

Zmiany parametrów optycznych i elektrycznych diod laserowych na pasmo 808 nm i 880 nm w czasie długotrwałej pracy

Elżbieta Dąbrowska, Marian Teodorczyk, Konrad Krzyżak, Magdalena Romaniec,
Grzegorz Sobczak, Andrzej Małąg

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych
ul. Wólczyńska 133, 01 - 919 Warszawa;
e-mail: elzbieta.dabrowska@itme.edu.pl

Streszczenie: Zaprezentowane zostały zmiany parametrów optycznych i elektrycznych diod podczas długotrwałej pracy: zmniejszenie mocy wyjściowej, zwiększenie prądu progowego jak i zmiana długości fali emisji - dla diod na pasmo 880 nm w kierunku fal krótszych oraz dla diod na pasmo 808 nm w kierunku fal dłuższych.

Słowa kluczowe: dioda laserowa, test starzeniowy, degradacja diod, elektroluminescencja

Changing optical and electrical parameters of laser diodes (LDs) emitting at 808 nm and 880 nm during continuous operation

Abstract: The following changes in optical and electrical parameters for diodes during long-term operation are presented: reduction in the output power, increase in the threshold current and change in the emission wavelength for diodes emitting at 880 nm towards shorter wavelengths and for diodes emitting at 808 nm towards longer wavelengths.

Key words: laser diode, degradation of laser diode, life test, electroluminescence

1. Wprowadzenie

Głównym obszarem zastosowań diod laserowych emitujących promieniowanie o długości fali 808 i 880 nm (dalej nazywanych na pasmo 808 i 880 nm) są układy pompowania optycznego laserów na ciele stałym, krystalicznych i ceramicznych. Ważnym obszarem są ich zastosowania przemysłowe i medyczne. Tolerancja na długość fali emitowanej jest w obu przypadkach dosyć ostra. Diody laserowe (LD) zwykle pracują w warunkach podwyższonej temperatury. Zachodzące w wyniku tego procesy starzeniowe powodują zmianę parametrów optycznych i elektrycznych w ostateczności prowadząc do uszkodzenia diody.

Za degradację odpowiadają naprężenia mechaniczne i termiczne generowane głównie podczas procesów

montażowych. Montaż obejmuje obróbkę mechaniczną (wyodrębnienie chipa z płytki po processingu), trwałe przymocowanie chipa do podłoża poprzez lutowanie i przyłączenie wyprowadzeń zewnętrznych (montaż drutowy) [1]. Procedura lutowania polega na zespoleniu dwóch materiałów (chipa i podłoża o niedopasowanych współczynnikach rozszerzalności termicznej) metalicznym lutem, który topi się i tężęje łącząc się z oboma materiałami [2]. Na Rys. 1 pokazano schematycznie chip przyłutowany do podłoża CuC i do chłodnicy Cu. Naprężenie mechaniczne powstające podczas lutowania powoduje powstawanie dyslokacji w sieci krystalicznej chipa. To z kolei przyczynia się do wzrostu gęstości liczby centrów rekombinacji niepromienistej, wzrostu prądu progowego i zmniejszenia zewnętrznej wydajności kwantowej.

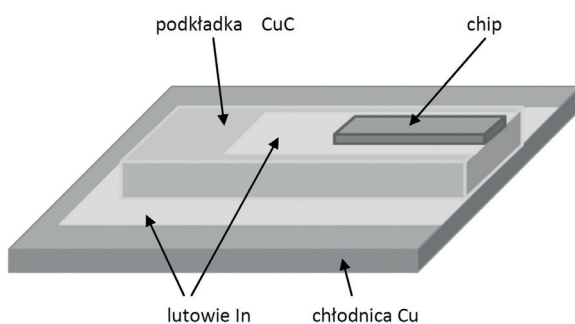
Rozwój sieci dyslokacji w trakcie pracy LD zależy od:

- wymiarów chipa,
- różnicy współczynników rozszerzalności termicznej (CTE) chipa, podkładki, chłodnicy, lutowia,
- temperatury krzepnięcia lutowia,
- grubości każdej warstwy montażowej tj. chipa, podkładki, chłodnicy, lutowia,
- płaskości i jednorodności grubości lutowia.

Jakość powierzchni bocznych i krawędzi chipu oraz mikro-urazy i inne wady chipu wprowadzają naprężenia mogące powodować pęknięcia chipu [3].

Istnieje korelacja pomiędzy naprężeniem a czasem życia urządzenia [4].

Naprężenie indukowane montażem deformuje wszystkie warstwy heterostruktury. Do QW przechodzi od 1/4



Rys. 1. Chip laserowy przyłutowany do podkładki CuC i chłodnicy Cu.

Fig. 1. Laser chip soldered to CuC heat spreader and Cu heat sink.

nawet do 1/2 naprężenia pochodzącego od montażu. Za koniec życia lasera przyjmuje się moment, kiedy straci on 20 % swojej pierwotnej mocy [5].

W artykule przedstawione są zmiany parametrów optycznych diod laserowych na pasmo 808 i 880 nm w czasie ich pracy w warunkach cw.

2. Badania

Diody emitujące promieniowanie laserowe w pasmach $\lambda = 808$ nm i 880 nm zostały wykonane z zastosowaniem heterostruktur DBSCH (AlGaAs/GaAs) z naprężonymi studniami kwantowymi (QW) z GaAsP (808 nm – naprężenie ściskające) oraz InGaAs (880 nm – naprężenie rozciągające) jako warstwami aktywnymi.

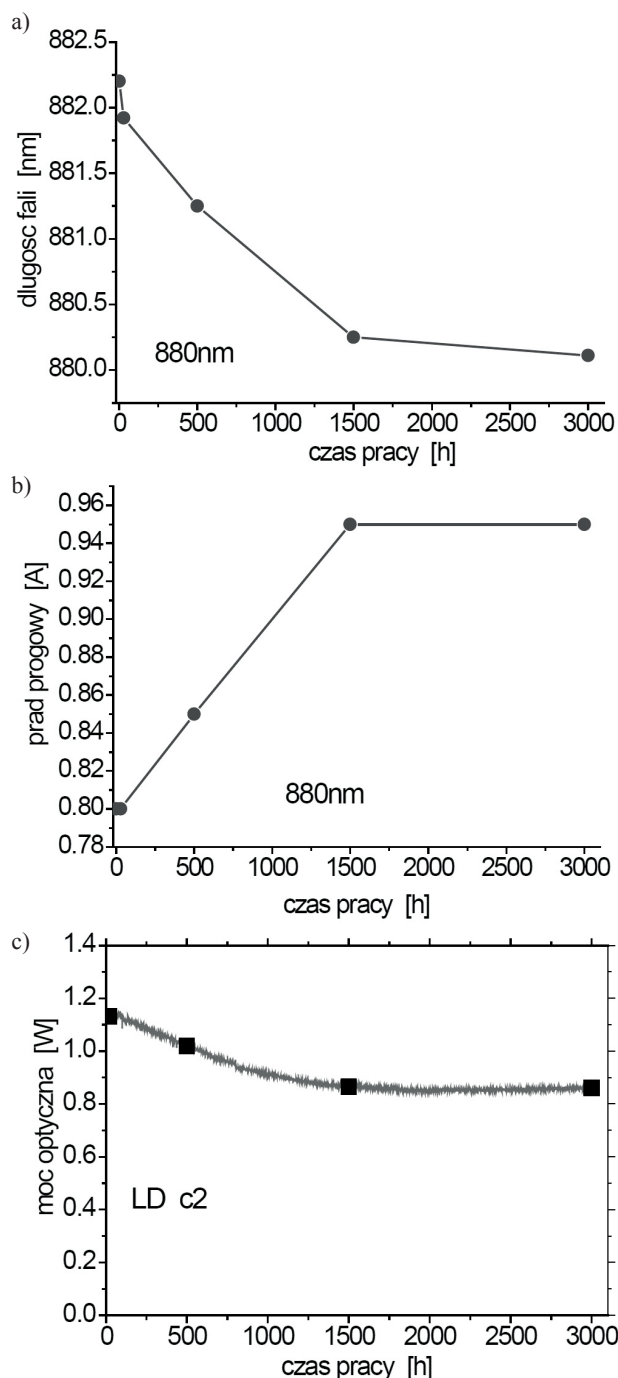
Do badań mocy optycznych, prądów progowych i charakterystyk spektralnych przeznaczono diody laserowe na pasmo 808 nm o długości rezonatora 2 i 3 mm z obszarem aktywnym o szerokości 90 μm . Diody na pasmo 880 nm, również o długości rezonatora 2 i 3 mm były wykonane z obszarem aktywnym o szerokości 180 μm . Paski aktywne były definiowane poprzez implantację jonów He⁺ ($E = 160$ keV dla 880 nm oraz $E = 130$ keV dla 808 nm) przez metalizację TiPt i maskę fotorezystu.

Dla wszystkich diod obliczono rezystancję termiczną R_{th} . Była ona stosunkowo wysoka ze względu na małe wymiary chłodnicy (klocki Cu o wymiarach 4 mm x 7 mm x 2 mm) nie nadążającej odprowadzać ciepła z obszaru aktywnego. Ale tylko dla tak zmontowanych diod można było przeprowadzić badania starzeniowe. R_{th} liczono ze zmian położenia maksimum charakterystyki spektralnej ze zmianą wielkości wstrzykiwanego prądu przy pracy ciągłej [6]. Wg autorów [3] dla poprawnego działania diody chłodnica Cu powinna mieć wymiar co najmniej 10-krotny wymiar chipa. Przy tak małych stosowanych chłodnicach mamy do czynienia z podwyższoną rezystancją termiczną diody, a co za tym idzie ze zwiększeniem temperatury złącza. Oznacza to, że prowadzone testy były przyspieszonymi testami starzeniowymi. Współczynnik przyspieszenia wynosił ~ 2 [7].

3. Wyniki

Dla 70 % badanych diod na pasmo 880 nm i 60 % diod na pasmo 808 nm zarejestrowano degradację stopniową. Na Rys. 2 pokazano przykładowe wyniki dla diody DL c2 na pasmo 880 nm z długością rezonatora 2 mm. Rezystancja termiczna $R_{\text{th}} = 7,2 \pm 0,5$ °C/W, co było wynikiem poprawnym dla tych diod i dla tego typu chłodnic.

Dla diody DL c2 w czasie trwania testu starzeniowego do 1500 h wzrasta prąd progowy, zmniejsza się moc diody, przesunięciu ulega charakterystyka spektralna w kierunku fal krótszych (Rys. 2). Po ~ 1500 h moc diody i prąd progowy ustabilizowały się, natomiast charaktery-

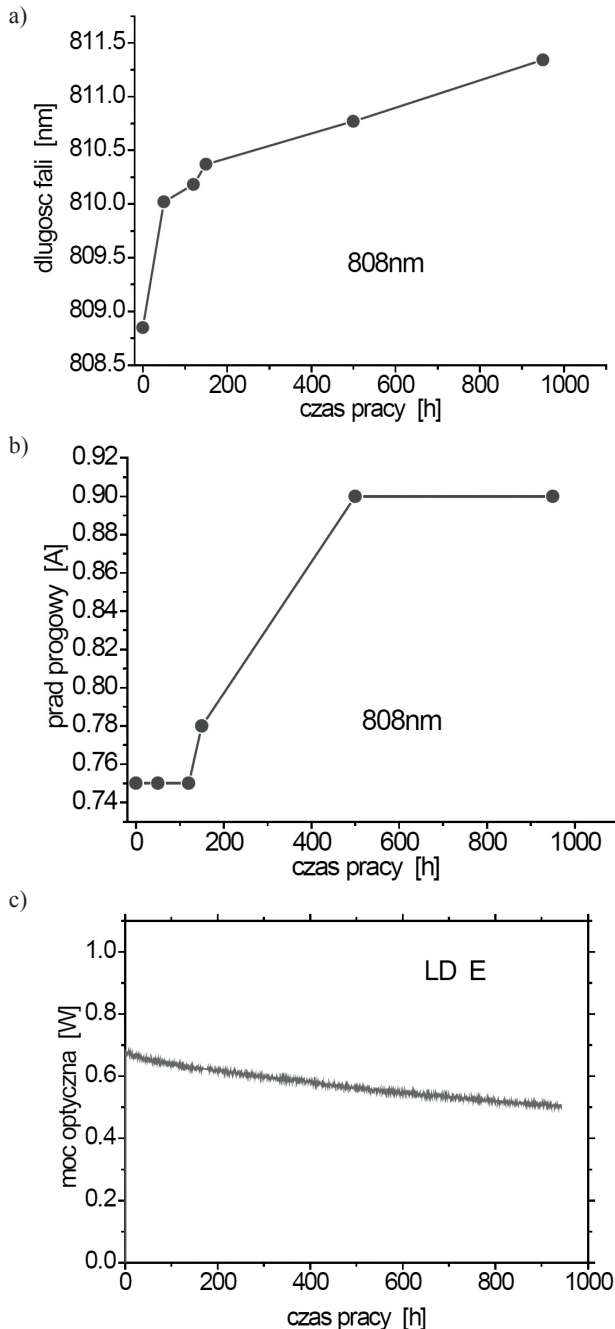


Rys. 2. Wyniki pomiarowe dla diody LD c2 na pasmo 880 nm: a) zmiana długości fali emisji, b) zmiana prądu progowego, c) zmiana mocy optycznej.

Fig. 2. Measurement results for LD c2 emitting at 880 nm: a) change in wavelength, b) change in threshold current, c) change in optical power.

styka spektralna w dalszym ciągu, choć zdecydowanie wolniej przesuwają się w kierunku fal krótszych. Badania starzeniowe dla diody przerwano po 3000 h.

Natomiast dla diody LD E na pasmo 808 nm z długością rezonatora 2 mm, przy postępującej powolnej degradacji parametrów elektrooptycznych obserwuje się stałe przesuwanie się charakterystyki spektralnej tym

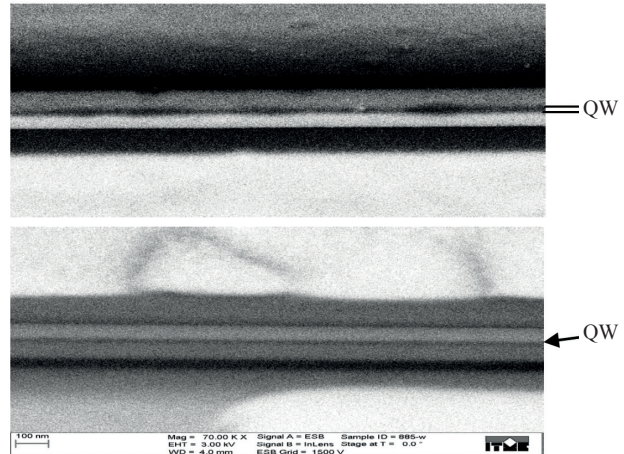


Rys. 3. Wyniki pomiarowe dla diody LD E na pasmo 808 nm: a) zmiana długości fali emisji, b) zmiana prądu progowego, c) zmiana mocy optycznej

Fig. 3. Measurement results for a LD E emitting at 808 nm: a) change in wavelength, b) change in threshold current, c) change in optical power.

razem w kierunku fal dłuższych (Rys. 3). Dla tej diody badania przerwano po 950 h. Rezystancja termiczna diody wynosiła $R_{th} = 7 \pm 0,4 \text{ } ^\circ\text{C/W}$.

Dla diod o długim czasie pracy, dla których nie zaobserwowano defektów, ale powolną degradację parametrów elektro-optycznych zaobserwowano na zdjęciach SEM rozmycie studni kwantowej (QW) [8]. Na Rys. 4 pokazano widok QW dla diody z długim czasem pracy, dla której następowały powolne zmiany parametrów elektrycznych



Rys. 4. Zdjęcie SEM : góra – rozmyta studnia kwantowa dla diody z długim czasem pracy, dół – studnia kwantowa dla diody przed badaniami starzeniowymi.

Fig. 4. SEM image: top fuzzy quantum well for diodes with long life, bottom - quantum well diode before aging tests.

i optycznych oraz widok QW diody przed badaniami starzeniowymi.

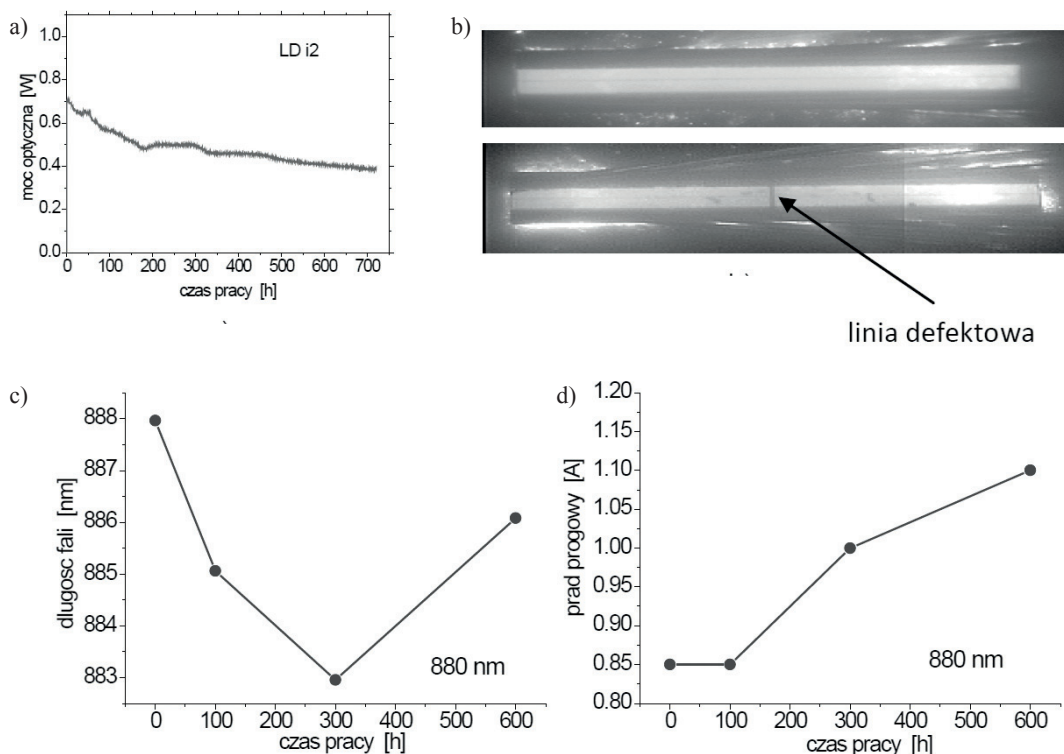
Dla diod na pasmo 880 nm z długim czasem pracy obserwuje się najprawdopodobniej dyfuzję In na zewnątrz studni kwantowej. Powoduje to zmniejszanie naprężenia ściskającego i w konsekwencji przesuwanie charakterystyki spektralnej w kierunku fal krótszych.

Natomiast dla diod na pasmo 808 nm mamy najprawdopodobniej do czynienia z dyfuzją P ze studni kwantowej co powoduje zmniejszenie naprężenia rozciągającego i powolne przesuwanie charakterystyk spektralnych w kierunku fal dłuższych.

Diody na pasmo 808 nm są wrażliwsze na naprężenia od diod na pasmo 880 nm najprawdopodobniej z powodu konstrukcji heterostruktury. Odległość od kontaktu p do QW dla diod na 808 nm wynosi $\sim 2,4 \text{ }\mu\text{m}$, dla diod 880 nm $\sim 3,8 \text{ }\mu\text{m}$. Dlatego wydaje się, że do QW diod na 808 nm dochodzi większa część naprężeń niż do QW diod na 880 nm. Stąd obserwuje się dla nich znacznie krótszy czas życia w porównaniu z diodami na pasmo 880 nm.

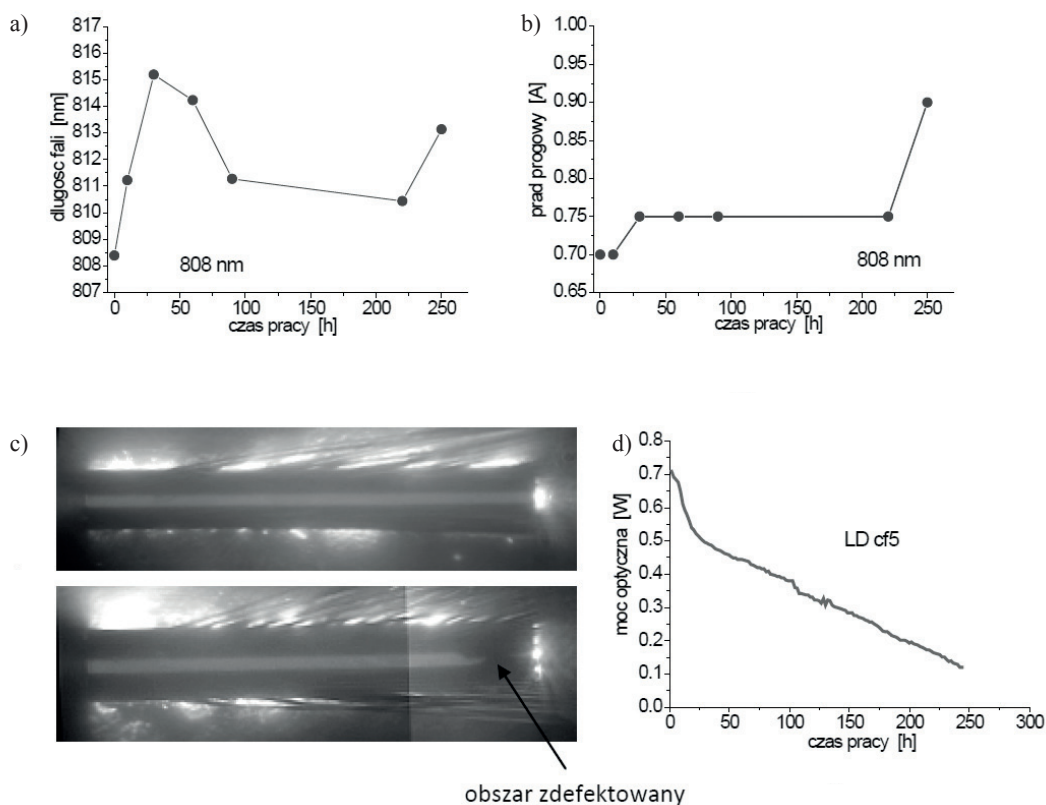
Na Rys. 5 pokazane są charakterystyki dla przykładowej diody LD i2 na pasmo 880 nm o długości rezonatora 3 mm. Dioda ta straciła 20 % swojej mocy już po 200 h, a 50 % po 600 h. Dla wszystkich diod na pasmo 880 nm, dla których charakterystyki spektralne przesuwają się w obu kierunkach, tak jak dla diody LD i2, obserwuje się w końcowym obrazie elektroluminescencji linie defektowe (tutaj w środku chipa) prostopadłe do osi rezonatora. Linie te rozwijają się bardzo szybko i ostatecznie prowadzą do całkowitej degradacji diody.

Również dla diod na pasmo 808 nm przy przesuwaniu się charakterystyk spektralnych podczas pracy w różnych kierunkach pojawiają się defekty uwidocznione w obrazie elektroluminescencji. W tym przypadku pojawiają się plamy rozwijające się pod kątem 45° do osi rezonatora (Rys. 6). Rezystancja termiczna przedsta-



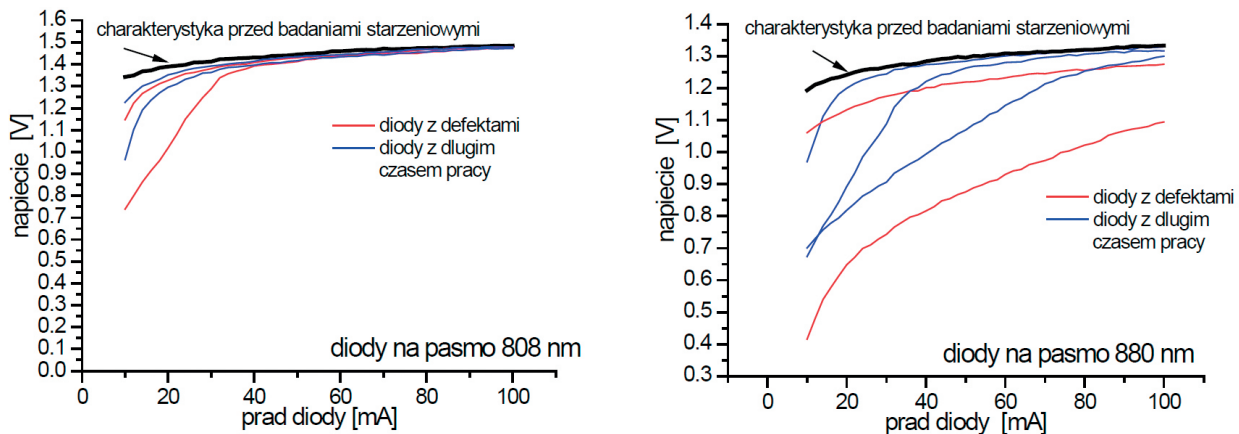
Rys. 5. Wyniki pomiarów dla diody LD i2: a) zmiana mocy optycznej, b) obraz elektroluminescencji przed i po 600 h pracy w warunkach przyspieszonych, c) zmiana długości fali emisji, d) zmiana prądu progowego.

Fig. 5. Measurement results for LD i2: a) change in optical power, b) electroluminescence image before and after 600 h under accelerated conditions, c) change in wavelength, d) change in threshold current.



Rys. 6. Wyniki pomiarów dla diody LD cf5: a) zmiana długości fali emisji, b) zmiana prądu progowego c) obraz elektroluminescencji po 250 h pracy w warunkach przyspieszonych, d) zmiana mocy optycznej.

Fig. 6. Measurement results for LD cf5: a) change in wavelength, b) change in threshold current, c) electroluminescence image after 250 h under accelerated conditions, d) change in optical power.



Rys. 7. Charakterystyki niskoprądowe w warunkach impulsowych dla diod na pasmo 808 nm i 880 nm z różnym stopniem uszkodzenia.

Fig. 7. Low-current characteristics under pulse conditions for diodes emitting at 808 nm and 880 nm, with varying degree of damage.

wionej diody LD cf5 była podwyższona i wynosiła $R_{th} = 7,9 \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$. Na obrazie elektroluminescencji widoczny jest obszar zdegradowany w tylnej części diody. Na Rys. 6 pokazano także zmianę charakterystyk mocowo-prądowych i spektralnych. Dioda po 250 h pracy, po przeprowadzonych pomiarach spektralnych uległa całkowitej degradacji.

Duże zmiany obserwuje się również w pomiarach impulsowych charakterystyk niskoprądowych. Wyniki dla diod z różnym stopniem uszkodzenia pokazane są na Rys. 7.

Diody o dłuższym czasie pracy po badaniach starzeniowych charakteryzowały się dużymi upływnościami. Charakterystyki I-V miały obniżony przebieg w stosunku do diod przed badaniami starzeniowymi. Należy przypuszczać, że w obszarach aktywnych tych diod pojawiły się zmiany: punkty defektowe lub rozmycie studni kwantowej. Prąd upływu jest spowodowany przepływem prądu elektronowego z obszaru aktywnego do warstwy p-claddingowej i prądu dziurowego z obszaru aktywnego do warstwy n-claddingowej (jest dużo mniejszy = 1/100 elektronowego).

Również diody z liniami defektowymi (na pasmo 880 nm) lub obszarami zdefektowanymi (na pasmo 808 nm) widocznymi w obrazie elektroluminescencji miały zmienne charakterystyki niskoprądowe.

4. Podsumowanie

Po przebadaniu 42 diod na pasmo 808 i 30 diod na pasmo 880 nm stwierdzono że:

- rozmiar defektów ujawnionych w obrazie elektroluminescencji zwiększa się bardzo szybko. Defekty pojawiają się przede wszystkim tam, gdzie występują większe naprężenia. Defekty punktowe czy też dyslokacje mogą indywidualnie tworzyć się w obszarze aktywnym podczas wzrostu kryształu czy też podczas montażu. W wyniku defektu wzrasta liczba centrów rekombinacji niepromienistej prowadząc do wzrostu absorpcji, co powoduje wzrost prą-

du progowego i zmniejszenie wydajności kwantowej [9],

- charakterystyki spektralne diod na pasmo 808 nm podczas długotrwałej pracy przy zasilaniu cw, gdy nie ma defektów widocznych w obrazie elektroluminescencji przesuwają się w kierunku długofalowym. Jeśli pojawiają się defekty, charakterystyki te przesuwają się w przypadkowych kierunkach,

- dla diod na pasmo 808 nm pojawiające się w obrazie elektroluminescencji plamy defektowe rozchodzą się pod kątem 45° do osi rezonatora. Większe obszary defektowe wytworzone są z punktów defektowych działających jak centra rekombinacji niepromienistej, wspierających tworzenie się nowych punktów defektowych [10]. Dla 20 % przebadanych diod na pasmo 808 nm zaobserwowano obszary defektowe,

- charakterystyki spektralne diod na pasmo 880 nm podczas długotrwałej pracy przy zasilaniu cw, gdy brak jest defektów widocznych w obrazie elektroluminescencji przesuwają się w kierunku krótkofalowym. Jeśli pojawiają się defekty, charakterystyki te przesuwają się w przypadkowych kierunkach,

- dla diod na pasmo 880 nm pojawiające się w obrazie elektroluminescencji linie defektowe rozchodzą się prostopadle do osi rezonatora. Wzrost linii defektowych jest typowym procesem wydłużania dyslokacji jako konsekwencja oddziaływania pomiędzy dyslokacjami i ładunkami mniejszościowymi (z iniekcji elektrycznej) w obszarze aktywnym oraz generację optyczną spowodowaną samo absorpcją światła laserowego wewnątrz studni kwantowej [9]. Dla 17 % przebadanych diod na pasmo 808 nm zaobserwowano linie defektowe,

- dla diod o długim czasie pracy, dla których nie zaobserwowano defektów, ale tylko lekką degradację parametrów elektro-optycznych zaobserwowano na zdjęciach SEM rozmycie QW,

- diody o dłuższym czasie pracy po badaniach starzeniowych charakteryzowały się dużymi upływnościami widocznymi w pomiarach impulsowych.

Zmiany zachodzące w długo pracujących diodach są

nieuniknione. Niski uzysk na etapie prac badawczych nie w pełni odzwierciedla uzyski otrzymywane podczas ustabilizowanej technologii produkcyjnej.

Literatura

- [1] Tomm J. W., Gerhardt A., Müller R., Malyarchuk V., Sainte-Marie Y., Galtier P., Nagle J., Landesman J. P.: Spatially resolved spectroscopic strain measurements on high-power laser diode bars, *Journal of Applied Physics*, 2003, 93, 3
- [2] Fritz M. A., Cassidy D. T.: Cooling rate in diode laser bonding”, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2004, 27, 1
- [3] Zimmer J., Palen E. : Diamont heat spreaders maximize emitter power and lifetime, *Laser Focus World* 2006, 42 5, S11 - S14
- [4] Martin E., Landesman J. P., Hirtz J. P., Fily A.: Microphotoluminescence mapping of packaging-induced stress distribution on high-power AlGaAs laser diodes, *Applied Physics Letters*, 1999 ,75, 17
- [5] Häusler K., Zeimer U., Sumpf B., Erbert G., Tränkle G.: Degradation model analysis of laser diodes, *J. Mater. Sci: Mater. Electron*, 2008, 19, S160 - 164
- [6] Dąbrowska E., Małąg A.: Comparison of measurement methods of laser diode’s thermal resistance, *Electrical Rev. (Przegląd Elektrotechniczny)*, 2011, 4, 232 - 238
- [7] Pliska A. C., Mottin J., Matuschek N., Bosshard Ch.: Bonding semiconductor laser chip: substrate materials figure of merit and die attach layer influence” Belgrade, Italy, 28 - 30 September 2005
- [8] Chu S. N. G., Chand N., Joyce W. B.: Generic degradation mechanism for 980 nm $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ strained quantum-well lasers, *Applied Physics Letters*, 2001, 78, 21
- [9] Xia R., Larkins E. C., Harrison I., Andrianov S. R. A., Morgan J., Landesman J. P.: Mounting-induced strain threshold for the degradation of high-power AlGaAs laser bars, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14, 7
- [10] Juan Jimenez C. R.: Laser diode reliability: crystal defects and degradation modes, *Physique*, 2003, 4, 663 - 673