

Warszawa , dnia 11 września 2015r.

dr hab. Henryk Teisseyre  
Instytut Fizyki  
Polskiej Akademii Nauk  
Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Łukasza Janickiego pod tytułem  
"Badanie rozkładu pól elektrycznych w strukturach półprzewodnikowych na bazie  
związków III-N"**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Łukasza Janickiego jest zarazem twórczą kontynuacją jak i istotnym rozszerzeniem badań wbudowanych pól elektrycznych, oraz badań powierzchni w azotkach grupy III prowadzonych od wielu lat w różnych ośrodkach naukowych krajowych i zagranicznych. W ostatnich latach na Politechnice Wrocławskiej, gdzie powstała recenzowana praca doktorska, tematyka ta rozwijana jest przez prof. prof. Jana Misiewicza i Prof. Roberta Kudrawca. Badania nad azotkami grupy III to w ostatnich dziesięcioleciach jedna z najszybciej rozwijanych się gałęzi fizyki i technologii półprzewodników - spowodowane jest to bardzo licznymi zastosowaniami tej grupy półprzewodników. Ze względu na szeroka przerwę energetyczną półprzewodniki te mają głównie zastosowanie w optoelektronice jako emiterzy światła widzialnego i diody elektroluminescencyjne oraz jako lasery diodowe na zakres niebieski. Coraz częściej mówi się także o zastosowaniach azotków w różnych urządzeniach elektronicznych jako tranzystorach, czy przełącznikach wysokich mocy i częstotliwości.

Znaczenie azotków i badań nad nimi zostało także docenione przez komitet Noblowski. W 2014 profesorowie Isamu Akasaki, Hiroshi Amano i Shuji Nakamura zostali nagrodzeni nagrodą Nobla "za wynalezienie efektywnego energetycznie i przyjaznego środowisku źródła światła". Prace tych japońskich naukowców stanowią swoisty fundament dla dynamicznego rozwoju technologii azotku galu w ostatnich latach. O aktualności prowadzonych badań i ich wysokim poziomie może również świadczyć dorobek publikacyjny autora. Mgr. Łukasz Janicki jest autorem i współautorem 7 publikacji, w tym dwóch w *Applied Physics Letters* i dwóch w *Journal of Applied Physics*. Można również wspomnieć, że

jedna z prac opublikowana w *Applied Physics Letters* w 2012 roku jest cytowana do tej pory 12 razy.

Z formalnego punktu widzenia rozprawa składa się z trzech powiązanych ze sobą części. Część pierwsza stanowi wprowadzenie, drugą część stanowią badania struktur typu Van wytworzonych z GaN oraz AlGaIn dla różnej orientacji podłoża, a trzecia to charakteryzacja struktur typu HEMT. Część pierwsza, na którą składają się dwa rozdziały jest swoistym wprowadzeniem do własności fizycznych materiałów i struktur grupy III-N. Rozdział trzeci stanowi pomost pomiędzy tym wprowadzeniem a oryginalnymi wynikami badawczymi. Jego początek jest poświęcony generalnie spektroskopii modulacyjnej, następnie bezkontaktowemu elektroodbiciu oraz badaniu wpływu gęstości i rozmiaru siatek na jakość widm elektroodbicia. Jest to bardzo ciekawy rozdział i w mojej opinii prezentowane tam wyniki mogły być podstawą do oddzielnej publikacji np. w *Review of Scientific Instruments*.

Rozdział czwarty poświęcony jest badaniom struktur typu Van Hoofa wytworzonych z GaN oraz AlGaIn. Autor w pierwszym etapie pracy pokazuje wyniki dotyczące pomiaru położenia poziomu Fermiego na powierzchni azotku galu o orientacji polarnej zakończonej powierzchnią galową. W eksperymentach porównano dwa zestawy próbek: wytwarzane metodą MBE i MOCVD. Istotnym wynikiem jest pokazanie, że metoda wytwarzania struktur ma istotny wpływ na potencjał powierzchniowy, co przypuszczalnie może być związane z jakością strukturalną. W kolejnej części rozdziału opisany został wpływ zastosowanego podłoża, na którym przeprowadzony został wzrost struktur typu Van Hoofa. Porównano struktury wzrastane na podłożach szafirowych i wykonane na podłożach z objętościowego azotku galu. W tej części pracy potwierdzono fakt, że użycie podłoża szafirowego skutkuje powstaniem większej ilości defektów, w porównaniu ze wzrostem na objętościowym kryształ GaN oraz stwierdzono, że defekty te dostarczają nośniki do stanów powierzchniowych powodując ich zapełnienie. Kolejnym ciekawym etapem badań był wpływ atmosfery na położenie poziomu Fermiego na badane struktury. Stwierdzono, że pokrycie powierzchni tlenem powoduje stabilizację poziomu Fermiego na powierzchni.

W dalszej części doktoratu zaprezentowano wyniki dotyczące drugiej powierzchni polarnej - tak zwanej powierzchni azotowej. Jest to powierzchnia rzadko badana w eksperymentach naukowych, uważana często za mniej istotną z przyczyn technologicznych, co w mojej ocenie w sposób istotny zwiększa wartość prezentowanych w tej części rozprawy

wyników. W porównaniu z powierzchnią galową potencjał powierzchniowy dla tego kierunku był dużo niższy. Dla struktur mierzonych w próżni poziom Fermiego przesuwają się na krawędź pasma przewodnictwa. Takie zachowanie przypisane zostało do wysokiej koncentracji wolnych nośników, która jest cechą charakterystyczną dla próbek o polarności azotowej. Do zestawu struktur polarnych dołączono również wyniki wykonane na strukturach o orientacji niepolarniej  $m$ . Dla tej orientacji wyznaczony został potencjał powierzchniowy, oraz zbadany został również wpływ próżni na omawiane struktury. Stwierdzono, że w próżni poziom Fermiego przesuwają się na krawędź pasma przewodnictwa. Autor przypisał to zachowanie brakiem stanów powierzchniowych w obrębie przerwy energetycznej na atomowo czystej powierzchni azotowej.

Na końcu rozdziału czwartego autor zamieścił wyniki badań trójskładnikowych stopów AlGaIn. Wyniki dotyczą próbek o zawartości 9% do 25%, oraz jednej próbki o koncentracji 20% wytworzonych metodą MOVPE przez dwa różne laboratoria. W obu sytuacjach położenie poziomu Fermiego na powierzchni AlGaIn odzwierciedla stopień nieintencjonalnego domieszkowania struktur na typ  $n$ : dla serii próbek wykonanych na półizolujących podłożach poziom Fermiego zlokalizowany jest na górnej krawędzi środkowej osobliwości, a dla próbki o wyższej ilości domieszki bliżej krawędzi pasma przewodnictwa.

Kolejny rozdział, piąty prezentuje wyniki badań optycznych struktur tranzystorowych AlGaIn/GaN. W pierwszej kolejności badany był wpływ dodatkowej warstwy AlN na układ pasm w strukturze – badania te rozszerzono o modelowanie natężenia wbudowanego pola za pomocą samo-uzgodnionych obliczeń równania Schrödingera i Poissona. Rola warstwy AlN polega na redukcji rozpraszania stopowego od Warstwy AlGaIn co powoduje znaczący wzrost przewodnictwa w kanale dwuwymiarowym. Wprowadzenie warstwy AlN powoduje jednocześnie pogłębienie trójkątnej studni potencjału oraz odwracanie kierunku pola elektrycznego w warstwie AlGaIn. To na odmianną powoduje przemieszczanie się nośników z tej warstwy w kierunku powierzchni i zmniejszenie się gęstości dwuwymiarowego gazu elektronowego. Ciekawym wynikiem była też analiza wyników dla struktur niepolarnych i semi-polarnych. O ile struktury wytworzone na kierunku polarnym charakteryzowały się wbudowanym polem elektrycznym w obszarze warstwy AlGaIn, o tyle struktury niepolarne spełniały warunki braku wbudowanego pola. Odpowiednie zaprojektowanie struktury powinny pozwolić na otrzymanie układu HEMT, w którym bez przyłożonego napięcia do bramki kanał gazu dwuwymiarowego pozostanie zatkany.

Rozprawa zakończona jest podsumowaniem, spisem rysunków, opisem dorobku naukowego i bibliografią.

Badania wykonane w ramach recenzowanej pracy doktorskiej przyniosły kilka ciekawych pod względem naukowym rezultatów. Najważniejsze osiągnięcia badawcze pracy doktorskiej mgr Łukasza Janickiego można podsumować następująco:

- Badanie wpływu gęstości i rozmiaru siatek na jakość widm elektroodbicia.
- Zastosowanie metody bezkontaktowego elektroodbicia w próżni i niskich temperaturach.
- Wyznaczenie położenia poziomu Fermiego na powierzchni GaN o różnej orientacji metoda spektroskopii modulacyjnej.
- Badanie roli warstwy AlN w strukturach typu HEMT i jej wpływu na położenie poziomu Fermiego w tego typu strukturach.

Rozprawa ma również słabsze strony oraz błędy, z których najistotniejsze w mojej opinii to:

- Błędny wzór (2.5) na polaryzację piezoelektryczną w kryształach heksagonalnych podany na stronie 10. Otóż w strukturze wurcytu są tylko trzy niezerowe stałe piezoelektryczne  $e_{11}$ ,  $e_{31}$  i  $e_{15}$ . Stała piezoelektryczna  $e_{24}$  w materiałach o strukturze wurcytu nie istnieje.
- Doktorant nie omawia w żadnym punkcie doktoratu wartości stałych piezoelektrycznych, oraz wartości polaryzacji spontanicznej w azotkach grupy trzeciej. W pracy zatytułowanej „**Badanie rozkładu pól elektrycznych ...**” jest to istotny moim zdaniem brak. W rozdziale piątym, w którym liczone są struktury typu HEMT bez i z przekładką AlN nie zostało podane przy jakich parametrach wykonano obliczenia.
- W rozdziale trzecim omawianej pracy dużo uwagi poświęcono między innymi badaniu zależności odległości siatki od próbki na wartość napięcia przebicia. Jest to bardzo ciekawy i dobrze napisany fragment doktoratu. Jak pisze sam autor, najbardziej optymalne warunki pomiaru znajdują się na granicy przebicia elektrycznego powietrza w kondensatorze. Jednak napięcie przebicia pomiędzy siatką w rzeczywistości jest bardziej skomplikowaną wersją prawa Paschena. Prawo to

sformułowane przez Paschena zostało przez niego opublikowane w *Annalen der Physik* w 1889 roku. Paschen badał napięcie przeskoku iskry elektrycznej pomiędzy dwoma równoległymi płytami w gazie jako funkcję ciśnienia i odległości płyt od siebie. Prawo Paschena jest wprawdzie wzmiankowane na stronie 30 i trochę szerzej omówione na stronie 33, jest to niestety jedyny moment kiedy autor o nim wspomina. Nie wiadomo czy wyniki przedstawione na rys 3.6 na stronie 29 spełniają prawo Paschena, czy też nie. Rozumiem, że odniesienie się do oryginalnej pracy wydanej po niemiecku w XIX wieku jest trudne, jednak mogłoby być cenne. Podanie wzoru Paschena na początku rozdziału i dokładne jego opisanie bez wątplenia przyczyniłoby się do lepszego zrozumienia rozdziału trzeciego.

- W rozdziale czwartym omawianej pracy autor nie zamieszcza wystarczająco wyczerpujących informacji o badanych próbkach. Nie ma profili SIMS, czy informacji o wynikach charakteryzacji rentgenowskiej, a jedyny rysunek rzeczywistej struktury próbki znajduje się na stronie 78, w rozdziale poświęconym heterostrukturom AlGaIn/GaN. Dla sekwencji próbek o zawartości 9% do 25% aluminium nie podano ani szerokości wysokooporowej warstwy buforowej, ani sposobu jej otrzymania. Autor przemilczał, czy była to warstwa komercyjna, np. z firmy lumilog, czy otrzymana podczas procesu wzrostu w MOCVD poprzez domieszkowanie żelazem. Innym przykładem braku pełnej informacji o charakteryzowanych próbkach jest pomiar struktur o polaryzacji azotowej. Próbki o polaryzacji azotowej wytworzono na podłożach HVPE, a referencyjne próbki o polaryzacji galowej na kryształach wysokociśnieniowych. Są to jednak podłoża różniące się zasadniczo liczbą nieintencjonalnych domieszek. Kryształy wysokociśnieniowe są silnie domieszkowane węglem i tlenem do poziomu  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , co wynika z procesu ich wzrostu,. Kryształy HVPE są na odmiannę znacznie czystsze o koncentracji swobodnych nośników na poziomie  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

Pod względem edytorskim doktorat posiada pewne niedociągnięcia i błędy. Poza zwykłymi literówkami (takimi jak np. pole eklektyczne na str. 44) i błędami interpunkcyjnymi, jest parę zagadnień, które jakkolwiek jako potknięcia edytorskie nie mają znaczenia dla meritum pracy, to jednak nie można ich pominąć w recenzji:

- W pewnych miejscach pracy występują problemy z tłumaczeniem technicznych zwrotów z języka angielskiego. Na stronie 45 autor pisze "o metodzie epitaksji z wiązek molekularnych z asystą plazmy". Wydaje mi się, że bardziej odpowiednie jest określenie - wzrost z wiązek molekularnych z zastosowaniem źródła plazmowego. Na stronie 47 omawiana jest (stosunkowo krótko) metoda wyznaczania gęstości dyslokacji za pomocą trawienia chemicznego. Otóż "zagłębienia" o których pisze autor w literaturze polskiej określane są "jamkami trawienia". Neologizmem jest również zastosowany na stronach 6 i 7 zwrot "parametr ugięcia". Ma on odpowiadać angielskiemu "gap bowing". Nie wydaje mi się, aby słowo to zostało trafnie dobrane, gdyż takie określenie stosuje się już w mechanice, np. przy wyznaczaniu modułu sprężystości. A co proponujesz?
- Błędy znajdują się także na zamieszczonych w pracy rysunkach. Na przykład podpis pod osiami, na rysunku 3.6 nie zawiera polskich liter. Ponadto rysunek 4.2 zawiera wyniki dla trzech zestawów próbek (struktur typu Van Hoffa) o grubości warstwy niedomieszkowanej 30,50,70 nm. -niestety brak opisu uniemożliwia przypisanie wyników do odpowiednich próbek.

Podsumowując, mimo wymienionych wyżej uchybień, przedstawiona do recenzji praca zawiera nowe i wartościowe wyniki naukowe, które bez wątpienia czynią ją cenną i interesującą. W swoich zasadniczych częściach dotyczy zagadnień ambitnych i będących obecnie w centrum zainteresowania nie tylko licznych ośrodków naukowych, ale i przemysłu elektronicznego. Oceniam pracę doktorską mgr Łukasza Janickiego wysoko, mimo wymienionych z obowiązku recenzenta niedoskonałości. Przedmiotowa praca spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Niniejszym wnoszę zatem o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Henryk Teisseyre

