

Recenzja rozprawy habilitacyjnej Pani Dr Marty Sobańskiej pod tytułem:

„Mechanizmy spontanicznej krystalizacji nanodrutów GaN techniką epitaksji z wiązek molekularnych na amorficznych podłożach”

Tematem autoreferatu Pani dr Marty Sobańskiej, stanowiącego podstawę Jej starań o uzyskanie stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne, jest opis mechanizmów spontanicznej krystalizacji nanodrutów azotku galu (GaN) techniką epitaksji z wiązek molekularnych (z ang. molecular beam epitaxy; MBE) na amorficznych podłożach. Temat jest przedłużeniem prac badawczo-rozwojowych prowadzonych przez Habilitantkę do uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych w roku 2017. Rozprawa doktorska została obroniona w Instytucie Technologii Elektronowej (dziś Łukasiewicz Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki; IMIF), a jej tytuł brzmiał „Wzrost i właściwości nanodrutów azotku galu otrzymany metodą MBE z plazmowym źródłem azotu”.

Zgłoszony do oceny habilitacyjny autoreferat dr Sobańskiej opiera się na 6 wybranych publikacjach dotyczących krystalizacji nanodrutów GaN. Dr Sobańska wybierała z 18 prac, których jest autorką i/lub współautorką, a które opublikowane zostały po obronie Jej pracy doktorskiej w 2017 r.

Zrozumienie mechanizmów zarodkowania i wzrostu nanodrutów GaN na niekryształicznych podłożach techniką epitaksji z wiązek molekularnych z plazmowym źródłem azotu (z ang. Plasma-Assisted MBE – PAMBE) było podstawowym celem prac dr Sobańskiej. Habilitantka badała jak mikrostruktura podłoża (lub jego warstwy buforowej) wpływa na kinetykę zarodkowania i właściwości krystalizowanych na nim nanodrutów. Szczegółowymi celami prac były: i/ kompleksowe zbadanie wpływu amorficznego podłoża na kinetykę spontanicznego zarodkowania nanodrutów GaN; ii/ opracowanie wydajnych metod kontroli czasu inkubacji GaN poprzez wybór warunków krystalizacji oraz podłoża; iii/ wyjaśnienie natury centrów przyspieszających zarodkowanie GaN na warstwie nukleacyjnej w trakcie wygrzewania w plazmie azotowej; iv/ opracowanie technologii i optymalizacja warunków selektywnego formowania nanodrutów GaN przy użyciu warstwy nukleacyjnej; v/ wyjaśnienie zjawiska występowania mieszanej polarności nanodrutów GaN; vi/ określenie wpływu reszkowych zanieczyszczeń podłoża na mechanizm krystalizacji nanodrutów GaN i ich orientację przestrzenną.

Do głównych osiągnięć dr Sobańskiej, przedstawionych w referacie i wcześniej opublikowanych we wspomnianych 6 wybranych przez Habilitantkę publikacjach, należą: i/ kompleksowy opis kinetyki spontanicznego zarodkowania nanodrutów GaN i analityczne sformułowanie zależności czasu ich inkubacji od parametrów procesu wzrostu; ii/ opracowanie modelu ilościowego - opisującego powierzchnię dyfuzję adatomów galu (Ga) podczas selektywnego wzrostu nanodrutów GaN; iii/ wykorzystanie wyżej wspomnianego modelu do wyjaśnienia przestrzennej niejednorodności nanodrutów, a następnie poprzez dopasowanie przewidywań modelu do danych doświadczalnych określenie drogi dyfuzji adatomów Ga na powierzchni z tlenku glinu ( $\alpha\text{-Al}_x\text{O}_y$ ); iv/ zademonstrowanie, że podczas selektywnego formowania nanodrutów na podłożu GaN/szafir przyspieszony wzrost krawędziowy warstwy planarnej, jak również mniejsza długość nanodrutów przy krawędzi paska nukleacyjnego, wynikają z powierzchniowego transportu masy z paska  $\alpha\text{-Al}_x\text{O}_y$  w kierunku warstwy GaN w okresie inkubacji nanodrutów; v/ identyfikacja wysp reszkowego tlenku jako źródła efektu mieszanej polarności oraz zmiany ułożenia krystalograficznego nanodrutów GaN na podłożach krzemowych (Si); vi/ wykazanie, że warstwa buforowa  $\alpha\text{-Al}_x\text{O}_y$  na podłożu Si zapewnia czystą i stabilną powierzchnię dla wzrostu nanodrutów o jednorodnej polarności

azotowej i uporządkowanym ułożeniu prostopadłym do podłoża; vii/ zaproponowanie mechanizmu wbudowywania się azotu do warstw buforowych osadzonych na Si i szafirze w trakcie procesu wygrzewania w plazmie azotowej w warunkach imitujących inkubację nanodrutów GaN; viii/ wskazanie, że lokalne wytrącenia fazy tlenku glinu z azotem (N)  $(Al(NO_3))_x$  powstałe na powierzchni warstwy buforowej w czasie inkubacji nanodrutów mogą być heterogennymi centrami przyspieszającymi zarodkowanie GaN na amorficznych warstwach buforowych  $a-Al_xO_y$ ; ix/ wykazanie, że w określonych warunkach technologicznych brak wyżej wspomnianych wytrąceń może doprowadzić do braku formowania się nanodrutów na podłożach.

Przedstawione powyżej osiągnięcia pozwoliły na: i/ wyliczenie wartości czasów inkubacji GaN w warunkach niezbadanych doświadczalnie i opracowanie na ich podstawie wydajnych sposobów kontroli etapu inkubacji GaN poprzez wybór warunków krystalizacji oraz podłoża ( $a-Al_xO_y$  vs. azotek krzemu  $(SiN_x)$ ); ii/ modelowanie i weryfikację doświadczalną diagramów wskazujących zakres parametrów technologicznych sprzyjających krystalizacji nanodrutów lub warstwy planarnej; iii/ wykazanie, że  $a-Al_xO_y$  jest znacznie wydajniejszą warstwą nukleacyjną dla nanodrutów GaN od powszechnie stosowanego układu  $SiN_x/Si$ , oferującą krótsze czasy inkubacji oraz dużo szerszy zakres parametrów technologicznych umożliwiających formowanie nanodrutów; iv/ opracowanie technologii selektywnego formowania nanodrutów GaN na podłożach GaN i  $SiN_x/Si$  z warstwą nukleacyjną  $a-Al_xO_y$ ; v/ określenie, poprzez porównanie wyników doświadczalnych z teoretycznymi, zakresu warunków, w których wskutek dyfuzji Ga wzdłuż ścianek bocznych nanodrutów do ich górnych powierzchni krystalizacja zachodzi w warunkach lokalnie bogatych w gal pomimo zewnętrznego nadmiaru azotu.

Nie ulega wątpliwości, że wyniki uzyskane w ramach opisanego osiągnięcia habilitacyjnego przyczyniły się do głębszego zrozumienia zjawisk fizycznych zachodzących podczas spontanicznej nukleacji GaN na niekryształicznych podłożach. Wyniki te przyczyniły się również do rozwoju prac nad wykorzystaniem aplikacyjnym układów nanodrutów GaN. Poznanie mechanizmów zarodkowania i wzrostu nanodrutów GaN jest bowiem kluczowe dla projektowania i kontrolowanego wytwarzania nanostruktur o właściwościach wymaganych dla konkretnych zastosowań aplikacyjnych lub badawczych. Dla przykładu, analiza procesów zarodkowania nanodrutów GaN na różnych warstwach buforowych jest kluczowa dla rozwoju techniki selektywnego formowania nanodrutów. Znajomość zależności szybkości inkubacji GaN od wyboru podłoża pozwala tak dobrać warunki wzrostu, by nanodrutu krystalizowały jedynie na powierzchni warstwy nukleacyjnej, podczas gdy krystalizacja GaN na obszarze zamaskowanym (na powierzchni maski) jest zablokowana. Poprzez istotny wpływ dyfuzji powierzchniowej kinetyka zarodkowania i selektywnego wzrostu nanodrutów silnie zależą od rozmiarów otworów w masce i zdecydowanie różnią się od obserwowanych podczas krystalizacji w tych samych warunkach na jednorodnych podłożach planarnych. Powierzchniowa warstwa buforowa, jej jednorodność i koncentracja reszkowych zanieczyszczeń, pełnią fundamentalną rolę dla procesu wzrostu, ułożenia krystalograficznego i właściwości elektronowych nanodrutów GaN. Korelacja polarności nanodrutów z parametrami procesu przygotowania podłoża do krystalizacji pozwala na blokowanie lub indukowanie formowania się nanodrutów pożądanego typu. Ma to istotne implikacje praktyczne, gdyż, jak wykazała Habilitantka w jednej ze swoich prac, zmiana polarności silnie wpływa na wydajność elektroluminescencji nanodrutowych struktur GaN/AlGaIn ze złączem p-n.

Należy zwrócić uwagę, że przedstawione powyżej wyniki zostały opublikowane w renomowanych czasopismach o wysokich impact factor'ach, takich jak: i/ Nanotechnology (dwie prace) (IF=3.874); ii/ RSC Advances (IF=3.361); iii/ Crystal Growth & Design (IF=4.076); iv/ Electronics (IF=2.397); v/ Applied Surface Science (IF=6.707).

Dr Marta Sobańska współpracuje z wieloma ośrodkami akademickimi z całego świata (Hiszpania, Niemcy, Rosja, Ukraina, USA). Odbiła szereg krótkoterminowych staży zagranicznych (głównie w Niemczech, w Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Berlin). W Polsce bardzo ściśle współpracuje ze wspomnianym już IMIF-em, Wydziałem Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego oraz Wydziałami Inżynierii Materiałów Półprzewodnikowych i Fizyki Politechniki Wrocławskiej.

Dr Sobańska prowadzi aktywną działalność dydaktyczną, dziś związaną z pracami wykonywanymi na rzecz Warszawskiej Szkoły Doktorskiej Nauk Ścisłych i BioMedycznych, a wcześniej Szkoły Doktorskiej Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk i Wydziału Matematyczno – Przyrodniczego Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie. Jest opiekunem naukowym dwojga studentów Politechniki Warszawskiej przygotowujących swoje prace magisterskie. Była promotorem pomocniczym w jednej pracy doktorskiej realizowanej w Warszawskiej Szkole Doktorskiej Nauk Ścisłych i BioMedycznych.

Dr Marta Sobańska jest autorką i współautorką 46 prac indeksowanych w bazie Web of Science. Prace cytowano ponad 400 razy, a indeks Hirsha dr Sobańskiej wynosi 12. Ponadto Habilitantka jest współautorką 5 prac w krajowych czasopismach naukowych nie posiadających impact factor'a. Była współautorką 21 wykładów zaproszonych, w tym 5 wygłoszonych osobiście oraz 36 ustnych prezentacji, w tym 15 wygłoszonych osobiście na konferencjach i spotkaniach naukowych. Ponadto dr Sobańska wygłosiła 10 seminariów i jest współautorką 83 konferencyjnych prezentacji plakatowych.

Dr Sobańska była kierownikiem jednego projektu naukowego Preludium finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki (NCN) oraz wykonawcą w 7 projektach finansowanych przez wspomniany NCN, Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) oraz Program Innowacyjna Gospodarka POIG. Jest współautorką dwóch krajowych (polskich) patentów dotyczących krystalizacji nanodrutów.

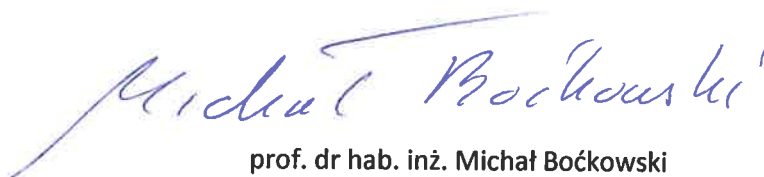
Zarówno przed jak i po doktoracie dr Sobańska uzyskała wiele nagród, wyróżnień i stypendiów. Do najważniejszych należą: i/ Nagroda im. prof. Jana Czochralskiego przyznana przez Senat Politechniki Warszawskiej za najlepszy doktorat w latach 2017 – 2019; ii/ Nagroda naukowa Polskiego Towarzystwa Wzrostu Kryształów za najlepszy doktorat w dziedzinie wzrostu kryształów w latach 2016 – 2018; iii/ Nagroda naukowa Polskiego Towarzystwa Próżniowego za najlepszy doktorat w dziedzinie technik próżniowych w latach 2017 – 2018; iv/ 3-letnie stypendium dla Wybitnego Młodego Naukowca przyznane przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Dorobek naukowy Pani Marty Sobańskiej jest imponujący i na pewno wystarczający do uzyskania stopnia doktora habilitowanego. Niepokój może jednak budzić monotematyczność prac Habilitantki. W zasadzie, od rozpoczęcia swojej działalności naukowej poświęca się krystalizacji nanodrutów GaN metodą PAMBE badając początkowe stadia wzrostu. Tematyka krystalizacji nanodrutów nie jest dziś tematem niszowym ale badania ich początkowych stadiów wzrostu (nukleacji) już tak. Oczywiście zjawisko nukleacji można badać w nieskończoność, obserwując jednocześnie jak „ucieka świat” budujący w oparciu o nanodrutu przyrządy optoelektroniczne i elektroniczne. Być może za dobór tematyki nie ponosi winy sama Habilitantka, a jej bezpośredni przełożeni. Sugerowałbym jednak szersze niż dotychczas próby prac nad przyrządami i zastosowaniem nanodrutów, ewentualnie bardziej całościową analizę procesu krystalizacji nanodrutów. Ze wspomnianą monotematycznością i niszowością prac badawczych łączy się mała liczba referatów zaproszonych wygłaszanych osobiście na prestiżowych międzynarodowych konferencjach (w zasadzie nie ma ani jednego takiego wystąpienia), niski indeks Hirsha i niewielka liczba cytowań. Zauważalny jest też brak dłuższego stażu zagranicznego. Roczny, czy dłuższy pobyt w jakimś prestiżowym ośrodku

innym niż macierzysty bardzo pomaga w realizacji kolejnych badań, jak i doborze nowej, ciekawej tematyki.

Mimo powyższych uwag krytycznych stwierdzam, że wyniki naukowe uzyskane przez dr Martę Sobańską spełniają ustawowe kryteria i czynią zadość wymogom stawianym w przewodzie habilitacyjnym przez przepisy właściwej dla przewodu habilitacyjnego ustawy. Popieram zatem starania w sprawie nadania tytułu dr. hab. w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne Pani dr Marcie Sobańskiej zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki (Dz. U Nr 53/03, poz. 595 z późniejszymi zmianami).

Warszawa, 01.04.2022



prof. dr hab. inż. Michał Boćkowski