

Prof. dr hab. Andrzej Turowski
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
05-400 Świerk, ul. A. Sołtana 7

**Ocena dorobku naukowego dr Marty Sobańskiej
w związku z prowadzonym postępowaniem habilitacyjnym**

1. Ocena istotnej aktywności naukowej i kariery naukowej

Dr Marta Sobańska ukończyła studia na kierunku fizyka Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie w 2009 roku. Bezpośrednio po studiach rozpoczęła pracę w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie początkowo na stanowisku technologa a następnie asystenta i po obronie doktoratu na stanowisku adiunkta. W 2017 r. uzyskała stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektronika nadany z wyróżnieniem przez Instytut Technologii Elektronowej w Warszawie na podstawie rozprawy doktorskiej pt.: *„Wzrost i właściwości nanodrutów azotku galu otrzymywanych metodą MBE z plazmowym źródłem azotu”*, promotorem był prof. dr hab. Zbigniew Żytkiewicz. Praca ta była wielokrotnie nagradzana przez różne polskie instytucje naukowe jako najlepszy doktorat w latach 2017-2019.

Pani Sobańska była też laureatką stypendium dla Wybitnego Młodego Naukowca przyznanego przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego. W okresie 2013-2017 odbyła trzy, krótkie (dwutygodniowe) staże naukowe w Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, w Berlinie oraz jeden staż w Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the NAS of Ukraine w Kijowie.

Kariera naukowa dr Sobańskiej od ukończenia studiów do chwili obecnej jest związana z Instytutem Fizyki PAN. Pracując w zespole prof. dr hab. Zbigniewa Żytkiewicza zajmowała się badaniami nad zastosowaniem epitaksji z wiązek molekularnych z plazmą azotową (PAMBE) do wytwarzania nanodrutów GaN i GaN/AlGaIn. Obecnie prowadzi podstawowe badania fizyczne mechanizmów zarodkowania takich nanodrutów na różnych podłożach i wykonuje dedykowane struktury nanodrutów dla wielu projektów badawczych realizowanych w IF PAN.

Habilitantka opublikowała 40 prac w czasopiśmie posiadających Impact Factor (IF) w tym 12 opublikowała po uzyskaniu stopnia doktora. Sześć z tych ostatnich wchodzi w skład osiągnięcia

naukowego. Koncentrując się na grupie publikacji opublikowanych po doktoracie, charakteryzującej kandydatkę jako samodzielną badaczkę, z uznaniem stwierdzam, że są to publikacje wysokiej rangi o czym świadczy przede wszystkim fakt, że spośród 12 publikacji 10 opublikowano w periodykach o IF powyżej 3. Jej prace były cytowane 418 razy a średni IF wszystkich publikacji wynosi 4.3. Dobry jest także jej współczynnik Hirscha (według Web of Science) wynoszący 12.

Dr Sobańska aktywnie uczestniczy w konferencjach naukowych. W ostatnich latach czterokrotnie wygłaszała referaty zaproszone na konferencjach międzynarodowych i była współautorką 15 wystąpień ustnych. Jest też często zapraszana do wygłaszania referatów na różnego rodzaju seminariach w instytucjach naukowych. W sumie wygłosiła 12 takich referatów.

2. Ocena osiągnięcia naukowego stanowiącego podstawę do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego nauk fizycznych.

Przedstawione mi do oceny osiągnięcie naukowe zatytułowane: *Mechanizmy spontanicznej krystalizacji nanodrutów GaN techniką epitaksji z wiązek molekularnych na amorficznych podłożach* oparte jest na 6 pracach, z których jedna ukazała się 2017 roku a pozostałe w latach 2019-2020. Wszystkie opublikowano w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym. Dr Marta Sobańska jest pierwszą autorką w czterech z nich. Wiodący udział merytoryczny habilitantki w pracach stanowiących podstawę wystąpienia o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego jest potwierdzony stosownymi oświadczeniami współautorów.

Półprzewodniki azotkowe (azotki galu, aluminium i indu) są bazą olbrzymiego rynku białych LED, diod laserowych, tranzystorów wysokiej mocy i częstości i wielu innych przyrządów. Jednak mimo wieloletnich wysiłków licznych zespołów na całym świecie własności tych półprzewodników nie są w dalszym ciągu w pełni zbadane. O ile technologia wzrostu heterostruktur planarnych na podłożach o polarności galowej jest obecnie dość dobrze opanowana o tyle metodyka wzrostu struktur quasi-jednowymiarowych takich jak nanodrutu ciągle jeszcze stanowi poważne wyzwanie. Prace w tym kierunku prowadzone są intensywnie ma całym świecie z uwagi na to, iż struktury te stwarzają wiele obiecujących możliwości konstrukcji nowych przyrządów. W obiektach krystalicznych o quasi-jednowymiarowym kształcie jakimi są nanodrutu, z uwagi na niewielki obszar kontaktu z podłożem, relaksacja naprężeń sieciowych jest znacznie ułatwiona w wyniku czego, nie występują w nich dyslokacje przenikające. Również powstawanie granic antyfazowych przy wzroście materiałów polarnych

na niepolarnych podłożach jest znacznie utrudnione. Stwarza to możliwości wytwarzania wysokiej jakości złożonych nanostruktur o bezdefektowej strukturze krystalicznej, nieosiągalnej w układach planarnych.

Publikacje stanowiące przedstawione mi do oceny osiągnięcie naukowe dr Marty Sobańskiej można podzielić na dwie grupy. Pierwsza z nich (H5-H6) poświęcona jest opracowaniu optymalnych warunków wzrostu nanodrutów GaN na podłożach azotku krzemu przy zastosowaniu techniki PAMBE. Ekspozycja podłoża Si na strumienie azotu i galu prowadzi do tworzenia azotku krzemu i zarodkowania GaN. Trwa to do wysycenia wszystkich wiązań Si-N i pokrycia podłoża cienką warstwą SiN_x , na której krystalizują nanodrut. Niestety niekontrolowane współzawodnictwo tworzenia wiązań Si-N i Ga-N prowadzi do zwiększenia szorstkości warstwy SiN_x , a w konsekwencji do zwiększonej przestrzennej dezorientacji nanodrutów. Poznanie mechanizmów zarodkowania i wzrostu techniką PAMBE nanodrutów GaN na niekrystalicznych podłożach jest podstawowym celem cyklu prac składających się na osiągnięcie habilitacyjne. Szczególnie ważne jest wyjaśnienie, wpływu mikrostruktury podłoża na kinetykę zarodkowania i właściwości wytwarzanych nanodrutów. opracowanie wydajnych metod kontroli czasu inkubacji GaN poprzez wybór warunków krystalizacji oraz podłoża – co przedstawiono w pracy [H1]. Pokazano w niej, że wielkość strumienia azotu istotnie wpływa na kinetykę zarodkowania GaN. Podobną rolę odgrywa efekt desorpcji galu z układu nanodrutów. Kluczowym procesem jest etap inkubacji, podczas którego atomy galu migrują po powierzchni podłoża aż do wytworzenia stabilnego termodynamicznie zarodka GaN. Jeśli taki zarodek jest dostatecznie duży może przyłączać kolejne atomy Ga co jest warunkiem jego dalszego wzrostu. Wyniki doświadczalne zebrane w pracy [H1] pozwoliły na kompletny, analityczny opis zależności czasu inkubacji GaN od wszystkich parametrów wzrostowych. W pracy [H1] zaobserwowano również, że podłoże $\alpha\text{-Al}_x\text{O}_y$ zapewnia krótsze czasy inkubacji oraz znacznie szerszy zakres parametrów wzrostowych umożliwiających formowanie nanodrutów, jest zatem znacznie wydajniejszą warstwą nukleacyjną dla nanodrutów GaN od powszechnie stosowanego układu SiN_x/Si . Z tego powodu habilitantka rozpoczęła następny cykl badań (prace H1-H4) nad metodą otrzymywania i modyfikacji nanodrutów GaN na podłożu Al_xO_y . Przy wysokich temperaturach stosowanych podczas wzrostu nanodrutów czasy inkubacji GaN na podłożach SiN_x/Si wynoszą kilka godzin. Opracowanie sposobu przyspieszenia inkubacji może obniżyć znacząco koszty procesu technologicznego i zwiększyć jego wydajność. W swojej wcześniejszej pracy [M. Sobańska et al., Nanotechnology 27 (2016) 325601], nie wchodzącej w skład ocenianego osiągnięcia, autorka wykazała, że zarodkowanie i wzrost nanodrutów GaN na podłożu $\alpha\text{-Al}_x\text{O}_y$ przebiega w trzech etapach: (i) inkubacja

poprzedzająca powstawanie trójwymiarowych zarodków, (ii) formowanie półsferycznych zarodków, a następnie ich transformacja do kształtu nanodrutów oraz (iii) osiowy wzrost nanodrutów i wyrównywanie ich długości wskutek efektów kolektywnych wraz z ewentualną koalescencją sąsiadujących nanodrutów. Zdaniem autorów tej pracy jest to uniwersalna cecha procesu samoorganizującego formowania się nanodrutów techniką PAMBE na amorficznych podłożach, przy czym kluczowym jest etap inkubacji, podczas którego adatomy galu migrują po powierzchni podłoża aż do wytworzenia zarodka GaN. W pracy [H1] pokazano, że w odróżnieniu od podłoża SiN_x/Si, dla którego szybkość powstawania zarodków GaN jest zależna od szybkości powierzchniowej dyfuzji adatomów Ga dla powierzchni Al_xO_y zależy ona od wielkości strumienia Ga co sugeruje heterogenne zarodkowanie na zewnętrznych centrach nukleacji. Przyjęto, że centra te mogą mieć charakter lokalnej niejednorodności chemicznej, co zostało potwierdzone w pracy [H2] poświęconej badaniu składu chemicznego warstw a-Al_xO_y techniką rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronów XPS (*X-ray Photoelectron Spectroscopy*). Poznanie mechanizmu zjawiska wydajnego formowania nanodrutów GaN na amorficznych warstwach buforowych a-Al_xO_y pozwoliło na opracowanie metody selektywnego wzrostu epitaksjalnego nanodrutów, tzn. do ich krystalizacji w ściśle określonych obszarach podłoża. Zostało to opisane w pracach [H3] i [H4]. Szczególnie ciekawa jest praca [H4] poświęcona dyfuzji powierzchniowej adatomów Ga będących źródłem niejednorodności selektywnego wzrostu nanodrutów GaN. Pokazano, że wykorzystując maskującą warstwę SiN_x pokrywającą część podłoża można uzyskać blokadę wzrostu nanodrutów na tym obszarze podczas gdy na powierzchni warstwy nukleacyjnej a-Al_xO_y występuje szybki wzrost tych struktur.

Kolejnym celem jaki postawiła sobie habilitantka było zbadanie zjawiska polarności nanodrutów. Doniesienia literaturowe wskazują na to, że samoorganizujące się nanodrutry GaN wytwarzane techniką PAMBE na azotowanym podłożu Si powinny mieć polarność azotową. Tym nie mniej obserwuje się zjawisko mieszanej polarności, tzn. występowanie nanodrutów o obu polarnościach w obrębie jednej próbki. W pracy [H5] dr Sobańska wykazała, że za powstawanie drutów o polarności Ga spowodowane jest występowaniem resztkowych zanieczyszczeń na powierzchni podłoża Si natomiast warstwa buforowa a-Al_xO_y skutecznie pokrywa resztkowy tlenek krzemu i zapewnia jednorodny wzrost nanodrutów o tej samej polarności.

Reasumując stwierdzam, że w przedstawionym mi do recenzji zbiorze sześciu publikacji stanowiących osiągnięcie habilitacyjne dr Marty Sobańskiej znajduje się szereg nowych i naukowo ważnych wyników badań zarówno eksperymentalnych jak i teoretycznych. Zaliczam do nich:

- zbadanie szczegółowej kinetyki spontanicznego zarodkowania nanodrutów GaN,
- opracowanie diagramów wzrostowych obrazujących zakres parametrów prowadzących do krystalizacji nanodrutów lub warstw planarnych i ich weryfikację eksperymentalną.
- eksperymentalne porównanie wydajności warstw nukleacyjnych $a\text{-Al}_x\text{O}_y$ i SiN_x , i opracowanie technologii selektywnego formowania nanodrutów GaN na podłożach GaN i SiN_x/Si z warstwą nukleacyjną $a\text{-Al}_x\text{O}_y$ oraz interpretacja tego zjawiska.
- wykazanie, że źródłem wzrostu nanodrutów GaN o mieszanej polarności oraz zmiany ich kierunku wzrostu na podłożach S są wyspy reszkowego tlenku krzemu.
- udowodnienie, że warstwa buforowa $a\text{-Al}_x\text{O}_y$ wydajnie pokrywa resztkowe tlenki krzemu na podłożu Si zapewniając czystą i stabilną powierzchnię dla wzrostu nanodrutów o jednorodnej polarności azotowej i uporządkowanym prostopadłym do podłoża kierunku wzrostu. Ze względu na potencjalnie ważne znaczenie technologiczne wyniki dotyczące selektywnego wzrostu nanodrutów GaN na buforze $a\text{-Al}_x\text{O}_y$ zostały objęte ochroną patentową.

3. Ocena całości dorobku naukowego

Liczący się dorobek naukowy habilitantki powstał podczas jego pracy w IF PAN. Przez cały ten okres tematyka jej prac poświęcona wykorzystaniu techniki PAMBE w technologii nanodrutów azotków i była konsekwentnie rozwijana. Dr Sobańska z powodzeniem wykorzystwała możliwości jakie stwarzała jej praca w wybitnych zespołach badawczych takich jak zespół prof. Żytkiewicza w IF PAN czy podobny w Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik w Berlinie. Wyniki jej prac były publikowane w międzynarodowych czasopismach naukowych posiadających wysoki Impact Factor. Były również prezentowane na licznych konferencjach naukowych w formie referatów zaproszonych i wystąpień ustnych. Dr Sobańska była wielokrotnie proszona o recenzowanie publikacji wysłanych do znanych czasopism naukowych takich jak: Crystal Growth & Design, Nano Research czy Journal of Applied Physics. Uczestniczyła też w ośmiu krajowych projektach badawczych. W jednym z nich jako kierownik a w pozostałych jako wykonawca.

Wybrany zestaw 6 publikacji będących osiągnięciem naukowym stanowiącym podstawę do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego nauk fizycznych jest jednorodny tematycznie i stanowi ważny wkład w rozwój technologii półprzewodnikowych struktur azotkowych. Jest to tematyka wiodąca w skali światowej zarówno pod względem poznawczym jak i aplikacyjnym.

Reasumując pragnę podkreślić, że dr Marta Sobańska jest utalentowaną badaczką posiadającą znaczące osiągnięcia naukowe w skali światowej. Biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy przedstawionego mi do oceny osiągnięcia naukowego i aktywność naukową habilitantki wyrażającą się bogatym dorobkiem publikacyjnym nie objętym bezpośrednią oceną i jej działalnością na arenie międzynarodowej stwierdzam, że

*powierzone mi do recenzji osiągnięcie naukowe spełnia w całej rozciągłości wymogi stawiane rozprawom habilitacyjnym przedstawione w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce. W związku z tym wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Fizyki PAN w Warszawie o dopuszczenie Autorki osiągnięcia naukowego pt. **Mechanizmy spontanicznej krystalizacji nanodrutów GaN techniką epitaksji z wiązek molekularnych na amorficznych podłożach** do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.*

Warszawa 28.04.2022

