Warszawa, 2 lipca 2025

Prof. dr hab. Marek Godlewski
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
02-668 Warszawa
Al. Lotników 32/46

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Wojciecha Olszewskiego zatytułowanej:

„Influence of arsenic on band structure and optical properties of GaN layers grown epitaxially"

Wstęp

Praca doktorska mgr Wojciecha Olszewskiego napisana jest w języku angielskim. Praca wykonana została na Uniwersytecie Wrocławskim na Wydziale Fizyki i Astronomii pod kierunkiem prof. dr hab. Detlefa Hommela (promotor rozprawy) i dr Rafała Szuszkiewicza (promotor pomocniczy). Decyzją Rady Dyscyplin Naukowych Astronomia oraz Nauki Fizyczne Wydziału Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Wrocławskiego (z dnia 29 kwietnia 2025) wyznaczony zostałem na recenzenta tej rozprawy.

Cele rozprawy

Celem wykonanej pracy doktorskiej było opracowanie technologii MOVPE warstw GaNAs oraz określenie wpływu wprowadzonego do sieci GaN Arsenu na właściwości strukturalne i optyczne (na przykład przerwa wzbroniona, położenie maksimum pasma walencyjnego) otrzymanych warstw. W moim odczuciu praca ma duże znaczenie praktyczne, a jej wyniki mogą być istotne przy produkcji nowej generacji przyrządów optoelektronicznych. Uważam jednocześnie, że w tytule doktoratu powinno dodać się opracowanie technologii odpowiednich warstw bo w moim odczuciu uzyskane wyniki technologiczne są najważniejszym osiągnięciem złożonej rozprawy. **Doktorant otrzymał wysokiej jakości warstwy GaNAs o rekordowej zawartości Arsenu!**

Opis rozprawy

Złożona praca doktorska liczy 97 stron. Część zasadnicza pracy składa się z sześciu rozdziałów, które poniżej krótko omówię, jak i ustosunkuję się do zawartych w tych rozdziałach wyników naukowych. Praca poprzedzona jest Abstraktem w języku angielskim, Podziękowaniami, Spisem treści, Spisem ilustracji i Skrótów. Przedstawione wyniki w rozdziałach 1-6 są następnie podsumowane i dodana jest obszerna Bibliografia.

Zasadnicza część pracy składa się z sześciu rozdziałów i zakończona jest Podsumowaniem i obszernym Spisem literatury (Bibliografia licząca 109 pozycji). Szkoda tylko, że doktorant nie zamieścił informacji o swoim dorobku naukowym. Spis publikacji doktoranta dostałem w niezależnym dokumencie. Zawiera on 14 pozycji co jest wyróżniającym osiągnieciem. Trzy publikacje z załączonej listy prac bezpośrednio dotyczą tematyki doktoratu, w tym w jednej z nich doktorant jest pierwszym autorem. Podana jest także informacja o projektach badawczych w których doktorant uczestniczy.

Poniżej analizuję zawartość poszczególnych części pracy. Omawiam przedstawiane informacje/wyniki krótko podkreślając najważniejsze osiągnięcia doktoratu. Przedstawię także moje uwagi dotyczące konstrukcji doktoratu.

Jednym z zadań recenzenta jest weryfikacja czy doktorant wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną w danej dyscyplinie naukowej. Na podstawie treści rozdziału pierwszego i drugiego rozprawy jestem przekonany, ze ten wymóg formalny jest spełniony. W pierwszym rozdziale omówiona jest historia technologii i badań GaN, właściwości trzech azotków (AlN, GaN i InN), w tym ich właściwości strukturalne (podrozdział 1.2.2). Autor omawia także dotychczasowe badania warstw GaNAs, dlaczego jest to trudny problem technologiczny aby otrzymać warstwy o wysokiej jakości, ale także dlaczego wprowadzenie Arsenu do sieci GaN jest ważne. **Jest to bardzo fachowo napisany tekst potwierdzający dużą wiedzę doktoranta w tematyce pracy**.

Rozdział drugi dotyczy wzrostu metodą MOVPE warstw GaN. Struktury wykonane w tej technologii wytwarzane były, a następnie badane przez doktoranta ze współpracownikami. Omówiony jest także problem doboru odpowiedniego podłoża i trudności wynikające z

niedopasowania sieciowego podłoże/GaN, jak i różnych współczynników rozszerzalności termicznej podłoża i odpowiednich azotków. Następnie doktorant szczegółowo opisuje procedurę wzrostu warstw GaN z wykorzystaniem metody MOVPE.

Lektura tej części rozprawy jednoznacznie przekonuje mnie, że doktorant mógł samodzielnie prowadzić odpowiednie prace technologiczne. Osiągnął on wystarczającą wiedzę do prowadzenia trudnych procesów technologicznych.

W dalszej części tego rozdziału (rozdziału drugiego) omówione są stosowane w badaniach wytworzonych warstw metody pomiarowe. W doktoracie przedstawione są wyniki charakteryzacji warstw GaNAs z wykorzystaniem licznych zaawansowanych technik pomiarowych. Istotne jest, że omawiając wyniki badań (kolejne rozdziały pracy) doktorant podaje kto wykonywał odpowiednie badania i jaki był jego udział w tych badaniach.

Mam drobne uwagi do części dotyczącej opisu dyfrakcji promieniowania X (XRD). Promieniowanie X rozpraszane jest na gęstości elektronowej, a nie na atomach jak napisane jest w doktoracie, a podane prawo jest prawem Braggów (dwóch autorów odpowiedniej pracy), a nie Bragga.

Kluczowe wyniki doktoratu przedstawione są w kolejnych rozdziałach. W pierwszym z nich (rozdział trzeci pracy) omówione są procesy technologiczne wytwarzania warstw GaNAs. Autor szczegółowo omawia wpływ temperatury procesu, stosunku prekursorów elementów z grup III (As) i V (N), oraz ciśnienia w reaktorze na wbudowywanie się Arsenu w miejsce Azotu. Dokładnie analizowano tempo wzrostu warstw w zależności od temperatury procesu. Bardzo wysoko oceniam otrzymane wyniki prac technologicznych.

Rozdział czwarty zawiera szczegółowe wyniki charakteryzacji otrzymanych warstw GaNAs. W szczególności pomiary wysokorozdzielczego XRD umożliwiły określenie optymalnych parametrów technologicznych aby otrzymać wysokiej jakości warstwy GaNAs o zawartości Arsenu do 7% (rekordowy wynik!). Otrzymane warstwy są bardzo gładkie (patrz wyniki pomiarów AFM) oraz zawierają jednorodny rozkład domieszki Arsenu (patrz wynik SIMS).

Pomiary SEM dla warstw wytworzonych w obniżonej temperaturze wykazały pojawianie się na powierzchni licznych wytrąńceń. Powiązano je z wytrąceniami GaAs na powierzchni warstw.

Przedstawione w rozdziale czwartym wyniki oceniam bardzo wysoko. Autorowi rozprawy z współpracownikami udało się wytworzyć wysokiej jakości warstwy GaNAs do rekordowej zawartości Arsenu – 7%.

Kolejny rozdział (rozdział piąty) zawiera wyniki modelowania warstw GaNAs (podrozdział 5.1). W moim odczuciu wyniki prac modelowych wstawione są do doktoratu w sposób sztuczny. Doktorant nie wykonywał tych obliczeń, więc odpowiednie wyniki obliczeń lepiej pasują do rozdziału pierwszego, w którym doktorant opisywał krótko informacje o warstwach GaNAs. W podrozdziale 5.1 opisane są dwa podejścia teoretyczne, w tym model BAC, często nazywany także modelem Walukiewicza. Chciałbym zaznaczyć, że po pokazaniu się odpowiedniej publikacji o tym modelu był on kwestionowany na podstawie późniejszych prac modelowych.

W dalszej części rozdziału piątego przedstawione są wyniki pomiarów XPS (UPS), w opracowaniu których brał udział doktorant. Przy okazji zwracam uwagę na błąd w cytowaniu odpowiedniego rysunku (Figure ?? w tekście pracy).

Pomiary XPS/UPS dostarczają kluczowe informacje dotyczące modyfikacji położenia maksimum pasma walencyjnego w stopach GaNAs. Przedstawione na rysunku 5.6 wyniki wskazują na istotną możliwość modyfikacji położenia tego pasma, a tym samym na możliwość regulacji głębokości (energii jonizacji) akceptorów. **Są to bardzo ważne wyniki pomiarowe!**

Jako suplement do doktoratu dodany jest rozdział szósty który zawiera wyniki modelowania, a następnie pomiarowe w celu określenie gęstości dyslokacji w warstwach GaNAs i koncentracji luk (anihilacja pozytronów). **Odpowiednie wyniki potwierdzają wysoką jakość warstw wykonanych w ramach doktoratu.**

Podsumowanie

Podsumowując, uważam że uzyskane w rozprawie wyniki są **bardzo wartościowe. Doktorat wnosi znaczący wkład w uprawianą dziedzinę badań. Przedstawione wyniki są oryginalne, co zresztą potwierdzone jest odpowiednimi publikacjami naukowymi z udziałem doktoranta.**

Stwierdzam więc, że praca doktorska mgr. Wojciecha Olszewskiego spełnia wszystkie wymagania formalne stawiane pracom doktorskim w odpowiednich ustawach i rozporządzeniach (art. 187 ustawy z dnia 20.07.2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023.742 z dnia 20.04.2023). Wnioskuję dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów postępowania.