

Bydgoszcz, 20.03.2022

dr hab. inż. Łukasz Skowroński, prof. PBŚ  
Zakład Fizykochemii Powierzchni  
Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej  
Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich  
ul. Aleje Prof. S. Kaliskiego 7  
85-796 Bydgoszcz

### **Recenzja**

**osiągnięcia naukowego oraz dorobku zawodowego  
przedstawionego do oceny w postępowaniu habilitacyjnym  
dra inż. Pawła Piotra Michałowskiego  
w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych,  
w dyscyplinie inżynieria materiałowa**

Podstawa opracowania recenzji:

Uchwała nr 167/II/2021 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej z dnia 17.12.2021 r.

Recenzję opracowałem w oparciu o dokumentację osiągnięć Habilitanta przekazaną w formie drukowanej i elektronicznej. Formalną i merytoryczną podstawą recenzji jest Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późniejszymi zmianami).

Jako osiągnięcie stanowiące znaczny wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria materiałowa, wynikające z art.219 ust.1 pkt.2 lit b) Ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późniejszymi zmianami), Habilitant przedłożył do oceny cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych pod tytułem „Charakteryzacja struktur półprzewodnikowych z nanometrową i subnanometrową rozdzielczością wgłębną przy użyciu metody Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych”.

## **1. Charakterystyka kariery naukowej i zawodowej Habilitanta**

Pan Paweł Michałowski w 2007 roku przygotował pracę magisterską pt. "Production of Li intercalated C60 films and implementation into electronic devices" na Wydziale Fizyki (Umeå University). Promotorem pracy był dr Thomas Wågberg. W 2008 roku Habilitant obronił pracę magisterską pt. "Badanie wpływu procesu fotopolimeryzacji fulerenów przy użyciu metody SIMS" na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Promotorem pracy był prof. Józef Barnaś. Stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyka Habilitant uzyskał 20.02.2015 roku na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, broniąc rozprawę "Diffusion and structural changes in  $Al_{1-x}Si_xO_y$  thin films investigated by Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy", spełniając w ten sposób wymóg formalny ubiegania się o uzyskanie stopnia doktora habilitowanego (art. 219 ust.1 pkt.1 Ustawy). Promotorem rozprawy był dr hab. Maciej Wiesner.

W latach 2007-2010 Pan Paweł Michałowski był zatrudniony na stanowisku asystenta we Fraunhofer Center Nanoelektronische Technologien (Drezno, Niemcy). Od 2015 roku Habilitant był zatrudniony jako adiunkt w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych, który w 2019 roku dołączył do Sieci Badawczej Łukasiewicz, a następnie w 2020 roku został skonsolidowany z Instytutem Technologii Elektronowej, tworząc Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, którego jest pracownikiem do dzisiaj. Od 2015 roku Pan Paweł Michałowski pełnił funkcję zastępcy kierownika, kierownika lub lidera grupy badawczej komórki, w której był zatrudniony.

## **2. Ocena osiągnięcia naukowego**

Osiągnięcie naukowe będące podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego dr Paweł Michałowski zatytułował jako „Charakteryzacja struktur półprzewodnikowych z nanometrową i subnanometrową rozdzielczością wgłębną przy użyciu metody Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych”, a jako jego potwierdzenie przedstawił cykl szesnastu powiązanych tematycznie artykułów naukowych (spełniając tym samym art.219 ust.1 pkt.2 lit b) Ustawy). Łączny współczynnik wpływu (impact factor) tych prac wynosi 66.074, natomiast liczba punktów wg wykazu MEiN to 1950

(zaznaczając, że została ona ustalona na podstawie zestawienia opublikowanego 18.02.2021).

Habilitant w swoich pracach przedstawił modyfikacje procedur pomiarowych, które pozwoliły na przeprowadzenie badań SIMS z nanometrową i subnanometrową rozdzielczością wgłębną. Rozdzielczość taka jest niezwykle istotna przy badaniu ultracienkich warstw, takich jak złącza tunelowe, supersieci lub materiały 2D, dla których standardowe procedury pomiarowe dają niesatysfakcjonujące wyniki.

W pracy "Secondary ion mass spectroscopy depth profiling of hydrogen intercalated graphene on SiC" Applied Physics Letters, 109:011904, 2016 habilitant potwierdził hipotezę, że można uzyskać subnanometrową rozdzielczość wgłębną podczas pomiarów SIMS, co umożliwiło jakościowe porównanie próbek grafenowych interkalowanych i nieinterkalowanych wodorem. Ponadto Habilitant stworzył procedurę SIMS, która pozwoliła na dokładną lokalizację grafenu oraz zauważył, że zanieczyszczenia organiczne zgromadziły się na powierzchni warstwy grafenu i nie wnikały w głąb próbki.

W pracy "Graphene Enhanced Secondary Ion Mass Spectrometry (GESIMS)" Scientific Reports, 7:7479, 2017 Kandydat udowodnił, że warstwa grafenowa blokowała emisję atomów z warstw leżących poniżej oraz zwiększała prawdopodobieństwo jonizacji ujemnej, a tym samym, że grafen można wykorzystać do polepszenia granic wykrywalności pomiarów SIMS (podejście określone jako GESIMS; zweryfikowane w późniejszej pracy: "Formation of a highly doped ultrathin amorphous carbon layer by ion bombardment of graphene" Nanotechnology, 29(30):305302, 2018).

W publikacji "Characterization of the superlattice region of a quantum cascade laser by secondary ion mass spectrometry" Nanoscale, 9:17571–17575, 2017 Habilitant zaproponował i zweryfikował eksperymentalnie hipotezę, że dla stosunkowo grubych próbek (200 nm) można zwiększyć obszar analizy (zamiast zwiększać czas integracji sygnałów), aby zachować subnanometrową rozdzielczość wgłębną. Ponadto Pan Paweł Michałowski wskazał, że metoda ta może być wykorzystana do trójwymiarowej analizy usterek strukturalnych badanych materiałów.

Istotne wyniki swoich badań Habilitant przedstawił w pracy "Contamination-free Ge-based graphene as revealed by graphene enhanced secondary ion mass spectrometry (GESIMS)" Nanotechnology, 29(1):015702, 2018, w której sformułował i zweryfikował

hipotezę, że proces wzrostu grafenu na różnych podłożach nie prowadzi do silnego zanieczyszczenia miedzią, co było obiegową opinią spowodowaną pojawianiem się podwójnie zjonizowanych pików w widmie masowym (a które były wcześniej błędnie interpretowane jako dowód obecności miedzi).

W pracy "Formation of a highly doped ultrathin amorphous carbon layer by ion bombardment of graphene" *Nanotechnology*, 29(30):305302, 2018 Pan Paweł Michałowski we współpracy z prof. Francisco Guinea (IMDEA Nanoscience i University of Manchester) zweryfikował wcześniejszą swoją hipotezę dotyczącą GESIMS (przedstawioną w publikacji "Graphene Enhanced Secondary Ion Mass Spectrometry (GESIMS)" *Scientific Reports*, 7:7479, 2017) i wyjaśnił efekt GESIMS.

Zastosowanie metody SIMS do materiałów tlenkowych (tlenek cynku bombardowany jonami iterbu) zostało opisane w "Oxygen out-diffusion and compositional changes in zinc oxide during ytterbium ions bombardment" *Nanotechnology*, 29(42):425710, 2018. Habilitant udowodnił, że w trakcie procesu bombardowania ZnO jonami iterbu dyfuzja tlenu następuje w kierunku powierzchni próbki, jednocześnie umożliwiając uformowanie się warstwy zubożonej w ten pierwiastek.

Zastosowanie metody SIMS do stosunkowo grubych struktur wielowarstwowych (kilka mikrometrów) zostało opisane w publikacji "A-Crater-within-a-Crater Approach for Secondary Ion Mass Spectrometry Evaluation of the Quality of Interfaces of Multilayer Devices" *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(43):37694–37698, 2018. Pan Paweł Michałowski zaprezentował w niej oryginalne podejście do mikrometrowych warstw, wykazując, że w takich przypadkach również jest możliwe otrzymanie subnanometrowej rozdzielczości, stosując podejście, które Habilitant nazwał a crater-within-a-crater.

W publikacji "Destructive role of oxygen in growth of molybdenum disulfide determined by secondary ion mass spectrometry" *Physical Chemistry Chemical Physics*, 21:8837–8842, 2019 Habilitant wykazał, że rodzaj podłoża ma duży wpływ na jakość wytwarzanych warstw MoS<sub>2</sub>. Przeprowadzone badania wykazały, że w przypadku podłoży zawierających tlen (np. tlenek krzemu, szafir) wysokotemperaturowy proces siarkowania powoduje uwalnianie się tlenu z podłoża, co powodowało postawanie domen MoS<sub>2</sub> otoczonych amorficznym, silnie utlenionym materiałem. Zupełnie inne wyniki otrzymano dla warstw siarczku molibdenu, których wzrost przeprowadzono na

podłożu bez tlenu (np. na azotku boru). W tym przypadku otrzymano jednorodną, wysokiej jakości warstwę MoS<sub>2</sub>. W drugiej pracy dotyczącej tego materiału ("Growth of highly oriented MoS<sub>2</sub> via an intercalation process in the graphene/SiC(0001) system" *Physical Chemistry Chemical Physics*, 21:20641–20646, 2019) Habilitant wykazał, że warstwy siarczku molibdenu na podłożu grafenu/SiC(0001) tworzą się pomiędzy grafenem i węglikiem krzemu. Zjawisko to wytłumaczono jako interkalację prekursorów pod warstwę grafenu.

Wyniki pomiarów dotyczące atomowej rozdzielczości wgłębnej dla struktur van der Waalsa zostały zaprezentowane w pracy: "Secondary ion mass spectrometry investigation of carbon grain formation in boron nitride epitaxial layers with atomic depth resolution" *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 34:848–853, 2019. Habilitant opracował procedurę SIMS umożliwiającą analizę warstwy wierzchniej. W procedurze tej krótki impuls wiązki jonów o dużym kącie padania zrywał słabe wiązania van der Waalsa i usuwał jedną warstwę, nie powodując żadnych uszkodzeń warstw leżących poniżej. Dzięki zastosowaniu takiego podejścia możliwe jest analizowanie metodą SIMS warstwy po warstwie.

Kolejne dwie prace dotyczą zanieczyszczeń tlenkowych w azotku galu ("Three dimensional localization of unintentional oxygen impurities in gallium nitride" *Chemical Communications*, 55:11539–11542, 2019 oraz "3D Depth Profile Reconstruction of Segregated Impurities using Secondary Ion Mass Spectrometry" *Journal of Visualized Experiments*, 158:e61065, 2020), przy czym druga z prac jest wideoartykułem prezentującym metodę pomiarową przedstawioną w pierwszym z wymienionych artykułów. Habilitant wykazał, że możliwe jest uzyskanie wiarygodnej informacji o trójwymiarowym rozkładzie tlenu w GaN pomimo jego niewielkiej koncentracji w materiale i niepożądanym udziale gazów resztkowych w komorze pomiarowej. Po optymalizacji techniki SIMS dla wymienionego w tym akapicie zagadnienia badawczego Pan Paweł Michałowski wykazał, że tlen jest zgromadzony wzdłuż podłużnych struktur (otwarte rdzenie dyslokacji śrubowych i mieszanych - efekt ten został potwierdzony z zastosowaniem analizy korelacyjnej przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej).

W pracy: "Indium concentration fluctuations in InGaN/GaN quantum wells" *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 34:1718–1723, 2019 Habilitant wykazał, że ind nie jest

rozłożony równomiernie w studniach kwantowych oraz opisał jakościowo i ilościowo fluktuacje koncentracji indu w tych strukturach.

Kolejne dwie prace są publikacjami, których Pan Paweł Michałowski jest jedynym autorem. W publikacji: "Probing a chemical state during ultra low impact energy secondary ion mass spectrometry depth profiling" *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 34:1954–1956, 2019 Habilitant przedstawił wyniki badań dotyczące sondowania stanu chemicznego próbki metodą SIMS z zastosowaniem niskiej energii padających jonów. W drugim z samodzielnych artykułów "Titanium presputtering for an enhanced secondary ion mass spectrometry analysis of atmospheric gas elements" *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 35:1047–1050, 2020 Habilitant zaprezentował ulepszenie metody Miwa et al. (S. Miwa, I. Nomachi and H. Kitajima, *Appl. Surf. Sci.*, 2006, 252, 7247–7251), polegające na zastosowaniu tytanu o wysokiej czystości zamiast krzemu do rozpylania wstępnego. Rozpylanie takie stosuje się, aby zminimalizować problem obecności gazów resztkowych (wodór, tlen, azot i węgiel) w komorze w trakcie badań próbek zawierających te pierwiastki. Zastosowanie przez Habilitanta tytanu zamiast krzemu pozwoliło na skrócenie czasu rozpylania wstępnego oraz poprawę granic wykrywalności wodoru i tlenu.

W pracy: "Defect- mediated sputtering process of boron nitride during high incident angle low-energy ion bombardment" *Measurement*, 179:109487, 2021 Habilitant sformułował hipotezę, że możliwość osiągnięcia atomowej rozdzielczości wgłębnej „jest związana ze specyficzną interakcją jonów pierwotnych padających pod wysokim kątem z materiałem”. Przeprowadzone przez Pana Pawła Michałowskiego badania i analizy SIMS poprawnie zweryfikowały wniosek z symulacji komputerowych wykonanych przez grupę prof. Zbigniewa Postawy z Uniwersytetu Jagiellońskiego mówiący o tym, że tylko defekty mogą zainicjować proces rozpylania materiału, oraz że proces rozpylania był asymetryczny (bardziej intensywny wzdłuż kierunku padania jonów pierwotnych).

W przedstawionych pracach stanowiących cykl publikacji, o którym mowa w art.219 ust.1 pkt.2 lit b) Ustawy zadeklarowany wkład Pana Pawła Michałowskiego w powstawanie prac wynosił od 60% do 100%. Warto podkreślić, że we wszystkich pracach Habilitant jest pierwszym autorem. We wszystkich pracach Habilitant sformułował

hipotezę badawczą i był wiodącą osobą odpowiedzialną za przeprowadzenie/koordynowanie badań oraz przygotowanie artykułu. W każdej pracy Pan Michałowski pokazuje, że potrafi dostosować procedury używane w metodzie SIMS, aby rozwiązać dane zagadnienie. Wspomnianą technikę pomiarową stosuje zarówno dla monowarstw, jak i struktur wielowarstwowych o grubości kilku mikrometrów – za każdym razem z atomową rozdzielczością wgłębną. Habilitant swobodnie i zarazem bardzo rzetelnie stosuje i - co warto podkreślić - rozwija metodę SIMS do różnych struktur i różnych materiałów. Pan Michałowski pracuje bardzo systematycznie i metodycznie. Stworzył on bazę dedykowanych procedur, które w zależności od problemu badawczego może stosunkowo prosto zmodyfikować, dostosowując do danego zagadnienia. Warto też podkreślić, że w latach 2016-2018 wiele artykułów Habilitanta było odrzucanych przez edytorów i recenzentów. Świadczy to o tym, że wyniki otrzymywane przez Pana Michałowskiego dotyczące dokładności pomiarów były w pewnym sensie przełomowe dla tej techniki pomiarowej i nie zostały przyjęte (początkowo) jako wiarygodne dla recenzentów. Ponadto wyniki analiz przeprowadzonych przez Pana dra Pawła Michałowskiego dla różnych struktur pozwalały wielokrotnie na optymalizację procesu ich wytwarzania.

W mojej ocenie osiągnięcie naukowe „Charakteryzacja struktur półprzewodnikowych z nanometrową i subnanometrową rozdzielczością wgłębną przy użyciu metody Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych” przynależy do dyscypliny inżynieria materiałowa i zostało w pełni potwierdzone w przedstawionym do oceny cyklu publikacji. W każdej z wymienionych prac Habilitant wskazał indywidualny wkład w ich powstanie, spełniając tym samym formalny wymóg art.219 ust.2 Ustawy.

### **3. Ocena aktywności naukowej albo artystycznej realizowanej w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej**

Habilitant jest współautorem 47 publikacji naukowych ujętych w Journal Citation Reports (6 przed uzyskaniem stopnia doktora i 41 po uzyskaniu stopnia doktora). Całkowity impact factor (IF) publikacji wynosi 178.251 (IF=11.067 przed uzyskaniem

stopnia doktora i  $IF=167.184$  po uzyskaniu stopnia doktora). Całkowita liczba punktów MEiN wynosi 4900, a należy zaznaczyć, że została ona ustalona na podstawie zestawienia opublikowanego 18.02.2021. Liczba punktów prac opublikowanych przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora wynosiła 490, a po – 4410. Całkowita liczba cytowań na dzień 17.09.2021 według Web of Science wynosiła 310 (w tym 210 bez autocytowań). Warto podkreślić, że na dzień 20.03.2022 liczba cytowań wynosi 360 (wg Web of Science). Indeks Hirsha (H) Pana Pawła Michałowskiego wynosi 10 ( $H=7$  bez autocytowań). Należy zaakcentować, że dorobek naukowy Habilitanta znacząco wzrósł od czasu uzyskania stopnia doktora, a biorąc pod uwagę młody wiek i aktywność naukową Kandydata - można uznać, że podane wyżej wskaźniki naukometryczne znacząco wzrosną w przyszłości. Warto też podkreślić, że większość publikacji powstała we współpracy z wiodącymi krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi.

Habilitant 23 razy recenzował artykuły naukowe w uznanych czasopismach, takich jak: ACS Applied Materials & Interfaces, ACS Nano, Journal of Physics Condensed Matter, Journal of Physics D Applied Physics, Journal of Vacuum Science and Technology B Nanotechnology and Microelectronics, Materials Research Express, Nanotechnology, Semiconductor Science and Technology oraz Surface and Interface Analysis.

Pan dr Paweł Michałowski brał (lub bierze) udział w dziesięciu projektach naukowych (głównie międzynarodowych). W większości z nich był wykonawcą. Obecnie Habilitant kieruje dwoma projektami naukowymi.

Habilitant prezentował wyniki swoich badań 14 razy w formie referatu na konferencjach międzynarodowych.

W mojej ocenie Habilitant wykazuje się istotną aktywnością naukową realizowaną we współpracy z wiodącymi ośrodkami naukowymi zarówno krajowymi, jak i zagranicznymi, zatem spełnia wymóg formalny art. 219 ust.1 pkt.3 Ustawy.

#### **4. Ocena działalności dydaktycznej, organizacyjnej oraz popularyzującej i współpracy z otoczeniem gospodarczym**

Habilitant był promotorem pomocniczym jednej pracy magisterskiej oraz opiekunem praktyk studenckich realizowanych w Sieci Badawczej Łukasiewicz. Prowadził on



wykłady dla studentów i doktorantów dot. techniki SIMS oraz wykłady popularyzujące wymienioną metodę pomiarową w wielu ośrodkach krajowych i zagranicznych. Szereg takich wykładów świadczy o zdobytej wiedzy związanej z rozwijaniem techniki SIMS oraz jej popularyzowaniu.

Współpraca Habilitanta z sektorem gospodarczym polegała na badaniu wytwarzanych przez firmy struktur. Warto podkreślić, że partnerzy przemysłowi to głównie firmy zagraniczne.

## 5. Podsumowanie

Dr inż. Paweł Piotr Michałowski swoje osiągnięcie naukowe, będące postawą postępowania habilitacyjnego, zatytułował „Charakteryzacja struktur półprzewodnikowych z nanometrową i subnanometrową rozdzielczością wgłębną przy użyciu metody Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych”. Ma ono postać cyklu szesnastu publikacji naukowych, w których jednoznacznie można wyodrębnić część pracy zbiorowej, będącą indywidualnym wkładem Habilitanta w rozwój dyscypliny.

Stwierdzam, że dr inż. Paweł Piotr Michałowski spełnia wymagania stawiane osobom ubiegającym się o stopień doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa w świetle Ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce i składam wnioszek do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej o nadanie Panu dr. inż. Pawłowi Piotrowi Michałowskiemu stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie inżynieria materiałowa.



