

dr hab. Dariusz Chrobak, prof. UŚ
Instytut Inżynierii Materiałowej
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych
Uniwersytet Śląski w Katowicach
ul. 75 Pułku Piechoty 1A
41-500 Chorzów
email: dariusz.chrobak@us.edu.pl

Chorzów, dn. 26.04.2022 r.

Recenzja dorobku naukowego

dr inż. Pawła Michałowskiego

***w związku z postępowaniem o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego
w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa***

Podstawą wykonania recenzji jest uchwała nr 167/II/2021 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej z dnia 17.12.2021 roku powołującego mnie, w roli recenzenta, do komisji habilitacyjnej w postępowaniu o nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa wszczętym na wniosek dr inż. Pawła Michałowskiego z dnia 17.09.2021 roku.

Do wniosku dołączono:

- *poświadczoną kopię dokumentu stwierdzającego nadanie stopnia naukowego doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki,*
- *autoreferat zawierający:*
 - *opis osiągnięcia naukowego,*
 - *informację o wykazaniu się istotną aktywnością naukową,*
 - *informację o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę,*
- *wykaz osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny, oraz dane bibliometryczne,*
- *kopie publikacji naukowych zgłoszonych jako osiągnięcia naukowe stanowiące podstawę do ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego,*
- *oświadczenia współautorów o ich udziale w przygotowanie poszczególnych publikacji.*

Struktura dokumentu:

1. Informacje ogólne.
2. Ocena głównego osiągnięcia naukowego.
3. Ocena pozostałego dorobku naukowego i aktywności badawczej.
4. Ocena osiągnięć dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę.
5. Wniosek końcowy.

1. Informacje ogólne.

Dr inż. Paweł Michałowski uzyskał 20.02.2015 roku stopień naukowy doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki na podstawie rozprawy doktorskiej pt. „*Diffusion and structural changes in Al_{1-x}Si_xO_y thin films investigated by Time-of-Flying Secondary Ion Mass Spectroscopy*” na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu.

Warto zwrócić uwagę na fakt, iż metoda Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych (SIMS) oraz jej zastosowanie do badania procesów zachodzących w zaawansowanych materiałach była wiodącą metodą badawczą wykorzystaną wcześniej w przygotowaniu pracy magisterskiej pt. „*Badanie procesu fotopolimeryzacji fulerenów przy użyciu metody SIMS*”, obronionej w 2008 roku, również na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu.

Wcześniej, tj. w 2007 roku, Habilitant obronił pracę magisterską pt. „*Production of Li intercalated C60 films and implementation into electronic devices*” na Faculty of Physics, Umeå University (Szwecja).

W latach 2007-2010 dr inż. Paweł Michałowski był asystentem w Fraunhofer-Center Nanoelektronische Technologien (Drezno, Niemcy), następnie w latach 2015-2020 pracował jako adiunkt i na stanowiskach kierowniczych w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych. Obecnie jest liderem grupy badawczej „Charakteryzacja Materiałów i Przyrządów” w warszawskim Instytucie Mikroelektroniki i Fotoniki (Sieć Badawcza Łukasiewicz).

2. Ocena głównego osiągnięcia naukowego.

Jako osiągnięcie naukowe odpowiadające wymaganiom Ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym (art. 219 ust. 1 pkt 2) dr inż. Paweł Michałowski przedstawił cykl 16 monotematycznych publikacji naukowych zatytułowany „*Charakteryzacja struktur półprzewodnikowych z nanometrową i*

subnanometrową rozdzielczością wgłębną przy użyciu metody Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych” opublikowanych w latach 2016-2021:

- [H1] P.P. Michałowski, W. Kaszub, A. Merkulov, W. Strupiński. ”Secondary ion mass spectroscopy depth profiling of hydrogen-intercalated graphene on SiC” *Applied Physics Letters*, 109:011904, 2016.
- [H2] P.P. Michałowski, W. Kaszub, I. Pasternak, W. Strupinski. ” Graphene Enhanced Secondary Ion Mass Spectrometry (GESIMS)” *Scientific Reports*, 7:7479, 2017.
- [H3] P.P. Michałowski, P. Gutowski, D. Pierścińska, K. Pierściński, M. Bugajski, W. Strupiński. ”Characterization of the superlattice region of a quantum cascade laser by secondary ion mass spectrometry” *Nanoscale*, 9:17571-17575, 2017.
- [H4] P.P. Michałowski, I. Pasternak, W. Strupiński. ”Contamination-free Ge-based graphene as re-vealed by graphene enhanced secondary ion mass spectrometry (GESIMS)” *Nanotechnology*, 29(1):015702, 2018.
- [H5] P.P. Michałowski, I. Pasternak, P. Ciepiewski, F. Guinea, W. Strupiński. ”Formation of a highly doped ultra-thin amorphous carbon layer by ion bombardment of graphene” *Nanotechnology*, 29(30):305302, 2018.
- [H6] P.P. Michałowski, J. Gaca, M. Wójcik, A. Turos. ”Oxygen out-diffusion and compositional changes in zinc oxide during ytterbium ions bombardment” *Nanotechnology*, 29(42):425710, 2018.
- [H7] P.P. Michałowski, W. Kaszub, P. Knyps, K. Rosiński, B. Stańczyk, K. Przyborowska, E. Dumiszewska. ”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.
- [H8] P.P. Michałowski, P. Knyps, P. Ciepiewski, P. Caban, E. Dumiszewska, J. Baranowski. ”De-structive role of oxygen in growth of molybdenum disulfide determined by secondary ion mass spectrometry” *Physical Chemistry Chemical Physics*, 21:8837-8842, 2019.
- [H9] P.P. Michałowski, P. Knyps, P. Ciepiewski, P.A. Caban, E. Dumiszewska, G. Kowalski, M. Tokarczyk, J.M. Baranowski. ”Growth of highly oriented MoS₂ via an intercalation process in the graphene/SiC(0001) system” *Physical Chemistry Chemical Physics*, 21:20641-20646, 2019.
- [H10] P.P. Michałowski, P. Caban, J. Baranowski. ”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.

[H11] P.P. Michałowski, S. Złotnik, and M. Rudziski. "Three dimensional localization of unintentional oxygen impurities in gallium nitride" *Chemical Communications*, 55:11539-11542, 2019.

[H12] P.P. Michałowski, E. Grzanka, S. Grzanka, A. Lachowski, G. Staszczak, J. Plesiewicz, M. Leszczyski, A. Turowski. "Indium concentration fluctuations in InGaN/GaN quantum wells" *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 34:1718-1723, 2019.

[H13] P.P. Michałowski. "Probing a chemical state during ultra low impact energy secondary ion mass spectrometry depth profiling" *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 34:1954-1956, 2019.

[H14] P.P. Michałowski. "Titanium pre-sputtering for an enhanced secondary ion mass spectrometry analysis of atmospheric gas elements" *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 35:1047-1050, 2020.

[H15] P.P. Michałowski, S. Zlotnik, I. Józwiak, A. Chamryga, M. Rudziński. "3D Depth Profile Re-construction of Segregated Impurities using Secondary Ion Mass Spectrometry" *Journal of Visualized Experiments*, 158:e61065, 2020.

[H16] P.P. Michałowski, D. Maciążek, Z. Postawa, P.A. Caban, S. Kozdra, A. Wójcik, J.M. Baranowski. "Defect-mediated sputtering process of boron nitride during high incident angle low-energy ion bombardment" *Measurement*, 179:109487, 2021.

Spośród nich, do najbardziej prestiżowych należy zaliczyć: *ACS Applied Materials & Interfaces* (IF: 9.229), *Nanoscale* (IF: 7.790), *Chemical Communications* (6.222) oraz *Scientific Reports* (IF: 5.134).

Sumaryczny Impact Factor osiągnięcia naukowego podlegającego niniejszej recenzji jest równy 66.074, a całkowita liczba cytowań (bez autocytowań) wynosi 26/25/30 (Web of Science/Scopus/Google Scholar).

Zwraca uwagę fakt, iż nazwisko dr inż. Pawła Michałowskiego występuje na pierwszym miejscu listy autorów wszystkich publikacji naukowych H1-H16 stanowiących analizowane osiągnięcie naukowe. Zgodnie z powszechnie respektowaną zasadą oznacza to dominujący wkład dr inż. Pawła Michałowskiego w powstanie ocenianych publikacji – ten oczywisty wniosek potwierdzają znajdujące się w dokumentacji habilitacyjnej formalne oświadczenia pierwszego autora oraz pozostałych współautorów.

Główny obszar badań naukowych, któremu Habilitant poświęcił najwięcej uwagi po uzyskaniu stopnia doktora nauk fizycznych, dotyczy Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych (SIMS), a w szczególności rozwojowi tej metody i jej zastosowaniu w badaniach własności fizyko-chemicznych warstwy powierzchniowej wybranych materiałów i struktur półprzewodnikowych. W opinii recenzenta ten rodzaj aktywności naukowej mieści się w zakresie nauk inżyneryjno-technicznych i dyscypliny inżynieria materiałowa. W szczególności przekonuje o tym znaczenie badań powierzchni materiałów półprzewodnikowych w projektowaniu, wytwarzaniu i charakteryzacji urządzeń elektronicznych i optoelektronicznych.

Rezultatem działalności naukowej dr inż. Pawła Michałowskiego było opracowanie szeregu dedykowanych procedur pomiarowych SIMS, które, między innymi, umożliwiają precyzyjne określenie profili wglębnych składu chemicznego warstwy powierzchniowej. Problem z jakim zetknął się Habilitant polega na tym, że zastosowanie niskoenergetycznych jonów pierwotnych umożliwia, co prawda, wykonanie eksperymentów z nanometrową rozdzielczością wglębną, jednak konsekwencją małej energii jonów pierwotnych jest wyraźne zmniejszenie prawdopodobieństwa ekstrakcji i jonizacji atomów badanego materiału. Nie trzeba uzasadniać, że powoduje to pogorszenie granic wykrywalności tych atomów, których analiza jest istotna. Zaproponowane przez Habilitanta procedury pomiarowe SIMS są dedykowane co oznacza, że są one dostosowane tak do rodzaju badanego materiału czy struktury półprzewodnikowej, jak również do charakteru postawionego problemu naukowego.

Szczególną rolę w badaniach dr inż. Pawła Michałowskiego zajmuje grafen. W pracy H1 (2016) Habilitant badał rozkład wglębny składu chemicznego wzbogaconego (*intercalated*) wodorem grafenu osadzonego na powierzchni SiC. Zauważył, iż osadzenie warstwy grafenu blokuje emisję atomów z podłoża, a jednocześnie zwiększa prawdopodobieństwo ujemnej jonizacji. Pomysł by częściowo zniszczyć warstwę grafenu i tym samym ograniczyć efekt blokady emisji przy jednoczesnym utrzymaniu poziomu prawdopodobieństwa jonizacji ujemnej okazał się być nie tylko błyskotliwy, ale również skuteczny. Nowe, autorskie rozwinięcie metody SIMS otrzymało nazwę Graphene Enhanced Secondary Ion Mass Spectrometry (GESIMS), a jej opis i pokaz skuteczności Habilitant przedstawił w pracy H2 opublikowanej w renomowanym *Scientific Reports* (2017). Praca H4 przynosi przykład zastosowania metody GESIMS i dowód, że elektrochemiczne przenoszenie warstwy grafenu na podłożę Ge z podłoża metalicznego Cu nie prowadzi do silnego zanieczyszczenia grafenu miedzią.

Wyjaśnienie zjawiska, które leży u podstaw metody GESIMS zostało zaproponowane w pracy H5 (*Nanotechnology*, 2018). Otóż kluczowe okazało się wykazanie, że zerwane wiązania sp^2 grafenu wiążą jony pierwotne cezu, co powoduje zwiększenie prawdopodobieństwa jonizacji ujemnej.

W swojej pracy naukowej Habilitant spotkał się z problemem wglębnej charakteryzacji warstw materiału leżącej w znacznej odległości od jego powierzchni, np. struktury ogniwa słonecznego InGaP/InGaAs/Ge. Rozwiązanie problemu zaowocowało opracowaniem procedury pomiarowej nazwanej później *a-crater-within-a-crater* (H7, 2018), a polegającej na szybkim usunięciu, przy pomocy wiązki wysokoenergetycznych jonów pierwotnych, znacznej ilości niebadanego materiału i tym samym dotarciu w pobliże interesującego obszaru heterozłącza. Powstaje więc krater, w którego obszarze, już przy wykorzystaniu wiązki jonów pierwotnych o znacznie mniejszej energii, dokonuje się właściwych pomiarów składu chemicznego z rozdzielczością tak dużą jak w przypadku badań warstw przypowierzchniowych. Jest to kolejne istotne osiągnięcie naukowe Habilitanta, które znalazło uznanie w oczach niezależnych recenzentów renomowanego czasopisma *ACS Applied Material & Interfaces*.

Wyróżnione wyżej artykuły przedstawione przez dr inż. Pawła Michałowskiego nie wyczerpują jego dorobku składającego się na istotne osiągnięcie naukowe podlegające niniejszej recenzji. Pozostałe prace: H3, H6, H8-H16, to zapis badań naukowych wykorzystujących dedykowane procedury SIMS stworzone przez Habilitanta. Cechą wspólną tych prac jest to, że rozwiązywały konkretne problemy technologiczne, inżynierskie i naukowe istotne z obszaru wytwarzania zaawansowanych materiałów i przyrządów półprzewodnikowych.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że wyniki badań naukowych Habilitanta znalazły uznanie w sektorze gospodarczym. Na przykład, zainteresowanie wynikami badań struktury kwantowego lasera kaskadowego AlInAs/InGaAs, przedstawione w pracy H3, zaowocowało współpracą z firmą VIGO-System w zakresie wysokorozdzielczej (subnanometrowej) charakteryzacji wglębnej urządzeń półprzewodnikowych. Kolejnym ciekawym przykładem uznania dla działalności naukowej Habilitanta jest współpraca z takimi instytucjami jak TopGaN Lasers, Unipress, Tyndall National Institute, PvcOMB Helmholtz-Zentrum berlin, Fraunhofer Institute for Integrated System and Devices Technology. Mam tutaj na myśli zastosowanie metody *a-crater-within-a-crater* do badania struktury urządzeń półprzewodnikowych wytwarzanych przez w/w instytucje.

Habilitant, stykając się z coraz to nowymi problemami naukowymi, nieustannie udoskonala swoją metodologię SIMS czego przykładami – jednymi z wielu – są: opracowanie metody tzw. *supercyklu* do rejestracji sygnału SIMS (H8), a także specjalnej procedury do analizy warstw heksagonalnego azotku boru z atomową rozdzielczością wglębną (H10).

Zgodnie z danymi zawartymi we wniosku, Habilitant wdrożył wiele dedykowanych procedur SIMS archiwizując je w formie bazy danych oraz stworzył program komputerowy do jej obsługi. Te procedury badawcze, chociaż dedykowane konkretnym materiałom i zagadnieniom naukowo-inżynierskim, jak również szerokie *know-how* Habilitanta w dziedzinie badań struktury powierzchni materiałów metodą SIMS stanowią bazę, na której można tworzyć nowe procedury pomiarowe SIMS dla rozwiązania innych zagadnień naukowych i inżynierskich.

Po uważnej lekturze treści recenzowanych publikacji jestem zdania, iż zaprezentowany w nich rozwój metodologii SIMS jak również wyniki badań z zakresu inżynierii materiałowej są istotne i ważne z poznawczego punktu widzenia. Świadczą one również o zdolnościach Habilitanta do samodzielnego rozwiązywania złożonych problemów naukowych i inżynierskich.

3. Ocena pozostałego dorobku naukowego i aktywności badawczej.

Analiza całokształtu działalności naukowej dr inż. Pawła Michałowskiego pozwala określić szereg obszarów zainteresowań badawczych Habilitanta mieszczących się w zakresie nauk inżynierijno-technicznych i w dziedzinie inżynierii materiałowa. Należą do nich:

- rozwój metody SIMS,
- inżynierii powierzchni materiałów półprzewodnikowych,
- problemy wytwarzania i charakteryzacji heterostruktur półprzewodnikowych,
- zagadnienia związane z wpływem domieszek i zanieczyszczeń na procesy wzrostu warstw półprzewodnikowych oraz ich własności fizyko-chemiczne.

Chciałbym w tym miejscu wyrazić stwierdzić, że skoncentrowanie uwagi naukowej Habilitanta głównie na materiałach półprzewodnikowych jednej metodzie badawczej (SIMS) uważam za zaletę, a nie wadę.

W okresie przed doktoratem Habilitant był współautorem 6 prac naukowych opublikowanych w czasopiśmie zagranicznych, z czego pierwszym autorem 1 artykułu. Habilitant wygłosił 3 prezentacje uczestnicząc w międzynarodowych konferencjach naukowych oraz w latach 2008-2010 był wykonawcą w 1 europejskim projekcie badawczym. Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora Habilitant nawiązał współpracę z 4 zagranicznymi jednostkami sektora gospodarczego.

Po doktoracie dr inż. Paweł Michałowski kontynuował tematykę podjętych wcześniejszych badań, jednak znacznie ją rozszerzając. Jest współautorem 41 publikacji naukowych, z czego pierwszym

autorem 17 prac. Habilitant uczestniczył w 17 konferencjach naukowych, gdzie wygłosił 11 referatów i zaprezentował 6 posterów. Realizował również badania w zakresie 9 projektów badawczych: był wykonawcą w 7 projektach i jest kierownikiem 2 trwających projektów. Wykonał 23 recenzje artykułów naukowych na zaproszenie renomowanych czasopism takich jak np.: *ACS Applied Materials & Interfaces*, *ACS Nano*, *Journal of Physics Condensed Matter*. Habilitant kontynuował współpracę naukową z sektorem gospodarczym: krajowym (2 firmy) i zagranicznym (5 firm). Współpraca ta zaowocowała 7 wdrożeniami technologicznymi jego procedur pomiarowych SIMS.

Przedstawiony przez Habilitanta dorobek naukowy wskazuje na nacisk jaki kładzie na współpracę międzynarodową i z sektorem gospodarczym.

Podstawowe dane bibliometryczne charakteryzujący całokształt dorobku naukowego dr inż. Pawła Michałowskiego są następujące:

- całkowity Impact Factor: 178.251
- całkowita liczba cytowań bez autocytowań: 210/224/264 (Web of Science/Scopus/Google Scholar)
- indeks Hirscha: 7/7/8 (Web of Science/Scopus/Google Scholar)
- całkowita liczba punktów MEiN: 4900

W świetle powyższych informacji stwierdzam, że całokształt dorobku naukowego Habilitanta należy uznać za wystarczający do ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżyneryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

4. Ocena osiągnięć dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę.

Dr inż. Paweł Michałowski może pochwalić się wyraźnym zaangażowaniem w działalność popularyzującą technikę SIMS. W latach 2016-2021 wygłosił 21 wykładów z czego 7 na zaproszenie zagranicznych gremiów.

Habilitant angażuje się w opiekę nad studentami w rolach: promotora pomocniczego i opiekuna praktyk studenckich. Z dokumentacji dołączonej do wniosku nie wynika by prowadził regularne (semestralne) wykłady czy ćwiczenia/laboratoria ze studentami, jednak w latach 2018-2021 wygłosił 4 wykłady dla studentów omawiające i wprowadzające w możliwości zastosowań metody Spektrometrii Mas Jonów Wtórych.

Habilitant miał swój udział w pracach komitetów organizacyjnych 2 konferencji naukowych: ICFSI-12 2009 oraz Graphen Week 2016.

5. Wniosek końcowy.

Pozytywnie oceniam dorobek naukowy dr inż. Pawła Michałowskiego przedstawiony do recenzji w postępowaniu habilitacyjnym. Dr inż. Paweł Michałowski w ciągu 6 lat od obrony pracy doktorskiej znacząco zwiększył swój dorobek naukowy – np. z 6 publikacji przed do 41 publikacji po doktoracie. Tym samym Habilitant zadbał o właściwe upowszechnienie swojej działalności naukowej, a ponadto położył znaczący nacisk na współpracę z sektorem gospodarczym i współpracę z zagranicznymi ośrodkami naukowymi.

W mojej opinii dr inż. Paweł Michałowski jest przygotowany do roli samodzielnego pracownika naukowego. Jego dorobek badawczy wraz z przedstawionym do recenzji osiągnięciem naukowym ujętym w cykl 16 publikacji świadczy o istotnym wkładzie w rozwój dyscypliny inżynieria materiałowa w zakresie rozwoju metodologii Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych, a także w obszarze badań zjawisk zachodzących w warstwie powierzchniowej materiałów i struktur półprzewodnikowych oraz technologii ich wytwarzania.

W konkluzji niniejszej recenzji stwierdzam, że dr inż. Paweł Michałowski spełnia wymagania kryteriów oceny dorobku naukowego osoby wnioskującej o nadanie stopnia doktora habilitowanego.

W związku z tym zwracam się do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej o przyznanie dr inż. Pawłowi Michałowskiemu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Dariusz Chudoba