



Wrocław, 08.07.2026

Dr hab. inż. Joanna Jadczyk, profesor uczelni
Katedra Fizyki Doświadczalnej
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska

Recenzja pracy doktorskiej Pana magistra Jakuba Iwańskiego

pt. „Modyfikacja strukturalnych i funkcjonalnych właściwości azotku boru z wykorzystaniem MOVPE ”

Rozprawa doktorska magistra Jakuba Iwańskiego poświęcona jest badaniom wpływu parametrów wzrostu na strukturę krystaliczną, rodzaj i koncentrację defektów, właściwości spinowe oraz przerwę energetyczną azotku boru otrzymywanego metodą epitaksji z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych. Praca została wykonana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem prof. dr hab. Andrzeja Wysmołka oraz dr Mateusza Tokarczyka, pełniącego funkcję promotora pomocniczego.

Azotek boru (BN), charakteryzujący się wieloma odmianami polimorficznymi o hybrydyzacji sp^2 oraz sp^3 , jest wysoce obiecującym materiałem dla technologii pracujących w obszarze spektralnym głębokiego ultrafioletu (DUV). Odmiany warstwowe tego związku mają kluczowe znaczenie dla współczesnych badań nad materiałami dwuwymiarowymi (2D). Szeroka przerwa energetyczna oraz gładka powierzchnia atomowa pozbawiona tzw. wiszących wiązań sprawiają, że od lat stanowi on podstawowy budulec struktur van der Waalsa. Ostatnie doniesienia literaturowe wskazują także na duży potencjał tego materiału jako platformy do inżynierii właściwości strukturalnych i funkcjonalnych.

Rozprawa doktorska Pana magistra Jakuba Iwańskiego dotyczy aktualnych zagadnień inżynierii materiałowej, fizyki ciała stałego oraz technik charakteryzacji materiałów. Za główny cel stawia sterowanie właściwościami strukturalnymi, spinowymi i elektronowymi azotku boru. Warto podkreślić, że oprócz prezentacji wyników, celem pracy jest również

wprowadzenie w tematykę azotku boru oraz przystępne wyjaśnienie mechanizmów fizycznych i technologicznych dla szerokiego grona czytelników, również spoza tej dziedziny. Transparentny opis wkładu doktoranta w działalność badawczą zamieszczono pod każdym osiągnięciem naukowym przedstawionym w pracy. Doktorant był odpowiedzialny przede wszystkim za proces wzrostu struktur, pomiary FTIR i fotoluminescencji, analizę i interpretację danych eksperymentalnych, opracowanie modelu tworzenia defektów podczas wzrostu MOCVD, a także projektowanie i koordynację badań eksperymentalnych.

Przedstawiona rozprawa doktorska ma przejrzystą strukturę i napisana jest poprawnym językiem. Rozdział 1 wprowadza w tematykę pracy i precyzyjnie określa jej cel. Rozdział 2 poświęcony jest opisowi technologii wzrostu materiałów metodą MOVPE, a Rozdział 3 opisuje techniki eksperymentalne wykorzystane do charakteryzacji struktur oraz badania ich właściwości fizycznych. Rozdziały 4, 5, 6 i 7 stanowią najważniejszą część rozprawy, prezentując kluczowe wyniki dotyczące odpowiednio: epitaksjalnego wzrostu azotku boru na podłożach szafirowych, sterowania politypem warstwowego azotku boru w procesie MOVPE, analizy defektów o niezerowym spinie oraz modyfikacji przerwy energetycznej azotku boru poprzez tworzenie stopów z glinem. Poniżej przedstawiono najważniejsze osiągnięcia naukowe opisane w tych rozdziałach.

Rozdział 4 przedstawia pierwsze fundamentalne osiągnięcie pracy, wykazując, że wzrost warstwowego BN na podłożach szafirowych ma charakter epitaksjalny, pomimo obecności złożonej warstwy przejściowej na interfejsie. Identyfikacja niescharakteryzowanej wcześniej warstwy g-C₃N₄, współlistniejącej z AlN:O, rzuca nowe światło na zrozumienie mechanizmów epitaksji materiałów dwuwymiarowych na podłożach trójwymiarowych. Rezultaty te wskazują, że to właśnie na poziomie interfejsu rozstrzyga się możliwość zachowania dalekozasięgowych relacji krystalograficznych oraz sterowania właściwościami materiału.

Uzyskanie szczegółowych informacji o mechanizmach wzrostu azotku boru z wykorzystaniem techniki MOVPE stanowi istotne osiągnięcie rozprawy. Analiza reżimu FME (ang. Flow Modulation Epitaxy) pokazuje, że wzrost BN nie podlega prostemu opisowi w kategoriach kinetyki reakcji lub transportu masy. Jest to proces mieszany, w którym transport makroskopowy, reakcje chemiczne w fazie gazowej oraz kinetyka powierzchniowa wspólnie definiują jakość hodowanych struktur. Zrozumienie tych zależności pozwoliło na precyzyjne wskazanie parametrów technologicznych niezbędnych do otrzymania warstw o wysokiej jakości strukturalnej i optycznej. Tym samym doktorant zrealizował kluczowy cel rozprawy, udowadniając

możliwość projektowania właściwości BN poprzez świadomy dobór warunków procesu MOVPE.

W Rozdziale 5 udowodniono, że precyzyjna kontrola procesu wzrostu pozwala na sterowanie politypami BN. Kluczowym osiągnięciem doktoranta jest opracowanie metody identyfikacji faz krystalicznych na podstawie emisji defektu $C_B C_N$. Ta technika luminescencyjna umożliwia nie tylko szybkie rozróżnienie faz h-BN i r-BN, ale też ilościowe śledzenie ich udziału w zależności od parametrów wzrostu. Wykazanie, że prędkość hodowli struktur jest kluczowym czynnikiem sprzyjającym powstawaniu fazy r-BN, przenosi dyskusję o politypach BN na poziom mierzalnych relacji technologicznych. Istotny rezultat stanowi również przestrzenne wydzielenie domen r-BN w matrycy h-BN oraz wykazanie ich kontrolowanej odpowiedzi piezoelektrycznej. Dowodzi to, że inżynieria azotku boru może obejmować zarówno kontrolę politypu, jak i lokalną topografię funkcjonalnych domen krystalicznych.

W Rozdziale 6 wykazano, że środowisko defektowe BN podlega także projektowaniu na etapie wzrostu materiału. W rozprawie przedstawiono możliwość efektywnego generowania centrów spinowych poprzez optymalizację temperatury wzrostu oraz procesów wygrzewania struktur. Wyniki badań EPR i ODMR potwierdziły, że możliwe jest zarówno tworzenie zespołów defektów o spinie $S = 1/2$, jak i pojedynczych centrów o spinie $S = 1$. Rezultaty te jednoznacznie dowodzą, że kontrolowana inżynieria defektów pozwala nadać azotkowi boru nowe, funkcjonalne cechy, wykraczające poza jego klasyczny obraz jako materiału dielektrycznego. W tym kontekście BN jawi się jako realna platforma dla technologii kwantowych, w tym detekcji spinowej oraz fotoniki kwantowej.

W Rozdziale 7 przedstawiono wyniki dotyczące modyfikacji struktury elektronowej BN poprzez tworzenie stopów z glinem (BAlN). Doktorant wykazał, że minimalna zawartość Al (poniżej 1%) prowadzi do wyraźnej zmiany widma absorpcji w głębokim ultrafiolecie. Kluczowym wynikiem było zaobserwowanie dwóch silnych rezonansów w widmie absorpcji, odpowiadających przejściom o energiach zbliżonych do przejść prostych i skośnych w BN. Wynik ten dowodzi, że kontrola składu stopu BAlN pozwala nie tylko na zawężanie szerokości przerwy energetycznej, ale też na modyfikację charakteru przejść optycznych. Oznacza to, że azotek boru stanowi doskonałą platformę do zaawansowanej inżynierii odpowiedzi optycznej, co ma istotne znaczenie aplikacyjne w technologiach źródeł światła z zakresu DUV.

Poniżej przedstawiono kilka pytań do przedstawionych rezultatów:

- (1) Współistnienie warstwy grafitowego azotku węgla ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) z utlenionym azotkiem glinu AlN:O wskazuje na silną interakcję z podłożem szafirowym Al_2O_3 . Czy badany był wpływ orientacji krystalograficznej lub przygotowania powierzchni szafiru na skład i grubość tej złożonej warstwy przejściowej? Autor podaje w pierwszych rozdziałach, że użyte podłoża Al_2O_3 miały orientacje (0001), tj. płaszczyzna c. Wykorzystano podłoża o trzech różnych kątach odchylenia orientacji krystalograficznej w kierunku $[1\bar{1}00]$, tj. kierunek m. Były to $0,3^\circ$, $0,6^\circ$, 1° .
- (2) Czy zaobserwowanie obecności warstwy $g\text{-C}_3\text{N}_4$ za pomocą spektroskopii Ramana jest możliwe dla innego pobudzania niż 532nm ?
- (3) W pracy wykazano obecność i kontrolowaną odpowiedź domen piezoelektrycznych romboedrycznego r-BN w matrycy h-BN. Jak stabilne termicznie są te domeny?
- (4) Centra o spinie $S = 1$ są kluczowe z punktu widzenia zastosowań w informatyce kwantowej. Jaka, według autora, jest natura mikroskopowa tych defektów (np. czy są to izolowane luki borowe V_B^- czy też bardziej złożone kompleksy z udziałem atomów domieszek, np. węgla)?

Uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w § 21 pkt 2–4 Załącznika nr 1 do uchwały nr 157 Senatu Uniwersytetu Warszawskiego z dnia 29 czerwca 2022 r. Wyniki badań zebrane w pracy zostały opublikowane w dobrych czasopismach naukowych, gdzie w czterech z nich doktorant jest pierwszym autorem (*Journal Alloys Compd.*, *Sci. Rep.*, *npj. 2D Mater. Appl.*, *Diam. Rel. Mater.*), a w jednej drugim (*Mater. Quantum Technol.*). Doktorant prezentował również wyniki swoich badań na kilku konferencjach tematycznych w formie referatów mówionych oraz plakatów wykazując się nieprzeciętną aktywnością naukową. Doktorant jest również kierownikiem grantu PRELUDIUM 21, pt. „*Inżynieria przerwy energetycznej kryształów mieszanych BaGaN* ”, związanego z tematyką rozprawy. Ponadto, Pan magister Jakub Iwański jest współautorem zgłoszenia patentowego pt.: „*Sposób wytwarzania zwierciadeł Bragga w pojedynczym procesie*”, w którym przygotował program z interfejsem graficznym służącym do analizy danych FTIR dla azotku boru na podłożu szafirowym.

Wniosuję o dopuszczenie Pana magistra Jakuba Iwańskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej. Ponadto, ze względu na wysoki poziom naukowy, oryginalność uzyskanych rezultatów, ich interdyscyplinarny charakter oraz wyraźny wymiar aplikacyjny, wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej. Przedstawione w pracy wyniki wnoszą istotny i nowatorski wkład w rozwój fizyki ciała stałego oraz inżynierii materiałowej,

wyznaczając spójną i kompletną strategię dalszych badań nad azotkiem boru jako materiałem funkcjonalnym nowej generacji. Szczególnym osiągnięciem Doktoranta jest przełamanie dotychczasowego paradygmatu postrzegania BN wyłącznie jako pasywnego elementu heterostruktur 2D. Pan magister Jakub Iwański udowodnił, że właściwości tego materiału mogą być świadomie kształtowane od poziomego interfejsu atomowego, przez strukturę elektronową, aż po strukturę spinową. Otwiera to zupełnie nowe perspektywy dla rozwoju nowoczesnych struktur van der Waalsa, nieliniowej fotoniki, wydajnych struktur aktywnych w zakresie DUV oraz technologii kwantowych.

