

Louisville, 7 lipca, 2026 r.

Dr. Jacek B. Jasinski
Conn Center for Renewable Energy Research
University of Louisville
Louisville, KY 40292, USA
Tel: +1-502.852.6338
E-mail: jacek.jasinski@louisville.edu

Recenzja pracy doktorskiej Pana mgr Jakuba Iwańskiego, zatytułowanej
„Modyfikacja strukturalnych i funkcjonalnych właściwości azotku boru z
wykorzystaniem MOVPE”

Rozprawa doktorska Pana mgr Jakuba Iwańskiego, zatytułowana „*Modyfikacja strukturalnych i funkcjonalnych właściwości azotku boru z wykorzystaniem MOVPE*” wykonana została w Instytucie Fizyki Doświadczalnej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem Pana prof. dr hab. Andrzeja Wysmołka i promotora pomocniczego Pana dr Mateusza Tokarczyka.

Celem doktoratu było zbadanie możliwości kształtowania właściwości azotku boru (BN) poprzez kontrolę procesu epitaksjalnego MOVPE, struktury krystalicznej, defektów oraz składu chemicznego. Rozprawa koncentruje się na odpowiedzi na fundamentalne pytania dotyczące wpływu warunków wzrostu na powstawanie określonych faz BN, mechanizmów formowania interfejsów z podłożem oraz możliwości sterowania właściwościami tego materiału z myślą o zastosowaniach optoelektronicznych czy kwantowych. Wyróżnione są trzy główne kierunki badawcze. Pierwszy dotyczy wpływu struktury krystalicznej i politypizmu BN, w tym stabilizacji faz hBN i rBN oraz możliwości ich przestrzennego uporządkowania. Drugi obejmuje rolę defektów punktowych i domieszek determinujących właściwości elektronowe i optyczne materiału, w szczególności właściwości emisyjne oraz tworzenie centrów spinowych. Trzeci koncentruje się na inżynierii przerwy energetycznej oraz opracowaniu materiałów przeznaczonych do wydajnych emiterów głębokiego ultrafioletu (DUV) poprzez syntezę związków mieszanych na bazie BN.

Aby lepiej zrozumieć znaczenie podjętych badań, warto umiejscowić je w kontekście dynamicznego rozwoju materiałów dwuwymiarowych (2D), a szerzej – materiałów warstwowych, stanowiących obecnie jeden z najintensywniej rozwijających się obszarów fizyki ciała stałego i inżynierii materiałowej. Materiały te charakteryzują się silnymi wiązaniami w płaszczyźnie warstw oraz słabymi oddziaływaniami międzywarstwowymi, co umożliwia otrzymywanie nawet pojedynczych warstw atomowych, a także projektowanie zaawansowanych struktur, takich jak heterostrukтуры Van der Waalsa (VdW) oraz supersieci moiré. Ze względu na szeroką przerwę energetyczną, wysoką stabilność chemiczną oraz dużą kompatybilność z innymi materiałami warstwowymi heksagonalny azotek boru (hBN) od wielu lat jest rutynowo wykorzystywany jako warstwa izolacyjna, buforowa lub podłoże w heterostrukturach VdW. Coraz liczniejsze wyniki badań wskazują jednak, że materiał ten ma szansę również pełnić rolę warstwy aktywnej w strukturach

optoelektronicznych i urządzeniach kwantowych. Wynika to z silnej zależności jego właściwości od fazy krystalicznej, składu oraz domieszek i defektów, co potencjalnie otwiera możliwości dostrajania do konkretnych zastosowań. Stopień wykorzystania BN będzie jednak w dużej mierze zależał od możliwości sterowania procesami technologicznymi prowadzącymi do otrzymywania warstw o ściśle określonych parametrach strukturalnych i funkcjonalnych. Z tego względu do najważniejszych wyzwań należy pełne zrozumienie mechanizmów epitaksjalnego wzrostu warstw BN, natury powstających interfejsów, możliwości precyzyjnej kontroli ich struktury i składu, jak również koncentracji i przestrzennego rozkładu powstających defektów. W swoim doktoracie Pan Jakub podejmuje te wyzwania, a otrzymane wyniki i ich analiza dostarczają nowej wiedzy i odpowiadają na szereg istotnych pytań w tej dziedzinie.

Rozprawa ma typową strukturę formalną i została napisana w języku polskim. Składa się kolejno ze strony tytułowej, dedykacji, streszczenia (w języku polskim i angielskim), wykazu skrótów stosowanych w pracy, spisu treści, wstępu autorskiego, zasadniczej części rozprawy obejmującej rozdziały 1-7 omówione poniżej, podsumowania (rozdział 8), podziękowań, zestawienia dorobku naukowego autora oraz podsumowania jego działalności naukowo-dydaktycznej, a także bibliografii, zawierającej 581 odnośników literaturowych.

W Rozdziale 1, *Wprowadzenie i cel pracy*, autor przedstawia najpierw tematykę materiałów 2D, zwracając uwagę na możliwość tworzenia heterostruktur vdW oraz wynikające z tego nowe możliwości projektowania materiałów o pożądanych właściwościach. Szczególną uwagę poświęca hBN, omawiając jego właściwości oraz rosnące znaczenie jako materiału dla optoelektroniki i technologii kwantowych. Dalej formułuje główny cel rozprawy i przedstawia trzy obrane przez siebie kierunki badań obejmujące kontrolę politypizmu i struktury krystalicznej BN, inżynierię defektów oraz domieszek, a także modyfikację przerwy energetycznej poprzez tworzenie stopów na bazie BN przeznaczonych do zastosowań w emiterach DUV. Rozdział stanowi dobrze przygotowane i merytorycznie wartościowe wprowadzenie. Przekonujące jest uzasadnienie znaczenia badań nad kontrolowanym wzrostem azotku boru oraz przedstawienie potencjału tego materiału dla nowoczesnych technologii. Autor trafnie wskazuje również, że kontrola fazy krystalicznej, defektów i składu otwiera możliwość świadomego projektowania właściwości BN pod konkretne zastosowania. Pewien niedosyt pozostawia natomiast kompozycja rozdziału. Główny cel rozprawy oraz stawiane pytania badawcze zostają sformułowane dopiero po stosunkowo obszernym wprowadzeniu poświęconym materiałom 2D i właściwościom azotku boru, przez co zasadnicza oś pracy ujawnia się dopiero po kilku stronach tekstu. W rezultacie część wcześniejszych informacji, choć merytorycznie wartościowych, sprawia wrażenie nieco oderwanych od głównego nurtu rozprawy. Korzystniejsze byłoby wcześniejsze zasygnalizowanie celu pracy lub silniejsze ukierunkowanie całego wprowadzenia na zagadnienia stanowiące przedmiot rozprawy. Uwagi te mają jednak charakter przede wszystkim redakcyjny i nie wpływają na ogólnie wysoką ocenę rozdziału.

Rozdział 2, *„Wzrost materiałów metodą MOVPE”*, poświęcony jest omówieniu epitaksji z fazy gazowej z wykorzystaniem związków metaloorganicznych (MOVPE), stanowiącej podstawową metodę otrzymywania materiałów badanych w doktoracie. Autor przedstawia podstawy fizyczne procesu, omawiając jego nierównowagowy charakter oraz dwa podstawowe reżimy wzrostu – limitowany transportem masy i limitowany kinetyką reakcji powierzchniowych – wskazując ich

wpływ na parametry takie jak szybkość wzrostu czy jednorodność i jakość warstw. Następnie omawia jest zastosowanie technologii MOVPE do wzrostu azotku boru, porównując ją z innymi metodami syntezy oraz analizując wpływ podstawowych parametrów procesu na mikrostrukturę i właściwości warstw. Rozdział stanowi wartościowe i dobrze udokumentowane opracowanie technologii MOVPE. Na uwagę zasługuje przedstawienie rozwoju tej metody oraz wyjaśnienie mechanizmów odpowiedzialnych za przebieg wzrostu epitaksjalnego. Autor trafnie uzasadnia też, dlaczego MOVPE jest obecnie jedną z najważniejszych metod otrzymywania materiałów z grupy azotków III–V oraz perspektywiczną techniką wzrostu epitaksjalnego warstw BN. Cennym elementem rozdziału jest również omówienie zależności pomiędzy parametrami procesu a właściwościami otrzymywanych warstw, co stanowi istotny punkt wyjścia dla interpretacji wyników przedstawionych w dalszej części rozprawy. Pewne zastrzeżenia budzi natomiast sposób organizacji materiału. W kilku miejscach rozdział ma charakter bardziej kompendium wiedzy niż krytycznej analizy literatury, przez co nie zawsze wyraźnie wyeksponowane są zagadnienia najistotniejsze z punktu widzenia celów rozprawy. Korzystne byłoby również szersze porównanie technologii MOVPE z konkurencyjnymi metodami wzrostu, zwłaszcza w kontekście otrzymywania warstw BN, a także bardziej krytyczne omówienie aktualnych wyzwań związanych z kontrolą defektów, skalowalnością procesu oraz jakością otrzymywanych materiałów. Uwagi te nie umniejszają jednak wartości rozdziału, który stanowi solidne wprowadzenie do technologii wykorzystanej w prezentowanych badaniach.

Rozdział 3, „*Techniki charakteryzacji struktury i właściwości fizycznych*”, przedstawia zestaw metod eksperymentalnych wykorzystanych do kompleksowej charakteryzacji badanych warstw. W szczególności opisane są techniki rentgenowskie (XRD i XRR), mikroskopia sił atomowych (AFM), techniki spektroskopii optycznej (PL, Raman, FTIR, UV-VIS), mikroskopia elektronowa (SEM i TEM/STEM) wraz z towarzyszącymi jej technikami spektroskopowymi (EDX, EELS i CL), jak również metody spektroskopii chemicznej (XPS i SIMS) oraz metody rezonansowe (EPR i ODMR). Taki wybór technik, pozwala na wszechstroną analizę właściwości strukturalnych, morfologicznych, chemicznych i optycznych badanych struktur. Autor wykazuje dobrą znajomość możliwości poszczególnych metod oraz ich wzajemnej komplementarności, a opis aparatury i procedur pomiarowych jest na ogół wystarczająco szczegółowy. Rozdział mógłby jednak zyskać na bardziej przejrzystej organizacji materiału. W niektórych fragmentach opisy poszczególnych technik mają charakter podręcznikowy, podczas gdy większy nacisk warto byłoby położyć na ich znaczenie w kontekście realizacji celów rozprawy oraz ograniczenia interpretacyjne i potencjalne źródła niepewności pomiarowej. Uwagi te mają jednak ponownie głównie charakter redakcyjny.

Rozdział 4, „*Epitaksjalny wzrost azotku boru na podłożach szafirowych*”, przedstawia jedno z najważniejszych wyników rozprawy, dotyczące mechanizmów epitaksjalnego wzrostu warstw BN metodą MOVPE na podłożach szafirowych. Autor podejmuje próbę wyjaśnienia fundamentalnego problemu przenoszenia orientacji krystalograficznej pomiędzy trójwymiarowym podłożem a warstwowym materiałem dwuwymiarowym oraz analizuje wpływ parametrów procesu na przebieg wzrostu i jakość otrzymywanych warstw. Do najważniejszych osiągnięć zaliczam eksperymentalne wykazanie złożonej budowy interfejsu BN/szafir oraz identyfikację dwuwarstwowej struktury buforowej obejmującej warstwę AlN:O i bogatą w węgiel warstwę pośrednią zinterpretowaną jako grafityczny azotek węgla ($g-C_3N_4$). Szczególnie cenne jest zaproponowanie mechanizmu, zgodnie

z którym warstwa g-C₃N₄ pełni rolę pośrednika w przekazywaniu informacji o orientacji pomiędzy podłożem a warstwą BN. Hipoteza ta stanowi oryginalny i wartościowy wkład w zrozumienie mechanizmów epitaksji materiałów warstwowych na podłożach krystalicznych. Na podkreślenie zasługuje również analiza wpływu parametrów wzrostu na kinetykę procesu oraz jakość otrzymywanych warstw, dostarczająca cennych wskazówek dotyczących optymalizacji technologii MOVPE. Przedstawione wyniki są przekonujące i zostały poparte szerokim zestawem komplementarnych technik badawczych, co zwiększa wiarygodność zaproponowanej interpretacji. Pewne uwagi dotyczą natomiast sposobu prezentacji części wyników. W szczególności podrozdział 4.1 „Mechanizm wzrostu w trybie FME” jest bardzo obszerny i miejscami sprawia wrażenie zbyt rozwlekłego, przez co śledzenie toku rozumowania autora staje się utrudnione. W mojej ocenie czytelność tego fragmentu znacznie poprawiłoby syntetyczne zestawienie najważniejszych wyników w formie tabeli podsumowującej wpływ podstawowych parametrów procesu na kinetykę wzrostu oraz właściwości otrzymywanych warstw. Takie zestawienie pozwoliłoby łatwiej wyodrębnić najważniejsze zależności i wnioski płynące z przeprowadzonych badań. Pomimo tych uwag uważam, że rozdział zawiera oryginalne i wartościowe wyniki naukowe, stanowiące jeden z najistotniejszych elementów rozprawy.

Również rozdział 5, „Sterowanie politypem warstwowego azotku boru w procesie MOVPE”, należy do najciekawszych i najbardziej oryginalnych części rozprawy. Autor podejmuje tutaj istotne zagadnienie kontrolowanego kształtowania politypizmu warstwowego azotku boru oraz identyfikacji faz hBN i rBN, których rozróżnienie przy użyciu konwencjonalnych metod jest często trudne. Za jedno z najważniejszych osiągnięć uważam opracowanie metody identyfikacji i ilościowej analizy politypów BN z wykorzystaniem komplementarnych technik dyfrakcyjnych, mikroskopowych i spektroskopowych. Szczególnie wartościowe jest wykazanie możliwości identyfikacji fazy rBN na podstawie charakterystycznego przesunięcia linii zerofononowej defektu węglowego w widmach katodoluminescencji i fotoluminescencji. Zaproponowane podejście ma charakter nowatorski i stanowi cenne uzupełnienie klasycznych metod identyfikacji politypów, takich jak dyfrakcja rentgenowska, których zastosowanie w przypadku cienkich warstw BN jest często ograniczone. Na wysoką ocenę zasługują również wyniki dotyczące kontrolowanego wzrostu struktur zawierających domeny rBN w matrycy hBN oraz wykazanie zależności pomiędzy parametrami procesu MOVPE, strukturą krystaliczną i właściwościami optycznymi materiału. Istotnym osiągnięciem jest także skorelowanie wyników uzyskanych różnymi technikami badawczymi, co pozwoliło na wiarygodną interpretację obserwowanych zjawisk oraz powiązanie lokalnej struktury z właściwościami materiału. Pewne kwestie wymagają jednak doprecyzowania. Zaproponowana metoda identyfikacji politypu rBN opiera się na obecności charakterystycznej emisji związanej z defektem węglowym, dlatego warto byłoby szerzej przedyskutować zakres jej stosowalności oraz możliwość zastosowania do próbek o innym składzie chemicznym lub odmiennej koncentracji defektów. Korzystne byłoby również uzupełnienie dyskusji o informacje dotyczące powtarzalności otrzymanych wyników oraz niepewności ilościowej analizy udziału poszczególnych politypów, zwłaszcza w przypadku struktur o złożonej morfologii i niewielkich domenach. Uwagi te nie umniejszają znaczenia przedstawionych rezultatów.

Rozdział 6, „Defekty o niezerowym spinie w azotku boru”, poświęcony jest badaniom centrów defektowych o właściwościach spinowych w warstwach BN otrzymywanych metodą MOVPE. Autor

analizuje wpływ parametrów wzrostu oraz procesów wygrzewania na powstawanie i ewolucję spinowo aktywnych defektów, koncentrując się przede wszystkim na roli atomów węgla i wodoru oraz ich wpływie na właściwości magnetyczne i optyczne materiału. Do najważniejszych osiągnięć zaliczam wykazanie, że właściwości spinowe warstw BN mogą być świadomie kształtowane poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu MOVPE. Autor przekonująco pokazuje zależność pomiędzy temperaturą wzrostu, obróbką termiczną oraz koncentracją centrów aktywnych spinowo, proponując jednocześnie mechanizm ich powstawania i transformacji. Za szczególnie interesujące uważam wyniki dotyczące identyfikacji nowego defektu węglowego o spinie $S = 1$, wykazującego jednocześnie właściwości centrum spinowego i emitera pojedynczych fotonów. Jest to rezultat o dużym znaczeniu poznawczym i aplikacyjnym, wskazujący na realny potencjał warstw BN do zastosowań w technologiach kwantowych, spintronice oraz czujnikach pola magnetycznego. Przedstawione badania dostarczają również praktycznych wskazówek dotyczących optymalizacji procesu wzrostu pod kątem uzyskania materiałów o pożądanych właściwościach spinowych. Pewne aspekty przedstawionej interpretacji wymagają jednak dalszej weryfikacji. Zaproponowany mechanizm powstawania defektów opiera się w znacznym stopniu na analizie pośrednich danych spektroskopowych, dlatego jego pełne potwierdzenie wymagałoby uzupełnienia o dodatkowe badania strukturalne lub modelowanie teoretyczne. Korzystne byłoby również szersze omówienie przyczyn obserwowanych różnic pomiędzy wynikami uzyskanymi metodami EPR i ODMR oraz dokładniejsze określenie roli poszczególnych zanieczyszczeń i domieszek w procesie tworzenia centrów spinowych.

Rozdział 7, „*Modyfikacja przerwy energetycznej azotku boru poprzez tworzenie stopów z glinem*”, poświęcony jest jednemu z najbardziej ambitnych wyzwań podjętych w rozprawie, jakim jest możliwość kontrolowanego strojenia przerwy energetycznej azotku boru poprzez tworzenie stopów z glinem. Autor podejmuje próbę rozwiązania istotnego problemu technologicznego, związanego z zachowaniem warstwowej struktury BN przy jednoczesnym wprowadzaniu atomów glinu preferujących trójwymiarową strukturę węgla. Na uznanie zasługuje opracowanie warunków wzrostu umożliwiających otrzymywanie warstwowych struktur BAlN metodą MOVPE oraz wykazanie, że zastosowanie odpowiednio dobranych sekwencji impulsowego podawania prekursorów pozwala zwiększyć efektywność domieszkowania glinem przy zachowaniu struktury typu sp^2 . Przedstawiona analiza, oparta na wynikach uzyskanych z wykorzystaniem wielu komplementarnych technik badawczych, dostarcza cennych informacji dotyczących zależności pomiędzy parametrami wzrostu, składem chemicznym i właściwościami optycznymi otrzymanych materiałów. Szczególnie interesujące są wyniki pomiarów absorpcyjnych wskazujące na pojawienie się dodatkowego pasma absorpcji o niższej energii, co może świadczyć o modyfikacji struktury pasmowej i otwiera perspektywę dalszych badań nad stopami BAlN przeznaczonymi do zastosowań w emiterach DUV. Jednocześnie uważam, że interpretacja części wyników wymaga pewnej ostrożności. Wbudowanie glinu do warstwowej struktury BN zostało potwierdzone przy użyciu kilku technik eksperymentalnych, jednak ze względu na bardzo małą zawartość Al uzyskane sygnały są bliskie granicy czułości niektórych metod analitycznych. Dotyczy to w szczególności analizy STEM-EDX, gdzie na interpretację wyników mogą wpływać efekty związane z tłem pomiarowym, lokalną zmiennością grubości preparatu oraz obecnością ewentualnych wydzieleni fazy AlN. Sam autor zwraca uwagę na te ograniczenia i podejmuje próbę ich uwzględnienia podczas analizy wyników. W mojej ocenie

najbardziej przekonującym argumentem przemawiającym za rzeczywistą modyfikacją struktury pasmowej materiału pozostaje obserwacja dodatkowego pików w widmach absorpcji. Nie jest jednak całkowicie wykluczone, że obserwowany efekt może być związany z pojawianiem się stanów defektowych, dlatego zagadnienie to wymaga dalszych badań eksperymentalnych i wsparcia teoretycznego. Pomimo tych zastrzeżeń rozdział oceniam wysoko. Autor podejmuje bardzo trudny i aktualny problem badawczy, a przedstawione wyniki stanowią wartościowy krok w kierunku opracowania nowych materiałów przeznaczonych do emiterów głębokiego ultrafioletu.

Podsumowanie

Należy stwierdzić, że przedstawione wyniki tworzą spójny i konsekwentnie realizowany program badawczy, którego nadrzędnym celem było opracowanie metod kontroli własności warstwowego BN otrzymywanego metodą MOVPE. Poszczególne rozdziały rozprawy są ze sobą logicznie powiązane – od zrozumienia mechanizmów wzrostu epitaksjalnego, poprzez kontrolę struktury krystalicznej i politypizmu, badania defektów spinowych, aż do prób inżynierii przerwy energetycznej poprzez tworzenie stopów BAlN.

Za najważniejsze osiągnięcia rozprawy uważam wyjaśnienie mechanizmu odpowiedzialnego za epitaksjalny wzrost BN na podłożach szafirowych wraz z identyfikacją złożonej struktury interfejsu, opracowanie metod kontrolowania udziału politypów hBN i rBN oraz ich przestrzennego rozmieszczenia, wykazanie możliwości sterowania właściwościami spinowymi poprzez odpowiedni dobór parametrów wzrostu oraz podjęcie prób modyfikacji struktury pasmowej azotku boru poprzez domieszkowanie glinem. Na szczególne podkreślenie zasługuje szerokie wykorzystanie komplementarnych technik, dzięki czemu uzyskane wnioski opierają się na wzajemnie uzupełniających się wynikach eksperymentalnych. Praca ma charakter wyraźnie interdyscyplinarny, łącząc zagadnienia z zakresu fizyki ciała stałego, inżynierii materiałowej, epitaksji cienkich warstw i zaawansowanej charakterystyki materiałów. W wielu miejscach autor proponuje własne interpretacje mechanizmów zachodzących podczas wzrostu i formowania właściwości materiału, co świadczy o dojrzałości naukowej oraz umiejętności krytycznej analizy uzyskanych wyników.

Nie oznacza to jednak, że rozprawa jest całkowicie pozbawiona słabszych stron. W kilku miejscach sposób prezentacji wyników mógłby być bardziej syntetyczny i przejrzysty. Dotyczy to zwłaszcza rozbudowanych opisów eksperymentalnych, które miejscami utrudniają wyodrębnienie najważniejszych zależności i wniosków. W niektórych fragmentach wskazane byłoby również szersze omówienie ograniczeń stosowanych metod badawczych oraz bardziej krytyczna dyskusja alternatywnych interpretacji części wyników, szczególnie tam, gdzie wnioski opierają się na pośrednich przesłankach eksperymentalnych. Ponadto, praca jest bardzo obszerna – część merytoryczna liczy blisko 300 stron, a bibliografia obejmuje niemal 600 pozycji. Świadczy to niewątpliwie o dobrej znajomości literatury przedmiotu, jednak miejscami nadmiar prezentowanych informacji utrudnia wyeksponowanie najważniejszych wyników i wniosków. W kilku fragmentach tekst mógłby zostać bardziej zwięźle zredagowany, bez uszczerbku dla wartości merytorycznej. Podobnie bibliografia mogłaby być bardziej selektywnie dobrana, koncentrując się przede wszystkim na pracach o kluczowym znaczeniu dla omawianych zagadnień. Należy również zaznaczyć,

że w trakcie analizy rozprawy zidentyfikowano kilka kwestii o charakterze merytorycznym, które wymagają dodatkowego wyjaśnienia lub doprecyzowania. Zostały one przedstawione w formie komentarzy zamieszczonych poniżej. Ponadto w tekście rozprawy występuje trochę błędów redakcyjnych i językowych, które nie wpływają na jej wartość naukową, jednak wymagają korekty. Zestawienie tych błędów oraz proponowanych poprawek zostało zamieszczone na końcu recenzji.

Powyższe uwagi mają jednak charakter przede wszystkim redakcyjny i interpretacyjny i nie wpływają na wysoką ocenę wartości naukowej rozprawy i na fakt, że rozprawa stanowi wartościowe i oryginalne osiągnięcie naukowe. Przedstawione wyniki wnoszą nową wiedzę do badań nad warstwowym azotkiem boru oraz mechanizmami jego epitaksjalnego wzrostu, a jednocześnie wyznaczają nowe kierunki dalszych prac nad materiałami przeznaczonymi do zastosowań w optoelektronice oraz technologiach kwantowych.

Wnioski końcowe

W mojej ocenie rozprawa doktorska Pana mgr Jakuba Iwańskiego spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim określone w obowiązujących przepisach, w szczególności w § 21 pkt 2–4 załącznika nr 1 do uchwały nr 157 Senatu Uniwersytetu z dnia 29 czerwca 2022 r., dotyczącym określenia sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora na Uniwersytecie Warszawskim.

Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego i wnosi znaczący wkład w rozwój badań nad warstwowymi materiałami azotku boru oraz ich zastosowaniami w optoelektronice i technologiach kwantowych. Stanowi spójny i logicznie uporządkowany cykl badań, oparty na szerokim wykorzystaniu nowoczesnych, komplementarnych technik eksperymentalnych, a uzyskane wyniki w znaczący sposób pogłębiają stan wiedzy na temat mechanizmu epitaksji takich warstw i kształtowania ich właściwości poprzez odpowiedni dobór parametrów wzrostu. Przeprowadzone badania zaowocowały szeregiem osiągnięć, wśród których za najważniejsze uważam:

- a) eksperymentalne wykazanie mechanizmu epitaksjalnego wzrostu azotku boru na podłożach szafirowych wraz z identyfikacją złożonej struktury interfejsu oraz rolę warstwy pośredniej $\text{g-C}_3\text{N}_4$ w przekazywaniu orientacji krystalograficznej,
- b) opracowanie metod identyfikacji i kontroli politypów BN (hBN i rBN) oraz ich przestrzennego rozkładu w warstwach epitaksjalnych,
- c) wykazanie możliwości kontrolowanego kształtowania właściwości spinowych warstw BN poprzez precyzyjną kontrolę parametrów wzrostu MOVPE.

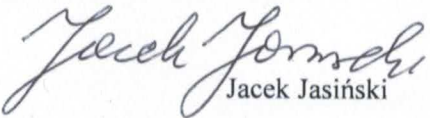
Autor wykazał się również bardzo dobrą znajomością zagadnień z zakresu fizyki ciała stałego, inżynierii materiałowej oraz metod zaawansowanej charakteryzacji materiałów, a także umiejętnością formułowania własnych interpretacji złożonych zjawisk fizykochemicznych zachodzących podczas wzrostu warstw epitaksjalnych.

Istotnym elementem oceny jest również dorobek naukowy doktoranta. Obejmuje on 14 publikacji w recenzowanych czasopismach naukowych, w tym 7 z pierwszym autorstwem, opublikowanych m.in. w renomowanych czasopismach, takich jak *npj 2D Materials and Applications*, *Scientific Reports* oraz *Journal of Alloys and Compounds*. Na uwagę zasługuje również fakt, że bezpośrednio z tematyką

rozprawy związanych jest 5 opublikowanych prac oraz 2 kolejne znajdujące się obecnie w recenzji, a łącznie doktorant jest współautorem 7 manuskryptów będących w recenzji, co świadczy o jego dużej aktywności naukowej. Dorobek ten uzupełniają liczne wystąpienia konferencyjne (22 referaty i 9 prezentacji plakatowych), współautorstwo w patencie, aktywny udział w realizacji projektów badawczych, w tym jako kierownik projektu finansowanego w ramach programu PRELUDIUM 21, a także działalność dydaktyczna obejmująca współopiekę nad pracami licencjackimi. Całość tej aktywności, uzupełniona uzyskanymi nagrodami i wyróżnieniami, potwierdza dużą dojrzałość naukową doktoranta oraz wysokie kompetencje w zakresie prowadzenia badań naukowych.

W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony. Jednocześnie, ze względu na wysoki poziom naukowy pracy, jej wyraźnie nowatorski charakter, interdyscyplinarność oraz szczególnie istotne wyniki dotyczące mechanizmów epitaksjalnego wzrostu BN i kontroli jego właściwości strukturalnych oraz spinowych, wnioskuję o jej wyróżnienie.

Wniosek o wyróżnienie uzasadniam szczególnie wysokim poziomem badań nad mechanizmami epitaksjalnego wzrostu azotku boru na podłożach szafirowych, obejmujących identyfikację złożonej struktury interfejsu BN/szafir oraz zaproponowanie roli warstwy $g-C_3N_4$ w przekazywaniu orientacji krystalograficznej. Na wyróżnienie zasługuje również opracowanie metod kontrolowanego otrzymywania i stabilizacji politypów BN (hBN i rBN) oraz nowatorskiego podejścia do ich identyfikacji i analizy ilościowej w oparciu o spektroskopię katodoluminescencyjną i fotoluminescencyjną


Jacek Jasiński

Komentarze i pytania

1. Odnosnie stwierdzenia na stronie 38 – „Ze względu na gorszą jakość krystaliczną i większą zawartość węgla dla próbek otrzymywanych w procesach wykorzystujących azot...” – czy wiadomo czemu jakość próbek hodowanych z użyciem azotu jest gorsza niż z użyciem wodoru? Czy wodór odgrywa jakąś dodatkową rolę oprócz bycia gazem nośnym?
2. Odnosnie Rys. 3.10 na stronie, czy doktorant może omówić jak dokładnie z pomiarów FTIR wyznaczone były grubości warstw?
3. Odnosnie stwierdzenia na stronie 137 – „Zmarszczki są bardzo słabo widoczne dla próbki z najdłuższymi pulsami. Wynika to jednak z małej grubości próbki...” – czy jest możliwe, że warstwa ta była jeszcze w dużym stopniu naprężona i dlatego nie powstały wyraźne zmarszczki?
4. Odnosnie stwierdzenia na stronie 138 – „W przypadku próbki o najdłuższych pulsach dane opisaliśmy pojedynczą krzywą Gaussa, której położenie maksimum wskazywało istotnie większą stałą sieci...” - czy ten wynik może wskazywać, że warstwa ta była jeszcze naprężona co tłumaczyłoby brak zmarszczek na obrazach SEM?

5. Odnośnie stwierdzenia na stronie 148 – „*FTIR wskazuje na zbliżone własności próbek hodowanych z przepływami 5000 ccm i 6000 ccm, które to różnią się istotnie dla próbek hodowanej z przepływem 7000 ccm.*” – czy ten wynik może wskazywać, że warstwa ta również była jeszcze naprężona (brak zmarszczek, „gorsza” stała sieci, itd)?
6. Odnośnie następującego stwierdzenia na stronie 274 – „*Jak można zauważyć na Rys. 7.1 le)-h), w obszarze odpowiadającym warstwie BALN obserwujemy nadmiar sygnału glinu na tle monotonicznego sygnału pochodzącego od podłoża Al_2O_3 . Po odjęciu wkładu tła wyznaczyliśmy zawartość glinu, która koreluje z ilością TMAI w fazie gazowej podczas wzrostu.*” – to sygnały nadmiarowe glinu (Al) są tak małe, że istotne staje się tło, wielkość szumu, czy efekty takie jak niejednorodność preparatu TEM (czyli żargonowo tzw. lamelki), którego grubość może się lokalnie zmieniać na skutek preferencyjnego trawienia w procesie FIB. Na ile czynniki te były uwzględnione i jak wyglądały widma EDX tych próbek?

Uwagi redakcyjne

- Strona iii (Streszczenie): określenie „*wiszących wiązań*” to kalka językowa.
- Strona 8: określenie „*superintensywną*” to kalka językowa.
- Strona 15: zamiast „*nietuzinkowych efektów*” chyba powinno być „*nietrywialnych efektów*”.
- Strona 16”: określenie „*natywnie*” to kalka językowa.
- Strona 19: zamiast „*sterowanie*” powinno być „*sterowania*”.
- Strona 38: Zdanie „*Wszystkie prekursorzy w obecności gazu nośnego są kierowane do reaktora polerowanymi elektrycznie.*” jest nagle „urwane”.
- Strona 57: zamiast „*Jednak zależności*” powinno być „*Jednak w zależności*”.
- Strona 62: zamiast „*oddziaływań dalekodystansowych*” chyba lepiej użyć „*oddziaływań dalekozasięgowych*”.
- Strony 89 i 92: „*elektrony transmitowane*” to kalka językowa.
- Strona 108: odnośnie wartości – 35,611°, 36,414°, 26,398°, 26,668° oraz 26,731°- podawanie tutaj trzech liczb po przecinku jest nadużyciem biorąc pod uwagę duże szerokości pików.
- Strona 131: zamiast „*Niwykluczne wynika*” powinno być „*Niewykluczne, że wynika*”.
- Strona 131: wyrażenie – „*podłoże z wyrośniętym materiałem*” – brzmi dziwnie.
- Strona 164: zamiast „*Składa się one*” powinno być „*Składa się ona*”.
- Strona 204: zamiast „*w kontekście przeprowadzonej należy*” powinno być „*w kontekście przeprowadzonej analizy należy*”.
- Strona 218: zamiast „*Długość lamelki wynosi typowo od kilku do kilkunastu nanometrów*” powinno być „*Długość lamelki wynosi typowo od kilku do kilkunastu mikrometrów*”.
- Strona 223: Dolne panele na Rys. 5.36 powinny być oznaczone (b)-(d) zamiast (a)-(c).
- Strona 242: Stwierdzenie „*dochodzi do klastrowania atomów węgla*” to kalka językowa.