*Szczecin, 04.08.2022*

*Prof. dr hab. Ewa Weinert-Rączka*
*Wydział Elektryczny*
*Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny*
*w Szczecinie*

**Recenzja**

Osiągnięć naukowych oraz dorobku zawodowego dr inż. Mateusza Wośko w związku z postępowaniem w sprawie nadania stopnia naukowego doktora habilitowanego

## Podstawa wykonania recenzji

Niniejsza recenzja została wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej zawarte w piśmie z dnia 31.05.2022, zgodnie z uchwałą z dnia 16 maja 2022 r. w sprawie powołania komisji habilitacyjnej w postępowaniu habilitacyjnym dr inż. Mateusza Wośko.

## 1. Informacje ogólne

Dr inż. Mateusz Wośko ukończył w roku 2004 studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, na kierunku Elektronika i Telekomunikacja, ze specjalnością Optoelektronika i technika światłowodowa. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2009 na Wydziale Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki przedstawiając wyróżnioną rozprawę doktorską pt. „*Opracowanie konstrukcji i technologii fotodetektorów z zastosowaniem nanostruktur półprzewodników AIIIBV o ciągłej zmianie składu*". Swoje życie zawodowe związał również z Wydziałem Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki, na którym pracuje od roku 2009 do chwili obecnej.

## 2. Ocena osiągniecia naukowego

Jako osiągniecie naukowe będące podstawą ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego Wnioskodawca wskazał cykl 15 publikacji pod wspólnym tytułem **„Opracowanie technologii zaawansowanych heterostruktur AlGaN/GaN do zastosowań w mikroelektronice"**. Tytuł cyklu dobrze oddaje treść objętych nim publikacji, a przedstawione osiągnięcie naukowe zawiera się w obszarze poszukiwania nowych rozwiązań umożliwiających wytwarzanie heterostruktur półprzewodnikowych o parametrach zoptymalizowanych pod kątem wybranych zastosowań w mikroelektronice.

Przedmiotem badań są struktury półprzewodnikowe zawierające heterozłącze AlGaN/GaN, na którym tworzy się bardzo wąska studnia potencjału ograniczająca ruch elektronów do dwóch wymiarów. Rejon, w którym powstaje dwuwymiarowy gaz elektronowy nie musi być domieszkowany, co umożliwia uzyskiwanie bardzo dużych ruchliwości elektronów. Struktury takie są od kilkunastu lat wykorzystywane do produkcji tranzystorów o wysokiej ruchliwości nośników, w których dwuwymiarowy gaz elektronowy spełnia funkcję kanału przewodzącego. Trudna technologia wytwarzania powoduje, że możliwości heterozłączy AlGaN/GaN ciągle nie są w pełni poznane i wykorzystane, i że są one tematem intensywnych badań prowadzonych w wielu ośrodkach na świecie. Każdego roku ukazują się publikacje przedstawiające nowe metody i rozwiązania techniczne pozwalające na wytwarzanie tańszych i lepiej dopasowanych do potrzeb elektroniki i optoelektroniki heterostruktur na bazie azotków. Tematyka prac prowadzonych przez Habilitanta jest zatem aktualna i ważna, zarówno z punktu widzenia badań naukowych jak i zastosowań praktycznych.

W artykułach wchodzących w skład osiągnięcia naukowego analizowane są cztery obszary badawcze, związane z projektowaniem i wytwarzaniem heterostruktur AlGaN/GaN metodą epitaksji z fazy gazowej z wykorzystaniem związków metaloorganicznych (MOVPE).

- Pierwszy obszar dotyczy doboru rodzaju i parametrów warstwy zarodziowej umożliwiającej osadzanie azotku galu na niedopasowanych strukturalnie podłożach,
- drugi optymalizacji sposobu osadzania buforowych warstw azotku galu,
- trzeci badania wpływu struktury bariery zawierającej AlGaN na parametry gazu elektronowego,
- a czwarty optymalizacji warunków epitaksji selektywnej oraz epitaksji wieloetapowej stosowanych przy produkcji urządzeń wykorzystujących heterostruktury AlGaN/GaN.

Wszystkie obszary łączy wspólny cel opracowania metody skutecznego wytwarzania heterostruktur AlGaN/GaN osadzonych na podłożach niedopasowanych strukturalnie, ale dostępnych w większych rozmiarach i istotnie tańszych, niż monokrystaliczny azotek galu. Projektowane i wytwarzane elementy optymalizowane były głównie pod kątem jakości struktury krystalicznej oraz parametrów dwuwymiarowego gazu elektronowego powstającego na złączu AlGaN/GaN.

Przedstawione badania obejmują prace projektowe, analizy numeryczne, wytwarzanie heterostruktur i kontrolę ich właściwości z wykorzystaniem licznych metod pomiarowych, takich jak:

- pomiary reflektometryczne prowadzone podczas osadzania warstw,
- skanowanie powierzchni mikroskopem elektronowym (SEM) i mikroskopem sił atomowych (AFM) oraz badanie profilometrem optycznym,
- pomiary jednorodności rezystancji powierzchniowej metodą spektroskopii obiciowej,
- badanie nachylenia powierzchni krystalitów metodami dyfrakcji rentgenowskiej,
- pomiary grubości warstwy zarodziowej przez badanie głębokości rowków wytworzonych metodą ablacji laserowej,
- charakteryzacja struktury krystalicznej metodą wysokorozdzielczej dyfrakcji rentgenowskiej,
- pomiary naprężeń za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej i spektroskopii mikro-Ramanowskiej,
- określanie składu i szacowanie jakości osadzonego materiału metodą fotoluminescencji,
- obrazowanie metodą spektroskopii masowej jonów wtórnych z wykorzystaniem czasu przelotu, ToF-SIMS (ang. Time of Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy),
- wyznaczanie ruchliwości i koncentracji elektronów metodą spektroskopii impedancyjnej,
- wyznaczanie ruchliwości i koncentracji gazu elektronowego metodą Halla.

Wymienione badania, do których dochodziły prace związane z selektywnym wytrawianiem próbek musiały być prowadzone przez wielu wykonawców. Jest więc w pełni uzasadnione, że wchodzące w skład cyklu publikacje mają po kilku autorów. Udział Habilitanta w tych pracach, obejmujący opracowywanie koncepcji, projektowanie i wytwarzanie struktur, prowadzenie niektórych spośród badań jakości oraz interpretację wyników pomiarów jest dobrze określony i opisany we wniosku. Za każdym razem miał on duży i ważny wkład w pracę zespołu. W większości publikacji jest autorem, a w 6 przypadkach współautorem koncepcji badań. Był również redaktorem tekstu większości prac. Oprócz oświadczeń współautorów jego

rolę w badaniach potwierdza fakt, że w dziewięciu na 15 publikacji jest pierwszym autorem. W pozostałych sześciu pracach pierwszymi autorami są doktoranci, w których przewodzie Habilitant jest, lub był promotorem pomocniczym.

Do najważniejszych osiągnieć Habilitanta związanych z optymalizacją warstwy zarodziowej zaliczyć można:

- określenie optymalnych warunków osadzania i wygrzewania warstw zarodziowych przy epitaksji na podłożach szafirowych,
- sprawdzenie wpływu różnych warunków osadzania warstw zarodziowych na podłożach krzemowych na jakość heterostruktur,
- zastosowanie osadzanej na warstwie zarodziowej nanomaski, która wspiera rozrost wyspowy GaN na podłożu krzemowym,
- osadzenie półpolarnego oraz niepolarnego azotku galu na podłożach krzemowych o orientacji (112) i (115) oraz zbadanie wpływu temperatury osadzania i grubości warstw na jego orientację [5],
- porównanie właściwości zoptymalizowanych heterostruktur AlGaN/GaN osadzonych na podłożach szafirowym, krzemowym i z węgliku krzemu [6],
- wytworzenie na tych podłożach heterostruktur tranzystorowych o wysokiej ruchliwości elektronów.

Do najważniejszych osiągnieć związanych z optymalizacją osadzania warstw buforowych azotku galu można zaliczyć:

- analizę wpływu warunków osadzania bufora na właściwości gazu elektronowego dla struktur na podłożach szafirowych oraz krzemowych,
- opracowanie metody osadzania na podłożach krzemowych struktur GaN o grubości powyżej 1 μm z wykorzystaniem cienkich przekładek z niskotemperaturowego azotku glinu (LT-AlN) [8],
- analizę wpływu przekładek LT-AlN na jakość powierzchni próbek oraz wielkość naprężeń [9],
- określenie warunków wzrostu bufora, które umożliwiają wytworzenie na krzemie heterostruktury o parametrach gazu elektronowego zbliżonych do uzyskiwanych dla podłoży szafirowych.

Spośród osiągnieć Habilitanta w związanych z doborem parametrów bariery AlGaN warto wymienić:

- przeprowadzenie analizy wpływu nanometrowej warstwy przekładkowej z azotku glinu umieszczonej w heterostrukturze AlGaN/GaN na parametry gazu elektronowego [11], w tym wykonanie symulacji komputerowych rozkładu

elektronów w heterozłączu z przekładką i bez oraz wytworzenie i przebadanie heterostruktur z warstwami przekładkowymi o różnej grubości,
- zbadanie wpływu składu molowego i sposobu osadzania bariery AlGaN na parametry gazu elektronowego [12],
- sprawdzenie wpływu płukania reaktora pomiędzy osadzaniem kolejnych warstw na jakość struktur,
- wytworzenie heterostruktur na podłożach szafirowych i krzemowych, z barierami w postaci supersieci składającej się z 6 par AlN/GaN [13], zbadanie ich parametrów elektrycznych i optycznych, określenie ograniczeń związanych z dyfundowaniem atomów i tworzeniem się obszarów stopowych.

Warto podkreślić, że Habilitant jako pierwszy zaprezentował heterostruktury z barierą w postaci supersieci AlN/GaN osadzone na podłożu krzemowym.

Do najważniejszych osiągnięć w zakresie epitaksji wieloetapowej i epitaksji selektywnej należy zaliczyć:

- opracowanie metody mycia międzyprocesowego (po trawieniu warstwy azotku galu, a przed epitaksją heterostruktury), która znacząco poprawia zwilżalność wytrawionej powierzchni i ułatwia wzrost następnej warstwy.
- opracowanie metody zmniejszania koncentracji chloru, zaabsorbowanego w procesie wytrawiania, przez wydłużone wygrzewanie w mieszaninie wodoru z amoniakiem,
- opracowanie metody kompensacji chloru atomami węgla, pochodzącymi z prekursorów stosowanych w czasie epitaksji warstwy LT-GaN na wytrawionej powierzchni,
- przeprowadzenie badań epitaksji selektywnej z wykorzystaniem maski dielektrycznej, w tym opracowanie metody wyznaczania efektywnej drogi dyfuzji atomów do obszarów okien w masce.

**Podsumowując**, warto zauważyć, że przedstawione w cyklu publikacji wyniki badań obejmują optymalizację wszystkich etapów epitaksji badanych heterostruktur. Zwraca uwagę duże doświadczenie autora w projektowaniu i wytwarzaniu próbek oraz bardzo szeroki zakres metod stosowanych do oceny ich właściwości. Na podkreślenie zasługuje stosowanie przez Habilitanta zarówno zaawansowanych narzędzi pomiarowych jak i metod autorskich, takich jak pomiar grubości warstwy zarodziowej z wykorzystaniem ablacji laserowej i profilowania mikroskopem sił atomowych.

Sam opis osiągnięcia naukowego dr Wośko został przygotowany w jasny i przemyślany sposób. Tekst posiada dobrą strukturę, która daje wrażenie ładu

i pokazuje myśl przewodnią autora. Ocenę ułatwia podział na cztery obszary badawcze i wyraźne połączenie poszczególnych fragmentów tekstu z odpowiadającymi im publikacjami oraz osobne wypunktowanie wkładu autora w uzyskane rezultaty.

O wysokim poziomie merytorycznym cyklu świadczy fakt, że prawie wszystkie prace zostały opublikowane w czasopismach o wysokiej, międzynarodowej renomie. Łączna punktacja Impact Factor prac wchodzących w skład cyklu wynosi ponad 24 punkty, co w mojej ocenie jest wskaźnikiem na dobrym poziomie, szczególnie, że w większości prac Habilitant jest pierwszym autorem, opracował założenia, zaprojektował i wytworzył heterostruktury, przeprowadził analizę wyników charakteryzacji strukturalnej, optycznej i elektrycznej i zredagował tekst publikacji.

**Cykl publikacji wskazany jako główne osiągnięcie naukowe jest jednorodny, spójny i stanowi przykład przemyślanej i konsekwentnej drogi naukowej**. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia świadczą o umiejętności precyzyjnego planowania, prowadzenia oraz przedstawiania wyników badań. Ich mocną stroną jest skuteczna współpraca z osobami wykonującym różnorodne, zaawansowane badania struktury oraz właściwości elektrycznych i optycznych próbek. Tematyka badań dr Wośko wiąże się z realizacją projektów badawczych. Szczególnie dotyczy to realizowanego w latach 2015-2018 projektu NCBR, zatytułowanego „Technologia struktur tranzystorowych AlGaN/GaN HEMT osadzonych na podłożach krzemowych", którego Habilitant był kierownikiem.

## 3. Ocena działalności naukowej, dydaktycznej i organizacyjnej

### Aktywność naukowa

Poza cyklem 15 publikacji wskazanych jako osiągnięcie naukowe, doktor Wośko był, w okresie po obronie pracy doktorskiej, współautorem trzech rozdziałów w monografiach, 16 artykułów w czasopismach oraz 27 prezentacji na konferencjach i jednego zgłoszenia patentowego. Artykuły w większości ukazały się w wysoko punktowanych czasopismach, a ich łączna punktacja Impact Factor wynosi ponad 21 punktów (przy średnio 5 autorach).

Sumaryczny Impact Factor wszystkich prac Habilitanta opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora to 45,563 punkty. Liczba cytowań jego prac wynosi 195 według bazy Scopus (bez autocytowań 158) i 130 według bazy Web of Science (bez autocytowań

92). Wartość Indeksu Hirscha w momencie przygotowywania wniosku wynosiła 8 według bazy Scopus i 7 według bazy Web of Science.

Ważna część aktywności naukowej dr Wośko dotyczy projektów badawczych. Po uzyskaniu stopnia doktora brał udział w realizacji pięciu projektów badawczych jako główny wykonawca oraz dwóch jako wykonawca i kierował realizacją jednego projektu NCBR. Brał również udział w realizacji czterech projektów w ramach programu współpracy polsko - słowackiej. O intensywności współpracy z partnerem w tych projektach świadczy 12 wspólnych publikacji, z czego cztery ukazały się po uzyskaniu przez niego stopnia doktora.

Współpraca Habilitanta z polskimi i zagranicznymi zespołami badawczymi nie ograniczała się do tych projektów. Po uzyskaniu stopnie doktora odbył trzy jednotygodniowe wizyty lub staże naukowe, a w autoreferacie wymienia cztery ośrodki naukowe z którymi współpracował. Miarą wpływu tej współpracy na jego dorobek naukowy jest 15 artykułów z udziałem przedstawicieli innych ośrodków, z czego 14 jest indeksowanych na Liście Filadelfijskiej.

Prace dr Wośko były prezentowane na konferencjach krajowych i międzynarodowych. Po uzyskaniu stopnia doktora wygłosił dwa wykłady zaproszone i 25 referatów oraz trzy wykłady plenarne na współorganizowanych przez Politechnikę Wrocławską cyklicznych warsztatach Interregional Workshop on Advanced Nanomaterials.
Uzupełnieniem własnej działalności naukowej jest działalność recenzencka Habilitanta. Obejmuje ona recenzje 16 artykułów dla 9 czasopism. W tym po 3 artykuły dla Physica Status Solidi A, Journal of Alloys and Compounds i Micromachines oraz dwa dla Electronics (MDPI). Inne czasopisma, z którymi współpracował w tym zakresie to Crystals, Materials, Materials Science Poland, Applied Surface Science i Optica Applicata.

Jego aktywność obejmuje też popularyzację nauki oraz działalność w stowarzyszeniach naukowych. Bierze udział w organizacji i obsłudze wizyt uczniów szkół podstawowych i licealnych na Uczelni. Był po doktoracie trzykrotnie członkiem komitetów organizacyjnych konferencji i seminariów, takich jak „Krajowa Konferencja Nanotechnologii" oraz seminaria „Powierzchnia i struktury cienkowarstwowe". Jest od lat członkiem Polskiego Towarzystwa Próżniowego.

**Dorobek dydaktyczny**

Działalność dydaktyczna Habilitanta obejmowała prowadzenie wykładów, ćwiczeń rachunkowych i zajęć laboratoryjnych na pierwszym i drugim stopniu studiów.

W autoreferacie wylicza 12 przedmiotów związanych z Elektroniką, mikroelektroniką, techniką światłowodową i informatyką. Prowadził zajęcia w języku angielskim oraz zajęcia na innych wydziałach Politechniki Wrocławskiej. Opracowywał i brał udział w opracowywaniu materiałów dydaktycznych. Był członkiem Zespołu przygotowującego zestawy pytań dyplomowych dla studentów kierunku Mechatronika. Jest często powoływany do Komisji Egzaminów Dyplomowych.

Ważnym aspektem dorobku dydaktycznego jest jego współpraca z dyplomantami i doktorantami. Był opiekunem 12 ukończonych prac inżynierskich oraz trzech magisterskich. Jest promotorem pomocniczym w dwóch przewodach doktorskich i był promotorem pomocniczym w dwóch innych, pomyślnie zakończonych.

**Działalność organizacyjna**

W działalności organizacyjnej Habilitanta wyróżnia się wieloletnia odpowiedzialność za projektowanie procesów wzrostu i techniczne utrzymanie dwóch stanowisk epitaksjalnych oraz współodpowiedzialność za utrzymanie ruchu technologicznego w dwóch „cleanroomach" Katedry Mikroelektroniki i Nanotechnologii. Był też odpowiedzialny za akceptację projektu komercyjnego reaktora epitaksjalnego, a następnie za instalację i uruchomienie nowego stanowiska do epitaksji w Laboratorium Mikroelektroniki i Nanotechnologii. Jest członkiem Rady Młodych Centrum Materiałów Zaawansowanych i Nanotechnologii.

## 4. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że efekty dotychczasowej pracy naukowo-badawczej Habilitanta stanowią znaczny wkład w rozwój Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika. Biorąc pod uwagę zarówno opinię o powiązanym tematycznie cyklu publikacji jak i ocenę aktywności naukowej dydaktycznej i organizacyjnej dr inż. Mateusza Wośko uważam, że spełnia on wymagania określone w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym, z dnia 20.07.2018 roku.

**Stawiam wniosek o nadanie doktorowi Mateuszowi Wośko stopnia naukowego doktora habilitowanego.**

E. Ka