



Warszawa, dn. 04.03.2022

**Recenzja
osiągnięć naukowo-badawczych,
dorobku dydaktycznego
i popularyzatorskiego oraz współpracy
międzynarodowej
dr. inż. Pawła Piotra MICHAŁOWSKIEGO
w związku z postępowaniem o nadanie
stopnia doktora habilitowanego**

1. Podstawa prawna wykonania recenzji

Niniejszą recenzję napisano na wniosek Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej z dnia 11.02.2021, a także na podstawie uchwały nr 167/II/2021 z dnia 17.12.2021 tejsze Rady o powołaniu komisji habilitacyjnej i recenzentów w postępowaniu habilitacyjnym Pana dr. inż. Pawła Piotra MICHAŁOWSKIEGO.

2. Ogólna charakterystyka Habilitanta

Dr inż. Paweł Piotr Michałowski już na wczesnym etapie kariery zdobywał doświadczenie międzynarodowe. Pracę magisterską wykonał i obronił w szwedzkim **Umeå University**, pod kierownictwem dr Thomas'a Wågberg'a (styczeń 2007). Co warte zauważenia, Habilitant prawie równolegle, bo w czerwcu 2008, obronił pracę magisterską na **Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu**, tym samym mając podwójne magisterium. Uzyskawszy tytuł magistra, Habilitant rozpoczął pracę w prestiżowym **Fraunhofer Center Nanoelektronische Technologien**, w Dreźnie, w Niemczech jako asystent w marcu 2007 i pracował tam do czerwca 2010. W lutym 2015 Habilitant obronił rozprawę doktorską pt. "Diffusion and structural changes in Al₁xSixO_y thin films investigated by Time of Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy" pod opieką dr. hab. Macieja Wiesnera na Wydziale Fizyki **Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu**.

Od kwietnia 2015 Dr inż. Paweł Piotr Michałowski pnie się po kolejnych szczeblach kariery w warszawskim **Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych (ITME)**, przemianowanym obecnie na **Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki**. Habilitant rozpoczął karierę w ITME jako adiunkt w kwietniu 2015, po czym już w czerwcu 2018 został zastępcą kierownika Laboratorium Badań Strukturalnych i Charakteryzacji Materiałów. Dalej, po dołączeniu ITME do Sieci Badawczej Łukasiewiczy, Habilitant awansował w styczniu 2020 na stanowisko kierownika Laboratorium Badań Strukturalnych i Charakteryzacji Materiałów. Po konsolidacji ITME i ITE (Instytut Technologii Elektronowej) w Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, Habilitant pracował najpierw, od października 2020 na stanowisku Kierownika Zakładu Badań Strukturalnych i Charakteryzacji Materiałów, po czym objął stanowisko Lidera Grupy Badawczej: Charakteryzacja Materiałów i Przyrządów.

Działalność i dorobek Habilitanta bezapelacyjnie wskazują, iż jest on wybitnym ekspertem w tematyce Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych (SIMS) i cała Jego kariera związana jest z udoskonalaniem i rozwojem metodyk opartych o SIMS dla zaawansowanych, nowatorskich materiałów i układów.

dr hab. Wojciech J. Stępniewski prof. WAT

Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa
NIP: 527-020-63-00, REGON: 012122900, www.wat.edu.pl

1 z 5

Ponadto **życiorys Habilitanta wskazuje na jego mobilność**, już na **wczesnym etapie kariery**, która owocuje szybkim pięciem się po szczeblach zawodowych w jednostce, w której obecnie pracuje.

3. Ocena osiągnięcia naukowego wskazanego w postępowaniu habilitacyjnym

Osiągnięcie naukowe Dr inż. Pawła Piotra Michałowskiego, pod wspólną nazwą: „*Charakteryzacja struktur półprzewodnikowych z nanometrową i subnanometrową rozdzielczością wgłębną przy użyciu metody Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych*” składa się z cyklu 16 prac opublikowanych w **recenzowanych, prestiżowych periodykach naukowych**, takich jak: Applied Physics Letters, Scientific Reports, Nanoscale, Nanotechnology (3), ACS Applied Materials & Interfaces, Physical Chemistry Chemical Physics (2), Journal of Analytical Atomic Spectrometry (4), Chemical Communications, Journal of Visualized Experiments, czy Measurement. Należy dodać, że we wszystkich publikacjach wchodzących w skład osiągnięcia naukowego wskazanego w postępowaniu habilitacyjnym dr inż. Paweł Piotr Michałowski jest pierwszym i korespondującym Autorem, co podkreśla **Jego wiodącą rolę** zarówno w planowaniu badań, ich zarządzaniem, jak i przygotowaniu manuskryptu i korespondencji z redaktorami i recenzentami. Ponadto, w dwóch artykułach typu komunikat (H13 i H14) Habilitant jest jedynym autorem publikacji, co również **potwierdza Jego samodzielność naukową**.

Cykl publikacji przedstawiony jako osiągnięcie naukowe w postępowaniu habilitacyjnym wskazuje, iż dr inż. Paweł Piotr Michałowski jest niekwestionowanym ekspertem w Spektroskopii Mas Jonów Wtórnych (SIMS). Nie tylko posługuje się On tą metodyką biegle, ale stale ją rozwija, tworząc dedykowane, do wielu specyficznych sytuacji, modyfikacje, przekraczając często standardowe granice oferowane przez metodykę, co wymaga nie tylko głębokiej wiedzy teoretycznej, ale również praktycznej i zmysłu konstruktorskiego.

W dalszej części recenzji Recenzent pozwoli sobie na przedstawienie, jego zdaniem, najbardziej interesujących i przełomowych efektów pracy naukowej Habilitanta. Przykładowo, Habilitant udoskonalił SIMS pod kątem uzyskiwania rzeczywistego stężenia pierwiastków w grafenie i nazwał tę metodykę GESIMS (Graphene Enhanced Secondary Ion Mass Spectrometry) [H2, H5]. W standardowym eksperymencie SIMS pojawiają się peaki od podwójnie zjonizowanych atomów pierwiastków, co wprowadza znaczący błąd systematyczny do wyników. Modyfikacja ta pozwoliła również na przesunięcie granicy wykrywalności poniżej 1 ppm dla zanieczyszczeń w badanych próbkach, co jest efektem bardziej niż imponującym. Jakość tej modyfikacji została doceniona przez szereg międzynarodowych partnerów Habilitanta w ramach programów Graphene Flagship, Core1, Core2 i Core2.

W opracowaniu została również opisana przełomowa w dziedzinie publikacja, w której Habilitant przedstawił profilowanie wgłębne układów AlInAs / InGaAs w kwantowym laserze kaskadowym, z dokładnością subnanometrową [H3]. Przy zwiększeniu rozdzielczości, jednocześnie, w stosunku do standardowych procedur, zwiększono pole powierzchni analizy z $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ do $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$. Dodatkowo, procedura ta pozwoliła na trójwymiarowe mapowanie pierwiastkowe. Metoda znalazła również zastosowanie komercyjne i stosowana jest w kontroli jakości niechłodzonych detektorów IR w firmie VIGO System. Zatem w tym punkcie, należy zwrócić uwagę na **szczególne oddziaływanie Habilitanta na lokalne środowisko gospodarcze w zakresie przemysłu wysokich technologii**.

W publikacji [H7] habilitant przedstawił nowatorską metodę pozwalającą na dokładną analizę układów warstwowych, często stosowanych w zaawansowanych urządzeniach, takich jak studnie kwantowe czy złącza tunelowe. Bardzo często, złożone i wymagające analizy jakości, układy materiałowe znajdują się pod warstwą innych materiałów, często grubych na wiele mikrometrów. W celu wiarygodnej analizy składu za pomocą SIMS, Habilitant opracował technikę „krater-w-kraterze”, obchodzącą to ograniczenie. Dzięki tej metodyce, warstwa, która nie jest przedmiotem analizy,

dr hab. Wojciech J. Stępniewski prof. WAT

Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

NIP: 527-020-63-00, REGON: 012122900, www.wat.edu.pl

2 z 5

poddawana jest ablacji, po czym już właściwa warstwa poddawana jest analizom. Metoda ta okazała się przełomowa i cieszy się już popularnością wśród zarówno lokalnych, jak i zagranicznych firm i instytucji. Należy tu wymienić chociaż tak uznane ośrodki jak Unipress, Tyndall National Institute, czy Helmholtz Zentrum Berlin.

Przełomową modyfikacją metodyki SIMS okazało się wprowadzenie tzw. supercykli. W standardowym podejściu, jednocześnie mierzone jest stężenie jednego jonu, zatem bombardowanie jonami próbki i jednoczesne mierzenie tylko jednego sygnału może dawać niewiarygodne wyniki, ze względu na degradację materiału (SIMS jest techniką niszczącą). Z tego też względu Habilitant zaproponował mierzenie sygnałów w bardzo krótkich czasach integrowania (0.2-0.3 s) co pozwala na krótkie oddziaływanie wiązki z próbką dla każdego pierwiastka tj. wyeliminowany został problem przesunięć czasowych dla różnych pierwiastków. Jest to poważny problem techniczny, który, przed propozycją Habilitanta, wprowadzał błędy do dokładnych, ilościowych analiz. [H8].

Ponadto, poza pracami nad rozwijaniem metodyki, Habilitant stosował swoje rozwiązania w szeregu analiz materiałowych. Przykładowo, dzięki SIMS wykazał, że jakość i typ podłoża ma znaczący wpływ na wzrost MoS₂ [H9]. MoS₂ wzrastając na podłożu grafen-SiC interkaluje pomiędzy SiC, a grafenem tj. rośnie pomiędzy warstwami podłoża. Dalej, dzięki statycznym pomiarom SIMS Habilitant dokonał analizy BN z atomową rozdzielczością, warstwa, po warstwie, co zostało docenione i wykorzystane przez redaktora czasopisma jako „cover story” w J. Anal. Atom. Spectrometry [H10]. Ponadto, w pracy [H11] za pomocą SIMS dokonano analizy tlenkowych zanieczyszczeń w GaN. Co ważne, ilość tlenu w próbkach była na poziomie 1-10 ppm. Ponadto, udowodniono, iż rozkład tlenu w próbkach jest niejednorodny – największe stężenie tlenu znajdowało się rdzeniach dyslokacji śrubowych i mieszanych. Obrazowanie trójwymiarowe z wykorzystaniem SIMS zastosowano również do analizy InGaN [H12]. W tym przypadku badano fluktuacje stężenia indu w studniach kwantowych.

Pomimo imponującej wartości merytorycznej autoreferatu, można dopatrzeć się drobnych mankamentów. Momentami forma autoreferatu jest dość oryginalna: pisanie w pierwszej osobie, a nie w stronie biernej, dwujęzyczność (rysunki opisane po angielsku w autoreferacie, w języku polskim), czy żargon (np. „koncentracja”, a nie „stężenie”, „nałożone”, a nie „osadzone” itd.). Muszę wspomnieć, iż w Krakowie znajduje się Uniwersytet Jagielloński, a nie Jagielloński (*Alma Mater* recenzenta; punkt 5.1). Przyszły profesor, samodzielny pracownik naukowy, winien w bardziej subtelny i wyszukany sposób władać ojczystą mową, a także bardziej pieczołowicie dopracowywać dokumenty rzutuące na swą przyszłą karierę naukową. Są to jednak didaskalia, nie mające wpływu na całościową, wysoką, ocenę osiągnięcia naukowego.

Dość niecodzienne, a wręcz karkołomne, jest wyjaśnienie, w ostatnim akapicie autoreferatu, dużego poziomu autocytacji (ponad 50%). Dobre osiągnięcia naukowe bronią się same. Niska ilość cytacji, bez autocytacji, wynika z faktu, że artykuły te zostały opublikowane stosunkowo niedawno, a także ze względu na niszowy charakter metodyki.

Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że przedstawione przez Habilitanta osiągnięcia naukowe spełnia wszystkie stawiane takim opracowaniom warunki. Zatem ocena Recenzenta jest pozytywna. Habilitant wykonywał badania zgodnie z ogólnie przyjętą sztuką, opublikował je, czym wniósł znaczący wkład w rozwój dyscypliny inżynieria materiałowa.

4. Ocena dorobku naukowego

Dr inż. Paweł Piotr Michałowski od roku 2015 związany jest z Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, który przemianowano na Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki. Pomimo tego, że po obronie doktoratu Habilitant pracował tylko w tym jednym Instytucie, udowodnił On na wiele wcześniejszym etapie kariery swoją mobilność: jedną z dwóch prac magisterskich wykonał w Umeå University, a także pracował ponad trzy lata jako asystent w Fraunhofer Center Nanoelektronische Technologien, w Dreźnie. Ponadto, **Habilitant**

dr hab. Wojciech J. Stępniewski prof. WAT

Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

NIP: 527-020-63-00, REGON: 012122900, www.wat.edu.pl

3 z 5

proceeds szeroko zakrojoną **współpracę krajową i międzynarodową** z tak **uznanymi** w świecie nauki **ośrodkami** jak: Osaka University, University of Western Australia, Wojskowa Akademia Techniczna, Politechnika Gdańska, Hasselt University, National Tsing Hua University, Korea Advanced Institute of Science and Technology, University of Manchester, Technische Universität Dresden, Uniwersytet Warszawski, Technical University Berlin, Polska Akademia Nauk, University of Kassel, Humboldt Universität Berlin, Tyndall National Institute, Aalborg University, State University of New Jersey, Politechnika Warszawska, Uniwersytet Wrocławski, Politechnika Wrocławska, Uniwersytet Jagielloński. W ramach tej szerokiej współpracy Habilitant opublikował, zgodnie z bazą Scopus (03.03.2022) 49 artykułów naukowych i 3 recenzowane komunikaty konferencyjne. Publikacje te **cytowane** były **379-krotnie**, a **współczynnik Hirsha** jest równy **11**. Jest to dobry wynik naukometryczny. Po usunięciu autocytowań wszystkich autorów liczby te spadają odpowiednio do **166 cytacji** i **H=6**. Ilość autocytowań na poziomie powyżej 50% może budzić zróżnicowane refleksje i w dalszej pracy gorąco rekomendowałbym Habilitantowi i Jego współpracownikom ograniczenie tej praktyki. Do wielu, własnych badań, w procesie publikowania, można się równie dobrze odnieść w „supporting information” i tam Recenzentom dość dobitnie i rzeczowo odpowiedzieć.

Habilitant był wykonawcą w siedmiu projektach. Należy zwrócić uwagę iż wiele z tych projektów to przedsięwzięcia najwyższego kalibru, jak projekty z cyklu Graphene Flagship w kilku odstępach. Przy tej okazji należy również wspomnieć o wpływie Habilitanta na środowisko gospodarcze. Pracował On w projektach z wieloma, również polskimi firmami, takimi jak Vigo System, czy Nano-Carbon,

14 wystąpień konferencyjnych i wykład typu **keynote** znaczą o wadze i odbiorze przez społeczność naukową badań prowadzonych przez Dr inż. P. Michałowskiego. Dość niecodzienne jest jednak zamieszczenie wykładu w autoreferacie, który Habilitant dopiero wygłosi (03.2022 Ultra low energy SIMS depth profiling of 2D materials, FCMN 2022, Monterey, CA, USA, wykład zaproszony). Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora, Habilitant miał również wkład w przygotowaniu Graphene Week w Warszawie.

5. Ocena dorobku dydaktycznego i organizacyjnego

Pomimo pracy w instytucji o profilu czysto naukowym, Habilitant znalazł możliwość by prowadzić zajęcia dla studentów. Od roku 2018 prowadzi On wykład pt. „Podstawy oraz możliwości Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych (SIMS)” dla studentów Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Prowadził On także „Secondary Ion Mass Spectrometry characterization of thin films with nanometer and subnanometer depth resolution” w ramach Courses on Advanced Topics 7, CEITEC w Brnie, w Czechach. Ponadto, w ramach działalności popularyzatorskiej, Habilitant przeprowadził ponad 20 wykładów nt. techniki SIMS w polskich i zagranicznych ośrodkach.

Habilitant ma również swój wkład w mentoring następnego pokolenia naukowców: był promotorem pomocniczym pracy magisterskiej wykonanej na Uniwersytecie Warszawskim i był opiekunem praktyk studenckich w Sieci Badawczej Łukasiewicz.

Habilitant recenzował również publikacje w uznanych periodykach o zasięgu międzynarodowym, w tym dla ACS Appl. Mater. Interfaces, ACS Nano, Surf. Interface Analysis itd. W sumie, po uzyskaniu stopnia doktora, w liczbie 23.

Za swoją działalność naukową Dr inż. Paweł P. Michałowski został nagrodzony Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla Młodych i Wybitnych Naukowców, a także jest laureatem Polskiej Nagrody Inteligentnego Rozwoju w kategorii Naukowiec Przyszłości.

Podsumowawszy szeroką współpracę międzynarodową i krajową, wpływ działalności naukowej na przedsiębiorstwa wysokiej technologii, doświadczenie międzynarodowe, publikacje w periodykach o wysokim współczynniku wpływu (impact factor) z pełnym przekonaniem uznaję całokształt pracy Habilitanta za bardzo dobry.

6. Wnioski końcowe

Na podstawie osiągnięcia naukowego zatytułowanego „Charakteryzacja struktur półprzewodnikowych z nanometrową i subnanometrową rozdzielczością wgłębną przy użyciu metody Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych”, dorobku naukowego, bogatej współpracy z ośrodkami naukowymi w Polsce i za granicą, stwierdzam, iż dr inż. Paweł Piotr Michałowski spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego, określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym.

W związku z powyższym, wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa (Politechnika Warszawska) o nadanie dr. inż. Pawłowi Piotrowi Michałowskiemu stopnia doktora habilitowanego.

Z Poważaniem



(dr hab. Wojciech Stępniewski prof. WAT)