

Warszawa, 12 maja 2010 r.

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

**Recenzja pracy doktorskiej  
mgr inż. Łucji Marony  
z Instytutu Wysokich Ciśnień PAN w Warszawie  
z tytułowanej  
„Mechanizmy degradacji półprzewodnikowych diod laserowych  
na azotku galu”**

Praca doktorska pani Marony przygotowana została w Instytucie Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk pod kierunkiem docenta dr hab. Piotra Perlina. Złożona do oceny praca oparta jest na cyklu publikacji w czołowych pismach naukowych. Doktorantka jest współautorką 18 prac naukowych i konferencyjnych, w tym 4 prac w Applied Physics Letters i 1 w Journal of Applied Physics. Ponadto autorka rozprawy jest współautorką 7 prezentacji konferencyjnych bez publikacji. Jest to już znaczący dorobek naukowy. Ułatwia to pracę recenzenta, ponieważ najistotniejsze rezultaty rozprawy zostały już zweryfikowane w procesie recenzji do czasopism naukowych.

Zanim przystąpię do opisu zawartości rozprawy chciałbym pochwalić jej staranną redakcję. Praca napisana jest bardzo poprawnie, czyta się ją przyjemnie, a ilość usterek redakcyjnych jest bardzo mała. Chciałbym zacytować tylko jedną, która mnie rozbawiła. Na stronie 36 autorka pisze: „temperatura rzędu  $\sim 1500$  °C”.

Nie wiem jak wyglądała w praktyce kolejność prowadzonych prac badawczych. Doktorat spisany jest w sposób bardzo przejrzysty. Autorka opisuje „siermiężną” drogę od struktur

laserowych pierwszej generacji po najnowszą generację diod o znacznie poprawionych parametrach pracy. Mnie osobiście takie „historyczne” zestawienie kolejności badań bardzo podoba się. Czytając prace nabrałem dużego szacunku dla grupy badawczej z IWC PAN. Bardzo obrazowo pokazane jest jak trudna jest droga „od pomysłu do przemysłu”. W wielu przypadkach początkowe prace prowadzone są wyłącznie intuicyjnie i stopniowo eliminowane są przyczyny degradacji wytwarzanych przyrządów.

Praca poprzedzona jest krótkim przedstawieniem przedmiotu i celów rozprawy. Następnie w ramach wstępu autorka opisuje diody laserowe, ich historię i zasady działania. Istotną częścią rozprawy jest omówienie przyczyn degradacji diod laserowych. Krótko opisany jest badany materiał, defekty w sieci GaN i metody wytwarzania podłoży i struktur laserowych i ich montażu. W rozdziale drugim autorka przedstawia metodykę badań, a następnie w kolejnych trzech rozdziałach opisuje „pętle zwrotne” pomiędzy badaniami mechanizmów degradacji diod laserowych i ich parametrami. Opisane jest dojście do najnowszych struktur laserowych o parametrach porównywalnych do tych wytwarzanych w czołowych laboratoriach na świecie. Praca zakończona jest krótkim podsumowaniem i opisem badanych struktur laserowych.

Chociaż na stronie 17-tej rozprawy autorka stwierdza, że mechanizmy degradacji półprzewodnikowych diod laserowych są dobrze znane i opisane, mam wrażenie, że to stwierdzenie dotyczy prawdo podobnie tylko struktur opartych o GaAs. Załączona rozprawa jasno demonstruje jak trudne jest określenie roli różnych mechanizmów degradacji w przypadku struktur azotkowych. Omawiane w pracy mechanizmy degradacji dotyczą zarówno wnętrza lasera (procesy związane z obecnością defektów strukturalnych, w tym nowy mechanizm tzw. COBD), luster (w wyniku ich utleniania lub topnienia (proces COMD),

kontaktów (w wyniku elektrodyfuzji metali lub degradacji lutów) i procesów wynikających z montażu.

Rozpoczynając pracę dotyczącą laserów pierwszej generacji należało ułożyć „układankę” składającą się z bardzo dużej ilości elementów. W pracy autorka opisuje nam tę „układankę” jako coś oczywistego i prostego, choć osobiście jestem przekonany, że powstała ona w wyniku wielu, często błędnych prób i bardzo ciężkiej i długotrwałej pracy. Pierwsza generacja laserów IWC PAN charakteryzowała się krótkimi czasami życia i bardzo krótkimi czasami stabilnej pracy liczonymi w godzinach. Następnie obserwowana była stopniowa degradacja, zakończona katastroficzną degradacją.

Aby wyeliminować obserwowane efekty w drugiej generacji diod laserowych usunięto metalizację w okolicach zwierciadeł. Miało to na celu osłabienie pętli COMD poprzez eliminację generacji ciepła Joule'a w okolicach luster laserowych. Niestety nadal obserwowano uszkodzenia luster laserowych, choć o innym charakterze niż w laserach pierwszej generacji. Dokładne badania wykazały inne procesy degradacji luster niż obserwowane dla struktur arsenkowych. Wykazano istotną rolę procesów fotochemicznych prowadzących do powstawania depozytów węgla w obszarze luster. Bardzo ciekawą obserwacją jest stwierdzenie odwracalności tego procesu, obserwowanej w obecności tlenu.

Aby wyeliminować te efekty w trzeciej generacji diod laserowych zastosowano hermetyczne obudowy zawierające mieszanki gazu z tlenem. Wprowadzono także metody czyszczenia struktur poprzez dopalanie w plazmie tlenowej lub w ozonie. Dla tej struktury laserowej osiągnięto czasy stabilnej pracy zbliżone do 1000 godzin, co umożliwia ich komercjalizację. Po zminimalizowaniu procesów degradacji luster wykazano, że znaczącą rolę odgrywają inne

procesy degradacyjne. Autorka pracy badała korelację pomiędzy ilością dyslokacji w strukturze lasera a prędkością procesów degradacji. Prezentowane wyniki są bardzo interesujące – obecność dyslokacji śrubowych i mieszanych istotnie obniża wydajność świecenia, natomiast dyslokacje krawędziowe miały mały wpływ na wydajność fotoluminescencji. Ciekawym faktem jest, że wynik ten nie potwierdza wcześniejsze prace katodoluminescencyjne Albrechta, który konkludował niską wydajność gaszenia świecenia przez dyslokacje śrubowe.

Wyniki zaprezentowane na rysunku 6.5 rozprawy jasno wykazują dalszy kierunek prac w IWC PAN w celu poprawienia ich diod laserowych. Konieczne jest dalsze obniżenie koncentracji dyslokacji na pasku laserowym do około 100, aby osiągnąć czasy życia rzędu 10000 godzin.

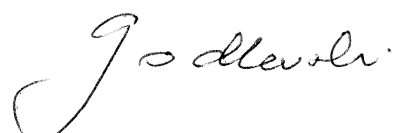
Znaczące poprawienie charakterystyk diod laserowych umożliwiło podjęcie prac nad mechanizmem degradacji katastroficznej. Powiązanie tej degradacji z dyfuzją akceptorów zaproponowane było przez grupę z firmy Sony i częściowo poparte wynikami osiągniętymi poprzez grupę z firmy Samsung. Autorka doktoratu badała profile rozkładu magnezu, wodoru i krzemu w badanych strukturach. Zbadane zostały także profile złota i niklu, czyli metali użytych do GaN p-typu. Uzyskane wyniki są bardzo ważne. Nie potwierdzono sugerowaną wcześniej istotną rolę procesów dyfuzji.

Badając możliwe procesy prowadzące do pogarszania się sprawności laserów autorka rozważała dwa procesy – wzrost ucieczki nośników z obszaru studni kwantowych i wzrost bocznego rozptyłu nośników w płaszczyźnie złącza. Rolę tego pierwszego procesu można ograniczyć wprowadzając tzw. „electron blocking layer” (EBL). Mimo bardzo

zaawansowanych prac autorka nie mogła rozstrzygnąć, który z wymienionych procesów jest istotny/dominujący.

W końcowych częściach rozdziału piątego autorka rozprawy dyskutuje krótko korelację pomiędzy degradacją laserów a tzw. „temperaturą charakterystyczną”, zależność degradacji od gęstości prądu i mocy optycznej i degradacji kontaktów omowych.

Podsumowując, uważam, że uzyskane wyniki są bardzo wartościowe, a rozprawa zasługuje na wyróżnienie. Mgr Łucja Marona jest już dojrzałym pracownikiem naukowym, w pełni zasługującym na uzyskanie stopnia naukowego doktora. Przedstawiona do recenzji rozprawa spełnia wszystkie wymogi formalne stawiane przez odpowiednią ustawę o stopniach naukowych. Zwracam się o dopuszczenie kandydatki do dalszych etapów procedury.



Prof. dr hab. Marek Godlewski