

Dr hab. Maria Kaniewska  
Instytut Technologii Elektronowej  
Al. Lotników 32/46, Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr Tatsiany Tsarovej**

**pt.:**

**„Spektroskopia pojemnościowa wybranych defektów  
w półprzewodnikowych związkach III-V”**

Recenzowana praca doktorska jest poświęcona charakteryzacji defektów w arsenku galu oraz defektów w strukturze diody laserowej z ośrodkiem czynnym w postaci wielokrotnej studni kwantowej z  $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ . Jako metodę badawczą, Doktorantka wykorzystuje niestacjonarną spektroskopię głębokich poziomów, tzw. DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy – DLTS). Technika ta, oryginalnie pomyślana do charakteryzacji elektrycznie aktywnych defektów, jest bardzo czułym i skutecznym narzędziem, a więc Doktorantka stosuje właściwą metodą do postawionego zagadnienia.

Argumentem za podjęciem tematyki w tej pracy jest znany fakt, że defekty mogą modyfikować właściwości materiałów i być przyczyną ograniczeń w wydajności i niezawodności przyrządów półprzewodnikowych. Doktorantka skupia uwagę na od dawna znanych, ale mniej szczegółowo zbadanych defektach w objętościowym GaAs, oryginalnie oznaczanych jako EL3 i EL5, co argumentuje faktem, że GaAs jest podstawą wytwarzania szerokiej gamy podzespołów stosowanych w optoelektronice i z tego względu materiał ten nadal jest obiektem badań. Badania defektów w strukturach diody laserowej, opartych na związkach GaN, należą do bardzo rzadkich z uwagi na wysoki stopień skomplikowania struktur i trudności interpretacji wyników uzyskanych metodą DLTS. Dobrze znanym problemem epitaksji tych związków jest brak odpowiednich podłoży pod względem dopasowania stałych sieci i charakterystyk termicznych, co w konsekwencji jest źródłem defektów rozciągłych i punktowych, które mogą być przyczyną degradacji właściwości

optycznych i elektrycznych warstw epitaksjalnych. Struktury wykorzystane do badań w tej pracy bazują na osiągnięciach polskiej technologii w wytwarzaniu podłóż z GaN, dlatego przewiduje się, że liczba generowanych defektów powinna być istotnie zredukowana.

W charakteryzacji defektów, Doktorantka wykorzystuje niemal wszystkie mody pracy, które udostępnia technika DLTS. To uzasadnia obszerny wstęp pracy, który zawiera szczegółowy opis podstaw działania techniki DLTS, opis modów pracy oraz sposobu wyznaczania parametrów defektów. Wstęp również obejmuje klasyfikację defektów wraz z ich właściwościami oraz przegląd technik otrzymywania interesujących ją związków półprzewodnikowych w nawiązaniu do defektów charakterystycznych dla konkretnej techniki wzrostu.

Zasadnicza część pracy poświęcona jest badaniu wpływu efektu pola elektrycznego na właściwości emisyjne defektów w GaAs. Elektryczne metody, jak DLTS wymagają zaprojektowania próbek do badań w postaci złącz Schotkyego lub złącz p-n (najlepiej skokowych i asymetrycznych). Naturalną konsekwencją jest, że defekty znajdujące się w warstwie ładunku przestrzennego złącza doznają działania pola elektrycznego. Ten fakt w połączeniu z podwójnie skorelowaną techniką DLTS, DDLTS (Double Correlation DLTS - DDLTS) został przez Doktorantkę właściwie wykorzystany w celu wspomnianym powyżej.

Wyniki badań poprzedza opis podstaw działania techniki DDLTS w oparciu o źródłową pracę Lefevre'a i Schulza oraz interesujący rozdział poświęcony różnym mechanizmom ucieczki nośników ze stanów defektów, tj. w procesie tunelowania przez Coulombowską barierę potencjału oraz na drodze przejść termicznych ponad barierą zredukowaną w wyniku efektu Frankela-Poole'a. Materiał jest prezentowany w oparciu o doniesienia literaturowe i zawiera dyskusję, istotną dla tego zagadnienia, dotyczącą wpływu tzw. efektu „ $\lambda$ ” na wyznaczaną między innymi wartość natężenia pola elektrycznego.

Za oryginalne należy uznać wyniki badań szybkości emisji nośników z defektów EL3 i EL5 w funkcji natężenia pola elektrycznego skierowanego wzdłuż różnych kierunków krystalograficznych w GaAs. Mgr T. Tsarova wykazała, że w przypadku obu defektów wkład do widm DLTS od różnych procesów może być identyfikowany w zależności od zakresu zmian pola i powyżej pewnej wartości krytycznej pola emisja jest zdeterminowana przez efekt tunelowania stymulowany termicznie. Na tej podstawie oraz symulacji teorii prezentowanej w rozdziale 3.2 i porównania danych z uzyskanymi w eksperymencie, procesy zostały scharakteryzowane przez stałe czasowe tunelowania z udziałem fononów i porównane z analogicznymi wynikami literaturowymi dla innych defektów, w innych materiałach. Zaobserwowane anizotropowe zmiany szybkości emisji w zależności od kierunku

krystalograficznego potwierdziły kompleksową strukturę mikroskopową defektów EL3 i EL5 oraz dodatkowo dostarczyły nowej informacji o symetrii krystalograficznej defektu EL5. Na bazie otrzymanych wyników i danych literaturowych doktorantka przyjmuje, że defekt EL5 jest kompleksem złożonym z luki arsenu i galu, natomiast EL3 jest związany z tlenem podstawiającym arsen, odsuniętym od pozycji węzłowej w kierunku  $\langle 100 \rangle$ . Dodatkowym i nowym efektem, który Doktorantka zaobserwowała, jest niemonotoniczna zmiana właściwości emisyjnych defektu EL3 w przypadku pola przyłożonego w kierunku  $\langle 100 \rangle$ . W kontekście przyjętej struktury defektu, jego reorientacja wywołana silnym polem elektrycznym, w której atom tlenu może zmieniać pozycję międzywęzłową jest interesującą propozycją interpretacji efektu.

Druga część pracy dotycząca charakteryzacji defektów w strukturze diody laserowej oparta jest na wynikach pomiarów zależności pojemności,  $C$ , od napięcia polaryzacji,  $V$ , ( $C-V$ ), która posłużyła do identyfikacji różnych obszarów diody w zależności od napięcia i w konsekwencji do przestrzennej lokalizacji badanych defektów. Ujawnione cztery defekty, T1 – T4, zostały w pełni scharakteryzowane pod względem ich właściwości emisyjnych. Przedstawione sygnatury emisyjne dostarczyły wartości energii aktywacji, jak również wartości dla tzw. emisyjnych przekrojów czynnych na wychwyty nośników. Wyznaczone parametry pułapek przedyskutowano w porównaniu z wynikami badań warstw epitaksjalnych z GaN innych autorów, jak również omówiono możliwość występowania pułapek w zależności od niektórych parametrów wzrostu warstw. Podstawą identyfikacji różnej natury defektów było odmienne zachowanie się sygnałów DLTS w procesach wychwyty nośników, które zbadano w szerokim zakresie czasów trwania impulsów elektrycznych. W wyniku zaprezentowanych rezultatów badań, związek T1 z dyslokacjami jest ewidentny, a na podstawie przeprowadzonej analizy i dyskusji wyników w porównaniu z danymi literaturowymi, interpretacja T2 i T3, odpowiednio jako antystrukturalny defekt,  $N_{Ga}$ , oraz luka azotowa,  $V_N$ , wydaje się być prawdopodobna. W tej części pracy na uwagę zasługuje przedstawiona analiza kształtu sygnału DLTS defektów rozciągniętych i wykorzystanie wyników analizy do interpretacji otrzymanych danych eksperymentalnych. Wyznaczone koncentracje defektów i ich przekroje czynne na wychwyty nośników mają znaczenie praktyczne. Nie przewidywana a stwierdzona obecność dyslokacji jest związana z relaksacją naprężeń w niedopasowanych sieciowo warstwach AlGaIn/InGaIn.

W ramach uwag, które głównie mają charakter szczegółowy, należałoby użyć innego oznaczenia dla energii swobodnej (str. 4) i natężenia pola elektrycznego (str. 36).

Z uwagi na nie spełniony warunek deplecji w realnej warstwie ładunku przestrzennego, nawet przy zaniedbywanej koncentracji defektów, koncentracja wyznaczana z pomiarów C-V jest bliższa koncentracji nośników aniżeli koncentracji domieszek, dlatego proponowałabym używanie tego pierwszego określenia.

Złożoność charakterystyki C-V prezentowanej w temperaturze pokojowej (Rys. 5.3) sugeruje celowość kontynuacji badań w mniej skomplikowanych strukturach odniesienia, co znacznie ułatwiłoby interpretację. Ze względu na ujawnienie w widmie heterostruktury kilku pułapek w szerokim zakresie temperatury (120 – 260 K) - Rys. 5.5, z pewnością zależność C-V była mierzona w funkcji temperatury, tym nie mniej prezentacja temperaturowej ewolucji tej zależności byłaby interesująca dla czytelnika.

Praca liczy ponad 80 stron, ponad 40 rysunków, jedną tabelę i 91 pozycji literaturowych. Oparta jest na 3 pracach autorki; 2 z nich opublikowano w *Mat. Sci. Semicond. Processing* i *Acta Phys. Polon.*, trzecia praca, której Doktorantka jest także pierwszą autorką, jest w recenzji w *Semicond. Sci. Technol.* Praca wyraźnie jest podzielona na dwa zakresy tematyczne, co nie budzi zastrzeżeń w odniesieniu do tytułu. W każdym z nich literatura jest cytowana właściwie i jest reprezentatywna dla rozważanych zagadnień. Praca jest napisana zwięźle, przejrzysto i jest starannie zredagowana.

W podsumowaniu, mgr Tatsiana Tsarova w rezultacie przeprowadzonych badań i zaprezentowanych wyników wykazała umiejętność charakteryzacji defektów techniką DLTS, przedstawiła bogaty materiał badawczy i poddała go wnikliwej analizie. Rozszerzony przez nią standard badań o efekt pola elektrycznego w zależności od kierunku krystalograficznego, umiejętnie połączony z wiedzą literaturową i z wynikami badań prezentuje wysoki poziom naukowy. Na tej podstawie stwierdzam, że praca doktorska mgr Tatsiany Tsarowej spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez obowiązujące przepisy, wobec czego wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*A. Kamiński*