

Warszawa, 15. lipca 2026



Dr hab. Henryk Turski, prof. IWC PAN
Laboratorium Azotkowych Struktur Zintegrowanych (NL-16)
Instytut Wysokich Ciśnień "Unipress", PAN
ul. Sokołowska 29/37, 01-142 Warszawa
tel. +48228760341
e-mail: henryk.turski@unipress.waw.pl

Recenzja

Pracy doktorskiej mgr Jakuba Iwańskiego pt. „Modyfikacja strukturalnych i funkcjonalnych właściwości azotku boru z wykorzystaniem MOVPE”

Promotor: Prof. dr hab. Andrzej Wismołek, Promotor pomocniczy: Dr Mateusz Tokarczyk

Niniejsza recenzja została wykonana w związku z uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne UW z dnia 11.05.2026 r. wyznaczającej mnie na recenzenta w postępowaniu w postępowaniu doktorskim pana mgr. Jakuba Iwańskiego. Niniejszą recenzję wykonano w oparciu o art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Dysertacja została spisana w języku polskim i poprzedzona streszczeniami w języku polskim oraz angielskim. Ma ona formę klasycznej monografii naukowej liczącej ponad 300 stron. Praca składa się z ośmiu rozdziałów obejmujących wprowadzenie do fizyki materiałów warstwowych i azotku boru, podstawy technologii MOVPE, szczegółowy opis zastosowanych technik badawczych, a następnie prezentację wyników dotyczących epitaksjalnego wzrostu BN, identyfikacji politypów hBN i rBN, badań centrów spinowych oraz modyfikacji właściwości optycznych poprzez dodawanie glinu. Poszczególne rozdziały łączy wspólny motyw badawczy związany z możliwością projektowania strukturalnych i funkcjonalnych właściwości azotku boru za pomocą parametrów procesu MOVPE, choć zakres poruszanych zagadnień jest bardzo szeroki i obejmuje kilka częściowo niezależnych kierunków badawczych. Przedstawione wyniki zostały w znacznym stopniu opublikowane w literaturze naukowej, a na szczególne uznanie zasługuje fakt, że Doktorant jest pierwszym autorem aż sześciu opublikowanych artykułów stanowiących podstawę rozprawy. Świadczy to o jego wiodącej roli w realizacji badań oraz wysokiej aktywności publikacyjnej. Pomimo pewnej rozwlekłości pracy i miejscami nadmiernie rozbudowanych części opisowych, poziom naukowy przedstawionych wyników oceniam bardzo wysoko.

Część właściwa pracy została poprzedzona obszernym, blisko stustronicowym wstępem obejmującym motywację podjętych badań, opis zastosowanej technologii wzrostu MOVPE oraz charakterystykę wykorzystanych metod badawczych. Autor bardzo szczegółowo przedstawia wszystkie techniki wykorzystane przy charakteryzacji badanych materiałów, również te, których, zgodnie z deklaracją zawartą w pracy, nie stosował osobiście. Nieco brakuje syntetycznego przedstawienia wyników poprzednich badań (np. zebranie w tabeli różnic pomiędzy modami wzrostu albo technikami pomiarowymi). Rozumiem, że takie podejście wynika z dążenia do zachowania kompletności i spójności rozprawy. Szeroki zakres omawianych metod i problemów badawczych sprawia momentami wrażenie wykraczającego poza główny nurt rozprawy, a większe skupienie na badaniach prowadzonych bezpośrednio przez Autora pozwoliłoby wyraźniej wyeksponować jego najważniejsze osiągnięcia naukowe, stanowiące zasadniczy wkład do przedstawionej pracy doktorskiej.

Za najważniejsze osiągnięcia naukowe Doktoranta uważam przede wszystkim wykazanie epitaksjalnego charakteru wzrostu azotku boru na podłożach szafirowych oraz identyfikację nieopisaną wcześniej warstwy pośredniej $g\text{-C}_3\text{N}_4$, która odgrywa kluczową rolę w przenoszeniu relacji krystalograficznych pomiędzy podłożem trójwymiarowym a dwuwymiarową warstwą BN. Istotnym rezultatem pracy jest również szczegółowe wyjaśnienie mechanizmu wzrostu materiału metodą MOVPE w reżimie FME. Autor wykazał, że proces ten ma charakter mieszany, a nie wyłącznie kinetyczny lub dyfuzyjny, co pozwoliło na racjonalną optymalizację parametrów wzrostu pod kątem jakości strukturalnej i optycznej otrzymywanych warstw. Za szczególnie interesujące uznaję także opracowanie nowej metody identyfikacji politypów hBN i rBN bazującej na emisji defektu $\text{C}_\text{B}\text{C}_\text{N}$ oraz zademonstrowanie możliwości kontrolowanego tworzenia domen rBN w matrycy hBN, którym towarzyszy mierzalna odpowiedź piezoelektryczna. Ważnym i perspektywicznym kierunkiem badań były również pierwsze próby inżynierii przerwy energetycznej azotku boru poprzez wprowadzanie niewielkich domieszek glinu. Uzyskane wyniki pokazują, że nawet bardzo małe koncentracje Al pozwalają skutecznie modyfikować właściwości optyczne materiału, przynajmniej w absorpcji. Na podkreślenie zasługuje szeroki zakres wykorzystanych metod charakteryzacji oraz umiejętne łączenie wyników pochodzących z różnych technik eksperymentalnych, co znacząco wzmacnia wiarygodność przedstawionych wniosków. Całość uzyskanych rezultatów oceniam jako wartościowy i oryginalny wkład w rozwój badań nad azotkiem boru oraz materiałami przeznaczonymi do zastosowań optoelektronicznych i kwantowych.

Przedstawiona praca doktorska jest bez wątpienia wartościowym wkładem w rozwój wiedzy w omawianym obszarze badawczym, a Doktorant wykazała się dużym zaangażowaniem oraz umiejętnością analizy złożonych problemów. Niemniej jednak, poniżej pozwolę sobie wskazać kilka kwestii, które mogą wymagać dalszej uwagi lub rozwinięcia podczas obrony, mając na celu uczynienie odbioru pracy jeszcze bardziej kompletnym:

- 1) Najistotniejsze wątpliwości budzi przedstawiona w rozdziale 5, w szczególności w podrozdziale 5.2, metoda ilościowej oceny udziału faz hBN i rBN na podstawie

intensywności luminescencji przypisywanej defektowi $C_B C_N$. Autor słusznie wskazuje w dalszej części tego rozdziału ograniczenia takiego podejścia, jednak nie wszystkie konsekwencje tych ograniczeń zostały, moim zdaniem, dostatecznie przedyskutowane. Zaproponowana analiza zakłada w praktyce, że intensywność emisji związanej z danym defektem jest wprost powiązana z udziałem określonego politypu w materiale. Pominięto natomiast możliwość różnic w koncentracji centrów nieradiacyjnych, wydajności rekombinacji oraz samym mechanizmie inkorporacji defektu w próbkach wzrastanych w różnych warunkach technologicznych. Dodatkowo część analizowanych warstw była celowo hodowana z różnymi prędkościami wzrostu, co powinno prowadzić do zmian koncentracji defektów punktowych. W konsekwencji ilościowa interpretacja udziału poszczególnych politypów na podstawie samej emisji defektowej wymaga, moim zdaniem, ostrożniejszego sformułowania oraz wyraźniejszego omówienia jej ograniczeń.

- 2) Drugie zastrzeżenie dotyczy interpretacji wyników przedstawionych w rozdziale 7, poświęconym materiałom określanym przez Autora jako stop BAlN. Z prezentowanych danych wynika, że zawartość glinu w badanych próbkach nie przekracza 1%, a w części przypadków jest wyraźnie niższa. W tej sytuacji pojawiają się wątpliwości, czy bardziej adekwatnym określeniem nie byłoby „domieszkowanie glinem” zamiast tworzenia stopu BAlN. W szczególności brakuje analizy statystycznej wyznaczanych składów oraz dyskusji niepewności pomiarowych, które mogłyby okazać się porównywalne z samymi raportowanymi koncentracjami Al. Pewne wątpliwości budzi również wielokrotnie używane w pracy określenie „warstwowy BAlN”, ponieważ przy tak niewielkich zawartościach glinu nie można jednoznacznie wykluczyć jego preferencyjnej inkorporacji w obszarach defektowych lub międzywarstwowych. Z kolei obserwowane w widmach absorpcji zmiany, w tym szczególnie pojawienie się dwóch wyraźnych maksimów absorpcji, wydają się zaskakująco silne w stosunku do raportowanej koncentracji glinu i wymagają bardziej pogłębionej dyskusji. Warto byłoby również odnieść się do możliwości wpływu innych domieszek, które mogą towarzyszyć procesowi wzrostu, na przykład tlenu często współwystępującego z glinem w strukturach azotkowych.
- 3) Dyskusja optymalnej temperatury wzrostu w relacji do temperatury topnienia przedstawiona przy Rys. 4.12 wykorzystuje koncepcję pochodzącą z klasycznych kryształów 3D. Jej zastosowanie w przypadku materiału warstwowego wzrastanego w sposób nieciągły wymaga dodatkowego uzasadnienia bądź komentarza.

Drobniejsze uwagi, które mogą wymagać krótkiego komentarza:

- a) str 285: “Wynika to z faktu, że azotek boru i azotek glinu występują naturalnie w istotnie różnych najstabilniejszych odmianach alotropowych.” – azotek glinu nie występuje naturalnie, jest w pełni syntetyczny. Natomiast azotek boru został potwierdzony “naturalnie” występujący w skałach bogatych w chrom, ale w postaci kubicznej – cBN.
- b) Rys. 6.1b: brakuje indeksu „A” oznaczającego próbkę po wygrzewaniu (annealed).

- c) Interpretacja zmian prędkości wzrostu na Rys. 4.11 wymaga doprecyzowania. Nie jest jasne, w jaki sposób wyznaczano prędkość wzrostu oraz jaki był dokładny przebieg procesu technologicznego w przypadku próbek wzrastanych w różnych temperaturach.

Zawarte powyżej pytania nie umniejszają roli przedstawionym obserwacjom, a postawiony cel pracy sformułowany jako „zbadanie możliwości modyfikacji właściwości azotku boru otrzymywanego metodą epitaksji z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych (MOVPE)” uważam za osiągnięty. Na podstawie przedstawionej mi do oceny dysertacji uważam, że Doktorant posiada niezbędne kwalifikacje wymagane od fizyka ze stopniem naukowym doktora.

Na podstawie analizy treści przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej pt. „Modyfikacja strukturalnych i funkcjonalnych właściwości azotku boru z wykorzystaniem MOVPE” autorstwa mgr Jakuba Iwańskiego stwierdzam, że **Doktorant wykazał odpowiedni poziom wiedzy w zakresie problematyki badawczej objętej niniejszą dysertacją**, dowiódł, że posiada umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, wyboru odpowiednich technik pomiarowych i planowania eksperymentów w celu rozwiązywania postawionych problemów naukowych.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr Jakuba Iwańskiego **spełnia wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce** (Dz.U.2024.0.1571). Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie pracy do obrony, a mgr Jakuba Iwańskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Henryk Turski

Podpisany elektronicznie przez
Henryk Turski
15.07.2026
22:32:40 +02'00'