Prof. dr hab. inż. Wojciech Sadowski
Instytut Nanotechnologii i Inżynierii Materiałowej
Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej
Politechnika Gdańska
wsadowski@pg.edu.pl

Recenzja całokształtu dorobku naukowego oraz rozprawy habilitacyjnej

dr inż. Mateusza Wośko

pt.: „Opracowanie technologii zaawansowanych heterostruktur AlGaN/GaN do zastosowań w mikroelektronice".

Informacje ogólne oraz ocena dorobku naukowego.

Dr inż. Mateusz Wośko jest absolwentem Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, kierunek Elektronika i Telekomunikacja, gdzie w 2004 roku obronił pracę magisterską pt: „Opracowanie technologii osadzania warstw GaN na podłożach krzemowych" pod opieką prof. dr hab. inż. Reginy Paszkiewicz. Po obronie pracy magisterskiej rozpoczął studia doktoranckie na Politechnice Wrocławskiej, gdzie w 2009 roku uzyskał stopień doktora nauk technicznych na podstawie rozprawy pt.: "Opracowanie konstrukcji i technologii fotodetektorów z zastosowaniem nanostruktur półprzewodników AIIIBV o ciągłej zmianie składu", wykonanej pod kierunkiem promotor prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz - Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki. Należy odnotować, że praca ta została wyróżniona przez Radę Wydziału Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki oraz nagrodzona przez Polskie Towarzystwo Wzrostu Kryształów i Polskie Towarzystwo Próżniowe. W 2009 roku dr inż. Mateusz Wośko został zatrudniony w tej ostatniej jednostce na stanowisku asystenta (w roku 2010 jako adiunkt naukowy) i od 2013 r. do chwili obecnej pracuje na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego.

Tematyka epitaksji azotków trzeciej grupy układu okresowego Habilitant zajmuje się od 2004 r., kiedy rozpoczął realizację pracy magisterskiej i później doktorskiej. Ówczesne jego prace badawcze skoncentrowane były głównie na wykorzystaniu tzw. alternatywnych podłoży do epitaksji azotku galu, a także doskonaleniu technik osadzania na szafirze oraz węgliku krzemu. Po obronie doktoratu (w 2009 r.) był odpowiedzialny za instalacje oraz uruchomienie nowego stanowiska epitaksjalnego AIXTRON FT CCS 3x2" w Laboratorium Mikroelektroniki Politechniki Wrocławskiej, która otworzyła nowe perspektywy badań, głównie nad strukturami niskowymiarowymi, a także intensyfikowała dotychczas prowadzone badania nad heterostrukturami AlGaN/GaN typu HEMT.

Swoja aktywność naukową oprócz macierzystej Uczelni dr inż. Mateusz Wośko realizował we współpracy z licznymi ośrodkami krajowymi oraz zagranicznymi, m.in. Slovak University of Technology (Słowacja), Universidad de Malaga (Hiszpania), Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki w Warszawie (dawniej Siec Badawcza Łukasiewicz -

Instytut Technologii Elektronowej w Warszawie), Wydział Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej.

Opinia o przedstawionych do habilitacji publikacjach naukowych

Osiągnieciem naukowym będącym podstawą ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego jest cykl 15-tu prac opublikowanych w czasopismach o zasięgu międzynarodowym, zatytułowany: **„Opracowanie technologii zaawansowanych heterostruktur AlGaN/GaN do zastosowań w mikroelektronice"**, który powstał w wyniku prowadzonych przez niego badań od 2009 r.

Stosowanie epitaksji do wytwarzania struktur funkcjonalnych na bazie azotków trzeciej grupy układu okresowego wymaga właściwego wyboru podłoży, na których prowadzona jest krystalizacja, uwzględniających szereg czynników, takich jak: parametry podłoża, jakość podłoża, kompatybilność technologiczna, parametry elektryczne, termiczne oraz optyczne właściwości podłoża.

Prace naukowe, realizowane przez dr inż. Mateusza Wośko w tematyce habilitacyjnej dotyczyły czterech głównych obszarów badawczych:

1. Dobór warstwy zarodziowej i wpływ podłoża na epitaksję GaN metodą MOVPE.

2. Optymalizacja warunków osadzania warstw buforowych heterostruktur AlGaN/GaN.

3. Badanie wpływu konstrukcji bariery w heterostrukturach AlGaN/GaN na parametry elektryczne dwuwymiarowego gazu elektronowego.

4. Epitaksja selektywna oraz epitaksja wieloetapowa heterostruktur AlGaN/GaN.

W wyniku prowadzonych badań w powyższych obszarach badawczych Habilitant uzyskał szereg ważnych wyników. **Do najważniejszych osiągnieć można zaliczyć:**

– **w zakresie obszaru 1**: przeprowadzenie analizy wpływu zarodziowania azotków trzeciej grupy układu okresowego na niedopasowanych strukturalnie podłożach Al_2O_3 oraz Si. Dr M. Wośko opracował nowatorską metodę pomiaru grubości subnanometrowych warstw zarodziowych GaN z wykorzystaniem ablacji laserowej oraz profilowania mikroskopem sił atomowych, określił optymalne warunki osadzania i wygrzewania (rekrystalizacji) niskotemperaturowych warstw zarodziowych do epitaksji GaN i heterostruktur AlGaN/GaN na podłozach szafirowych. Zaproponował on też koncepcję zastosowania nanomaski, osadzanej na warstwie zarodziowej, do faworyzacji wzrostu wyspowego, w początkowych fazach epitaksji GaN/Si, opisał proces osadzania półpolarnego oraz niepolarnego azotku galu na podłożach krzemowych o orientacji (112) oraz (115), wykazując wpływ temperatury osadzania i grubości warstwy zarodziowej AlN. Habilitant opracował również warunki zarodziowania warstw azotkowych na podłożach Al_2O_3, Si oraz 4H-SiC, umożliwiających osadzanie heterostruktur AlGaN/GaN do zastosowania w tranzystorach typu HEMT oraz zaproponował konstrukcję warstw zarodziowych i buforowych do osadzania heterostruktur AlGaN/GaN na różnych podłożach heteroepitaksjalnych.

– **w zakresie obszaru 2**: analizę wpływu warunków osadzania bufora GaN na właściwości dwuwymiarowego gazu elektronowego, wprowadzając struktury testowe na podłożach szafirowych oraz krzemowych metoda MOVPE. Dr inż. M. Wośko opracował też metody osadzania struktur azotkowych grubszych niż 1 μm na podłożach Si o orientacji (001) z wykorzystaniem niskotemperaturowych przekładek AlN, w wyniku przeprowadzonych badań określił optymalne warunki wzrostu bufora umożliwiającego wzrost heterostruktury o parametrach 2DEG zbliżonych do tych otrzymywanych na podłożach szafirowych.

– **w zakresie obszaru 3**: wykonał symulacje komputerowe rozkładu elektronów dwuwymiarowego gazu elektronowego w heterozłaczu AlGaN/GaN oraz AlGaN/AlN/GaN oraz okreslił optymalną grubość warstwy AlN, dla zadanego składu i grubości bariery AlGaN, w przypadku której ruchliwość dwuwymiarowego gazu elektronowego jest największa. Dr inż. M. Wośko dokonał wszechstronnej walidacji wpływu konstrukcji, metodyki osadzania bariery AlGaN na parametry dwuwymiarowego gazu elektronowego oraz wytworzył heterostruktury AlGaN/GaN na podłożach szafirowych i krzemowych, z quasibarierą w postaci supersieci AlN/GaN.

– **w zakresie obszaru 4:** opracował metody mycia międzyprocesowego po trawieniu reaktywnym w plazmie chlorowej azotku galu przed epitaksja heterostruktury AlGaN/GaN i wykazał, że brak odpowiedniego przygotowania powierzchni GaN po procesie RIE skutkuje późniejszym wzrostem polikrystalicznego materiału. Habilitant opracował metody wzrostu warstw materiałów AIIIN na trawionym w plazmie chlorowej azotku galu bez efektu pasożytniczego autodomieszkowania i udowodnił, że wydłużone wygrzewanie trawionej powierzchni GaN w mieszaninie H_2 i NH_3 prowadzi do desorpcji chloru z powierzchni GaN i zapobiega występowaniu warstwy przewodzącej. Warto dodać, że opracowana przez dr M. Wośko metoda jest oryginalna i nie została wcześniej zaproponowana w literaturze przedmiotu.

Przeprowadzone przez Habilitanta obszerne prace teoretyczne i eksperymentalne nad epitaksją selektywną z wykorzystaniem maski dielektrycznej o dowolnej konfiguracji pozwoliły m.in. na opracowanie metody wyznaczania efektywnej drogi dyfuzji adatomów i posłużyły do stworzenia rozbudowanego modelu uwzględniającego dyfuzję w fazie gazowej oraz dyfuzję powierzchniową prekursorów w procesie osadzania selektywnego. Na podstawie tego modelu możliwe jest opracowane oprogramowania umożliwiające symulacje wzrostu epitaksjalnego metoda MOVPE dla zadanych warunków procesu i konfiguracji maski.

W podsumowaniu tej części charakterystyki naukowej Habilitanta chciałbym wskazać, że przedstawiona do recenzji rozprawa habilitacyjna jest spójnym tematycznie cyklem 15 publikacji składających się na osiągnięcie naukowe zatytułowane „Opracowanie technologii zaawansowanych heterostruktur AlGaN/GaN do zastosowań w mikroelektronice". Ten tematyczny cykl prac został omówiony w polskojęzycznym autoreferacie będącym częścią dokumentacji postępowania habilitacyjnego. **Prace te ukazały się w renomowanych czasopismach specjalistycznych**, w tym Journal of Electrical Engineering (IF: 0,378), Optica Applicata (IF 2019: 0,673), Cryst.Eng.Comm. (IF: 3,474), Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films (IF: 1,724), Superlattices and Microstructures (IF: 2,123), Crystal Research and Technology (IF 2020: 1,639), Journal of Crystal Growth

(IF: 1,462), Crystal Research and Technology (IF: 1,000), Journal of Materials Science: Materials in Electronics (IF 2019: 2,20), Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics (IF: 0,810), Physica Status Solidi (B) Basic Research (IF: 1,522), Materials Science in Semiconductor Processing (IF 2019: 3,085), Electronics (IF 2019: 2,412).

Wszystkie publikacje (15) stanowiące podstawę rozprawy habilitacyjnej mają charakter wieloautorski. Należy jednak podkreślić, że dr. Mateusz Wośko jest pierwszym autorem aż w 9 pracach. Dołączone do rozprawy kompletne oświadczenia współautorów tych prac nie pozostawiają też wątpliwości odnośnie wiodącej lub współwiodącej roli Habilitanta w formułowaniu celów badawczych, znaczącym udziale w badaniach eksperymentalnych i interpretacji otrzymanych wyników oraz przygotowaniu publikacji. W zależności od publikacji oświadczenia współautorów zawierają stwierdzenia o współudziale w formułowaniu koncepcji badawczej, przygotowaniu materiałów i ich charakteryzacji z zastosowaniem różnorodnych technik, obliczeń, interpretacji wyników pomiarowych oraz redagowaniu publikacji.

Pełen dorobek naukowy Dr inż. Mateusza Wośko obejmuje 46 publikacji indeksowanych w Journal of Citation Reports. Wg stanu na dzień 24 listopada 2021r., sumaryczny Impact Factor jego publikacji naukowych według tej listy wynosi 52,193, a całkowita liczba cytowań wg bazy Scopus to 214, bez uwzględniania autocytowań - 166. Indeks Hirscha moich publikacji wynosi 8. Na jego dorobek naukowy składają się prace opublikowane w wielu prestiżowych czasopismach naukowych.

Prezentowane przez Habilitanta wyniki w znaczącej części zostały wykonane w grupie badawczej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Reginy Paszkiewicz – wybitnego eksperta w zakresie technologii elektronowej, półprzewodnikowych, cienkowarstwowych struktur funkcjonalnych, co dodatkowo podkreśla naukowe i aplikacyjne walory wyników i perspektywy ich wykorzystania.

Ocena dorobku organizacyjnego i dydaktycznego.

Chciałbym również odnotować znaczące zaangażowanie i osiągnięcia Habilitanta w działalności dydaktyczno-organizacyjnej. Dr Mateusz Wośko był/jest promotorem pomocniczym w czterech przewodach doktorskich, byłem promotorem 3 prac magisterskich, 12 prac inżynierskich. Prowadził on też różnorodne zajęcia dydaktyczne (wykłady, laboratoria, projekty) dla studentów pierwszego i drugiego stopnia studiów z zakresu elektroniki, mechatroniki, telekomunikacji oraz informatyki, a także opracował materiały dydaktyczne do czesci z tych zajec, m.in.: Przyrządy półprzewodnikowe; Elementy i układy elektroniczne; Elektronika; Electronics (wykład w języku angielskim); Podstawy technik wytwarzania; Mikroelektronika; Technologie opto- i mikroelektroniczne; Światłowody; Urządzenia peryferyjne systemów komputerowych i in. W latach 2006 – 2009 dr inż. Mateusz Wośko był członkiem Stowarzyszenia Naukowego Studentów „Optoelektronika i Mikrosystemy" oraz sekcji studenckiej IEEE na Politechnice Wrocławskiej, a od 2013 roku jest członkiem Rady Młodych Centrum Materiałów Zaawansowanych i Nanotechnologii Politechniki Wrocławskiej. Od rozpoczęcia studiów doktoranckich na Politechnice

MS

Wrocławskiej dr inż. Mateusz Wośko włączył się w działalność popularyzującą naukę, m.in. przez organizacje zajęć dla studentów wizytujących uczelnię w ramach programu Erasmus, uczestniczył w kołach naukowych oraz na festiwalach nauki, np. Dolnoslaski Festiwal Nauki. Był też członkiem komitetów organizacyjnych kilku konferencji i seminariów: Seminarium Beneficjentów Programów TECHNO i TECHNE 2004, X Seminarium "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe", I Krajowej Konferencji Nanotechnologii, XIII Seminarium "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe", Szklarska-Poręba, XIV Seminarium "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe", Szklarska-Poręba, IX Krajowa Konferencja Nanotechnologii, 1- 3.07.2019.

Należy podkreślić również znaczący udział dr inż. Mateusza Wośko w realizacji 11 projektów naukowo-badawczo-wdrożeniowych (NCN, NCBR, POIG, projekty zamawiane MNiSzW) prowadzonych na Wydziale Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki, a w 5-ciu z nich był on głównym wykonawcą.

Wnioski końcowe

Przedstawione osiągnięcia naukowo-badawcze dr inż. Mateusza Wośko w postaci jednotematycznego cyklu publikacji **„Opracowanie technologii zaawansowanych heterostruktur AlGaN/GaN do zastosowań w mikroelektronice"** dowodzą, że Habilitant wypracował w swojej działalności naukowej wyodrębnioną i spójną tematykę badawczą stanowiącą istotny, oryginalny i twórczy wkład w rozwój dyscypliny. Tematyka publikacji przedstawionych w cyklu habilitacyjnym wpisuje się doskonale w aktualne trendy i wyzwania współczesnej fizyki materiałów, nanotechnologii, elektroniki i stanowią znaczny wkład w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika. Oceniając bardzo wysoko samą rozprawę habilitacyjną oraz całokształt dokonań naukowych, dydaktycznych i organizacyjnych, jestem głęboko przekonany, że Habilitant jest w pełni przygotowany do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W moim głębokim przekonaniu uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa habilitacyjna spełnia wszystkie warunki określone art. 219 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j.: Dz.U. z 2021 r. poz. 478). W przedmiotowym postępowaniu habilitacyjnym wymienione warunki zostały spełnione. Kandydat przedstawił cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych, które w roku opublikowania artykułu w ostatecznej formie były ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. b.

Jednoznacznie **pozytywnie oceniam** wskazane osiągnięcia naukowe dr inż. Mateusza Wośko do nadania stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie **automatyka, elektronika i elektrotechnika** i wnioskuję o dopuszczenie do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

Wojciech Sadowski

Gdańsk, 1.08.2022