

Warszawa, 17 sierpnia 2015 r.

Prof. dr hab. Tadeusz Suski

Instytut Wysokich Ciśnień

Polskiej Akademii Nauk

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Janickiego

zatytułowanej: „Badanie rozkładu pól elektrycznych w strukturach półprzewodnikowych na bazie związków III-N”

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Janickiego została wykonana na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Jej promotorem był dr hab. Robert Kudrawiec, prof. PWr. Recenzowana rozprawa jest pracą doświadczalną.

Główny przedmiot rozprawy stanowią badania położenia poziomu Fermiego na powierzchni wybranych półprzewodników azotkowych i związanego z tym rozkładu pól elektrycznych. Pomiary prowadzone były wyłącznie metodą bezkontaktowego elektroodbiccia w temperaturze pokojowej. Rozprawa wykazuje właściwy wybór metody pomiarowej umożliwiającej dokładny pomiar generowanego w strukturach pola elektrycznego. Oscylacje Franz'a-Kiędysza wynikające z obecności pól elektrycznych są analizowane w oparciu o standardową teorię (D.E. Aspnes, Phys. Rev. Lett. **28**, 168 (1972)) i interpretowane w oparciu o istniejące prace teoretyczne (głównie C.G. Van de Walle and D. Segev, J. Appl. Phys. 101, 081704 (2007)), wiążące obszary gęstości stanów w przerwie energetycznej z obecnością konkretnej rekonstrukcji powierzchni półprzewodnika i obecności na niej „rodzimych” defektów strukturalnych lub zaabsorbowanych atomów „obcych”. Praktycznie we wszystkich badanych w rozprawie strukturach azotkowych uzyskano możliwość mikroskopowej interpretacji dokonanych obserwacji.

Znaczną część sukcesu przeprowadzonych pomiarów należy przypisać wspaniale dobranym próbkom. Było ich ponad 40, pochodziły z 4 polskich instytucji naukowych (IWC PAN, WEMiF PWr, ITME, IFD UW). Próbkę te reprezentują dwa typy struktur: a) tzw. struktury Van Hoof'a GaN i AlGa_N oraz b) struktury tranzystorów z dwuwymiarowym gazem elektronów AlGa_N/AlN/GaN i AlGa_N/GaN. Pierwsza z tych grup to epitaksjalnie wytworzone pary wysokodomieszkowanych (na typ n) i niedomieszkowanych warstw GaN:Si/u-GaN i AlGa_N:Si/u-AlGa_N charakteryzujące się polem elektrycznym w

niedomieszkowanej warstwie półprzewodnika. Jego wielkość określona jest różnicą w położeniu poziomu Fermiego w warstwie wysokodomieszkowanej i na powierzchni materiału niedomieszkowanego („pinning” poziomu Fermiego). Z kolei wyznaczenie jego wartości wymaga analizy charakteru oscylacji Franz’a-Kielydysza.

W przypadku badania struktur tranzystorowych pole elektryczne pojawia się samoistnie na polarnych międzypowierzchniach AlGa_N/Ga_N. Jego natężenie wynika z kontrastu polaryzacji (spontanicznej i piezoelektrycznej) dla obu tych półprzewodników oraz ze stopnia jego zaekranowania. W efekcie powstaje dwuwymiarowy „kanał” potencjału wypełniony elektronami. Pochodzą one głównie z powierzchniowych stanów defektowych. Doktorant wyznaczył natężenie tego pola w zależności od grubości warstwy AlN w badanych strukturach AlGa_N/AlN/GaN i w przypadku braku tej warstwy. Stwierdził, że pole to maleje z redukcją grubości warstwy AlN. Dla cienkich warstw AlN pole to staje się znacznie mniejsze niż w przypadku struktury AlGa_N/Ga_N. Powyżej opisany efekt jest wynikiem wprowadzenia przez warstwę AlN dodatkowej składowej polaryzacji spontanicznej i piezoelektrycznej modyfikującej rozkład pola w obszarze tworzenia się kanału z przewodzącym dwuwymiarowym gazem elektronowym.

Warto podkreślić następujący fakt; badania zaprezentowane w recenzowanej rozprawie doktorskiej nie są pierwszymi w literaturze światowej. Natomiast poprzednio uzyskane wyniki są w wielu wypadkach sprzeczne lub niejednoznaczne a przez to trudne do porównania z przewidywaniami teoretycznymi. Przewaga doktoranta polegała na dysponowaniu całą gamą próbek, w których można było określić wpływ warunków wzrostu i przygotowania próbek do pomiarów bezkontaktowego elektroodbicia. Na przykład w klarowny sposób obserwuje to w próbkach Van Hoff’a Ga_N przygotowanych dwoma metodami wzrostu z wiązek molekularnych i metalorganków (MBE i MOVPE). Dodatkowo, doktorant miał dostęp do struktur przygotowanych na objętościowych kryształach Ga_N. Znaczna redukcja gęstości dyslokacji w takich heterostrukturach umożliwiała prowadzenie bardziej wiarygodnej interpretacji danych pomiarowych.

W rozprawie zbadano i przeprowadzono dyskusję wpływu następujących efektów na wielkość pól elektrycznych i lokalizację poziomu Fermiego na powierzchni warstw epitaksjalnych Ga_N i AlGa_N:

- a) typu powierzchni polarnych próbek Ga_N (galowa <0001> i azotowa <000-1>);
- b) orientacji krystalograficznej: niepolarna w kierunkach *m* i *a* oraz półpolarnej (20-21);

- c) obecności tlenu na powierzchni struktur;
- d) koncentracji dyslokacji i metody wzrostu;

Przeprowadzono obliczenia układu pasm i rozkładu pól elektrycznych w heterostrukturach AlGaN/AlN/GaN z różną szerokością warstwy AlN (samouzgodnione obliczenia równań Schroedingera i Poissona). Wiarygodność obliczeń wzmacnia fakt przyjęcia jako warunków brzegowych położenia poziomu Fermiego na powierzchni struktury tzn. 0.54 eV poniżej pasma przewodnictwa, którą to wartość uzyskano z przeprowadzonych w pracy doktorskiej badań struktur Van Hoof'a na bazie $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$.

Lektura recenzowanej rozprawy skłoniła recenzenta do wyrażenia kilku opinii:

1. Bardzo dobrze została zestawiona bibliografia;
2. W sposób klarowny przedstawiono korzyści płynące z zastosowania w przeprowadzonych badaniach bezkontaktowego elektroodbicia oraz przewagi tej techniki nad innymi technikami modulacyjnymi;

i zadania następujących pytań:

1. Do jakiego stopnia niedopasowanie sieciowe warstw domieszkowanych i niedomieszkowanych może wpłynąć na pojawienie się różnicy stałych sieci i wyindukowania dodatkowego pola elektrycznego (polaryzacja piezoelektryczna) w wykorzystywanych strukturach Van Hoof'a?
2. Czy były jakieś istotne powody natury merytorycznej nieprzeprowadzenia badań na strukturach van Hoof'a typu p?
3. Czy nie zdziwiły doktoranta dane na temat obniżenia wielkości przerwy energetycznej w InN (Tabela 2.2) pomiędzy temperaturą pokojową i $T=1.6K$?
4. W przypadku badań porównawczych struktur GaN typu Van Hoof'a przygotowanych metodami wzrostu metodami MOVPE i MBE, pojawia się informacja o gęstości jamek trawienia $5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ dla przypadku użycia podłoża szafirowego. Doktorant wiąże ujawnione jamki z gęstością dyslokacji Czy ta wydedukowana, bardzo niska koncentracja dyslokacji nie zaskakuje?

Za najważniejsze osiągnięcia doktoranta uważam:

1. Zademonstrowanie wszechstronności metody bezkontaktowego elektroodbicia do badań relacji pomiędzy położeniem poziomu Fermiego na powierzchni próbek, wielkością wbudowanego pola elektrycznego i charakterem obszarów dodatkowej gęstości stanów w

przerwie zabronionej w różnie przygotowanych próbkach GaN i AlGaN. Było to możliwe dzięki umiejętnemu zastosowaniu tzw. struktur Van Hoof'a oraz struktur tranzystorowych AlGaN/AlN/GaN i AlGaN/GaN.

2. Wykazanie wpływu dyslokacji (ujemnie naładowanych dyslokacji krawędziowych) na zmiany potencjału (położenia poziomu Fermiego) na powierzchni niedomieszkowanych warstw GaN osadzanych epitaksjalnie na podłożach szafirowych i podłożach z monokryształów GaN. Defekty te występujące w znacznie wyższych koncentracjach w strukturach osadzanych na szafirze, dostarczają nośniki do stanów powierzchniowych powodując ich zapelnienie. Ten efekt prowadzi do znacznych zmian stanu ładunkowego powierzchni półprzewodnika. Stanowi to jakościowo nową informację gdyż powszechnie znany był wpływ dużej gęstości dyslokacji w materiale tworzonym poprzez epitaksję na obcych podłożach na obniżenie jakości strukturalnej warstw epitaksjalnych.

3. Wykazanie korzystnej dla własności tranzystora HEMT modyfikacji struktury pasmowej i wewnętrznego pola elektrycznego w strukturach poprzez wprowadzenie nanometrowej warstwy AlN pomiędzy warstwy GaN i AlGaN tworzące taki tranzystor z kanałem zawierającym dwuwymiarowy gaz elektronowy (2DEG). Uzyskany wynik dostarcza nowej istotnej informacji o działaniu tranzystora AlGaN/AlN/GaN gdyż panuje powszechne przekonanie, że jedyny efekt wprowadzenia tej warstwy AlN polega na znacznej redukcji indukowanego przez potrójny stop AlGaN rozpraszania stopowego elektronów.

Mam kilka uwag o charakterze krytycznym:

1. Rozbudowanie lakonicznego podsumowania znacznie ułatwiło by docenienie przez czytelnika (w tym wypadku recenzenta) walorów pracy.
2. Doktorant w niewielkim stopniu dyskutuje błędy towarzyszące pomiarom i wyznaczanym parametrom.
3. Szkoda, że autor nie przygotował przejrzystej tabeli zbadanych próbek. Znacznie ułatwiło by to śledzenie uzyskanych wyników a w konsekwencji wzmocniło klarowność wniosków. Szczególnie, że w przeprowadzonych badaniach wykorzystano ponad 40 próbek.
4. Jedynie w ostatniej z 7-miu opublikowanych prac wieloautorskich Ł. Janicki jest pierwszym autorem. Lista tych prac nie zawiera numerów stron identyfikujących te artykuły w czasopiśmie. Ze względu na brak listy autorów prezentacji konferencyjnych trudno zorientować się jaki był tutaj wkład doktoranta.

5. Uwagi redakcyjne: w tekście rozprawy jest znaczna ilość tzw. literówek czy niezgodności przypadków/końcówek poszczególnych składowych tekstu.

Konkluzja

Zakres badań przewidzianych do przeprowadzenia w recenzowanej rozprawie obejmował zagadnienia trudne i wciąż rozumiane w niedostatecznym stopniu. Pomimo intensywnych prac w wielu laboratoriach światowych. Analiza przedstawionych rezultatów pozwala stwierdzić, że postawione na początku cele pracy zostały zrealizowane w zadowalającym stopniu.

Oceniam rozprawę doktorską Pana mgr inż. Łukasza Janickiego jako satysfakcjonującą recenzenta pomimo pewnych zastrzeżeń wyrażonych w uwagach krytycznych.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca spełnia wymogi określone w ustawie o stopniach i tytule naukowym stawiane rozprawom doktorskim i dlatego wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Łukasza Janickiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Tadeusz Suski