



Wrocław, 31.07.2026

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

**Recenzja pracy doktorskiej Pana magistra Piotra Tatarczaka
pt. „Quantum Emitters in MOVPE-Grown Layered Boron Nitride”**

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr. Piotra Tatarczaka jest analiza wpływu warunków wzrostu na właściwości fizyczne warstw azotku boru (BN) osadzanych metodą MOVPE, a także charakterystyka i modyfikacja kluczowych parametrów emiterów kwantowych obecnych w tym materiale. Praca została wykonana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem dr hab. Johannesesa Bindera.

Azotek boru o hybrydyzacji sp^2 to dwuwymiarowy materiał o szerokiej przerwie energetycznej (~ 6 eV), którego centra barwne wykazują emisję w szerokim zakresie spektralnym (od UV do NIR). Defekty te znajdują zastosowanie w technologiach kwantowych, m.in. ujemnie naładowane luki borowe służą jako sensory pól magnetycznych, a defekty emitujące w zakresie widzialnym jako źródła pojedynczych fotonów. Dotychczasowe badania opierają się głównie na mało skalowalnych płatkach, odseparowywanych metodą eksfoliacji mechanicznej kryształów objętościowych. Aby umożliwić praktyczne wdrożenia, niezbędne jest przejście na technologię MOVPE, która pozwala na powtarzalną syntezę wielkopowierzchniowych warstw BN na podłożach o rozmiarach rzędu kilku cali.

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr. Piotra Tatarczaka są aktualne zagadnienia z zakresu inżynierii materiałowej, fizyki ciała stałego oraz zaawansowanych technik charakteryzacji struktur. Pierwszy cel badawczy obejmuje statystyczną analizę wpływu parametrów

wzrostu na właściwości fizyczne warstw azotku boru (BN), jak również detekcję i ocenę emiterów pojedynczych fotonów w zakresie widzialnym (~ 540 nm). Drugim, komplementarnym celem pracy jest ocena właściwości mechanicznych struktur pęcherzy BN – generowanych drogą naświetlania wiązką elektronów bezpośrednio po procesie epitaksji – oraz określenie ich korelacji z charakterystyką wspomnianych emiterów jednofotonowych. Uzupełnieniem badań jest także analiza właściwości optycznych azotku boru poddanego naświetlaniu neutronami termicznymi, które zastosowano w celu kontrolowanego generowania luk borowych. Autor rozprawy podkreśla swój wkład w pomiary widm fotoluminescencji (PL), widm rozpraszania Ramana oraz generacji drugiej harmonicznej (SHG), a także w ich analizę i interpretację. Wykonał również naświetlanie struktur wiązką elektronów oraz przeprowadził proces fotolitografii.

Przedstawiona rozprawa doktorska ma przejrzystą strukturę i napisana jest poprawnym językiem. Rozdział 1 wprowadza w tematykę pracy, omawiając fundamentalne właściwości światła kwantowego, jego kluczowe aplikacje oraz parametry krytyczne. Przedstawia również analizę porównawczą emiterów pojedynczych fotonów pod kątem ich potencjału i ograniczeń, osadzając azotek boru w aktualnym kontekście literaturowym. W rozdziale 2 omówiono właściwości fizyczne BN, jego zastosowania oraz techniki wzrostu. W dalszej części skoncentrowano się na opisie defektów punktowych w warstwowym BN, w tym na centrach barwnych (UV i niebieskich), emiterach pojedynczych fotonów w zakresie widzialnym oraz ujemnie naładowanych lukach borowych emitujących w bliskiej podczerwieni (NIR). Szczególną uwagę poświęcono badaniom w pracy emiterom widzialnym, podsumowując metody ich wytwarzania i modyfikacji właściwości, a także najnowsze osiągnięcia w ich bezpośredniej inżynierii podczas wzrostu. Rozdział 2 zamyka wprowadzenie do fizyki struktur pęcherzy jako obiecującej platformy do modyfikacji właściwości optycznych materiałów 2D, zestawiając literaturowe doniesienia o pęcherzach obecnych w płatkach otrzymanych za pomocą eksfoliacji mechanicznej z badanymi w pracy strukturami generowanymi poprzez naświetlanie wiązką elektronów warstw MOVPE. Rozdział 3 przedstawia zastosowane techniki eksperymentalne, w tym wzrost warstw BN metodą MOVPE, przygotowanie próbek oraz pomiary strukturalne i optyczne. Opisano tu również wykorzystaną aparaturę badawczą. Rozdziały 4, 5 i 6 stanowią najważniejszą część rozprawy, prezentując kluczowe wyniki dotyczące odpowiednio: (i) charakteryzacji i inżynierii zielonych emiterów pojedynczych fotonów w warstwach BN uzyskanych metodą MOVPE, (ii) badań nad strukturami pęcherzy generowanymi w epitaksjalnych

warstwach BN poprzez naświetlanie wiązką elektronów oraz (iii) procesu formowania centrów barwnych w romboedrycznym azotku boru (rBN) ze wzrostu MOVPE, indukowanego naświetlaniem neutronami termicznymi. Rozdział 7 stanowi podsumowanie najważniejszych osiągnięć rozprawy oraz określa perspektywy ich wykorzystania w dalszych badaniach i aplikacjach technologicznych.

Istotnym wynikiem przedstawionym w Rozdziale 4 jest wykazanie, że warstwy epitaksjalne BN, wyhodowane metodą MOVPE w temperaturze 1400 °C, zawierają powiązane z obecnością węgla zielone centra barwne. Działają one jako emitery pojedynczych fotonów w temperaturze pokojowej, co potwierdzają pomiary funkcji korelacji drugiego rzędu, wykazujące zależność $g^2(0) < 0,5$. Pomiary w temperaturach kriogenicznych (1.7 K), ze względu na specyfikę układu eksperymentalnego, ograniczono do ultra-stabilnych emiterów. Wykazują one ultra-czystą emisję charakteryzującą się wartością $g^2(0) \sim 0.02$. Szerokość spektralna badanych emiterów wynosi 1–2 meV, co świadczy również o obecności istotnej dyfuzji spektralnej. W Rozdziale 4 przedstawiono także analizę trzech klas emiterów, różniących się niskoenergetyczną charakterystyką fononową. W celu zbadania mechanizmów poszerzenia linii spektralnych, wywołanego oddziaływaniem z fononami, przeanalizowano widma fotoluminescencji (PL) w funkcji temperatury. Uzyskane rezultaty wskazują na kluczową rolę fononów akustycznych ZA w kierunku M-K.

Dalsza część wyników w Rozdziale 4 dotyczy wpływu grubości warstwy BN oraz natężenia przepływu prekursora metaloorganicznego –TEB – na formowanie zielonych emiterów pojedynczych fotonów podczas procesu wzrostu. W celu jednoznacznego rozdzielenia efektów wynikających z grubości BN od tych związanych z natężeniem przepływu TEB, systematycznie zbadano dwie serie warstw: pierwszą o zmiennej grubości oraz drugą, wytworzoną przy różnych natężeniach przepływu TEB. Porównanie właściwości strukturalnych wszystkich badanych próbek, uzupełnione o szczegółową analizę wpływu warunków wzrostu na formowanie emiterów, stanowi niezwykle istotny element pracy. Autor proponuje prosty model opisujący zależność gęstości emiterów od grubości BN i parametrów wzrostu, który poddaje krytycznej dyskusji pod kątem jego ograniczeń. W dalszej kolejności wykazano, że zbyt wysokie natężenie przepływu TEB prowadzi do degradacji emisji pojedynczych fotonów z zielonych centrów barwnych. Uzyskane wyniki ujawniają wyraźny obszar przejściowy pomiędzy reżimem wzrostu sprzyjającym formowaniu wysokiej jakości emiterów kwantowych a reżimem generującym emitery o niskiej jakości. Ostatecznie wykazano, że stabilność emiterów rośnie liniowo wraz z grubością warstwy BN w badanym zakresie. Otrzymane rezultaty stanowią

cenne wytyczne do optymalizacji warunków wzrostu metodą MOVPE pod kątem uzyskiwania zielonych emiterów pojedynczych fotonów w warstwowym BN. Choć wyciągnięte wnioski są ściśle powiązane z warunkami procesowymi stosowanymi w danej grupie badawczej, podejście przedstawione w tym rozdziale demonstruje ogólną, uniwersalną strategię optymalizacji parametrów pod kątem generacji emiterów pojedynczych fotonów.

Rozdział 5 rozpoczyna się od analizy właściwości mechanicznych pęcherzyków w warstwach BN. Ze względu na unikalny mechanizm ich formowania – oparty na odrywaniu się zmarszczek, charakterystyczny dla azotku boru hodowanego metodą MOVPE – struktury te wykazują nietypowe cechy, a opis ich geometrii wyryka się powszechnie stosowanym modelem teoretycznym. W dalszej części przeanalizowano wpływ tych defektów na centra barwne. Porównanie map fotoluminescencji (PL) próbek nieeksponowanych oraz poddanych działaniu elektronów wykazało, że pęcherzyki wzmacniają emisję pojedynczych fotonów. Na podstawie mapowania widm PL oraz spektroskopii Ramana zjawisko to przypisano efektom interferencyjnym wewnątrz pęcherzyków, które działają jak wnęki optyczne. Ostatnia część rozdziału dotyczy formowania deterministycznych macierzy pęcherzyków, co jest kluczem do ich praktycznego zastosowania. Opracowano strategię maski pozwalającą na wytwarzanie struktur o pożądanym wymiarach w ściśle określonych, zdefiniowanych litograficznie obszarach. Co istotne, metoda ta nie zaburza właściwości kwantowych zielonych emiterów pojedynczych fotonów (SPE). Wyniki te opublikowano w artykule P. Tatarczk i in. pt. „*Deterministic hBN Bubbles as a Versatile Platform for Studies on Single-Photon Emitters*” (Adv. Funct. Mater. 36, nr 24, 2026: e26312), którego autor niniejszej rozprawy jest pierwszym autorem.

Rozdział 6 przedstawia proces formowania centrów barwnych w r-BN, indukowanych działaniem neutronów termicznych. W tej części pracy porównano właściwości optyczne dwóch próbek: poddanej ekspozycji na neutrony oraz referencyjnej, niepoddanej działaniu promieniowania. Wyniki pomiarów widm fotoluminescencji (PL) oraz optycznie wykrywanego rezonansu magnetycznego (ODMR) wskazują na skuteczną kreację centrów V_B^- w materiale napromieniowanym. W dalszej kolejności, wykorzystując zróżnicowane długości fali pobudzania, zbadano emisję związaną z obecnością defektów w obu obiektach. Wyniki te ujawniają, że radiacja neutronowa generuje emisję w zielonym zakresie widma, pochodzącą od centrów luminescencyjnych, które w swojej strukturze atomowej najprawdopodobniej zawie-

rają zarówno wakanse borowe, jak i domieszki węgla. Ponadto wykazano, że proces ten indukuje powstawanie centrów, których energia emisji jest bliska niebieskim pojedynczym emitantom fotonów, powszechnie opisywanym w literaturze jako centra B.

Poniżej przedstawiono pytania i komentarze do omówionych rezultatów.

- (1) W podrozdziale 4.6 przedstawiono analizę widm fotoluminescencji (PL) w funkcji temperatury dla przykładowego zielonego emitera. Autor koncentruje się głównie na poszerzeniu i przesunięciu linii emisyjnej ZPL w próbce T_{1400} . Zasadne wydaje się jednak pytanie, dlaczego pominięto analizę korelacji intensywności linii ZPL oraz towarzyszących jej replik fononowych (PSB) przesuniętych o 165 meV i 195 meV. Kwestia ta pozostawia pewien niedosyt, tym bardziej że w podrozdziale 4.3 zaprezentowano trzy typy emiterów, podając również krótką informację na temat alternatywnej interpretacji charakterystyki fononowej przesuniętej o 195 meV.
- (2) Czy Doktorant rozważał uzupełnienie pracy o analizę zależności intensywności zielonego emitera od temperatury (Rys. 4.7a) w formie wykresu Arrheniusa? Przedstawienie wyników w tym ujęciu oraz wyznaczenie energii termicznej aktywacji wygaszania emitera stanowiłoby cenne i interesujące dopełnienie przeprowadzonych badań.
- (3) W podrozdziale 6.2 zaprezentowano wyniki generacji drugiej harmonicznej (SHG) w kryształach r-BN, uzyskane z wykorzystaniem lasera pracy ciągłej (CW) o długości fali 1064 nm. Czy możliwość obserwacji SHG w tak specyficznych warunkach eksperymentalnych wynika wyłącznie z unikalnej struktury krystalicznej i złamania symetrii inwersji tego politypu? Czy też uzyskane rezultaty świadczą o znacznie większym, aplikacyjnym potencjale warstw r-BN w obszarze zintegrowanej optyki nieliniowej?
- (4) Czy Doktorant rozważał uzupełnienie analizy emisji luki borowej (V_B^-) w rBN w funkcji temperatury (podrozdział 6.3) o wykres Arrheniusa? Pozwoliłoby to na ilościowy opis termicznego gaszenia całkowitej fotoluminescencji (pola powierzchni pod pasmem emisyjnym) oraz na bezpośrednie porównanie uzyskanych wyników z danymi literaturowymi dla kryształów hBN.

Uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, określone w Uchwale nr 157 Senatu Uniwersytetu Warszawskiego z dnia 29

czerwca 2022 r. Wnioskuje zatem o dopuszczenie Pana magistra Piotra Tatarczaka do publicznej obrony. Omówione w pracy rezultaty potwierdzają ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie nauki fizyczne oraz jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiotem rozprawy są oryginalne badania naukowe dotyczące manipulacji parametrami wzrostu BN, wzmocnienia emisji emiterów pojedynczych fotonów za pośrednictwem mikropęcherzyków oraz mechanizmów generowania centrów barwnych poprzez napromieniowanie neutronami.

Komentarze zawarte w recenzji nie obniżają wysokiej wartości merytorycznej prezentowanych wyników. Część rezultatów opisanych w dysertacji została opublikowana w prestiżowym czasopiśmie naukowym „*Advanced Functional Materials*”, w którym doktorant jest pierwszym autorem. Pozostałe wyniki zostały przygotowane pod kątem przyszłych publikacji. Doktorant prezentował również wyniki swoich badań na krajowych i międzynarodowych konferencjach tematycznych w formie referatów oraz komunikatów plakatowych. Ponadto jest autorem co najmniej 10 innych publikacji, co świadczy o jego nieprzeciętnej aktywności naukowej. Warto podkreślić, że Pan magister Piotr Tatarczak jest kierownikiem grantu PRELUDIUM 21 pt. „*Deterministic activation of single-photon emitters in hexagonal boron nitride*”, ściśle związanego z tematyką rozprawy. Jest także współautorem zgłoszenia patentowego pt. „*Sposób wytwarzania zwierciadeł Bragga w pojedynczym procesie oraz zwierciadło Bragga wytworzone sposobem*”.

