



Dr hab. Agata Kamińska, prof. uczelni

Warszawa, 27. XII. 2022 r.

Instytut Nauk Fizycznych

Wydział Matematyczno-Przyrodniczy. Szkoła Nauk Ścisłych

Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego

ul. Dewajtis 5

01-815 Warszawa

e-mail: agata.kaminska@uksw.edu.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr Dominiki Majchrzak

p.t. „*Charakteryzacja strukturalna i elektryczna związków półprzewodnikowych na bazie azotku galu*”

wykonana na zlecenie Rady Naukowej Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych
Polskiej Akademii Nauk im. Włodzimierza Trzebiatowskiego we Wrocławiu.

Rozprawa doktorska mgr Dominiki Majchrzak powstała w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu pod opieką promotora prof. dr. hab. Detlefa Hommela oraz promotora pomocniczego dr. Edyty Piskorskiej-Hommel i opiekuna pomocniczego dr hab. Miłosza Grodzickiego. Jest to praca doktorska wdrożeniowa zrealizowana w ramach współpracy pomiędzy Instytutem Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN oraz Siecią Badawczą Łukasiewicz – PORT.

UKSW

Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr Dominiki Majchrzak jest poświęcona badaniom własności strukturalnych i elektrycznych warstw i struktur związków półprzewodnikowych opartych na azotkach galu (GaN), glinu (AlN) i ich stopach (AlGaIn) oraz GaN i AlGaIn rozrzedzanych arsenem. Celem badań Doktorantki była optymalizacja procesu wzrostu tych materiałów pod kątem ich możliwych zastosowań: głównie w strukturach diod elektroluminescencyjnych (LED) o emisji w nadfioletowym zakresie widmowym, a także wykorzystania mikroslupków GaN jako ostrzy do pomiarów techniką mikroskopii sił atomowych (AFM). Struktury te otrzymano przy użyciu techniki epitaksji z wiązek molekularnych (MBE) lub epitaksji z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych (MOVPE), a scharakteryzowano za pomocą techniki rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronów (XPS), mikroskopii sił atomowych (AFM), pomiarów transportowych (efekt Halla) oraz skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM).

Jest to praca w pełni oryginalna i zawierająca bardzo bogaty materiał doświadczalny wsparty obliczeniami teoretycznymi, a jej tematyka jest bardzo aktualna. Szczególnie obecnie, po doświadczeniu pandemii COVID-19, duże zainteresowanie wzbudzają LEDy świecące w zakresie



nadfioletu, a zwłaszcza nadfioletu o najwyższej energii, tzw. UVC o długości fali emisji poniżej 280 nm, co wymaga użycia struktur zawierających wysokie zawartości glinu rzędu co najmniej 50%. Promieniowanie UVC może skutecznie unieszkodliwić wirusy i bakterie bez użycia toksycznych środków chemicznych lub lamp rtęciowych. Jest to generalnie bardzo skuteczne narzędzie bakteriobójcze, wirusobójcze i grzybobójcze, stanowi więc atrakcyjną opcję dla dezynfekcji nie tylko w walce z pandemią, ale i w normalnym funkcjonowaniu szpitali do sterylizacji pomieszczeń, a poza tym jest przydatne w szerokim zakresie zastosowań w medycynie, biochemii, rolnictwie, optycznych nośnikach danych o dużej gęstości, oświetleniu UV znaków zabezpieczających na banknotach itp.

Niestety uzyskiwana obecnie wydajność emiterów opartych na azotkach obniża się znacznie dla fali emisji poniżej 350 nm. Pomimo nieustannych wysiłków, sprawność całkowita diod emitujących UVC nadal wynosi zaledwie 3%, czyli 20 razy mniej niż w przypadku ich niebieskich odpowiedników. Dlatego prace dotyczące UV-LED należą obecnie do intensywnie eksploatowanego nurtu badań półprzewodników azotkowych. Do bardzo istotnych lecz wciąż nie rozwiązanych problemów należą m.in. wysoka gęstość defektów w strukturach AlGa_N oraz niska koncentracja dziur w warstwach p-AlGa_N zawierających wysokie zawartości Al.

Tych właśnie zagadnień dotyczy rozprawa Pani mgr Dominiki Majchrzak. Zadanie badawcze polegające na wytworzeniu i systematycznej analizie serii warstw i struktur opartych na azotkach grupy III uważam za dobrze zaplanowane i wartościowe, gdyż dogłębne zrozumienie i kontrolowanie czynników wpływających na ich własności strukturalne i elektryczne oraz wydajność emisji jest ważne zarówno z aplikacyjnego, jak i czysto poznawczego punktu widzenia. Dodatkowo ciekawym zagadnieniem zaprezentowanym w rozprawie, mającym duży potencjał aplikacyjny, jest otrzymanie i analiza własności warstw i mikrośłupków na bazie azotku galu rozrzedzanych arsenem.

Analiza i ocena zawartości rozprawy

Treść rozprawy jest zgodna z jej tytułem. Liczy ona 128 stron i jest podzielona na 8 rozdziałów, z których dwa pierwsze przedstawiają cel pracy i przegląd literaturowy, dwa kolejne zawierają opis metod wzrostu struktur epitaksjalnych na bazie azotku galu oraz ich charakteryzacji, obszerny rozdział piąty poświęcony jest omówieniu i analizie uzyskanych wyników, a rozdział szósty stanowi podsumowanie. Dwa ostatnie rozdziały rozprawy zawierają kolejno: wykaz dorobku naukowego Doktorantki (11 publikacji współautorstwa Doktorantki, w tym 8 bezpośrednio związanych z rozprawą, 11 prezentacji konferencyjnych, w tym 2 referaty i 2 plakaty prezentowane osobiście przez Doktorantkę, kierownictwo w projekcie NCN Preludium 19) oraz bogaty spis literatury (168 pozycji).

Na część wstępną rozprawy składa się streszczenie w języku polskim i angielskim, zwięzły opis wkładu Doktorantki w prezentowane wyniki badań, a następnie spis treści oraz obszerny wykaz symboli i skrótów stosowanych w rozprawie. Zamieszczanie takiego wykazu jest bardzo dobrą praktyką ułatwiającą czytanie dalszego tekstu, gdyż tych symboli i skrótów jest dużo, więc można do nich sięgnąć w każdej chwili. Niestety niektóre z nich objaśnione są nieprecyzyjnie, a

nawet błędnie. Skrót RHEED pochodzący od „Reflection High Energy Electron Diffraction” opisany został jako „dyfrakcja wysoko-energetycznych elektronów”, podczas gdy ściśle jest to raczej „odbiciowa dyfrakcja wysokoenergetycznych elektronów”. Skrót RMS pochodzący od „Root mean square” oznacza „pierwiastek kwadratowy z wartości średniej”, a nie „średnie kwadratowe odchylenie”, jak podała Autorka. Natomiast skrót SAED (Selected Area Electron Diffraction) oznacza „dyfrakcję elektronów z wybranego obszaru”, a nie „dyfrakcję wybranego obszaru”. Dla trzech skrótów Autorka nie podała polskich odpowiedników. Rzeczywiście w niektórych przypadkach trudno jest znaleźć w polskiej terminologii adekwatne odpowiedniki angielskich terminów specjalistycznych, jednak warto próbować i w mojej opinii można „Epitaxial Lateral Overgrowth” przetłumaczyć jako „lateralny wzrost epitaksjalny”, „Impurity Resonant State” jako „stan rezonansowy domieszki”, a „Patterned Sapphire Substrate” jako „profilowane podłoże szafirowe”.

W pierwszym rozdziale mgr Dominika Majchrzak podała uzasadnienie wyboru tematyki, sprecyzowała cel naukowy pracy, a także przedstawiła postawione sobie zadania i wypunktowała wszystkie nowe, oryginalne wyniki zawarte w rozprawie. Wysoko oceniam wartość tych wyników, jednak w związku z tym, że Doktorantka jako jeden z celów pracy wymieniła badanie struktur o wysokiej zawartości glinu pod kątem uzyskania wydajnych emiterów głębokiego UV, w rozprawie brakuje mi wyników dla studni kwantowych AlN/AlGaIn lub co najmniej komentarza dotyczącego możliwości lub problemów w uzyskaniu diod opartych na takich strukturach, które być może spowodowały brak podjęcia takich badań.

Rozdział drugi obejmujący 13 stron stanowi wprowadzenie do podjętej problematyki badawczej podparte przeglądem literatury dotyczącej badanych zagadnień. Jest on generalnie dobrze napisany i obejmuje wszystkie zagadnienia, których dotyczy rozprawa, jednak nie jest on wolny od nieścisłości i pewnych braków, które nie powinny pojawiać się w tekście na poziomie rozprawy doktorskiej. W podrozdziale 2.1 dyskutując problem domieszkowania na typ p Doktorantka stwierdza, że „wraz ze wzrostem Al wydajność domieszkowania staje się znacznie niższa ze względu na szerokie pasmo wzbronione warstw AlGaIn i AlN”. Tymczasem o wydajności domieszkowania na typ p lub n decyduje energia aktywacji, a nie wielkość przerwy energetycznej, choć oczywiście te wielkości są z sobą powiązane. W tym samym podrozdziale Autorka wspomina o domieszce magnezu, który działa jak „głęboka nieczystość materiału”. Według mnie w polskiej nomenklaturze nie istnieje takie określenie, natomiast taki typ domieszki nazywa się „głębokim defektem”. Poza tym w tabeli 2.1-1 przedstawione są wybrane parametry GaN oraz AlN, nie podano jednak temperatury, w jakiej wyznaczono te parametry, a sądząc np. po podanych wartościach przerwy energetycznej, są to wartości dla GaN w temperaturze pokojowej, a dla AlN raczej w temperaturze rzędu 10 K, jakkolwiek i tak są one wyższe niż wartości raportowane zwykle przez innych autorów (np. E. Silveira et al., J. Cryst. Growth **310**, 4007 (2008) itp.).

W podrozdziale 2.3 Autorka omawia „ilość dyslokacji” w warstwach GaN. Pomijając fakt, że jest to wartość policzalna, czyli nie ilość, tylko liczba (ten błąd pojawia się w rozprawie wiele razy) – własności warstw nie zależą od bezwzględnej liczby dyslokacji, lecz od ich gęstości, a zatem taka właśnie wielkość powinna być dyskutowana przez Autorkę. W tym samym podrozdziale

wspomina ona o wydajności lamp rtęciowych, oczekiwałabym zatem porównania tej wartości z aktualnie uzyskiwanymi wydajnościami struktur azotkowych o emisji w porównywalnym zakresie widmowym, które są raportowane w literaturze. Natomiast w podrozdziale 2.5 dotyczącym domieszkowania polaryzacyjnego Doktorantka pisze o „ogromnych polach polaryzacji spontanicznej” w półprzewodnikach III-V, podczas gdy ściśle mówimy o polach elektrycznych będących wynikiem polaryzacji spontanicznej. Ilościowo polaryzację opisuje nie pole, lecz wektor polaryzacji. We wzorze (3) w tym podrozdziale nie jest wyjaśniony sens wielkości σ_{π} , nie zgadza się również jednostka koncentracji ładunku ρ_{π} , która zgodnie z prawą stroną równania i dalszym opisem w tekście jest wyrażona w cm^{-1} ... Ponadto w mojej opinii powinno się mówić raczej o warstwie gradientowej (stopniowanej), a nie o „gradiencie” lub „warstwie gradientu”.

Kolejny, trzeci rozdział rozprawy zawiera opis metod epitaksji z wiązek molekularnych (MBE) oraz epitaksji z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych (MOVPE), za pomocą których Doktorantka otrzymała badane struktury. W opisie tym Autorka zawarła w zasadzie wszystkie podstawowe informacje o obu metodach, zabrakło mi tu jedynie komentarza dotyczącego stosowanych podłoży oraz uzasadnienia wyboru podłoży użytych przez Doktorantkę do wzrostu badanych warstw i struktur.

Rozdział czwarty poświęcony jest przedstawieniu technik pomiarowych wykorzystanych przez Autorkę w przeprowadzonych badaniach. Składa się on z trzech podrozdziałów dotyczących kolejno techniki rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronów, mikroskopii sił atomowych oraz pomiarów transportu elektronowego. Bardzo obszerną część tego rozdziału stanowi podrozdział zawierający szczegółowy opis techniki XPS, która jest głównym narzędziem badawczym Doktorantki. W podrozdziale 4.1.3 Autorka powołuje się na artykuł K. Moszak et al., Mater. Sci. Semicond. Process. **136**, 106125 (2021). W tym miejscu chciałabym zwrócić uwagę na bardzo irytującą metodologię cytowania przez Doktorantkę publikacji, które słusznie uznała za związane z rozprawą i w wykazie swojego dorobku oznaczyła kolejnymi symbolami D1, D2 itp., a następnie w rozprawie odwołuje się czasem do tych właśnie symboli, ale jednocześnie umieściła te publikacje w spisie literatury i w innych miejscach tekstu podaje odpowiednie numery pozycji z tego spisu. Jednak w wykazie literatury mgr Dominika Majchrzak nie podała pełnego składu autorów (m.in. siebie, o ile nie jest pierwszą autorką danej publikacji), co uważam za dużą wadę rozprawy, bo utrudnia np. identyfikację rysunków, z których opisu nie wynika, że może być ich autorką jako współautorka cytowanych publikacji (np. rys. 4.1-6 zaczerpnięty z publikacji D5 cytowanej tu jako ref. 91, rys. 5.1-1 zaczerpnięty z publikacji D7 cytowanej tu jako ref. 110 itd.). Ponadto wspomniany artykuł oznaczony jako D5 został podany w wykazie dorobku z błędnym tytułem, natomiast figuruje w spisie literatury pod pozycją 91 z właściwym tytułem, ale w tekście nie ma jednoczesnego odsyłacza do tej pozycji. Podobna sytuacja zdarzyła się z publikacją D7, do której Doktorantka odwołuje się w kolejnym rozdziale, nie podając równocześnie pozycji 110 ze spisu literatury, gdzie akurat publikacja D7 podana jest z prawidłowym tytułem.

Chciałabym również zwrócić uwagę na błąd w znaku w równaniu (18) w podrozdziale 4.3, gdzie w odjemniku w drugiej części równania zamiast $-U_{error}$ powinno być $+U_{error}$. Mam nadzieję, że jest to tylko błąd edytorski i wszystkie obliczenia zostały wykonane z użyciem równania z

poprawnym znakiem.

Rozdziały 5 - 6 obejmujące ponad połowę objętości rozprawy, to jej najważniejsza część, gdyż zawierają wyniki własne Doktorantki oraz ich podsumowanie i wnioski. Podzielone są one na dwie grupy zagadnień

- badania warstw epitaksjalnych GaN i AlGa_N pod kątem ich zastosowań do optymalizacji struktur DUV LED – podrozdział 5.1;
- badania warstw i mikroslupków GaN_s i AlGa_N_s bogatych w azot – podrozdział 5.2.

W części 5.1.1 Doktorantka przeprowadziła szczegółową analizę obecności zanieczyszczeń tlenu i węgla na powierzchni p-GaN (0001) bezpośrednio po wzroście MBE oraz po ekspozycji na zanieczyszczenia powietrza, po której zastosowano różne techniki czyszczące. Dla każdego z tych przypadków wyznaczyła położenie maksimum pasma walencyjnego GaN w stosunku do poziomu Fermiego, co może wpływać na charakterystykę warstw kontaktowych w urządzeniach DUV LED oraz ich wydajność. W części 5.1.2 skupiła się na problemie wciąż zbyt dużych gęstości dyslokacji w warstwach AlN i AlGa_N. Wykazała, że zastosowanie pulsacyjnego osadzania Al podczas wzrostu warstw AlN metodą MBE skutkuje istotną poprawą jakości powierzchni tych warstw, a także własności struktur wielokrotnych studni kwantowych Al_{0,85}Ga_{0,15}N/GaN wyhodowanych na tych warstwach. Jest to bardzo ciekawy wynik, jednak mam do niego dwa zastrzeżenia. Pierwsze wiąże się z brakiem komentarza o możliwości wykorzystania tych wniosków do zastosowań komercyjnych, w których nie stosuje się przecież wzrostu metodą MBE, lecz MOVPE. Drugie zastrzeżenie, o którym już wcześniej wspomniałam w swojej recenzji, dotyczy wniosku Doktorantki o zastosowaniu uzyskanych wyników do otrzymania wysokiej jakości emiterów DUV. Dlaczego po uzyskaniu dobrej jakości podłoża AlN nie wyhodowano układu wielokrotnych studni AlN/AlGa_N, które rzeczywiście byłyby źródłem emisji w zakresie DUV, natomiast wyhodowano studnie AlGa_N/GaN, których emisja obejmuje najniższą energetyczną część widma UV i mieści się zaledwie w zakresie UVA?

Część 5.1.3 rozprawy dotyczy również warstw AlGa_N, ale tym razem Doktorantka podjęła się analizy wpływu strumienia galu na zawartość glinu oraz na jakość strukturalną warstw. Wykazała, że wzrost warstw AlGa_N w reżimie kropli Ga prowadzi do uzyskania lepszej jakości strukturalnej, a także do zmniejszenia koncentracji Al w warstwie, ale w różnym stopniu w objętości i na powierzchni, w związku z czym warstwa AlGa_N wzbogacona w Ga może działać jako powierzchniowa studnia kwantowa.

Część 5.1.4, którą uważam za najciekawszą i najbardziej perspektywiczną część rozprawy, dotyczy bardzo aktualnej i intensywnie badanej koncepcji tzw. domieszkowania polaryzacyjnego, którego celem jest poprawa przewodności typu p warstw AlGa_N o wysokiej zawartości Al poprzez użycie warstwy kontaktowej z gradientem składu chemicznego. Wykorzystuje się tu obecność wbudowanej polaryzacji elektrycznej w niecentrosymetrycznych strukturach azotkowych oraz różnice polaryzacji pomiędzy GaN i AlN. Doktorantka przeprowadziła dobrze zaplanowane, systematyczne badania struktur kontaktowych z różnymi grubościami warstwy gradientowej Al_xGa_{1-x}N:Mg (od 0 do 200 nm), gdzie zawartość glinu x zmienia się od 0,6 do 0. Wykonano

obliczenia teoretyczne koncentracji dziur oraz diagramów energetycznych dla zaplanowanych struktur, a następnie przeprowadzono pomiary elektro-transportowe na strukturach o takiej samej geometrii otrzymanych metodą MOVPE. Wyznaczono rezystancję, opór właściwy, a także koncentrację oraz ruchliwość nośników typu p. W ten sposób uzyskano bardzo wartościowe wyniki, które mogą stanowić punkt wyjścia do dalszej optymalizacji struktur tego typu. Moje zastrzeżenie do tej części rozprawy ponownie dotyczy pewnej nonszalancji Doktorantki w ścisłym opisie analizowanych zjawisk: w szczególności rys. 5.1-19 przedstawia zależność koncentracji dziur od przepływu $Cp2Mg$ i od stosunku molowego Mg/Ga , a nie odwrotnie, jak to napisano w rozprawie. Pewne wątpliwości budzi też metodyka wyznaczenia koncentracji dziur poprzez wstawienie do wzorów sztucznej grubości warstw będącej sumą wierzchniej warstwy $GaN:Mg$ oraz warstwy gradientowej. Oczywiście można porównywać otrzymane w ten sposób koncentracje nośników dla analizowanej serii próbek, ale bardzo trudne, a wręcz niemożliwe jest ich porównanie z wynikami raportowanymi w literaturze, gdzie autorzy najczęściej podają tzw. "Hall sheet density" lub używają dobrze określonej próbki referencyjnej (oprócz prac cytowanych przez Doktorantkę dotyczących tej tematyki polecam np. ciekawe artykuły D. Jena et al., APL **81**, 4395 (2002) S. Li et al., JAP **112**, 053711 (2012) oraz D.C. Look et al., APL **70**, 3377 (1997)).

Druga grupa zagadnień badanych przez Doktorantkę omówiona jest w podrozdziale 5.2. Pierwsza część tego podrozdziału przedstawia opracowaną przez nią trzyetapową procedurę czyszczenia powierzchni warstw $GaNAs$ i $AlGaNaNs$, co umożliwiło prawidłowe badanie ich własności fizykochemicznych oraz m.in. zaobserwowanie własności antysurfaktantowych As przy wzroście mikroślupków GaN podczas przeprowadzonej analizy XPS. Wzrost mikroślupków uzyskano w warunkach bogatych w gal w wyniku zastosowania mechanizmu wzrostu VLS-MBE (para-ciecz-ciało stałe) indukowanego arsenem bez standardowego użycia obcego katalizatora metalicznego. Jest to bardzo interesujący wynik pokazujący sposób uzyskania mikroślupków GaN wolnych od metalicznych zanieczyszczeń. Na koniec zaprezentowano jedno z wielu możliwych zastosowań mikroślupków GaN otrzymanych tą metodą jako ostrza AFM.

W pozostałych dwóch częściach podrozdziału 5.2 główny wkład Doktorantki polegał na opracowaniu techniki czyszczenia powierzchni warstw $GaNAs$ i $AlGaNaNs$, co umożliwiło ich prawidłową charakteryzację przy użyciu techniki XPS. W części 5.2.2 zbadano zależności temperaturowe przerwy wzbronionej warstw $GaNAs$ bogatych w azot. Pomiary transmisyjne i odbiciowe $GaNAs$ z koncentracją As poniżej 0.6% wykazały prawie 40% redukcję zależności temperaturowej przerwy wzbronionej $GaNAs$ w porównaniu do GaN . Efekt ten wyjaśniono na podstawie modelu niekrzyżujących się pasm (BAC). Stwierdzono, że jest on skutkiem stabilizacji pasma walencyjnego w wyniku tworzenia się niezależnego od temperatury podpasma związanego z As . Uzyskany wynik można wykorzystać do konstrukcji stabilnych temperaturowo urządzeń optoelektronicznych.

W części 5.2.3 Doktorantka dyskutuje możliwości inżynierii pasmowej związków $AlGaNaNs$ bogatych w azot, wynikające ze stosunkowo silnej zależności położenia maksimum pasma walencyjnego od zawartości arsenu i przesuwania się go w kierunku poziomu Fermiego wraz ze wzrostem koncentracji As . Efekt ten może być przydatny np. w optymalizacji kontaktów omowych

do materiału p-GaN lub p-AlGaN. Dodatkowo, dobierając odpowiednie koncentracje arsenu i glinu można modyfikować wartość przerwy wzbronionej związków mieszanych AlGaNs, co może znaleźć zastosowanie w inżynierii pasm urządzeń optoelektronicznych zbudowanych ze struktur opartych na tych związkach.

W rozdziale 6 Doktorantka zebrała najważniejsze wyniki i wnioski z przeprowadzonych badań. Rozprawę kończy krótkie podsumowanie, w którym mgr Dominika Majchrzak przedstawiła ciekawe plany dalszych badań, związane głównie z realizowanym przez nią projektem PRELUDIUM 19 pt. „Zastosowanie gradientowej warstwy kontaktowej AlGaN w celu uzyskania omowego kontaktu o niskiej rezystywności w emiterach głębokiego UV”.

Rozprawę kończy wspomniany już wykaz dorobku naukowego Doktorantki (rozdział 7) oraz spis literatury (rozdział 8).

Uwagi ogólne

Recenzowana rozprawa jest logiczna i przemyślana. Zgromadzony i zanalizowany materiał doświadczalny zaprezentowany w niniejszej rozprawie uważam za bardzo cenny i ważny zarówno ze względu na potencjalne aplikacje badanych materiałów, jak i z poznawczego punktu widzenia. Praca została wykonana bardzo rzetelnie, zawiera nowe, dobrze zaplanowane i przeprowadzone badania eksperymentalne, w kilku przypadkach poparte również obliczeniami teoretycznymi. Wyniki przedstawione w rozprawie zostały opublikowane w siedmiu publikacjach, ósma jest w trakcie recenzji. W trzech z nich mgr Dominika Majchrzak jest pierwszą autorką. Na jej całkowity dorobek składa się w sumie 11 publikacji, wszystkie znajdują się w bazie Web of Science. Według danych z tej bazy z dnia 1. XII. 2022 r. liczba cytowań tych publikacji była równa 20 (14 bez samocytowań), a indeks Hirscha opublikowanych prac = 3, co dobrze świadczy o wartości dorobku Doktorantki.

Uwagi szczegółowe i uwagi o charakterze redakcyjnym

Rozprawa została napisana w sposób zrozumiały i czytelny, kolejność rozdziałów jest przemyślana i logiczna. Niestety mam pewne zastrzeżenia do edytorskiej strony rozprawy i dbałości o poprawność gramatyczną. Jakkolwiek nie wpływają one na jej wartość merytoryczną, jednak utrudniają czytanie i nadążanie za prezentowanymi wynikami. Niektóre z nich zostały wymienione w analizie zawartości rozprawy. Poniżej przedstawiam kilka kolejnych.

- 1) Na str.11: zamiast „Materiały takie jak GaN i AlGaN znajdują zastosowanie w optoelektronice (...) oraz w urządzeniach mocy i częstotliwości” powinno być np. „... w urządzeniach o dużej mocy i wysokiej częstotliwości”.
- 2) Na str. 41: w opisie techniki mikroskopii sił atomowych zamiast „Opiera się ona na oddziaływaniu próbnika (...) z powierzchnią badanego materiału, a następnie z przetworzeniem otrzymanego sygnału...” powinno być „...a następnie na przetworzeniu otrzymanego sygnału...”.

- 3) Na str.50: zamiast „Wpływ wszystkich wymienionych technik oczyszczania powierzchni półprzewodników na właściwości powierzchniowe warstw epitaksjalnych p-GaN były badane już wcześniej” powinno być „...był badany już wcześniej”.
- 4) Na str. 61 znajduje się niezbyt precyzyjny opis wielokrotnych studni kwantowych AlGaIn/GaN. Dopiero na następnej stronie na rys. 5.1-8 (b) znajduje się ich schemat niejako ‘wklejony” pomiędzy wykresy krzywych dyfrakcyjnych tych studni, ale Autorka nie wspomina w tekście o tym schemacie. W mojej opinii ten schemat powinien znajdować się przed wykresami krzywych dyfrakcyjnych, a przy opisie struktur w tekście powinien się znajdować odpowiedni odsyłacz. Podobna sytuacja ma miejsce na str. 77, gdzie znajduje się niezbyt jasny opis struktur kontaktowych z warstwą gradientową, bez żadnego odnośnika do schematu, który znajduje się dopiero na str. 81 na rys. 5.1-20 (a).
- 5) Na str. 62 na rys. 5.1-8 (c) nie ma informacji, której struktury dotyczy przedstawiona symulacja. Chyba lepiej i klarowniej byłoby tę symulację umieścić na rys. 5.1-8 (a) bezpośrednio pod odpowiednią krzywą dyfrakcyjną.
- 6) Na rys. 5.1-10 (b) i (c) opis osi odciętych sugeruje taką samą skalę dla obydwu rysunków, jednak kreski na osi z rys. (b) znajdują się w innych miejscach niż na rys. (c), przez co trudno jest porównać energie przejść oraz odpowiadające im wartości nakładania się prawdopodobieństw elektronowo-dziurowych dla konkretnych szerokości studni kwantowych.
- 7) Na rys. 5.1-18 (b) brakuje opisu trzech prezentowanych tam krzywych.
- 8) Na rys. 5.2-13 (b) nie oznaczono, skąd wzięły się podane tam wartości SPV, ponadto wydaje się, że są one podane w V, a nie mV...

Te drobne uchybienia i poczynione uwagi nie umniejszają wartości poznawczej całej rozprawy, którą oceniam wysoko. Uważam, że rozprawa doktorska **mgr Dominiki Majchrzak p.t. „Charakteryzacja strukturalna i elektryczna związków półprzewodnikowych na bazie azotku galu”** prezentuje dobry poziom naukowy i stanowi oryginalne oraz wartościowe osiągnięcie naukowe Doktorantki.

Podsumowanie i wnioski końcowe

W konkluzji stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska **mgr Dominiki Majchrzak p.t. „Charakteryzacja strukturalna i elektryczna związków półprzewodnikowych na bazie azotku galu”** spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (tj. Dz.U.2020, poz. 85 z późn. zm.) i mgr Dominika Majchrzak powinna zostać dopuszczona do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Agata Kamińska