda do danych pomiarowych, a w pracy [H6] zastosowano bardziej skomplikowaną analizę różniczkową. Głównym wnioskiem z tych prac jest stwierdzenie, że

przekładka z HfO_2 odgrywa zasadniczą rolę dla poprawy własności prostujących złącz Ag-HfO₂-ZnO. Najlepsze parametry diod otrzymane zostały dla przekładki o grubości $d=2,5$ nm.

Ostatnia praca cyklu habilitacyjnego [H7] jako jedyna, nie dotyczy warstw ani struktur z ZnO. Tu autorzy wytworzyli i badali struktury wielowarstwowe składające się z naprzemiennych warstw Al_2O_3 oraz HfO_2 . Struktury takie efektywnie pułapkują elektrony i mogą znaleźć zastosowania jako komórki pamięci typu charge trapping memory. Przedstawione wyniki sugerują, że wygrzewanie takich struktur w atmosferze O_2 i N_2 ma bardzo różny wpływ na obecność aktywnych elektrycznie defektów. Wygrzewanie w azocie wprowadza ujemne ładunki tlenków, podczas gdy w tlenie - dodatnie. Ujemny ładunek jonów tlenu pochodzi z warstw Al_2O_3 . Wygrzewanie w tlenie wzmacnia efekt pułapkowania elektronów, a tym samym zdolność przechowywania ładunków w wielowarstwach. Autorzy stwierdzili również, że istotną rolę odgrywa również grubość poszczególnych warstw. Maksymalną wydajność pułapkowania osiąga się gdy warstwy HfO_2 i Al_2O_3 są w równowadze. Autorzy stwierdzają, że wielowarstwy $\text{HfO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ mogą znaleźć zastosowania jako pułapki ładunku w urządzeniach pamięci stałej.

Spośród wyników uzyskanych przez dr Krajewskiego i raportowanych w pracach jego cyklu habilitacyjnego do najważniejszych należą:

1. Identyfikacja defektów punktowych w warstwach ZnO hodowanych w niskich temperaturach oraz określenie jaką rolę defekty te odgrywają we własnościach transportowych takich warstw,
2. Opracowanie metod otrzymywania homo-złącz ZnO:N/ZnO, ZnO:N,Al./ZnO oraz złącz metal/ półprzewodnik ZnO/Ag,
3. Poprawa własności elektrycznych takich złącz przez wprowadzenie przekładki dielektrycznej pasywującej powierzchnię półprzewodnika,
4. Przeprowadzenie modelowych rachunków opisujących wpływ przekładki dielektrycznej w złączach na ZnO na ich charakterystyki prądowo-napięciowe.

Z obowiązku oceniającego, chce jednak zwrócić uwagę na kilka punktów, które w mojej ocenie są słabsze:

1. W ocenianym cyklu publikacji uderzający jest brak jakichkolwiek pomiarów stricte transportowych, takich jak efekt Halla, ruchliwość etc. Wydaje się, że w badaniach transportowych warstw i struktur półprzewodnikowych, co było głównym tematem prac Habilitanta, podstawowymi informacjami powinny być dane o koncentracji nośników, ich ruchliwości i przede wszystkim typie przewodnictwa.
2. Przez brak klasycznych danych transportowych, Habilitant nie przedstawił żadnego dowodu na to, że warstwy ZnO domieszkowane azotem lub aluminium lub codomieszkowane azotem i aluminium, są istotnie typu p. Samo powstanie bariery potencjału w homo- czy hetero-złączu i stąd nieliniowe charakterystyki prądowo-napięciowe takich złącz, nie świadczą o tym, że jedna warstwa jest typu p a druga n.

Takie właściwości pokazują tylko, że występuje jakaś niejednorodność (domieszkowania, przerwy energetycznej, band-offsetu, etc.) i możemy np. mieć do czynienia z złączem typu n/n^+ .

Mimo powyższych uwag krytycznych stwierdzam, że cykl prac stanowiących osiągnięcie naukowe będące podstawą wystąpienia dra Tomasza Krajewskiego o stopień doktora habilitowanego, jak i pozostałe osiągnięcia zawodowe Habilitanta reprezentują wysoki poziom naukowy i wnoszą istotny wkład autora w rozwój fizyki ciała stałego.

Uważam, że przedstawione do recenzji materiały spełniają warunki określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311) dla osób ubiegających się o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego i wnioskuję o dopuszczenie dra Tomasza Aleksandra Krajewskiego do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.



Grzegorz Karczewski