

BADANIA DEGRADACJI DIOD LASEROWYCH NA PASMO 880 nm

Elżbieta Dąbrowska, Magdalena Nakielska, Marian Teodorczyk, Grzegorz Sobczak,
Magdalena Romaniec, Andrzej Małąg

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

Streszczenie: Celem pracy było zbadanie przyczyn degradacji laserów mocy i ich związku z wykonywaniem poszczególnych operacji technologicznych (processing, montaż, napyłanie luster) na degradację diod na pasmo 880 nm. Dla badanych diod o długości ich życia decydowały przede wszystkim poprawność wykonania luster oraz wprowadzający naprężenia montaż. Praca posłużyła do modernizacji technologii wytwarzania diod laserowych celem zwiększenia zysku.

Słowa kluczowe: dioda laserowa, heterostruktura, badania starzeniowe, niezawodność diody laserowej

The investigation of degradation of laser diodes emitting at 880 nm band

Abstract: The influence of following technology processes (such as: wafer processing, montage, mirror deposition) on degradation of laser diodes emitting at 880 nm band was studied. Those investigations helped to improve technology of laser diode production.

Key words: laser diode, heterostructure, burn-in tests, degradation

1. WPROWADZENIE

Podczas długotrwałego działania diody laserowej (DL) jej moc wyjściowa przy stałym dostarczanym prądzie, albo płynący prąd przy stałej wyjściowej mocy zmieniają się. W pierwszym przypadku moc wyjściowa ma tendencję do zmniejszania się, w drugim przypadku płynący prąd zwiększa się podczas pracy. W obu przypadkach ma miejsce tzw. degradacja przyrządu.

Niezawodność DL dużej mocy - zdefiniowana jako zdolność przyrządu do pracy w sposób zadowalający w zdefiniowanym środowisku dla określonego przedziału czasu - jest kluczowym parametrem przy praktycznym jej zastosowaniu. Koniec życia lasera określa się, gdy jego moc optyczna spadnie

o 20% [1]. Rodzaj i szybkość degradacji DL zależy od wielu czynników: konstrukcji lasera, jakości podłoża, dokładności wykonania poszczególnych warstw heterostruktury, procesu technologicznego m.in. napyłania kontaktów i luster oraz operacji montażu. Zrozumienie mechanizmów zjawisk degradacyjnych w DL jest niezbędne dla wydłużenia jej czasu życia.

Wyróżnia się kilka rodzajów degradacji w zależności od jej szybkości i stopnia. Mówi się więc o degradacji stopniowej, gwałtownej i katastroficznej. Degradacja gwałtowna obserwowana jest w pierwszych 100 godzinach pracy DL. Degradacja stopniowa następuje przy pracy rzędu kilku tysięcy godzin i objawia się stopniowym zmniejszeniem wydajności kwantowej. Katastroficzne uszkodzenie ma miejsce, kiedy przyrząd nagle przestaje działać po wcześniejszej regularnej, stabilnej pracy. Katastroficzne uszkodzenie zachodzi nagle, bez wcześniejszych, wyraźnych znaków.

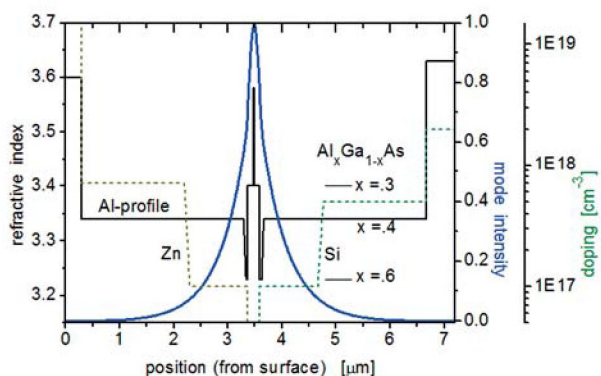
Do identyfikacji rodzajów degradacji potrzebne są badania zależności wyjściowej mocy optycznej P ($I = \text{const}$) lub prądu zasilającego I ($P = \text{const}$) w funkcji czasu, czyli tzw. badania starzeniowe.

Degradacja może być również klasyfikowana przez miejsce jej zainicjowania. Wewnętrzna degradacja ma miejsce wewnątrz obszaru aktywnego lub w przejściach międzyzłączowych. Zewnętrzna ma miejsce poza obszarem aktywnym i może być spowodowana błędami montażowymi (lutowaniem, ultrakompresją), uszkodzeniem luster lub kontaktów.

Celem pracy było rozpoznanie niektórych przyczyn degradacji DL dużej mocy na pasmo 880 nm, a następnie zoptymalizowanie technologii wytwarzania DL pod kątem zniwelowania wykrytych wad i tym samym wydłużenie czasu ich życia.

2. HETEROSTRUKTURA NA PASMO 880 nm

Heterostruktura DBSCH-SQW (*double-barrier separate-confinement-heterostructure – single quantum well*) diody laserowej na pasmo 880 nm została wykonana techniką MOVPE w firmie FBH. Projekt heterostruktury w wersji symetrycznej powstały w ITME zakładał szeroki rozkład pola optycznego (w płaszczyźnie prostopadłej do złącza), co pociągało za sobą zastosowanie stosunkowo grubych warstw ograniczających dla uniknięcia penetracji fali prowadzonej do obszarów o wysokiej absorpcji (warstwa podkontaktowa GaAs i podłoże GaAs). Centralną częścią heterostruktury jest falowód AlGaAs zawierający naprężoną ściskająco studnię kwantową InGaAs o grubości ~ 7 nm. Analizy literaturowe i konsultacje ze specjalistami w dziedzinie epitaksji wskazywały na duże prawdopodobieństwo istnienia głębokich defektów, jakim jest złącze InGaAs – AlGaAs. Rozwiązaniem problemu było zastosowanie cienkich warstw GaAsP (3 nm) na tym złączu, o zawartości P zapewniającej dostateczne poszerzenie przerwy energetycznej. Na Rys. 1 pokazano profil współczynnika załamania wynikającego z zawartości Al (x) w warstwach heterostruktury, profil domieszkowania Zn i Si oraz znormalizowany rozkład intensywności pola optycznego podstawowego modu poprzecznego.



Rys. 1. Profil współczynnika załamania warstw heterostruktury na pasmo 880 nm, profil domieszkowania Zn i Si oraz znormalizowany rozkład intensywności pola optycznego podstawowego modu poprzecznego. Na Rys. zaznaczono 3 wartości x odpowiadające kolejno: $x = 0,3$ – falowodowi, $x = 0,4$ – warstwie okładkowej (*cladding*), $x = 0,6$ – warstwie barierowej.

Fig. 1. Refractive index profile of layers of heterostructure designed for 880 nm band, Si and Zn doping profiles and normalized intensity distribution of fundamental transverse optical field mode.

Centralną część światłowodu stanowi ściskająco naprężona studnia InGaAs.

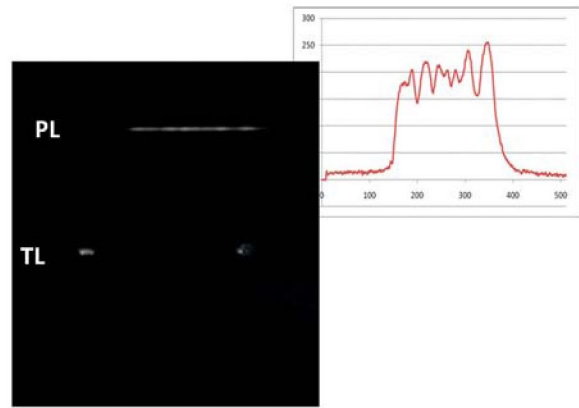
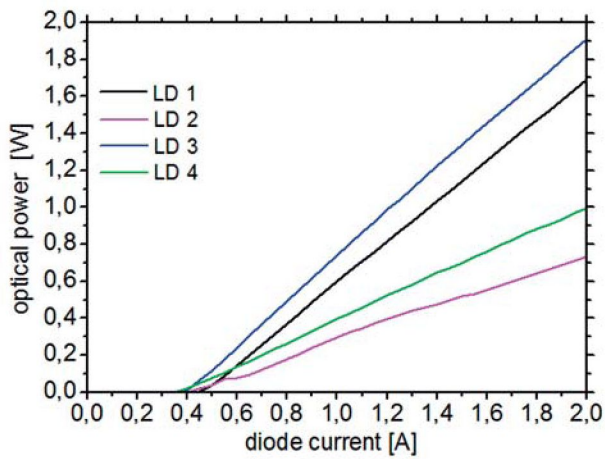
Pomiędzy falowodem a warstwami okładkowymi umieszczone są szerokopasmowe (z małym współczynnikiem załamania) cienkie warstwy barierowe AlGaAs (30 nm) domieszkowane Zn lub Si, dające dodatkowy stopień swobody przy projektowaniu ograniczenia optycznego. Tak zaprojektowany, nie-gausowski, miękki profil rozkładu intensywności pola powinien zwiększyć odporność lustra na katastroficzne uszkodzenie (COD). Odległość studni kwantowej od powierzchni heterostruktury wynosi ~ 4 μm .

3. WSTĘPNE POMIARY DIOD LASEROWYCH

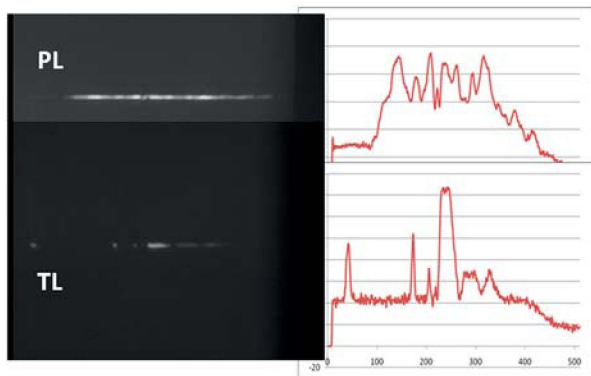
Dla badanych diod na każdym etapie montażu wykonywano pomiary charakterystyk mocowo-prądowych, napięciowo-prądowych, spektralnych, oraz rozkład promieniowania w polu bliskim (NF). Na bieżąco modyfikowano procesy technologiczne, eliminując niekorzystne zjawiska mające wpływ na obniżanie jakości otrzymany diod. Na koniec przeprowadzono badania starzeniowe.

Po wstępnej selekcji do dalszych badań wybierano chipy, które przy zasilaniu impulsem długości 0,4 μs i repetycji 0,19 ms miały poprawne charakterystyki mocowo-prądowe (P-I) (prąd progowy $\sim 0,4$ A, nachylenie P-I ~ 1 W/A). Dla znanej, sprawdzonej heterostruktury nachylenie charakterystyki P-I zależy m.in. od poprawności przebiegu processingu, od montażu i przede wszystkim od jakości luster.

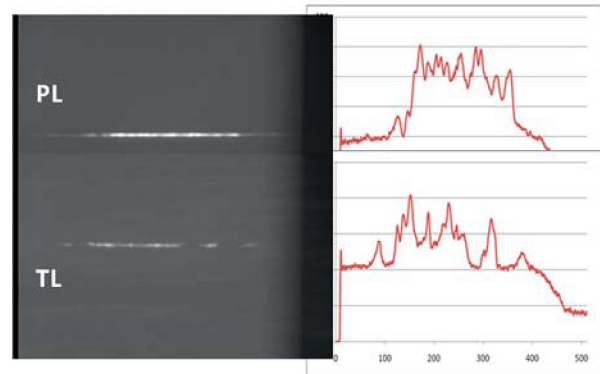
Na Rys. 2 pokazano przykłady chipów laserowych (odrzuconych na etapie badań wstępnych) z różnymi nachyleniami charakterystyki P-I spowodowanymi wadami luster. Dla tych chipów przedstawiono rozkład promieniowania w polu bliskim od strony przedniego lustra (PL) i tylnego lustra (TL). Moc diody laserowej spada, gdy tylne lustro nie jest szczelne z powodu niepoprawnego wykonania przelomu lub wadliwego pokrycia luster warstwami odbiciowymi. Dla diody nr 2 z charakterystyką mocowo-prądową o najmniejszym nachyleniu oprócz wadliwego tylnego lustra zaobserwowano wadę na przednim lustrze.



LD 3 – od strony tylnego lustra widać jedynie rozświetlone końce chipa

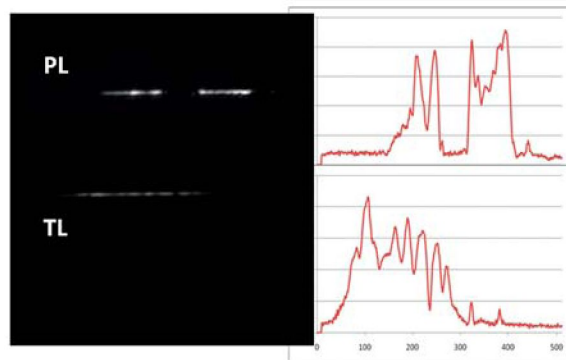


LD 1



LD 4

w obu przypadkach tylne lustro nie jest szczelne



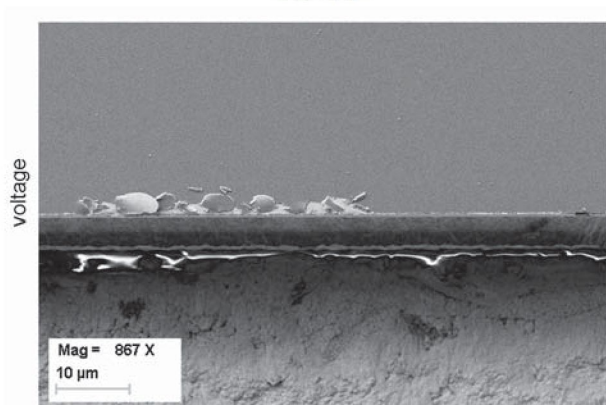
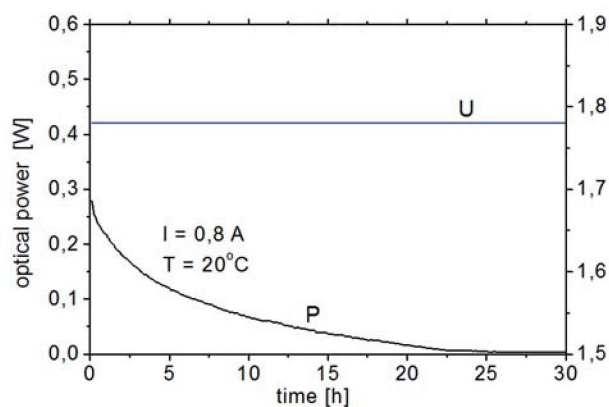
LD 2 tylne lustro nie jest szczelne, na przednim widoczne jest uszkodzenie

Rys. 2. Wyniki pomiarów diod laserowych LD1, LD2, LD3 i LD4. a) charakterystyki mocowo-prądowe; b) rozkład promieniowania w polu bliskim (NF) z przedniego (PL) i tylnego (TL) lustra (od strony tylnego lustra widać jedynie rozświetlone końce chipa); c) d) NF dla przedniego i tylnego lustra przy nieszczelnym tylnym lustrze; e) NF dla diody z nieszczelnym tylnym lustrem i wadą na przednim lustrze.

Fig. 2. Measurement results for LD1, LD2, LD3 and LD4 laser diodes. a) current-voltage characteristics; b) near field distribution from the face mirror (PL) and the back mirror (TL) (on the side of the back mirror only illuminated ends of the chip are visible); c) and d) near field (NF) for the face mirror and the back mirror when the back mirror is leaky e) near field (NF) for a diode with a leaky back mirror and a face mirror defect.

Na skutek złej adhezji pokrycia lustra, pod wpływem zwiększonej temperatury w czasie pracy diody warstwa na lustrze może popękać i zaczyna odpadać.

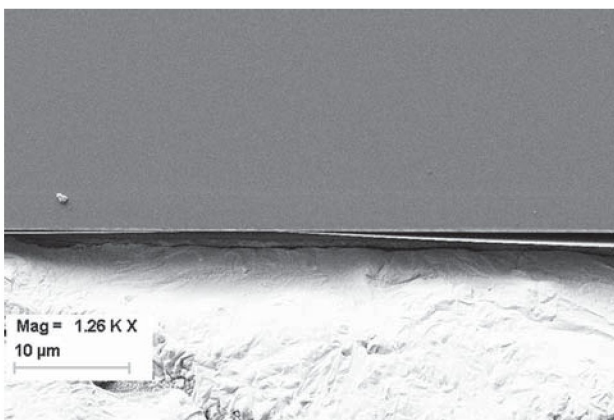
Moc takiej diody w czasie pracy gwałtownie spada (Rys. 3).



Rys. 3. Charakterystyki mocowo-prądowe i napięciowo-prądowe oraz zdjęcie SEM dla diody laserowej ze złą adhezją pokrycia przedniego lustra.

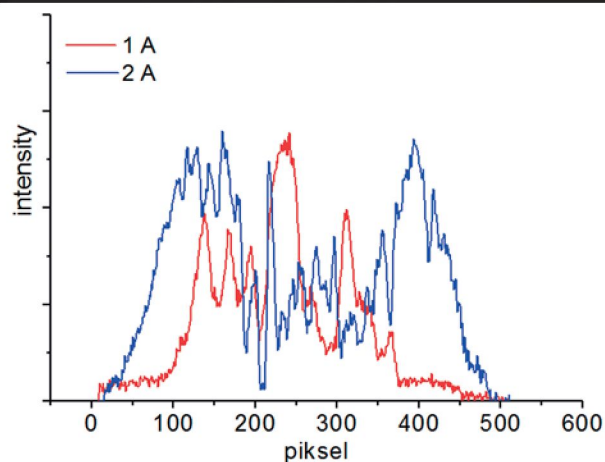
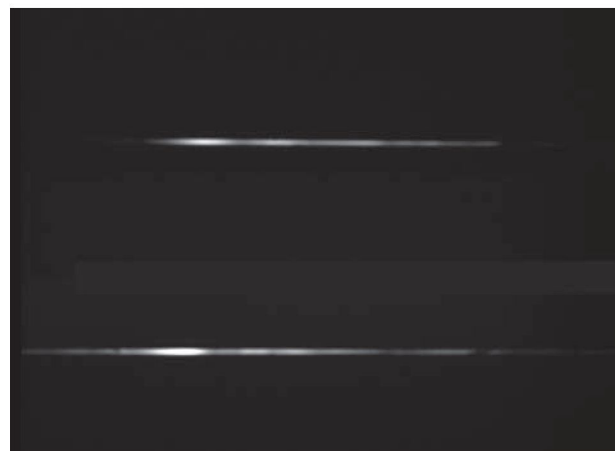
Fig. 3. Light vs. Current and Voltage vs. Current characteristics and SEM photographs of laser diode (LD) taken for a LD with wrong adhesion of deposited face mirror.

Bardzo ważne są metaliczne kontakty na chipach laserowych. Dla diody z Rys. 4 również następował w czasie pracy szybki spadek mocy diody na skutek odwarstwienia warstwy kontaktowej. Błędy takie występują rzadko, ale potrafią zdyskwalifikować całą partię laserów.



Rys. 4. Dioda z odwarstwioną warstwą metaliczną.
Fig. 4. Detachment of metallic layer on laser diode.

Na podstawie wcześniejszych prac dotyczących poznania przyczyn degradacji przy wytwarzaniu diod laserowych dla zdefiniowania paska aktywnego zrezygnowano z bariery Schottky'ego, a warstwę izolującą uzyskuje się w procesie implantacji jonów helu [2]. W ten sposób unika się przypadkowych „wylupań” GaAs/AlGaAs na krawędzi lustrzanej na górze mes i u ich podstawy, minimalizując wpływ jakości powierzchni czołowej na czas życia lasera. Jednak źle dobrane warunki implantacji jonów helu powodują, że pasek aktywny nie jest dobrze zdefiniowany i jego szerokość zmienia się przy różnych wartościach prądu (Rys. 5). Dioda taka bardzo szybko przestaje pracować w warunkach pracy ciągłej (cw).

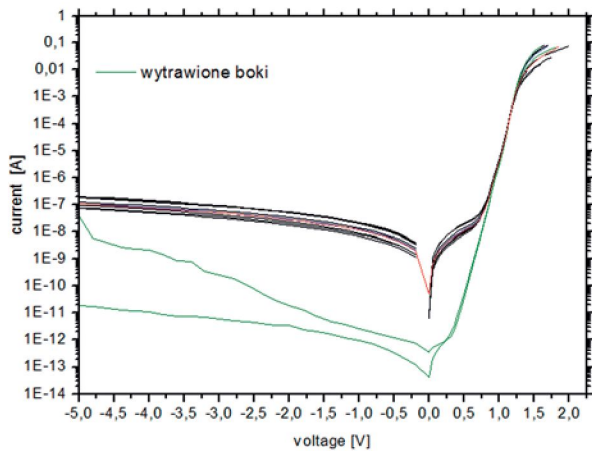


Rys. 5. Rozkład promieniowania w polu bliskim przy 1 A i przy 2 A dla diody ze źle zdefiniowanym paskiem aktywnym.

Fig. 5. Near field distribution at 1 A and 2 A drive current for a laser diode with incorrect active stripe definition.

Stwierdzono, że korzystne jest trawienie krawędzi bocznych chipów laserowych w roztworze do trawienia GaAs. Przykładowe pomiary dla diody na pasmo 880 nm przedstawione są na Rys. 6. Właściwie wykonane trawienie powoduje usunięcie mikrouszko-

dzeń z powierzchni bocznych chipa i widać wyraźną poprawę charakterystyk w części odpowiadającej za prądy generacyjno-rekombinacyjne. Diody takie mają większe szanse na dłuższy czas życia.

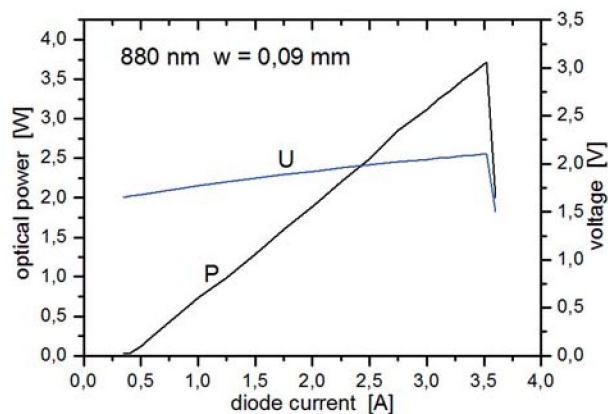


Rys. 6. Charakterystyki V-I niskoprądowe dla chipów z trawionymi i nietrawionymi krawędziami bocznymi.

Fig. 6. Low-current vs. Voltage characteristics for a laser diode chips with and without side edges passivation by wet etching.

4. WYNIKI BADAŃ STARZENIOWYCH

Podczas gdy czas życia prawidłowo zmontowanej diody laserowej jest ograniczony przez stopniową degradację, maksymalna moc optyczna diod laserowych wysokiej mocy jest ograniczona przez



Rys. 7. Charakterystyka mocowo-prądowa i napięciowo-prądowa dla typowej diody na pasmo 880 nm z paskiem aktywnym o szerokości 90 μm montowanej na chłodnicy Cu w kształcie prostokątności o wymiarach 4 mm x 7 mm x 2 mm.

Fig. 7. Light vs. Current and Voltage vs. Current characteristics taken for typical laser diode emitting on 880 nm band with 90 μm active stripe width mounted on rectangular Cu heat sink with dimension 4 mm x 7 mm x 2 mm.

katastroficzne uszkodzenie lustra (COD). Poniżej, na Rys. 7 przedstawiono charakterystykę mocowo-prądową i napięciowo-prądową typowej diody na pasmo 880 nm. Najlepsze diody tego typu w reżimie cw pracowały do ~ 3,5 A, a dalsze zwiększanie prądu kończyło się katastroficznym uszkodzeniem. Dlatego diody w badaniach starzeniowych pracowały przy prądzie ~ dwa razy mniejszym tj. przy 1,5 A.

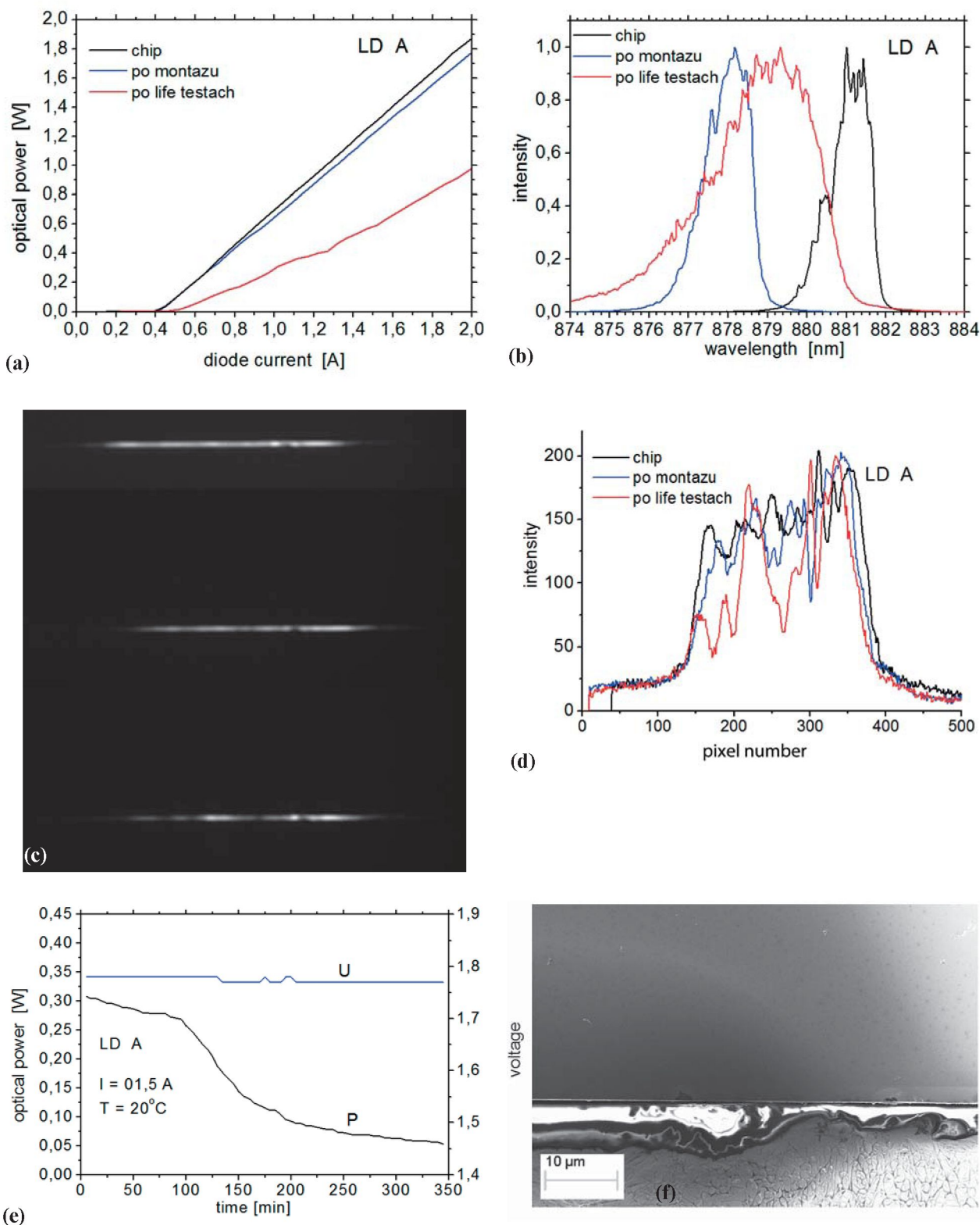
W badaniach trwałości diod laserowych prowadzonych w ITME stosuje się poniższy cykl zasilania:

- pierwsze 24 h podprogowo (dla badanych diod przy $I = 0,2$ A),
- następne 24 h przy $I \sim 2$ x prąd progowy (u nas $I = 0,8$ A),
- po dwóch dobach przykładano prąd $I = 1,5$ A.

Na kolejnych Rys. 8 – 11 pokazano przykładowe wyniki przeprowadzonych pomiarów dla diod, które różniły się jakością montażu.

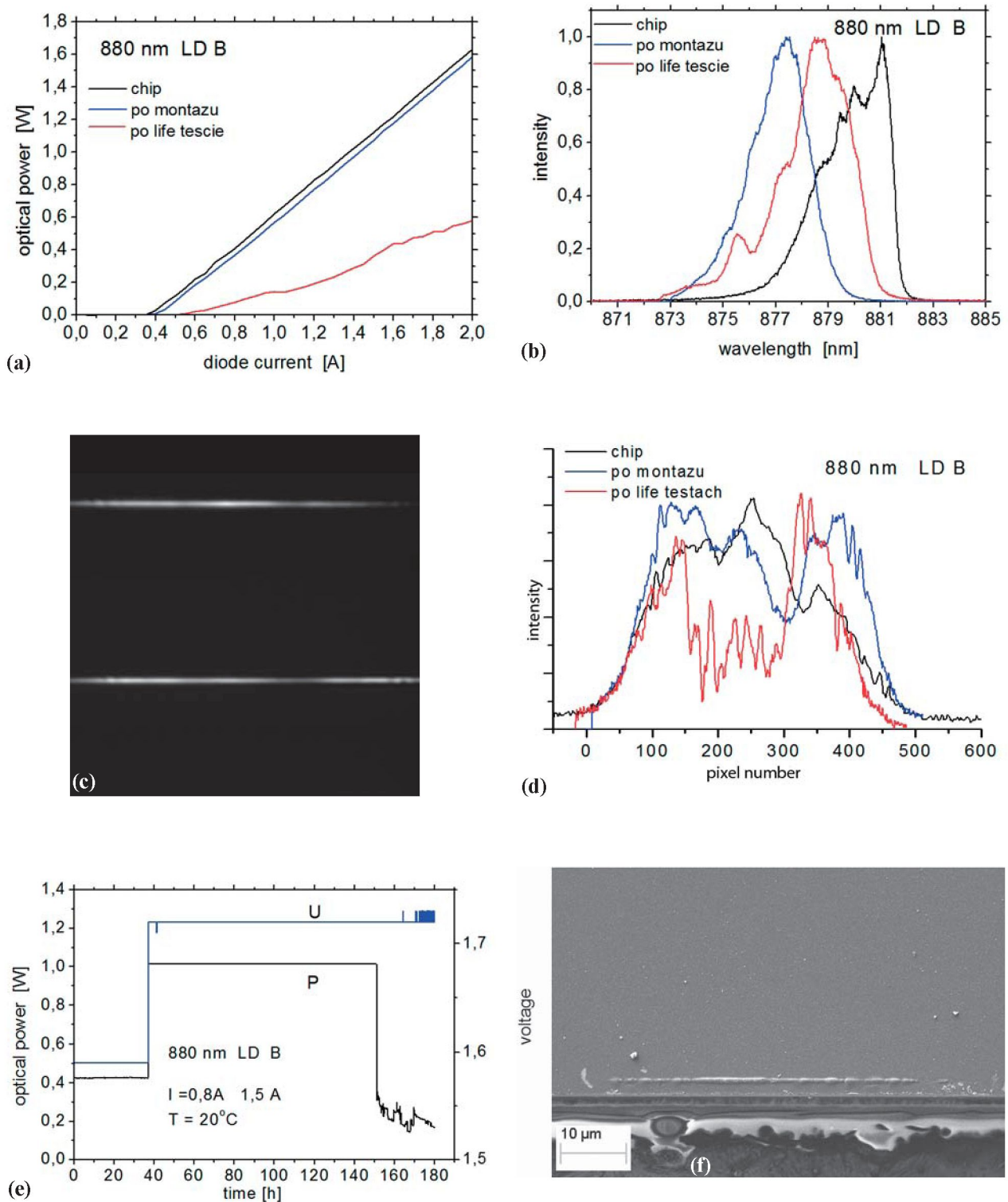
Dla diody A z Rys. 8 po przylutowaniu chipa do chłodnicy nastąpiło nieznaczne zmniejszenie nachylenia charakterystyki mocowo-prądowej, prąd progowy pozostał bez zmian, również charakterystyka spektralna przesunięta w kierunku krótszych fal nie uległa poszerzeniu. Wszystko to świadczy o prawidłowym montażu, jak również o wprowadzeniu nieuniknionego naprężenia w czasie lutowania chipu do chłodnicy [3].

W przypadku tej diody mamy niewątpliwie do czynienia z gwałtowną degradacją, która jest związana z obecnością defektów niszczących aktywny obszar lasera (QW i warstwy ograniczające). Punkty defektowe lub dyslokacje mogą być zapoczątkowane w obszarze aktywnym podczas procesu wzrostu kryształu lub procedury montażu [4]. Defekty na przednim lustrze, spowodowane uszkodzeniem sieci krystalicznej wskutek zerwania połączeń atomowych, działają jako centra rekombinacji niepromienistej [5]. W lustrach laserowych uzyskiwanych przez przelamywanie wraz z powstawaniem tlenków na ściankach luster mogą powstawać dodatkowe efekty powierzchniowe. Składowe warstwy aktywnej i warstw ograniczających bazujących na Al zwykle ulegają utlenianiu, warstwy wolne od Al cechują się lepszą stabilnością. Rekombinacja niepromienista powoduje wzrost temperatury na lustrach i w związku z tym zmniejsza się przerwa energetyczna, wzrasta absorpcja promieniowania laserowego, powodująca dalsze podwyższenie temperatury. Konsekwentnie w następstwie wzrasta absorpcja i ostatecznie prowadzi to do nieodwracalnego uszkodzenia [6]. Badania dla diody A przerwano, gdy jej moc spadła o ponad 20%. Po badaniach starzeniowych, wskutek

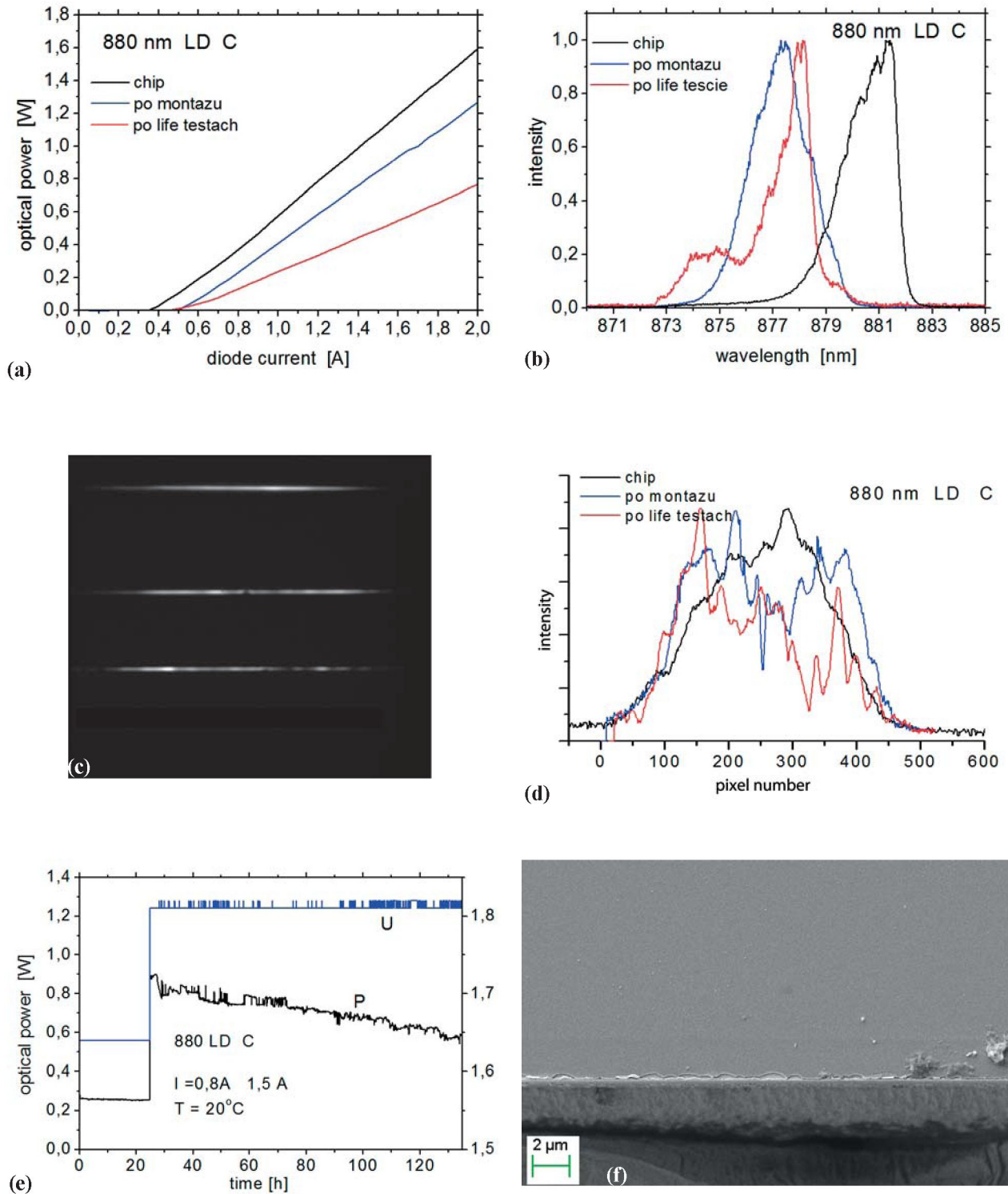


Rys. 8. Wyniki badań starzeniowych diody laserowej LD A: a) charakterystyki mocowo-prądowe; b) charakterystyki spektralne; c) obraz i d) intensywność rozkładu promieniowania w polu bliskim na różnych etapach badań; e) zależności mocy promieniowania (P) oraz napięcia (U) od czasu starzenia; f) obraz SEM lustra po pomiarach starzeniowych.

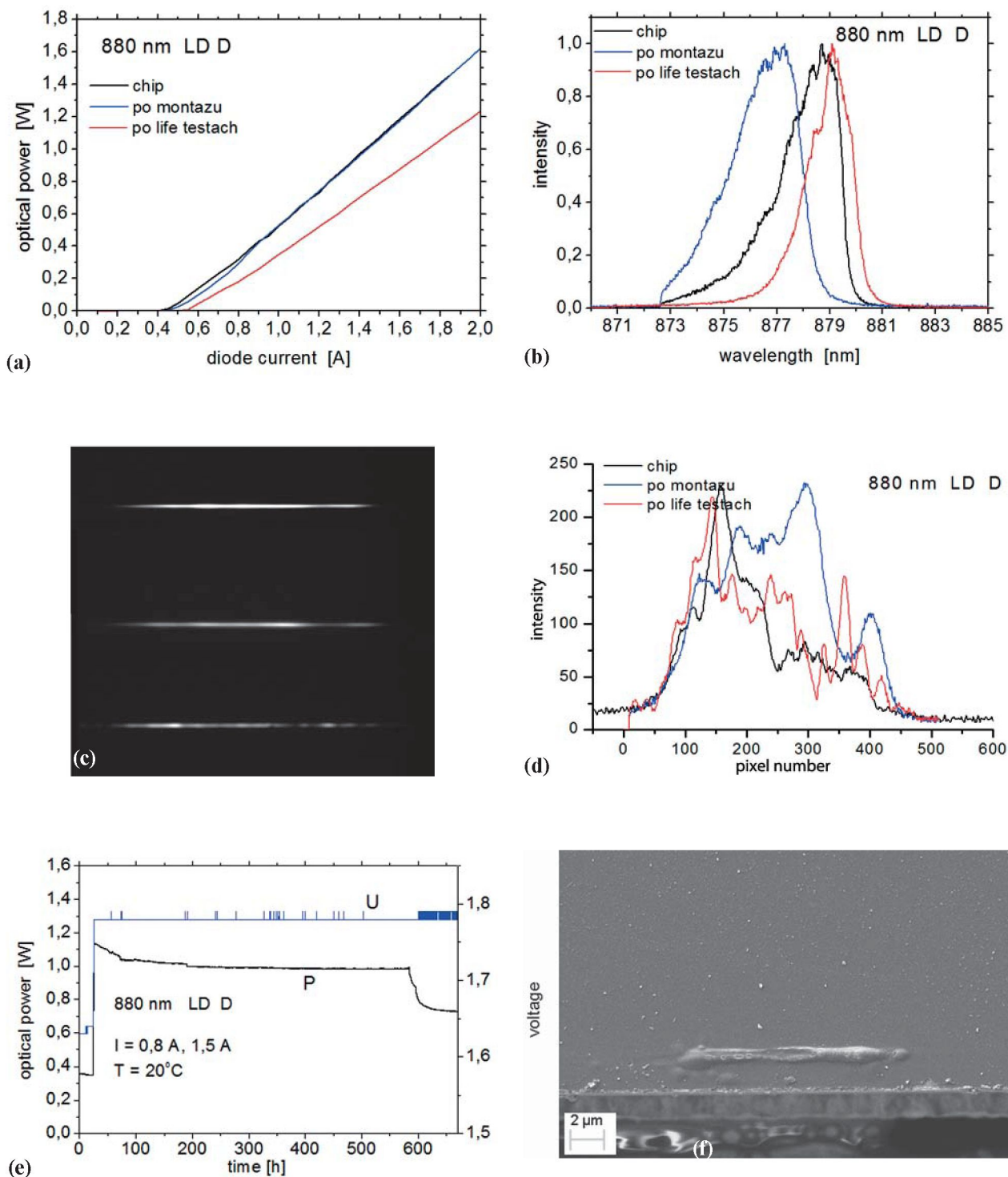
Fig. 8. Results of the ageing tests for the laser diode A: a) current-voltage characteristics b) spectral characteristics c) image and d) intensity of the near field distribution investigated at various stages; e) correlation between the radiant power (P), voltage (U) and ageing time; f) SEM image after the ageing tests.



Rys. 9. Wyniki badań starzeniowych diody laserowej LD B: a) charakterystyki mocowo-prądowe; b) charakterystyki spektralne; c) obraz i d) intensywność rozkładu promieniowania w polu bliskim na różnych etapach badań; e) zależności mocy promieniowania (P) oraz napięcia (U) od czasu starzenia; f) obraz SEM lustra po pomiarach starzeniowych.
Fig. 9. Results of the ageing tests for the laser diode B: a) current-voltage characteristics b) spectral characteristics c) image and d) intensity of the near field distribution investigated at various stages; e) correlation between the radiant power (P), voltage (U) and ageing time; f) SEM image after the ageing tests. .



Rys. 10. Wyniki badań starzeniowych diody laserowej LD C: a) charakterystyki mocowo-prądowe; b) charakterystyki spektralne; c) obraz i d) intensywność rozkładu promieniowania w polu bliskim na różnych etapach badań; e) zależności mocy promieniowania (P) oraz napięcia (U) od czasu starzenia; f) obraz SEM lustra po pomiarach starzeniowych.
Fig. 10. Results of the ageing tests for the laser diode C: a) current-voltage characteristics b) spectral characteristics c) image and d) intensity of the near field distribution investigated at various stages; e) correlation between the radiant power (P), voltage (U) and ageing time; f) SEM image after the ageing tests.



Rys. 11. Wyniki badań starzeniowych diody laserowej LD D: a) charakterystyki mocowo-prądowe; b) charakterystyki spektralne; c) obraz i d) intensywność rozkładu promieniowania w polu bliskim na różnych etapach badań; e) zależności mocy promieniowania (P) oraz napięcia (U) od czasu starzenia; f) obraz SEM lustra po pomiarach starzeniowych.
Fig. 11. Results of the ageing tests for the laser diode D: a) current-voltage characteristics b) spectral characteristics c) image and d) intensity of the near field distribution investigated at various stages; e) correlation between the radiant power (P), voltage (U) and ageing time; f) SEM image after the ageing tests.

defektów powstałych w warstwie aktywnej, znacznemu rozszerzeniu i przesunięciu o ponad 1 nm w kierunku fal dłuższych uległa charakterystyka spektralna, natomiast rozkład promieniowania w polu bliskim wskazywał na defekty na lustrze.

Dioda B z Rys. 9 była poprawnie zmontowana, o czym świadczą charakterystyki mocowo-prądowe i spektralne przed i po montażu. Dla diody tej mamy typowe katastroficzne zakończenie życia już po 150 godzinach regularnej pracy.

Katastroficzna degradacja zwykle kojarzona jest z lustrami, ale może przebiegać w innej części obszaru aktywnego. Fizyczny mechanizm tej degradacji jest podobny do degradacji gwałtownej, ale różni się czasem wystąpienia i gwałtownością procesu. Głównym powodem degradacji lustra jest anormalnie wysoka temperatura spowodowana niepromienistą rekombinacją i absorpcją światła laserowego. Parametrami, które określają COD są [7]:

- szybkość powierzchniowej rekombinacji,
- gęstość defektów na ściance,
- obróbka krawędzi chipów i ich pokrycie,
- zależność temperaturowa przerwy energetycznej materiału tworzącego obszar aktywny,
- moc optyczna i dostarczony prąd,
- przewodność termiczna różnych warstw tworzących strukturę laserową.

Katastroficzne uszkodzenie lustra zachodzi najczęściej na przednim lustrze, ponieważ moc optyczna na tym lustrze jest większa niż moc optyczna na tylnym lustrze [6]. W przypadku diody B na przednim lustrze widoczne są pęcherze potwierdzające katastroficzne uszkodzenie lustra. Intensywność NF maleje w miejscach degradacji [8].

Dla większości diod rejestrowana była degradacja stopniowa. Testy starzeniowe, w zależności od jakości montażu, kończyły się w różnym czasie. Dla diody C z Rys. 10 po przylutowaniu chipa do chłodnicy nastąpił wzrost prądu progowego i zmniejszenie nachylenia charakterystyki mocowo-prądowej, jak również nieznaczne poszerzenie uległa charakterystyka spektralna. Wszystko to świadczy o niepoprawnym montażu poprzez wprowadzenie dużego naprężenia. Dioda taka charakteryzuje się dużą rezystancją termiczną, a wysoka rezystancja termiczna prowadzi do generacji wysokiej temperatury w obszarze aktywnym diody laserowej [9].

Dioda ta od początku trwania testu starzeniowego (~ 130 h) systematycznie traciła moc. Na lustrze po badaniach nie stwierdzono żadnych zmian.

Dla diody D z Rys. 11 również obserwuje się degradację stopniową. Dioda była dobrze zmontowana,

o czym świadczą jej charakterystyki mocowo-prądowe (bez zmiany prądu progowego i bez rozszerzenia charakterystyki spektralnej po montażu). Testowana dioda pracowała ponad 600 godzin, co przy niezoptymalizowanych w tym momencie pokryciach luster jest wynikiem zadowalającym. Jak dla wszystkich diod charakterystyka spektralna przy degradacji przesuwana się w kierunku fal dłuższych.

Przy stopniowej degradacji dioda może pracować tysiące godzin. Z degradacją tego typu mamy do czynienia w przyrządach pozbawionych defektów w obszarze aktywnym lub pracujących przy niskiej mocy. Badania elektroluminescencyjne [7] pokazują jednorodne ciemnienie obszaru aktywnego. Efekt ten jest spowodowany formowaniem się punktów defektowych przez niepromienistą rekombinację. Punkty te działają dalej jako centra rekombinacji, zmniejszając wydajność generowanego światła i wspomagając tworzenie się nowych defektów. Powyższy mechanizm prowadzi do migracji i skupiania się defektów punktowych tworząc ciemne plamki powodujące wzrost prądu progowego. Nagłe uszkodzenie po stopniowej degradacji jest powiązane z ciemnymi liniami powstającymi po wzroście i połączeniu się ciemnych plamek.

PODSUMOWANIE

Procesy degradacji diod laserowych są wynikiem oddziaływania różnych czynników wewnętrznych (własności materiału, defektów kryształu, jakości międzyzłaczy, itp.) i czynników zewnętrznych – technologicznych i eksploatacyjnych (montaż, bonding, temperatura pracy, wstrzykiwany prąd, pokrycie luster, itp.), które wprowadzają głębokie zmiany w materiale tworzącym część aktywną przyrządu i wpływają na zmniejszenie wydajności kwantowej.

Dla badanych diod na pasmo 880 nm o długości ich życia decydują przede wszystkim poprawność wykonania luster oraz wprowadzający naprężenia montaż.

Naprężenia powodują, że wzrasta liczba centrów niepromienistej rekombinacji, prowadząc do wzrostu absorpcji na defektach, wzrostu prądu progowego i zmniejszenia wydajności kwantowej [10]. Również przesunięciu w kierunku długofalowym ulega charakterystyka spektralna.

Podczas pracy diody temperatura jej lustra wzrasta o ~ 200°C, podczas gdy temperatura objętościowa o ~ 15°C [11]. Na przegrzanie lustra mocno wpływa absorpcja promieniowania przez defekty

i znaczne powiększenie prędkości powierzchniowej rekombinacji zależnej od materiału tworzącego część aktywną i pokrycia luster. Z drugiej strony rekombinacja niepromienista może przenosić ciepło do sieci krystalicznej lub wspomagać formowanie się defektów i ruch przez podniesienie rekombinacji defektów. Dlatego też potrzebne jest efektywne chłodzenie lasera [12].

W efekcie prowadzonych prac, w procesie wytwarzania diod wprowadzono trawienie krawędzi bocznych chipów, zmodyfikowano procesy mycia płytek oraz nakładania i wtapienia kontaktów. Zakończono opracowanie i wprowadzono nową technologię pokryć luster diod laserowych. Trwają prace nad modyfikacją konstrukcji chłodnic laserowych z przeznaczeniem dla laserów dużej mocy optycznej.

PODZIĘKOWANIE

Praca była częściowo finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (projekt NN515 3420 36) oraz z tematu statutowego ITME nr 07-10-1007-11

LITERATURA

- [1] Häusler K., Zeimer U., Sumpf B., Erbert G., Tränkle G.: Degradation model analysis of laser diodes, *J. Mater. Sci: Mater. Electron*, 19:S160-S164, (2008)
- [2] Zynek J., Małąg A.: Mechanizmy degradacji półprzewodnikowych przyrządów optoelektronicznych, sprawozdanie ITME, (1999)
- [3] Dąbrowska E., Teodorczyk M., Sobczak G., Małąg A.: Badanie naprężeń wprowadzonych do diod laserowych podczas montażu za pomocą In oraz stopu eutektycznego AuSn, *Materiały Elektroniczne*, 4, 37, (2009)
- [4] Xia R., Larkins E.C., Harrison I., Dods S. R. A., Andrianov A., Morgan J., Landesman P.: Mounting-induced strain threshold for the degradation of high-power AlGaAs laser bars, *IEEE Photonics Technology Letters*, 14, 7, (2002)
- [5] Martin M., Avella M., Iñiguez M.P., Jimenez J., Oudart M., Nagle J., A physical model for the rapid degradation of semiconductor laser diodes, *Applied Physics Letters*, 93, 171106, (2008)
- [6] Sanayeh M. B., Jaeger A., Schmid W., Tautz S., Brick P., Streubel K., Bacher G.: Investigation of dark line defects induced by catastrophic optical damage in broad-area AlGaInP laser diodes, *Applied Physics Letters*, 89, 101111, (2006)
- [7] Jimenez J.: Laser diode reliability: crystal defects and degradation modes, *C.R. Physique*, 4, 663-673, (2003)
- [8] Ziegler M., Tomm J. W., Reeber D., Elsaesser T., Zeimer U., Larsen H. E., Petersen P. M., Andersen P. E.: Catastrophic optical mirror damage in diode lasers monitored during single-pulse operation, *Applied Physics Letters*, 94, 191101, (2009)
- [9] C. Chen, G. Xin, R. Qu, Z. Fang: Measurement of thermal rise-time of a laser diode based on spectrally resolved waveforms, *Optics Communications*, 260, 223-226, (2006)
- [10] Xia R., Larkins E. C., Harrison I., Dods S. R. A., Andrianov A., Morgan J., Landesman J.P.: Mounting-induced strain threshold for the degradation of high-power AlGaAs laser bars, *IEEE Photonics Technology Letters*, 14, 7, (2002)
- [11] Tomm J. W., Thamm E., Bärwolff A., Elsaesser T., Luft J., Baeumler M., Mueller S., Jantz W., Rechenberg I.: Facet degradation of high-power diode laser arrays, *Applied Physics A, Materials Science & Processing*, 70, 377-381, (2000)
- [12] Martin A. M., Avella M., Iñiguez M. P., Jimenez J., Oudart M., Nagle J.: A physical model for the rapid degradation of semiconductor laser diodes, *Applied Physics Letters*, 93, 171106, (2008)