

Warszawa , 10.06.2010

prof. dr hab. Maciej Bugajski
Instytut Technologii Elektronowej
Al. Lotników 32/46
02 668 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Łucji Marony
p.t. Mechanizmy degradacji półprzewodnikowych diod laserowych na azotku galu

Azotki metali III grupy układu okresowego stanowią ważną dla zastosowań klasę materiałów półprzewodnikowych. Ich technologia daleka jest jednak od doskonałości a zjawiska fizyczne leżące u podstaw działania przyrządów z nich wytwarzanych, w szczególności mechanizmy degradacji ich własności elektrycznych i optycznych, nie są jeszcze w pełni poznane. Ten stan rzeczy jest przyczyną, że azotki i struktury z nich wytwarzane są przedmiotem intensywnych badań w wielu laboratoriach na świecie. Jednym ze światowych liderów w tej dziedzinie jest Instytut Badań Wysokociśnieniowych PAN, w którym recenzowana praca została wykonana.

Praca ma charakter eksperymentalny i jest poświęcona badaniu mechanizmów degradacji diod laserowych z azotku galu. Praca ma silny związek z praktyką i może być przykładem na to jak wnikliwe badania fizyczne mogą przyczynić się do trwałego postępu w technologii, mierzonego czasem życia wytwarzanych laserów. Rozprawa dotyczy zagadnień ważnych i aktualnych, o dużym znaczeniu poznawczym i aplikacyjnym. Bez wątpienia przyczynia się ona do głębszego zrozumienia działania i zjawisk degradacyjnych w laserach azotkowych.

W rozdziale 1, będącym wstępem do recenzowanej pracy, autorka omawia problemy związane z niezawodnością klasycznych diod laserowych i przedstawia przegląd zagadnień dotyczących technologii struktur i procesów wytwarzania przyrządów. Należy podkreślić, że *processing* laserowy i zagadnienia montażu, często traktowane jako mało naukowe, mają

decydujące znaczenie dla stabilnej i długotrwałej pracy przyrządu. Działania w kierunku poprawy niezawodności przyrządów nie mogą się ograniczać tylko do minimalizacji ilości defektów materiałowych. Recenzowana rozprawa należy do rzadkiego gatunku prac, które poprzez wnikanie w fizyczną naturę procesów degradacji przyrządowej pozwalają na istotną poprawę parametrów i wydłużenie czasu życia laserów.

W rozdziale 2 autorka omawia stosowane w pracy metody eksperymentalne. Podstawową techniką eksperymentalną były testy długoczasowe na ramie trwałości (impulsowe i w reżimie pracy ciągłej). Rama trwałości umożliwiała rejestrację napięcia, prądu pracy, temperatury i mocy optycznej lasera. Możliwa była także rejestracja w dowolnej chwili czasu charakterystyk $L - I$ (moc optyczna – prąd) i charakterystyk $I - V$ (prąd – napięcie). Jest to standardowy sposób postępowania w tego typu badaniach, który pozwala na zebranie danych eksperymentalnych opisujących zachowanie lasera w czasie. Dodatkowo, dla identyfikacji mechanizmów degradacji, wykonywano szereg pomiarów *ex-situ*, takich jak: badania mikroskopowe, badania kadodoluminescencji oraz badania fotoprądu i badania charakterystyk pojemnościowych złącz. Należy podkreślić, że prócz testów laserów wytwarzanych różnymi wariantami standardowej technologii badane były przyrządy niestandardowe, wytwarzane specjalnie dla sprawdzenia konkretnych hipotez badawczych, co nie jest powszechnie stosowane, a co w moim przekonaniu stanowi o wartości recenzowanej pracy.

Komentarza wymaga również sprzężenie badań niezawodnościowych z rozwojem i ewolucją technologii wytwarzania (*procesingu*) laserów. W okresie kiedy realizowana była praca dokonał się w IWC PAN znaczny postęp w jakości wytwarzanych laserów. Trwałość laserów wzrosła od kilku godzin do ponad tysiąca godzin, co czyni z nich produkt komercyjny. Choć, jak podkreśla autorka pracy, postęp ten był wynikiem wielu czynników, to na pewno identyfikacja źródeł degradacji przyrządów i ich choćby częściowa eliminacja należą do czynników o podstawowym znaczeniu dla wydłużenia czasu życia przyrządów. Ta bezpośrednia weryfikacja w praktyce podnosi znacząco wartość pracy.

Zasadniczą część pracy stanowią rozdziały 3 do 5, w których zebrane są wyniki badań trzech generacji laserów wytwarzanych w IWC PAN od 2004 roku. W przypadku laserów I-szej generacji, których czas życia nie przekraczał 50 godzin, podstawowym problemem było

przegrzanie zwierciadeł, prowadzące do zniszczenia pokryć dielektrycznych. Problem ten wyeliminowano w laserach II-giej generacji, w których wykorzystano, stosowaną wcześniej w klasycznych laserach ze związków III-V, koncepcję NIF (*Non Injected Facet*) odsunięcia kontaktu paskowego od krawędzi lasera. Redukcja generacji ciepła Joule'a w okolicy zwierciadeł wyeliminowała proces katastroficznej optycznej degradacji zwierciadeł (COMD). Uszkodzeń zwierciadeł nie dało się jednak całkowicie wyeliminować; zmieniły swój charakter i stały się bardziej zlokalizowane. Dla zidentyfikowania przyczyny degradacji zaproponowano oryginalny pomysł testowania laserów w warunkach kontrolowanej atmosfery zewnętrznej. Stwierdzono, że przyczyną degradacji zwierciadeł jest tworzenie się depozytów węglowych na ich oświetlonej powierzchni. Jednocześnie stwierdzono, że obecność tlenu w atmosferze otaczającej zwierciadło proces ten spowalnia. Doktorantka wysuwa hipotezę, że mamy tu do czynienia z procesem wcześniej zidentyfikowanym dla laserów z InGaAs na pasmo 980 nm, tzw. *Package Induced Failure* (PIF). W rezultacie, zastosowano hermetyczną obudowę, pozbawioną części klejonych i wypełnioną mieszanką gazów zawierających tlen, jak również wprowadzono rygorystyczne procedury czyszczenia zarówno płytki laserowej jak i obudowy, co zaowocowało całkowitą eliminacją uszkodzeń zwierciadeł.

Lasery wykonywane w nowej technologii (na użytek pracy określane jako lasery III – ciej generacji osiągnęły trwałość przekraczającą 1000 godzin. Osiągnięcie takiego poziomu niezawodności umożliwiło badanie fizycznych mechanizmów powolnej degradacji przyrządów. W wyniku tych badań stwierdzono, że degradacja postępuje z szybkością proporcjonalną do pierwiastka z czasu, co sugeruje proces dyfuzji jako odpowiedzialny za mechanizm degradacji. Nie udało się jednak stwierdzić co w tym przypadku podlega dyfuzji; na pewno nie magnez.. Wydaje się, że niezależnie od wysiłków doktorantki, jak i licznych prac w innych laboratoriach, mikroskopowa natura powolnej degradacji jest w przypadku laserów azotkowych ciągle tajemnicą, a często, jak to ma miejsce w przypadku obserwowanej korelacji szybkości degradacji z gęstością dyslokacji, jest sprzeczna z intuicyjnym rozumieniem problemu. Natomiast za niezwykle wartościowe uważam zauważenie liczbowej korelacji pomiędzy prądem progowym a sprawnością lasera, wskazujące na ten sam czynnik warunkujący degradację. Doktorantka wysuwa hipotezę, że degradacja parametrów użytkowych lasera wynika ze wzrostu strat powodowanego ucieczką nośników z obszaru czynnego, co z punktu widzenia formalizmu matematycznego opisującego zjawiska ma sens.

Natomiast nie do końca rozumiem dlaczego proces ucieczki nośników miałby zależeć od czasu; konkretnie rosnąć z czasem. W sposób naturalny proces ucieczki nośników zależeć może od temperatury. Przyczyną wzrostu temperatury przyrządu z upływem czasu, może być na przykład wzrost rezystywności przyrządu. W tym miejscu, co w żadnej mierze nie podważa wcześniejszej bardzo pozytywnej opinii na temat metodologii badań, brak mi trochę dyskusji możliwych źródeł obserwowanej degradacji. Z drugiej strony mam pełną świadomość, również z własnego doświadczenia w zakresie badania niezawodności laserów półprzewodnikowych, jak trudne do jednoznacznego rozstrzygnięcia są to problemy. Pewien niepokój budzą również wyniki dotyczące temperatury charakterystycznej badanych laserów. Wartość $T_0=1125\text{K}$ jest na tyle zaskakująca, że wymagałaby skomentowania. Poza tym, pokazana na Rys.87a (str.92) zależność temperatury charakterystycznej od czasu starzenia lasera, gdzie T_0 od wartości początkowej $\sim 150\text{K}$ rośnie do prawie 1200K po 45 godzinach pracy lasera jest zaskakująca. To samo odnosi się do wyników przedstawionych na Rys.87b, z których wynika, że proces starzenia przebiega wolniej w podwyższonej temperaturze, co stoi w sprzeczności z ogólnie przyjętą metodologią badania niezawodności przyrządów półprzewodnikowych polegającą na przyspieszonym starzeniu w podwyższonej temperaturze, z której zresztą parę stron dalej korzysta doktorantka. Wierząc w rzetelność danych eksperymentalnych, uważam, że konieczny jest w tej sprawie komentarz.

Praca mgr inż. Łucji Marony wnosi istotny wkład w poznanie trudnych do rozszyfrowania mechanizmów degradacji laserów azotkowych InGaN/GaN. Niezależnie od tego, że wiele zagadnień pozostaje ciągle nie do końca wytłumaczonych jej rezultaty są konkretne i wymierne; wzrost czasu życia laserów o dwa rzędy wielkości i istotny wkład w zrozumienia natury niektórych procesów odpowiedzialnych za degradację parametrów przyrządów. Również, pozornie negatywny wynik wykluczenia pewnych procesów jako odpowiedzialnych za degradację; konkretnie chodzi tu o dyfuzję magnezu, jest ważny z technologicznego punktu widzenia. Warte szczególnego podkreślenia jest wykorzystanie szerokiej gamy uzupełniających pomiarów, które wykraczają poza typowy zestaw metod eksperymentalnych stosowanych w badaniach degradacji laserów. W ten sposób uzyskano szereg rezultatów niemożliwych do osiągnięcia standardowymi metodami.

Praca doktorska stanowi samodzielny i oryginalny dorobek naukowy autorki, potwierdzony 19 publikacjami w najwyższej rangi czasopismach z dziedziny fizyki

półprzewodników; między innymi w J. Appl. Phys., Appl. Phys. Lett., phys. stat. sol. czy J. Crystal Growth. W 6 z tych publikacji doktorantka jest pierwszym autorem. Uzyskane przez doktorantkę wyniki są bardzo cenne a ich wartość polega na tym, że prócz weryfikacji różnych modeli degradacji laserów InGaN/GaN, pozwoliły na optymalizację procesów technologicznych ich wytwarzania i w znacznym stopniu przyczyniły się do uczynienia z nich produktu komercyjnego. Rozprawa świadczy o tym, że doktorantka opanowała w stopniu bardzo dobrym warsztat eksperymentalny w dziedzinie badania przyrządów półprzewodnikowych i dysponuje dużą wiedzą w dziedzinie fizyki laserów.

Mając na uwadze dużą naukową i praktyczną wartość otrzymanych wyników wyrażam przekonanie, że praca mgr inż. Łucji Marony z wyraźnym nadmiarem spełnia wymagania stawiane pracom na stopień naukowy doktora. Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Łucji Marony do publicznej obrony pracy doktorskiej a w przypadku pozytywnego jej zakończenia o wyróżnienie pracy.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Antoni...' followed by a stylized flourish.