

## NEW THICK FILM COMPOSITES OF LOWER SINTERING TEMPERATURE FOR OHMIC CONTACTS FOR SOLAR CELLS

New generation of screen printed thick film materials where conducting phase was of submicron silver powder. The main advantage of these

pastes compare with the standard ones is that they do not contain glassy phase. This phase helped sintering process, but caused the worse electrical conductivity. Another advantage of this paste is the lower sintering temperature which enables its application in much wider range of technological processes.

**Key words:** thick-film technology, silver nanopowder, solar cell

## BADANIE NAPRĘŻEŃ WPROWADZANYCH DO DIOD LASEROWYCH PODCZAS MONTAŻU ZA POMOCĄ In ORAZ STOPU EUTEKTYCZNEGO AuSn

Elżbieta Dąbrowska<sup>1</sup>, Marian Teodorczyk<sup>1</sup>, Grzegorz Sobczak<sup>1</sup>, Andrzej Małąg<sup>1</sup>

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

Montaż diod laserowych wprowadza naprężenia do warstwy aktywnej chipu laserowego, zmieniając jej parametry elektrooptyczne. Dla ich charakteryzacji w ramach niniejszego opracowania badano charakterystyki mocowo-prądowe, spektralne promieniowania laserowego, nisko-prądowe I-V oraz charakterystyki promieniowania spontanicznego poniżej progu dla samego chipu i po każdym etapie montażu. Diody montowano do chłodziw w próżni i w atmosferze azotu przy użyciu lutowia miękkiego (In), a także przy zastosowaniu lutowia twardego (eutektycznego AuSn). W drugim przypadku chipy lutowano do miedzianej chłodziwy bezpośrednio i z zastosowaniem przekładki diamentowej. Stosowane lutowie AuSn było w postaci folii, jak również w postaci cienkich warstw Au i Sn lub stopu eutektycznego AuSn napyłanych na chłodziwę lub przekładkę diamentową. Na każdym etapie montażu w diodach obserwowano różne naprężenia w zależności od zastosowanej metody. Sprawdzone również skuteczności procesów termicznej relaksacji naprężeń w diodach wykonanych poprzez wygrzewanie.

**Słowa kluczowe:** dioda laserowa, heterostruktura, montaż DL, In, eutektyk AuSn

### 1. WSTĘP

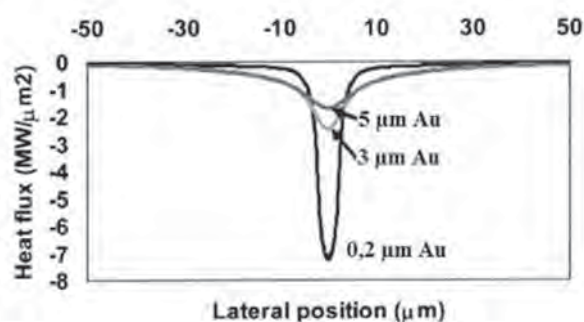
Proces wytwarzania diody laserowej obejmuje wiele operacji technologicznych. Bardzo ważnym elementem tej technologii jest montaż, a przede wszystkim lutowanie chipu laserowego do podło-

ża, którym jest chłodziwa lub przekładka odprowadzająca ciepło, tzw. *heat spreader*. Lutowie ma za zadanie stabilne mechaniczne połączenie. Musi przy tym wykazywać się niską elektryczną i termiczną rezystancją połączenia. Jakość lutowania wpływa na elektrooptyczne własności urządzenia i jest krytyczna dla pracy i niezawodności diody laserowej (DL).

Jako chłodziw (DL810) we wszystkich badaniach używano bloków wykonanych z miedzi, obrobionych mechanicznie i chemicznie w wysokiej klasie dokładności wymiarów i gładkości powierzchni, a następnie pokrytych galwanicznie Ni i Au.

Znaczna część energii elektrycznej dostarczanej podczas pracy diody laserowej zamieniana jest na ciepło. Dla diod montowanych stroną epitaksjalną do chłodziwy (*epi-down*) strumień ciepła przepływa z obszaru aktywnego poprzez warstwę p-emitera, metalizację po stronie epitaksjalnej i poprzez lutowie do chłodziwy. Transfer ciepła z obszaru aktywnego jest generalnie słaby z powodu niskiej przewodności cieplnej obszaru aktywnego i warstwy p-emitera. Skuteczność odprowadzenia tego ciepła z obszaru aktywnego odpowiada za parametry elektryczne i optyczne (długość fali promieniowania laserowego, prąd progowy  $I_{th}$ , sprawność optyczną  $\eta$ ), czas życia diody, oraz jej niezawodność.

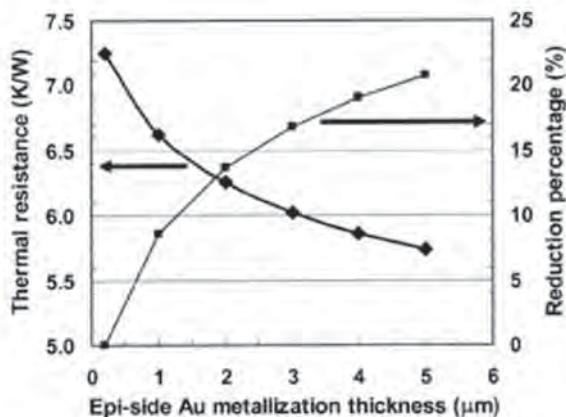
Na termiczne własności lasera istotny wpływ ma m.in. struktura i grubość metalizacji Au po stronie epitaksjalnej. Przewodność cieplna Au jest dość duża (315 W/m/K) i sama metalizacja znajduje się w odległości na ogół poniżej 3  $\mu\text{m}$  od źródła ciepła, tak więc może ona rozszerzać strumień cieplny, mając jednocześnie znaczny wpływ na termiczne zachowanie diody laserowej. Gruba warstwa Au może znacząco zredukować rezystancję termiczną przez skierowanie części strumienia ciepła do szerszych bocznych obszarów (Rys. 1.1) [1].



**Rys. 1.1.** Wpływ grubości warstwy Au osadzonej na stronie epitaksjalnej na rozpyły strumienia ciepłego emitowanego przez obszar aktywny diody laserowej. Punkt 0 jest środkiem obszaru aktywnego.

**Fig. 1.1.** Influence of thickness of an Au layer electroplated on the chip's epi-side on spreading of a heat flux emitted by active layer. The point „0” is a center of active layer.

Rezystancja termiczna według X. Liu i innych [1] może być zredukowana o 17% dla 3  $\mu\text{m}$  warstwy Au i o 21% dla warstwy Au grubości 5  $\mu\text{m}$  w porównaniu z warstwą Au grubości 0,2  $\mu\text{m}$  (Rys. 1.2).



**Rys. 1.2.** Termiczna rezystancja diody laserowej w funkcji grubości warstwy Au.

**Fig. 1.2.** Thermal resistance of a laser diode as a function of Au layer thickness.

Dodatkowo gruba warstwa złota na stronie p chipu ma zabezpieczyć obszar aktywny przed ściskaniem lub nawet zniszczeniem w momencie umiejscowienia chipu na chłodnicy w czasie lutowania, jak również zmniejszyć naprężenie termiczne w tym obszarze.

Przy lutowaniu należy zabezpieczyć się przed tworzeniem takich związków jak tlenki, węgiel czy krzem na powierzchni rozpuszczonej warstwy lutowia. Materiały te tworząc stały film na warstwie lutowia uniemożliwiają wykonanie poprawnego połączenia. Warstwa tlenku dodatkowo narasta na materiale lutowia w czasie kiedy lutowie mięknie [2]. Lutowie, podłoże i cały proces lutowania mają zapewnić połączenie bez pustych przestrzeni (*voids*), niskie naprężenia i stabilne, bardzo precyzyjne ustawienie.

Przy montażu epi-down diod laserowych odległość pomiędzy obszarem aktywnym zawierającym studnie kwantowe i światłowod, a chłodnicą jest zredukowana do kilku mikrometrów. Konstrukcja taka pozwala na lepsze odprowadzanie ciepła z obszaru aktywnego, w porównaniu z montażem epi-up (stroną epitaksjalną do góry), co jest istotne zwłaszcza w diodach dużej mocy. Jednakże mała odległość obszaru aktywnego od chłodnicy wprowadza w nim naprężenia.

Całkowite naprężenie w diodzie laserowej składa się z kilku niezależnych składowych:

- 1) *misfit strain* - niedopasowanie powstające w czasie wzrostu epitaksjalnego. Różne stałe sieci krystalicznej  $a_1$  i  $a_2$  warstw lub warstwy i podłoża wprowadzają deformację opisaną parametrem niedopasowania:

$$\Delta a/a = (a_1 - a_2)/a_1$$

Naprężenie to ściśle zależy od grubości i składu warstwy, jest często zamierzone i uwzględnione w konstrukcji,

- 2) podczas lutowania chipu do chłodnicy metodą epi-down chip i chłodnica grzane są do temperatury lutowania  $T_s$ , a następnie chłodzone do temperatury otoczenia  $T_a$ . Generuje to naprężenie w heterostrukturze  $\epsilon_p$  dane wzorem [2]:

$$\epsilon_p = (\alpha_1 - \alpha_2) \times (T_s - T_a)$$

gdzie:  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  są współczynnikami rozszerzalności termicznej (CTE – *coefficient of thermal expansion*) chipu i chłodnicy. Naprężenie  $\epsilon_p$  powoduje zmianę stałej sieci krystalicznej w heterostrukturze, a tym samym zmianę parametrów diody laserowej w porównaniu z parametrami niezmontowanego chipu. Gdy  $\epsilon_p$  przyjmuje wartość ujemną – warstwa jest ściskana, gdy dodatnią – warstwa jest rozciągana.

Ważne jest, jaka część tego naprężenia przejdzie od lutowia do warstwy aktywnej.

C.C. Lee i inni wykazali [2], że do studni kwantowej przechodzi od  $\frac{1}{4}$  nawet do  $\frac{1}{2}$  naprężenia pochodzącego od montażu. Ta wielkość zależy od własności i grubości materiału lutowia oraz technologicznych detali procesu montażowego.

Autorzy prezentowanej pracy sprawdzali charakter i wielkość naprężeń indukowanych podczas różnych

sposobów montażu poprzez pomiary wynikłych z tego zmian podstawowych parametrów DL. Do badań przeznaczono chipy wyselekcjonowane w czasie pomiarów impulsowych. Zostały one wykonane z heterostruktury otrzymanej techniką MOVPE w ITME, budowę której przedstawiono w Tab. 1. Konstrukcja DL obejmowała wyznaczenie obszaru aktywnego (paska o szerokości 100  $\mu\text{m}$ ) poprzez implantację jonów  $\text{He}^+$ , wykonanie kontaktów oraz wykonanie pokryć

**Tabela 1.** Heterostruktura DBSCH SQW / 808 nm.

**Table 1.** Heterostructure DBSCH SQW/808 nm.

	Warstwa	Skład x	Grubość	Domieszko- wanie	Koncentracja [ $\text{cm}^{-3}$ ]
13	GaAs - warstwa kontaktowa	0	0.3 $\mu\text{m}$	Zn	$> 2\text{E}19$
12	AlGaAs - p-emiter	0.45	2.4 $\mu\text{m}$	Zn	7E17
			$\sim 0.1 \mu\text{m}$	Zn domieszkowanie gradientowe	
11			0.5 $\mu\text{m}$	Zn	1E17
10	AlGaAs - gradient	0.65 $\rightarrow$ 0.45	30 nm	Zn	1E17
9	AlGaAs - bariera	0.65	30 nm	Zn	1E17
8	AlGaAs - falowód	0.35	130 nm	n	—
7	GaAsP - QW	dla $\lambda = 808 \text{ nm}$	15 nm	n	—
6	AlGaAs - falowód	0.35	130 nm	n	—
5	AlGaAs - bariera	0.65	30 nm	Si	$\sim 1\text{E}16$
4	AlGaAs - gradient	0.45 $\rightarrow$ 0.65	30 nm	Si	1E17
3	AlGaAs - n-emiter	0.45	0.5 $\mu\text{m}$	Si	1E17
			$\sim 0.1 \mu\text{m}$	Si domieszkowanie gradientowe	
2			2.4 $\mu\text{m}$	Si	5E17
1	GaAs - bufor	0	$\sim 1 \mu\text{m}$	Si	2E18

dielektrycznych luster. Jedynie nieprawidłowy montaż lub nieujawnione defekty mogą spowodować, że tak dobrane diody nie będą pracować w pracy ciągłej (CW). Diody montowano w atmosferze azotu i próżni przy użyciu lutowia miękkiego (In) bezpośrednio do chłodnicy, jak również przy użyciu lutowia twardego (eutektycznego AuSn) do chłodnicy lub przekładki diamentowej. Lutowie AuSn stosowano w postaci folii lub w postaci napyłanych cienkich warstw Au i Sn lub stopu eutektycznego AuSn. Badano charakterystyki mocowo-prądowe (P-I), napięciowo-prądowe (I-V), spektralne promieniowania laserowego, niskoprądowe I-V i charakterystyki spektralne promieniowania spontanicznego poniżej prądu progowego dla samego chipu, a następnie po każdym etapie montażu. Do każdego rodzaju montażu przygotowano po 8 chipów.

Naprężenia indukowane montażem deformują wszystkie warstwy heterostruktury powodując zmianę szerokości przerwy energetycznej studni kwantowej (QW) – stąd przesunięcia charakterystyk spektralnych. Zakładając określony sposób montażu, zatem przewidując typ i wielkość wytworzonych naprężeń, można kompensować je na etapie projektowania heterostruktury przez wprowadzenie modyfikacji składu warstw. Stwarza to niedopasowanie sieciowe

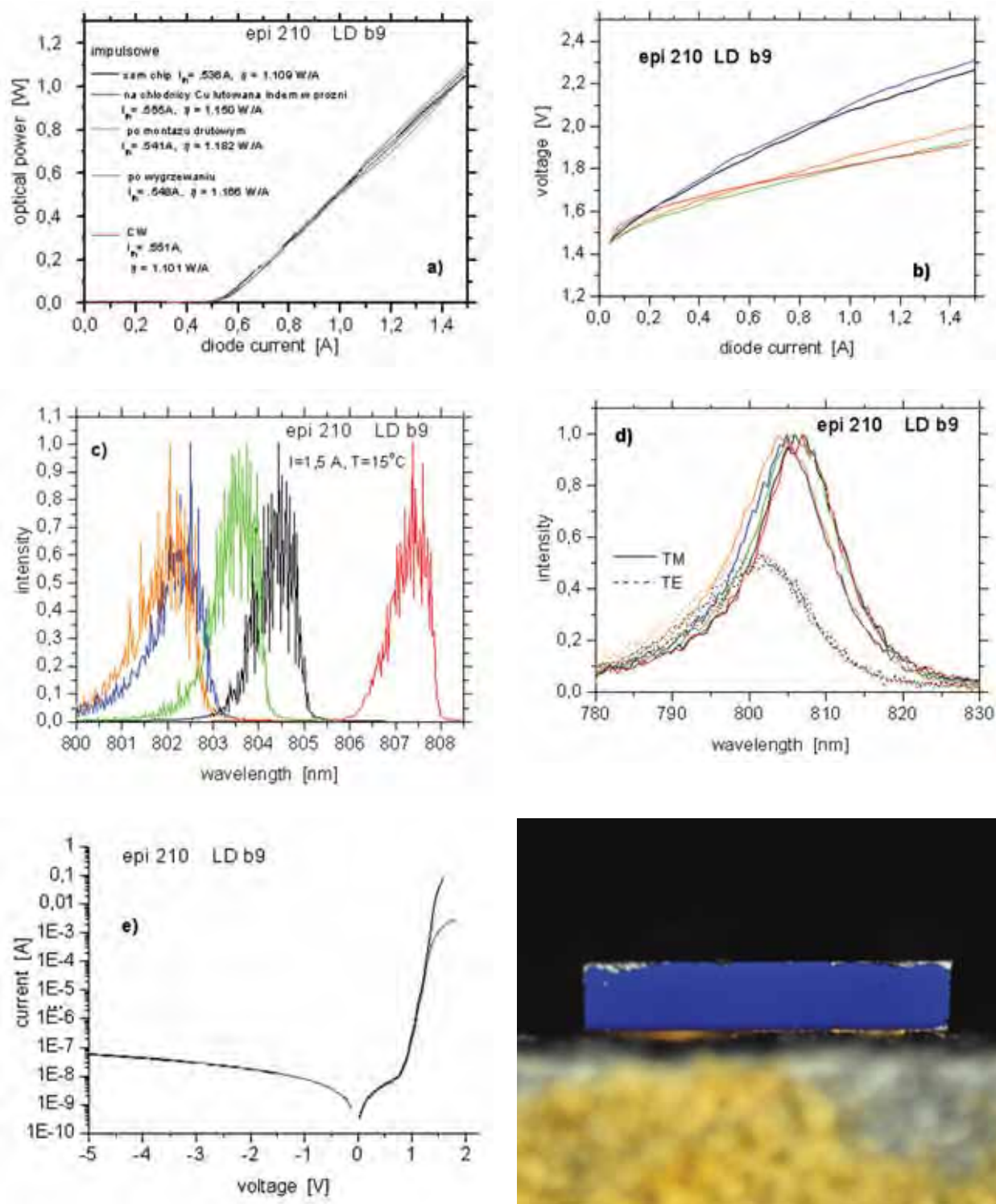
powodujące naprężenie rozciągające – wtedy ulega zwężeniu przerwa energetyczna, lub naprężeniu ścisakującemu – wtedy przerwa energetyczna rozszerza się. Zwężenie przerwy energetycznej wywołane grzaniem występuje również przy pracy ciągłej (CW).

W ramach pracy sprawdzono skuteczności procesu termicznej relaksacji naprężeń w diodach montowanych różnymi metodami poprzez wygrzewanie ich w temperaturze 70°C przez 170 godzin. Parametry te wynikają z możliwości technicznych stosowanej do tego celu aparatury. Są to parametry porównywalne ze stosowanymi przez firmy produkujące DL. Optymalizacja warunków odprężania jest przedmiotem dalszych badań.

## 2. LUTOWANIE LUTOWIEM MIĘKKIM

Ponieważ istnieje duże niedopasowanie współczynników rozszerzalności termicznej pomiędzy GaAs ( $\sim 5.8 \text{ ppm/K}$ ) i Cu ( $\sim 17.8 \text{ ppm/K}$ ), montaż DL wydaje się możliwy tylko przy użyciu miękkiego lutowia takiego jak PbSn lub In. Według J.W. Tomm





**Rys. 2.1.** Chip oznaczony LD b9 zmontowany indem w próżni: a) charakterystyka mocowo-prądowa (P-I); b) charakterystyka napięciowo-prądowa (I-V); c) charakterystyka spektralna; d) charakterystyka promieniowania spontanicznego; e) charakterystyka niskoprądowa (I-V). Dla wszystkich rysunków zachowane kolory z Rys.a). Obok umieszczono zdjęcie struktury od strony przedniego lustera.

**Fig. 2.1.** Chip denoted LD b9 soldered with In in vacuum: a) light-current (P-I) characteristics; b) I-V characteristics; c) spectral characteristics above laser threshold; d) spectral characteristics below threshold; e) low-current I-V characteristics. Colors used in Fig. a) and described in the legend therein of are common for all other graphs. Photograph shows the front facet of the laser diode.

i in. [3] przy lutowaniu miękkimi lutowaniami brak jest naprężenia, bo lutowia te plastycznie deformują się, relaksując naprężenia. Ta deformacja plastyczna powoduje jednak termiczne zmęczenie i pękanie lutowia po ściankach chipu, skutkiem czego problemem staje się długoterminowa niezawodność diody laserowej.

W prezentowanej przez nas pracy badano dwa sposoby przylutowania diod laserowych do chłodnicy DL810 za pomocą indu:

- po napyleniu na złożone chłodnice odpowiedniej grubości warstwy In, chipy laserowe, po dokładnym ich ustawieniu za pomocą urządzenia do precyzyjnego lutowania chipów (*die-bondera*) były umieszczane z chłodnicami w specjalnych uchwytach i grzane do temperatury topnienia In w próżni, zgodnie z procedurami opracowanymi w ITME [4 - 5],
- przy pełnym wykorzystaniu *die-bondera* firmy Fine-Tech. W tym przypadku, po optymalnym ustaleniu programów grzania stolika i ssawki oraz ustaleniu siły nacisku tej ssawki, chipy były lutowane w atmosferze azotu.

Okazało się, że w przypadku lutowania miękkim lutowiem mamy również do czynienia z naprężeniami indukowanymi w czasie montażu. Dla chipów lutowanych w próżni wpływ naprężenia na parametry elektrooptyczne dla przykładowej struktury widoczny jest na Rys. 2.1. Oprócz charakterystyki mocowo-prądowej (P-I) i napięciowo-prądowej (I-V) pokazano na nim charakterystyki spektralne promieniowania laserowego i emisji spontanicznej poniżej prądu progowego, oraz charakterystyki niskoprądowe I-V. Nie widać znaczących różnic (w stosunku do parametrów chipów niezmontowanych) w przebiegu charakterystyk niskoprądowych (co świadczy o braku upływności związanych z migracją indu lub zwarciem), oraz w charakterystykach P-I. Widoczne różnice występują natomiast w charakterystykach I-V dla przypadków przed i po montażu drutowym. Podczas pomiaru pojedynczą sondą ostrzową ustawioną na środku chipu laserowego, przy kontakcie „na styk” rozptył prądu po powierzchni chipu jest słaby, stąd dużo większe mierzone napięcie w porównaniu z chipami z drutami aluminiowymi przymocowanymi wzdłuż całej struktury, po obu stronach aktywnego paska. Zjawisko to występuje w przypadku wszystkich sposobów lutowania.

Znacznie też przesuwa się charakterystyka spektralna w kierunku krótkofalowym po przylutowaniu chipu indem do chłodnicy miedzianej (kolor niebieski na Rys. 2.1.c) w porównaniu ze spektrum niezmontowanego chipu (kolor czarny). Miedź ma CTE prawie trzykrotnie większy niż chip laserowy

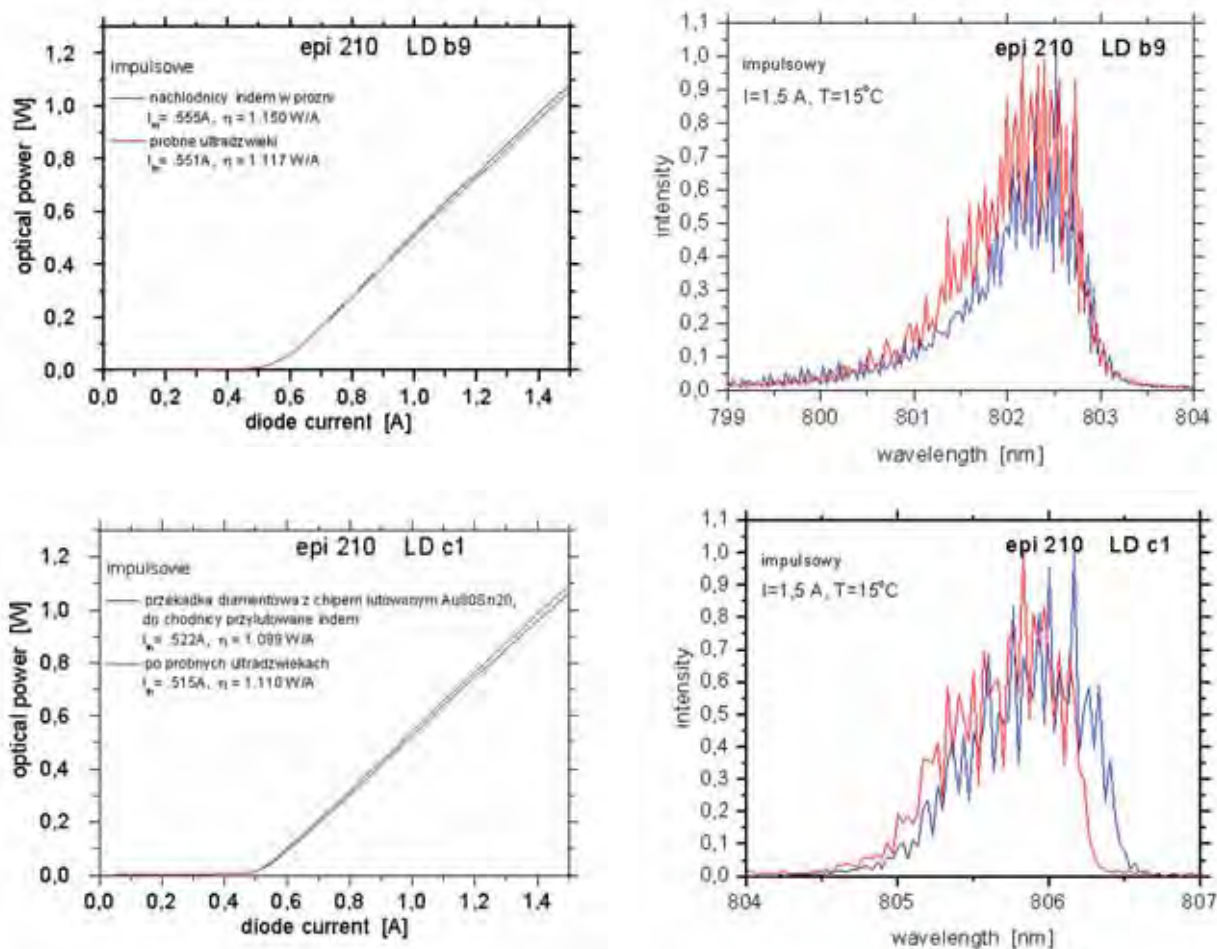
z GaAs, w związku z czym po procesie lutowania, w czasie chłodzenia, szybko kurcząca się chłodnica napręża - ściska „nie nadążający” chip z GaAs. Naprężenie ściskające warstw epitaksjalnych, w tym aktywnej, powoduje poszerzenie przerwy energetycznej. Stąd przesunięcie charakterystyki spektralnej w kierunku krótkofalowym, w tym przypadku o ponad 2 nm. Przyłączenie drutów aluminiowych metodą ultrakompresyjną (kolor pomarańczowy) powoduje dalsze, już tym razem niewielkie (< 0,5 nm), przesunięcie charakterystyki spektralnej w kierunku krótkofalowym.

Stwierdzono, że już same ultradźwięki, przy pomocy których następuje przyłączenie wyprowadzeń elektrycznych do chipu (Rys. 2.2 - w tym przypadku 5 symulowanych połączeń), powodują wprowadzenie naprężeń, co przejawia się rozszerzeniem charakterystyki spektralnej lub jej przesunięciem, w tym przypadku, w kierunku krótkofalowym. Nie ma natomiast różnicy w charakterystykach P-I. W praktyce wykonuje się ~ 10 połączeń drutowych (w zależności od oczekiwanych mocy diod).

Wygrzewanie diody montowanej przy pomocy In w próżni przez 170 godz. w temperaturze 70°C (kolor zielony) relaksuje wprowadzone naprężenia i widać przesunięcie piku charakterystyki w kierunku długofalowym o ponad 1 nm. W rezultacie pik charakterystyki spektralnej DL po ostatnim procesie montażowym jest przesunięty w kierunku krótkofalowym, w stosunku do piku niezmontowanego chipu, o ~ 1 nm (Rys. 2.1.c).

Zmiany spowodowane naprężeniami indukowanymi w czasie lutowania widoczne są również w charakterystykach widmowych emisji spontanicznej. Pik tego promieniowania przesuwa się w takim kierunku jak pik charakterystyki spektralnej promieniowania laserowego i dla pracy w reżimie impulsowym o taką samą wartość. Różnice, ze względu na grzanie się obszaru aktywnego występują dopiero przy pracy w reżimie CW. Na Rys. 2.1.d pokazano charakterystyki spektralne emisji spontanicznej rozdzielone polaryzacyjnie na składowe TM i TE. Są to wartości znormalizowane, ale jest zachowany stosunek pomiędzy składowymi polaryzacji. Nieznacznie, wraz z następującymi procesami montażowymi, wzrasta udział składowej TE.

Różnica pomiędzy pikami charakterystyki spektralnej (Rys. 2.1.c) lasera pracującego w reżimie pracy impulsowej i CW wynosi ponad 4 nm, podczas gdy dla emisji spontanicznej tylko ~ 1 nm. Tej różnicy 1 nm odpowiada naprężenie ściskające 16 MPa [6 - 7]. Pozostała różnica 3 nm spowodowana jest grzaniem obszaru aktywnego w czasie pracy CW.



**Rys. 2.2.** Wpływ ultradźwięków na parametry diod laserowych montowanych: a) indem; b) Au80Sn20 przy zastosowaniu przekładki diamentowej.

**Fig. 2.2.** Influence of ultrasounds on electro-optical parameters of laser diodes mounted using: a) indium; b) Au80Sn20 alloy with a diamond heat-spreader.

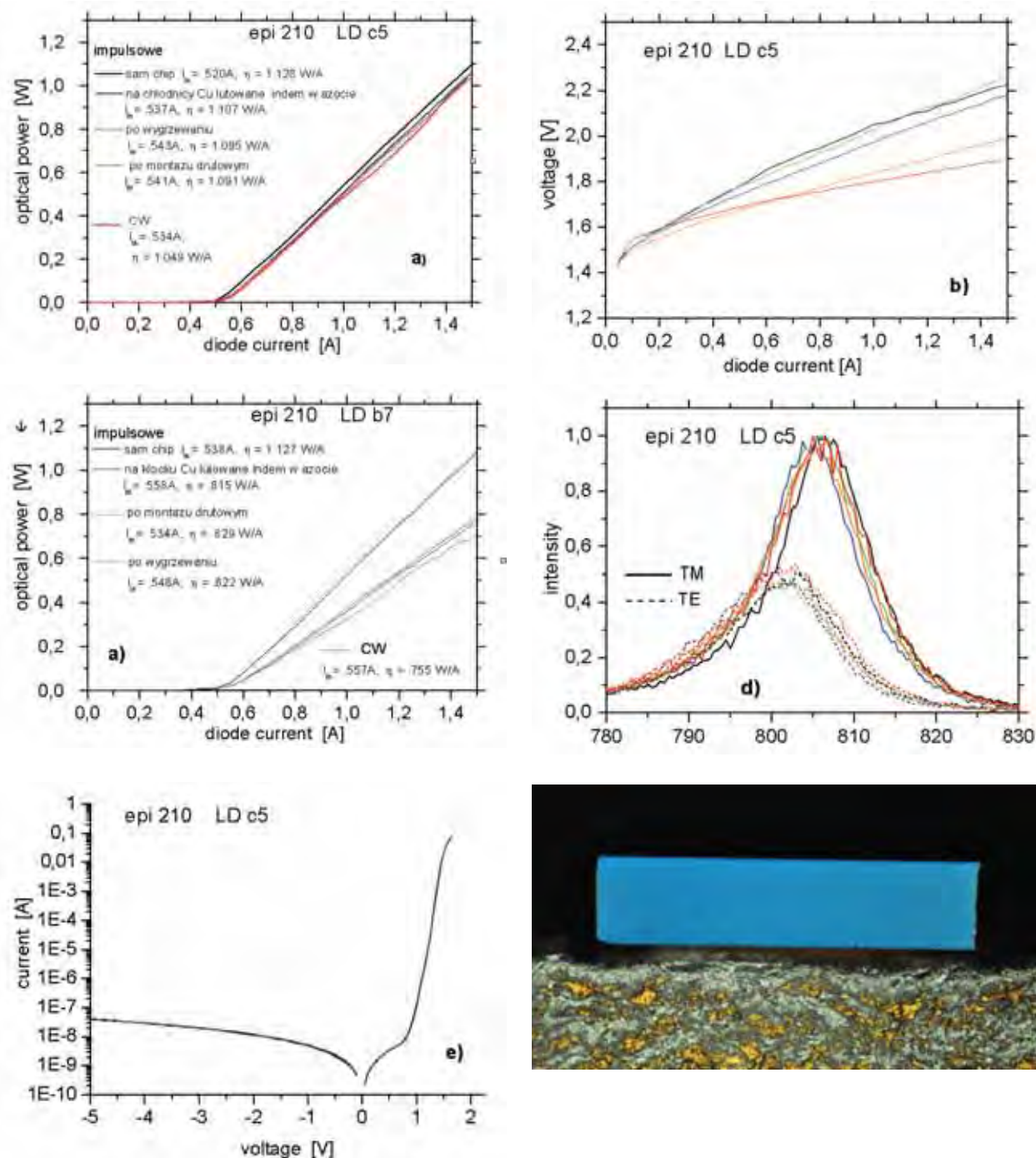
Przesunięcie to będzie tym większe, im wyższa jest temperatura w obszarze aktywnym.

Na Rys. 2.3 przedstawione są charakterystyki P-I, I-V, spektralne promieniowania laserowego i emisji spontanicznej oraz niskoprądowe charakterystyki I-V dla diody montowanej lutowiem indowym przy pomocy *die-bondera*. Dla tej diody zmieniono dotychczasową kolejność operacji technologicznych. Diodę poddano wygrzewaniu przed montażem drutowym. Charakterystyki I-V potwierdzają gorszy rozptył prądu przy pomiarach ostrzowych. Po przyłutowaniu chipu do chłodnicy przesunięcie charakterystyki spektralnej o ponad 2,5 nm w kierunku krótkofalowym jest porównywalne do przesunięcia obserwowanego dla diod montowanych w próżni. Wygrzewanie w temperaturze 70°C w czasie 170 godz. częściowo uwalnia naprężenia powstałe w laserach podczas lutowania. Montaż drutowy wprowadza tym razem naprężenia rozciągające i charakterystyka spektralna przesuwa się znacznie w kierunku długofalowym.

Przesunięcie charakterystyk spektralnych promieniowania laserowego przy pracy CW względem impulsowej jest o  $\sim 2$  nm mniejsze niż dla diody montowanej próżniowo (Rys. 2.1.c - tam wynosiła  $\sim 4$  nm). Dla charakterystyk spektralnych promieniowania spontanicznego obserwujemy, podobnie jak dla diod montowanych w próżni, przesunięcia analogiczne do przesunięć charakterystyk spektralnych. Wyniki dla przebadanych diod nieznacznie różnią się między sobą, tak więc nie można jednoznacznie stwierdzić, że lutowanie indem przy przepływie azotu jest korzystniejsze niż w próżni. Jednak montaż w azocie z zastosowaniem *die-bondera* jest mniej pracochłonny i wydaje się przyszłościowy.

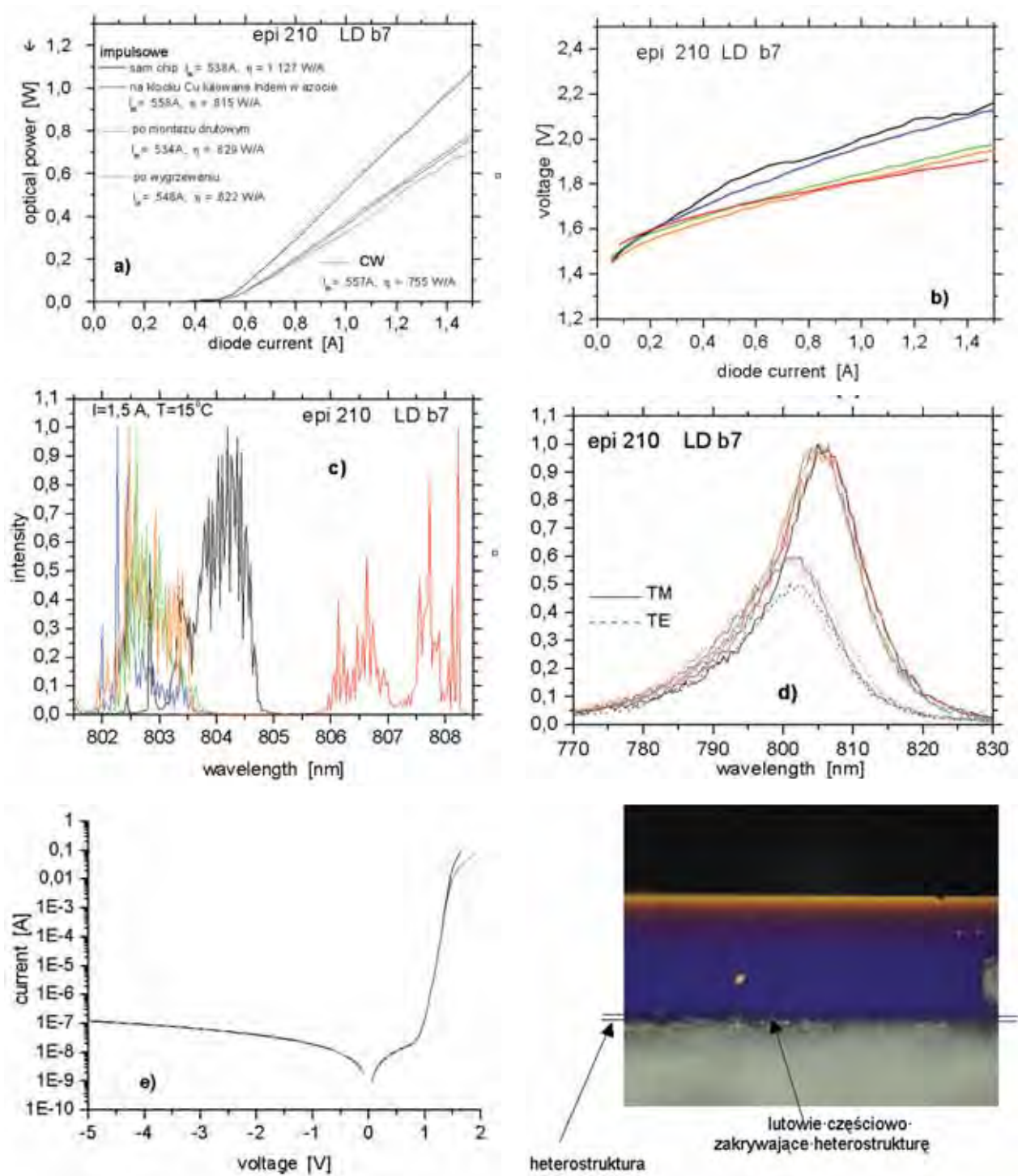
Dla porównania na Rys. 2.4. pokazane są charakterystyki P-I, I-V i spektralne wadliwie zlutowanej diody laserowej z lustrem przednim częściowo przysłoniętym lutowiem. Pomimo braku upływności lub zwarć (charakterystyki niskoprądowe przed i po montażu pokrywają się), po przyłutowaniu znacznie





**Rys. 2.3.** Chip oznaczony LD c5 zmontowany indem w azocie: a) charakterystyka P-I; b) charakterystyka I-V; c) charakterystyka spektralna, promieniowania laserowego; d) charakterystyka promieniowania spontanicznego, e) charakterystyka niskoprądowa I-V. Dla wszystkich rysunków zachowane kolory z Rys. a). Obok umieszczono zdjęcie struktury od strony przedniego lustra.

**Fig. 2.3.** LD denoted chip c5 soldered with In in  $N_2$  atmosphere: a) P-I characteristics; b) I-V characteristics; c) spectral characteristics above laser threshold; d) spectral characteristics above and below laser threshold, respectively; e) low current I-V characteristics. Colors used in Fig. a) are common for all graphs. Photograph shows the front facet of the laser diode.



**Rys. 2.4.** Chip LD b7 przylutowany indem w atmosferze azotu: a) charakterystyka P-I; b) charakterystyka I-V; c) charakterystyka spektralna promieniowania laserowego; d) charakterystyka promieniowania spontanicznego; e) charakterystyka niskoprądowa I-V. Dla wszystkich rysunków zachowane kolory z Rys. a). Obok umieszczono zdjęcie struktury od strony częściowo przesłoniętego przedniego lustra.

**Fig. 2.4.** Chip LD b7 soldered by In in  $N_2$  atmosphere: a) characteristics P-I; b) I-V characteristics, c) spectral characteristics above laser threshold; d) spectral characteristics above and below laser threshold, respectively, e) low current I-V characteristic. Colors used in Fig. a) are common for all graphs. The photograph shows a fragment of the front facet of laser diode. It is seen, its partially hidden by the solder.



pogorszyła się charakterystyka P-I diody, również charakterystyki spektralne z wąskiej, regularnej, stały się szerokie, poszarpane. Znacznie zwiększył się udział modu TE w charakterystyce spektralnej emisji spontanicznej.

Miękkie lutowie indowe prowadzi jednak do migracji indu w kierunku heterostruktury. K. Mizuishi [8] doszedł do wniosku, że odpowiedzialny za migrację lutowia jest prąd niepromienistej rekombinacji zwiększający lokalne grzanie, co jest przyczyną degradacji parametrów lasera. Inną przyczyną nagłych niewydolności lasera jest wzrost „wąsów” (*wiskers*) lutowia pojawiający się na jego powierzchni wokół chipu. Te „wąsy” mają tendencję do rośnięcia blisko obszaru aktywnego diody. „Wąsy” In o średnicy 1 – 2  $\mu\text{m}$  rosną do długości 100 - 200  $\mu\text{m}$  (porównywalnej z grubością chipu) i powodują zwarcia elektryczne lasera. Ponadto wzrasta rezystancja termiczna laserów GaAlAs/GaAs z lutowiem In podczas procesów starzenia [9]. Jej wzrost jest przyspieszony w podwyższonej temperaturze, przy pracującej diodzie i ma istotny wpływ na skrócenie czasu życia diody.

Problemy ze zvarciami elektrycznymi, ze wzrostem rezystancji termicznej i ogólnie z brakiem niezawodności nie pojawiają się dla laserów lutowanych lutowiem twardym AuSn. Wzrastają jedynie naprężenia mogące powodować zmianę wyjściowych charakterystyk elektrooptycznych.

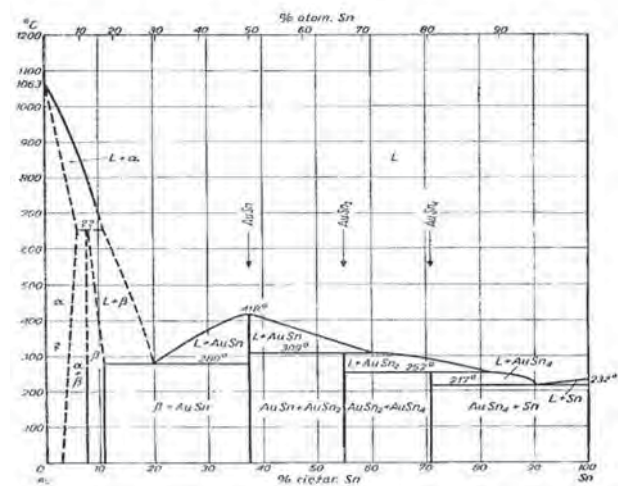
### 3. LUTOWANIE LUTOWIEM TWARDYM

Lutowie eutektyczne Au<sub>80</sub>Sn<sub>20</sub> jest ekologicznie bezpieczne. Jest ono często używane w przemyśle półprzewodnikowym w procesach montażowych i w obudowach stosowanych m.in. w optoelektronice. Lutowie to ma bardzo dobrą odporność na korozję, stosunkowo wysokie elektryczne i termiczne przewodnictwo, dużą wytrzymałość mechaniczną i nie wymaga topnika w procesie lutowania w przeciwieństwie do innych lutowi twardych.

Diagram fazowy Au/Sn przedstawiony na Rys. 3.1 pokazuje dwa punkty eutektyczne: w temperaturze w 283°C (Au<sub>80</sub>Sn<sub>20</sub>), charakteryzujący się dobrymi właściwościami mechanicznymi i w temperaturze 232°C (Au<sub>10</sub>Sn<sub>90</sub>), które jest kruche i często pęka przy studzeniu w procesie lutowania.

Eutektyk Au<sub>80</sub>Sn<sub>20</sub> charakteryzuje się stromymi liniami równowagi, szczególnie po stronie bogatej w Au. Konsekwencją tego jest, że odchylenie o 1% od składu eutektycznego skutkuje wzrostem o 30°C

temperatury topnienia. Dlatego tak istotna jest jednorodność lutowia AuSn.

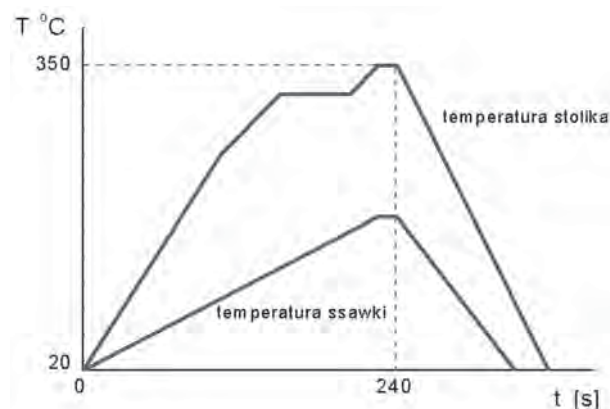


Rys. 3.1. Diagram fazowy Au-Sn.

Fig. 3.1. Au-Sn phase diagram.

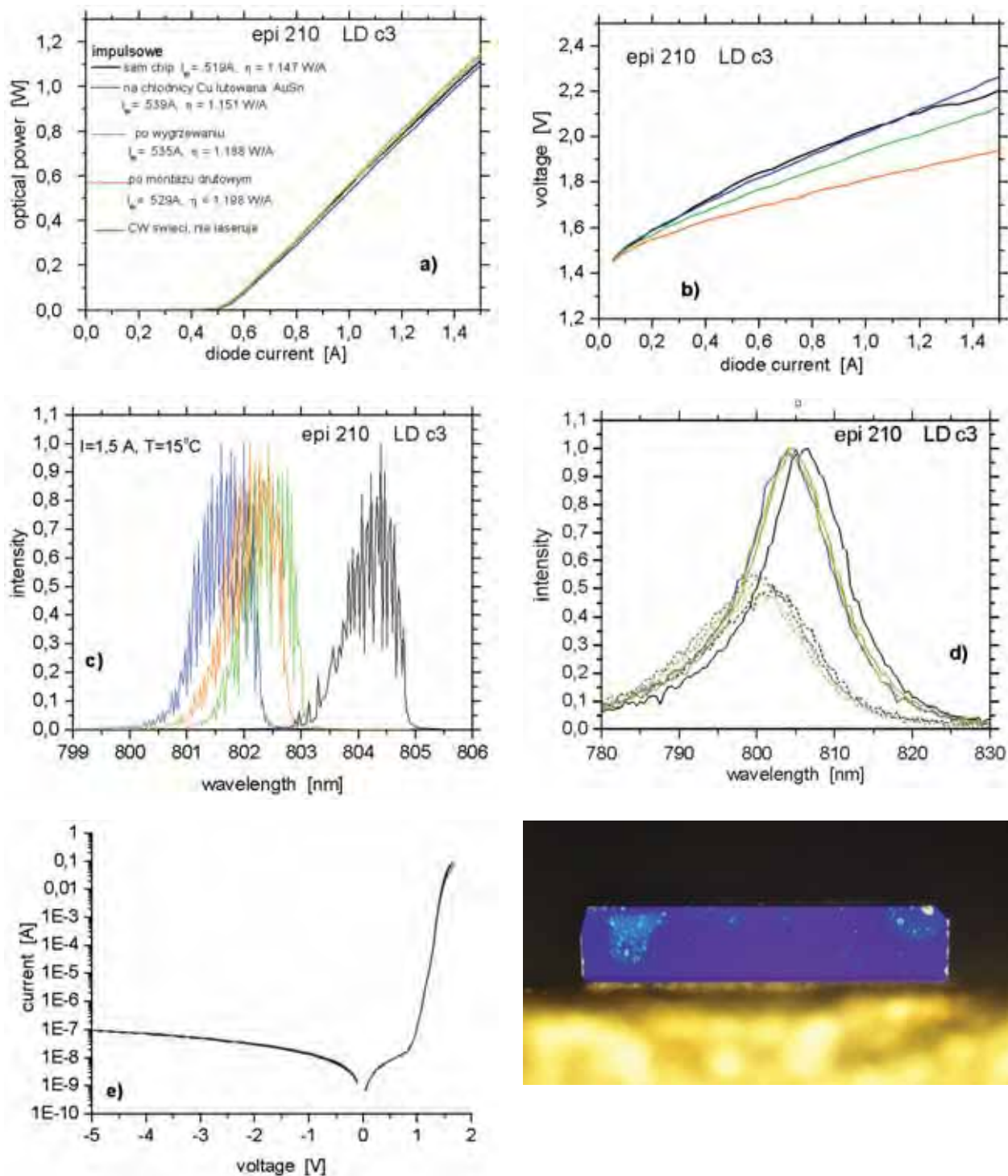
Skrzepnięty eutektyk składa się z dwóch faz międzymetalicznych: pod środkiem chipu tworzy się faza  $\zeta$  (Au<sub>5</sub>Sn mająca strukturę krystaliczną hcp i temperaturę topnienia 521°C), przy krawędzi chipu faza  $\delta$  (AuSn o strukturze heksagonalnej o temperaturze topnienia 419.3°C, która jest bardziej krucha niż Au i twardsza niż Au i Sn) [10].

W celu lutowania twardym lutowiem Au<sub>80</sub>Sn<sub>20</sub> w postaci folii o wymiarach chipu (preform) ustalono optymalny profil temperatur (najniższą możliwą temperaturę, czas i siłę nacisku podajnika), przy którym nie następuje oderwanie chipu od podłoża. Przykładowy przebieg temperatur w die-bonderze w czasie lutowania chipu do chłodnicy Au<sub>80</sub>Sn<sub>20</sub> pokazany jest na Rys. 3.2. Rzeczywista temperatura w obszarze lutowia przebiega pomiędzy tempera-



Rys. 3.2. Przykładowy przebieg temperatur w czasie lutowania chipu do chłodnicy przy użyciu folii AuSn

Fig. 3.2. Exemplary temperature time-profile for a chip soldering onto a heat sink with AuSn perform foil.



**Rys. 3.3.** Chip LD c2 zmontowany przy użyciu folii AuSn bezpośrednio na chłodnicy: a) charakterystyka P-I; b) charakterystyka I-V; c) charakterystyka spektralna promieniowania laserowego; d) charakterystyka promieniowania spontanicznego; e) charakterystyka niskoprądowa I-V. Dla wszystkich rysunków zachowane kolory z Rys. a). Obok umieszczono zdjęcie struktury od strony przedniego lustra.

**Fig. 3.3.** Chip LD c2 soldered with AuSn preform on Cu heat sink: a) P-I characteristics; b) I-V characteristics; c) spectral characteristics above laser threshold; d) spectral characteristics above and below laser threshold, respectively e) low current I-V characteristic. Colors used in fig. a) are common for all graphs. The photograph shows the front facet of the LD.

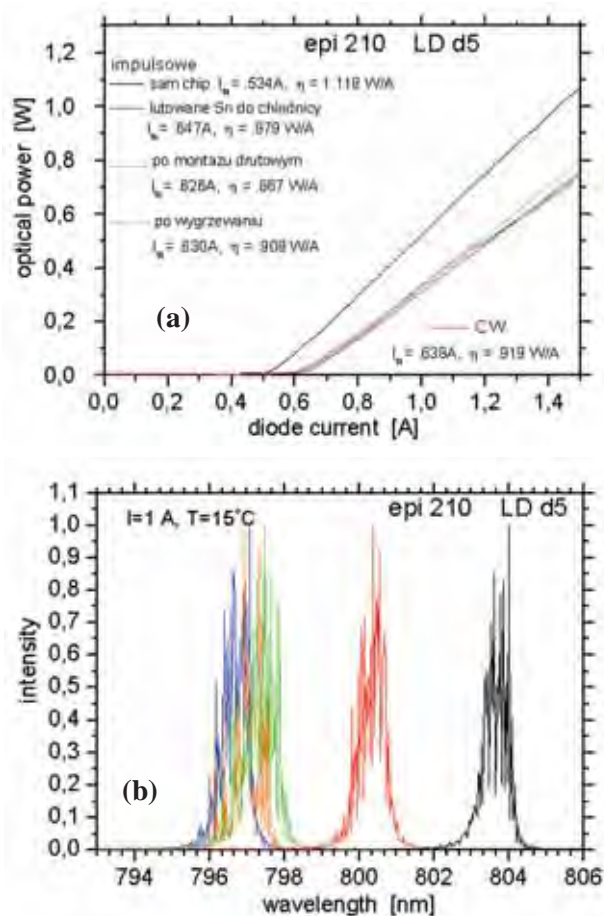
turą stolika a temperaturą podajnika próżniowego („ssawki”).

Podczas podgrzewania dioda laserowa i podłoże swobodnie rozszerzają się. Jednakże rozszerzanie GaAs i podłoża zwykle jest różne z powodu niedopasowania współczynników CTE. Podczas fazy chłodzenia od temperatury lutowania swobodnemu kurczeniu chipa laserowego i chłodnicy przeciwdziała warstwa lutowia, co powoduje powstawanie podczas montażu naprężenia w obszarze warstwy aktywnej chipa tym wyższego, im wyższa była temperatura lutowania. Zjawisko to pokazano dla przykładowej diody na Rys 3.3. Widoczne jest, że charakterystyki niskoprądowej I-V pokrywają się, to znaczy nie mamy do czynienia z upływnością, nie ma zwarcia. Kompletny montaż nie zmienił w sposób istotny parametrów diody laserowej takich jak prąd progowy  $I_{th}$  i sprawność energetyczna  $\eta$ , zmienił jednak położenie charakterystyki spektralnej. Tak jak w przypadku montażu indem, przylutowanie chipu do chłodnicy przesunęło charakterystykę spektralną w kierunku krótkofalowym w tym przypadku o  $\sim 3$  nm. Kierunki zmian tej charakterystyki po wygrzewaniu odprężającym i po montażu drutowym są takie jak przy diodach lutowanych indem za pomocą *die-bondera*. Ale próba pracy CW tej diody nie powiodła się, gdyż emitowała ona promieniowanie spontaniczne, ale nie wykazywała emisji laserowej CW.

W procesie lutowania bezpośrednio na złożonych chłodnicach miedzianych DL810, przy użyciu spoiwa Au80Sn20, nachylenie krzywej nagrzewania, czasy kolejnych etapów procesu lutowania, maksymalna temperatura i nachylenie krzywej chłodzenia mają istotny wpływ na generację naprężeń w obszarze diody laserowej. Mimo wielu prób zmian parametrów lutowania, dla żadnej DL nie uzyskano akcji laserowej przy zasilaniu CW. Wydaje się, że ten sposób montażu, wprowadzający bardzo duże naprężenia, nie może być stosowany dla diod wysokiej mocy. Takie same wnioski wyciągnięto również w innych laboratoriach. Przy montażu chipów do obudowy przy użyciu AuSn diody pracowały tylko w reżimie impulsowym [11].

Przy stosowaniu folii lutowniczych możemy mieć do czynienia z wolnymi przestrzeniami, powodującymi istnienie tzw. gorących punktów. Ażeby otrzymać bardziej jednorodną warstwę lutowniczą, zmniejszyć prawdopodobieństwo przesłaniania lutowiem luster laserowych, jak również ułatwić proces lutowania przeprowadzono próby napyłania warstw Sn i Au na chłodnicę Cu. Odpowiednio dobrane grubości warstw i odpowiednie warunki lutowania powinny wytworzyć eutektyczne lutowie AuSn, którego grubość zależna jest od czasu przetrzymania w temperaturze topnienia eutektyku.

Najczęściej warstwy Au i Sn są nakładane na chipy (jeszcze w trakcie processingu na płytkach) i na powierzchnię chłodnicy [1]. Ponieważ w czasie realizacji projektu używano chipów wytworzonych wcześniej, nie można było nanieść dodatkowych warstw Sn i Au na istniejące pojedyncze chipy. W pracy wykorzystano fakt, że chip ma nałożoną galwaniczną warstwę Au grubości  $\sim 4$   $\mu\text{m}$  na stronie p. Warstwy Sn i Au napyłano więc tylko na miedziane, złożone chłodnice. Na Rys. 3.4. pokazano przykładowe charakterystyki DL przylutowanej do chłodnicy Cu przy pomocy napyłonej warstwy Sn o grubości  $\sim 3$   $\mu\text{m}$ .



**Rys. 3.4.** Charakterystyki P-I (a) i spektralne (b) dla DL lutowanej przy pomocy Sn do chłodnicy Cu. Poniżej zdjęcie chipu od strony przedniego lustra.

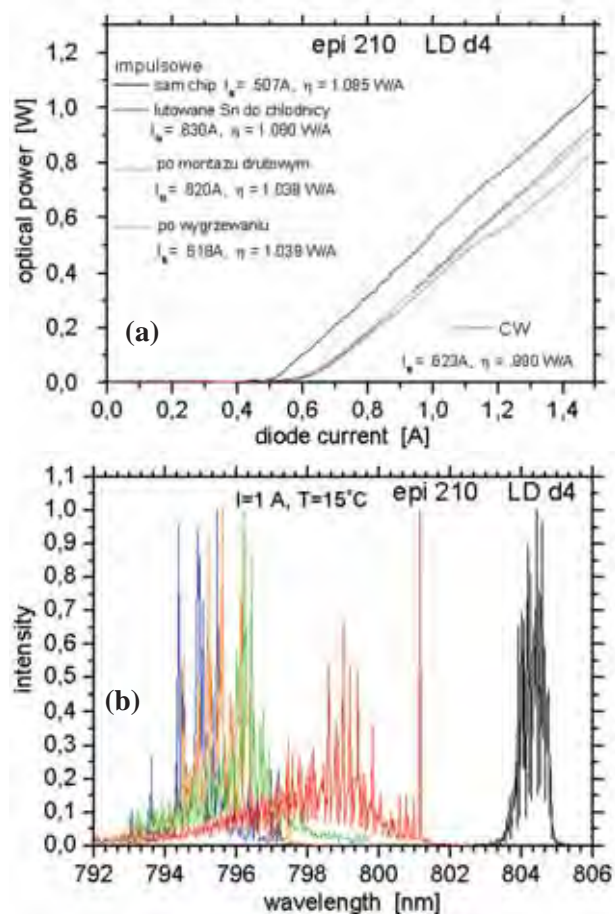
**Fig. 3.4.** P-I (a) and spectral characteristics (b) of LD soldered with Sn onto Cu heat sink. Below – the chip's front facet photograph.



Przylutowanie chipu do chłodnicy znacznie pogorszyło jego parametry elektrooptyczne i przesunięciu w kierunku krótkofalowym o  $\sim 7$  nm uległa charakterystyka spektralna. Zmiany po montażu drutowym i po wygrzewaniu odprężającym nie są już tak duże, w końcowym efekcie przesunięcie jest znacznie większe niż w przypadku lutowania za pomocą folii AuSn. Jednak w tym przypadku uzyskano akcję laserową przy pracy ciągłej. Próby wydłużenia czasu chłodzenia po procesie lutowania do 30 min nie przyczyniły się do poprawienia parametrów diody, a wręcz przeciwnie (Rys. 3.5.), poszarpane i rozszerzone charakterystyki spektralne świadczą o powstaniu większych naprężeń. Potwierdzone zostały w ten sposób wyniki pracy [8]. Według jej autorów szybsze chłodzenie zapewnia większą jednorodność, występuje mniej wolnych przestrzeni w lutowiu i mniejsza jest chropowatość jego powierzchni. Natomiast wolny proces studzenia pozwala na migrację cząstek Au i Sn i na procesy dyfuzyjne w złączu lutowniczym. Do końca też nie

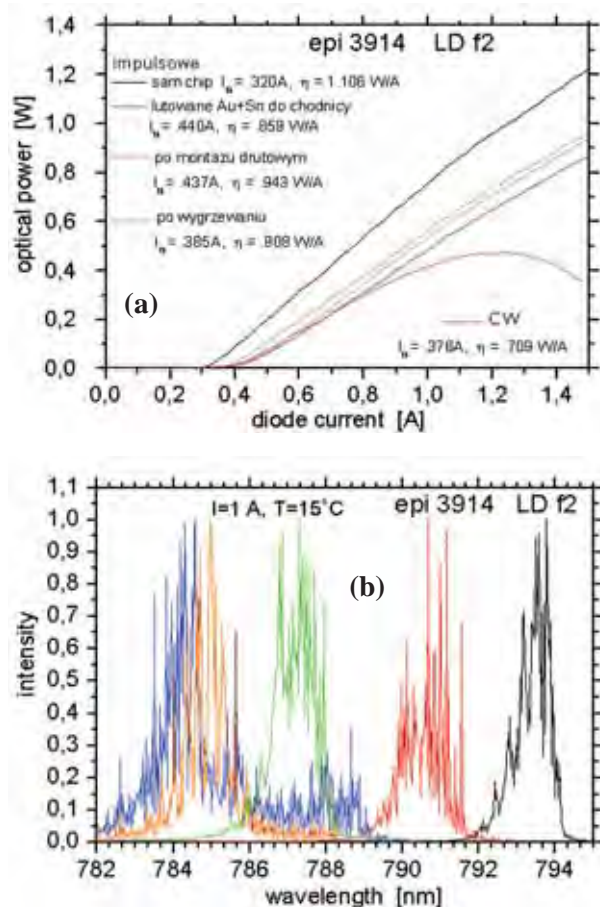
wiadomo jaki stop wytworzył się na tym złączu, i jak jego skład odbiega od składu eutektycznego Au80Sn20.

Ponieważ Sn bardzo szybko utlenia się przy kontakcie z powietrzem, w następnym etapie badań zastosowano napylenie warstwy Sn i bezpośrednio na niej warstwy Au o grubości  $\sim 2$   $\mu\text{m}$  w jednym procesie próżniowym. W tym przypadku uzyskano dużo gorsze, w porównaniu z nieprzylutowanym chipem, parametry DL i nie uzyskano dla tych przypadków akcji laserowej CW. Przy grubszej warstwie Au ( $\sim 3,5$   $\mu\text{m}$ ) uzyskano lepsze wyniki (Rys. 3.6.), chociaż pik charakterystyki spektralnej przesunął się o ponad 9 nm. Wygrzewanie odprężające zmniejszyło naprężenia i uzyskano akcję laserową CW, jednak widać, że dioda przegrzewa się przy  $\sim 0,9$  A.



**Rys. 3.5.** Charakterystyki P-I i spektralne dla DL lutowanej przy pomocy Sn do chłodnicy Cu przy wydłużonym czasie chłodzenia.

**Fig. 3.5.** P-I and spectral characteristics of LD soldered using Sn onto Cu heat sink with elongated cooling time.



**Rys. 3.6.** Charakterystyki P-I (a) i spektralne (b) dla DL lutowanej do chłodnicy Cu przy pomocy napylnych warstw Sn + 3,5  $\mu\text{m}$  Au.

**Fig. 3.6.** P-I (a) and spectral characteristics (b) of LD soldered with evaporated Sn + 3,5  $\mu\text{m}$  Au layers onto Cu heat sink.

Podjęto również próby przylutowania chipów do chłodnicy napyłając warstwę bezpośrednio ze stopu eutektycznego Au80Sn20. W porównaniu z grubymi foliami Au80Sn20 (25  $\mu\text{m}$ ) tutaj można było uzyskać dużo cieńsze warstwy lutowia. Dla zadanej z badanych grubości napyłonej warstwy Au80Sn20 (2,5  $\mu\text{m}$ , 3,5  $\mu\text{m}$  i 6  $\mu\text{m}$ ) nie osiągnięto akcji laserowych CW.

Wydaje się, że jedynym rozwiązaniem przy lutowaniu lutowiem eutektycznym Au80Sn20, w celu zredukowania naprężenia termicznego, jest zastosowanie dodatkowych przekładek (*heat spreader*) charakteryzujących się współczynnikiem CTE dopasowanym do chipu laserowego. Takie przekładki, dodatkowo dzięki swej dużej przewodności cieplnej, mają za zadanie rozprzewadzić i przekazać do chłodnicy strumień ciepły wytwarzany przez emiter optoelektroniczne.

#### 4. Lutowanie na przekładkach diamentowych

Zadaniem przekładki diamentowej jest szybki transport strumienia ciepła z obszaru aktywnego diody do chłodnicy. Przekładka nie powinna zatrzymywać ciepła, zatem wymagania dla niej są kombinacją wysokiej przewodności i niskiej pojemności cieplnej. Natomiast chłodnica powinna magazynować i rozpraszać energię, dlatego potrzebuje wysokiej przewodności cieplnej jak również wysokiej pojemności cieplnej.

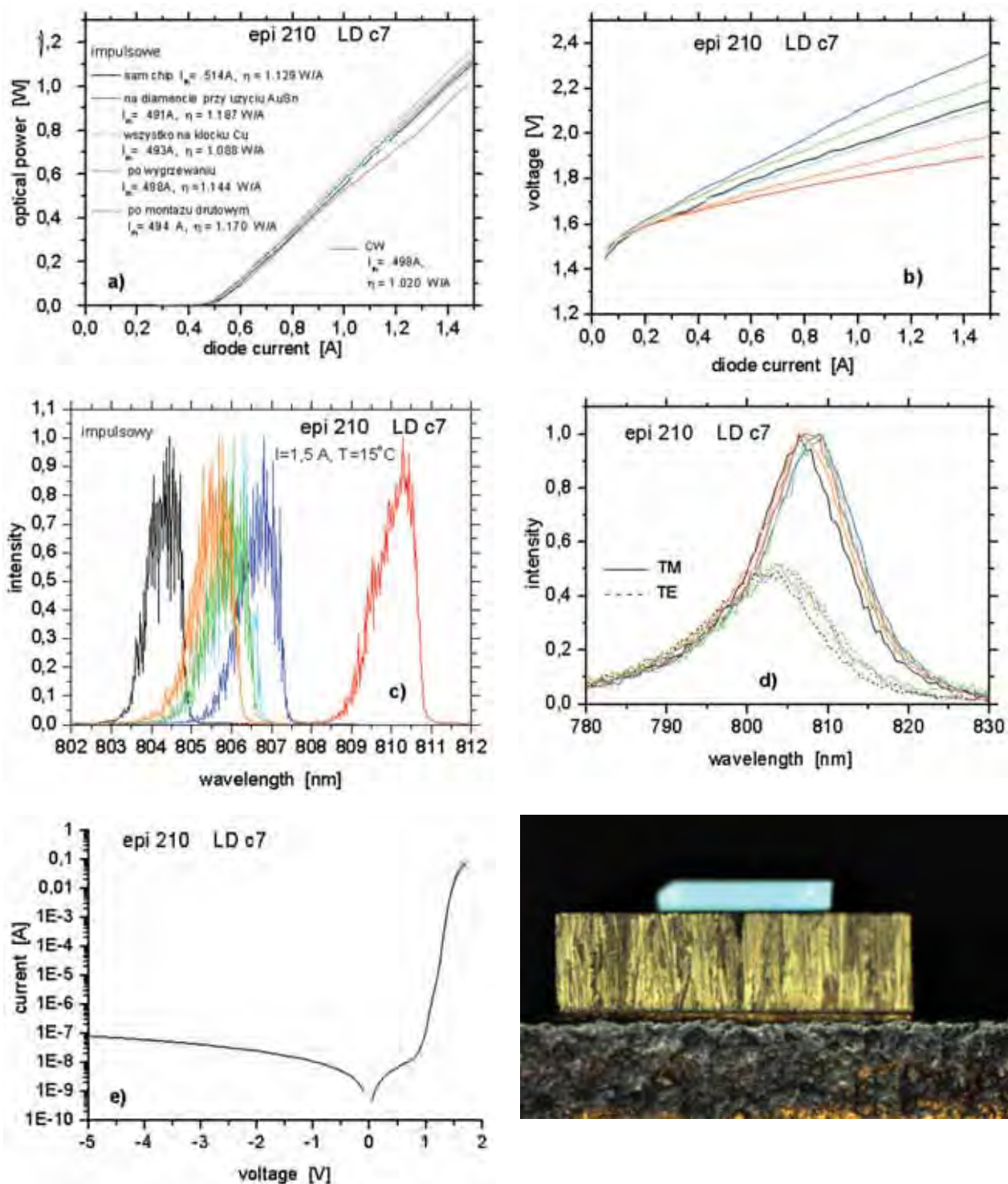
Współczynnik CTE i przewodność cieplna są kluczowymi parametrami, które trzeba wziąć pod uwagę przy wyborze przekładek do procesów montażowych DL.

W Tab. 2 podana jest przewodność cieplna i współczynnik rozszerzalności cieplnej dla wybranych półprzewodników, lutowia, przekładek (*heat spreaderów*) i chłodnic [12].

**Tabela 2.** Przewodność cieplna i współczynnik cieplnej rozszerzalności (CTE) dla wybranych półprzewodników, lutowia i chłodnic.

**Table 2.** Thermal conductivity and thermal coefficient of expansion (CTE) for selected semiconductors, solders and heat sinks.

Materiał	Przewodność cieplna (W/mK)	CTE ( $10^{-6}/\text{K}$ )
<b>Półprzewodniki:</b>		
InP	67	4.56
$\text{In}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{As}$	66	5.66
GaAs domieszkowany	44	6.4
GaAs niedomieszkowany	44	5.8
$\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$	11	5.8
$(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.525}\text{In}_{0.475}\text{P}$	6	—
$\text{Ga}_{0.515}\text{In}_{0.485}\text{P}$	5	—
<b>Lutowia:</b>		
In	81.8 - 86	29 - 33
Sn	64 - 73	19.9 - 23,5
80Au/20Sn	57.3	16
60Sn/40Pb	44 - 50.6	24.7
88Au/12Ge	44.4	12.9 - 13.3
52In/48Sn	34	20
<b>Przekładki, chłodnice:</b>		
CVD Diamond	1000 - 1600	2
Srebro (Ag)	427	19
Miedź (Cu)	398	16.5
Złoto (Au)	315	14.4
15Cu/85W	240	7.5
30Cu/70W	201	10.8
10Cu/90W	147 - 209	6.5
BeO	220 - 260	6.5 - 7.3
Krzem (Si)	125 - 150	2.6 - 4.1
Nikiel (Ni)	90	13



**Rys. 4.1.** Chip LD c7 zmontowany na przekładce diamentowej przy użyciu folii AuSn: a) charakterystyka P-I; b) charakterystyka I-V; c) charakterystyka spektralna promieniowania laserowego; d) charakterystyka promieniowania spontanicznego; e) charakterystyka niskoprądowa I-V. Dla wszystkich rysunków zachowane kolory Rys. a). Obok umieszczono zdjęcie struktury od strony przedniego lustra.

**Rys. 4.1.** LD chip c7 soldered with AuSn preform foil on diamond heat-spreader: a) P-I characteristics, b) I-V characteristics; c) and d) spectral characteristics above and below laser threshold, respectively, e) low current I-V characteristic. Colors used in Fig. a) are common for all graphs. The photograph shows the front facet of the LD.



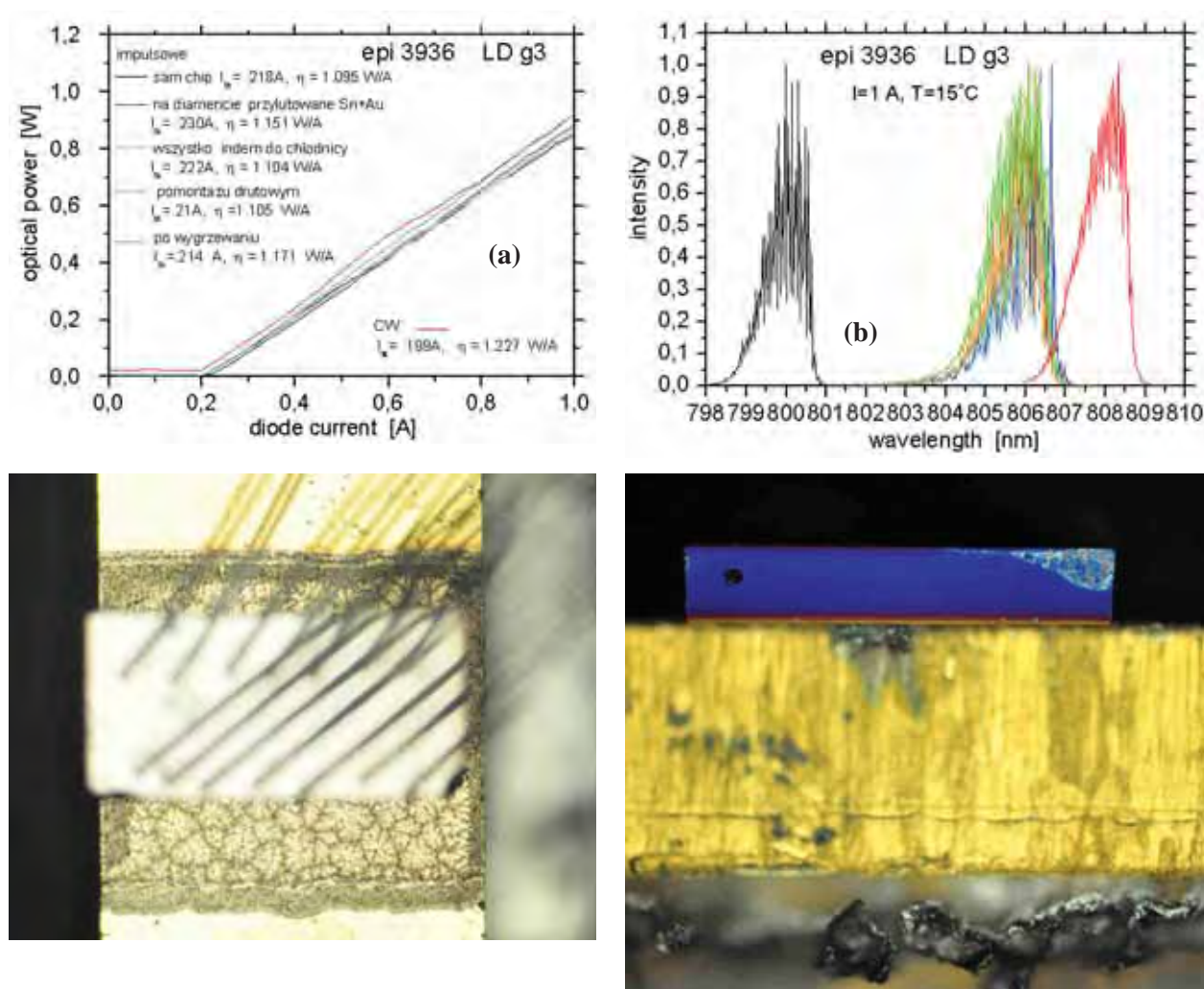
Według autorów prac [11, 13] najlepszymi przekładkami dla GaAs (przy stosowaniu twardych lutów) są przekładki diamentowe. Diament ma dużo większą przewodność cieplną niż inne materiały; trzykrotnie większą niż miedź, pięciokrotnie większą niż AlN. Przekładka diamentowa (izolator elektryczny) jest jednostronnie polerowana i metalizowana Ti/Pt/Au ze wszystkich stron. Gładka powierzchnia diamentu minimalizuje pęknięcia montowanego chipu, na które to pęknięcia GaAs jest bardzo podatny. Autorzy [11] zalecają wymiary przekładek: grubość 400  $\mu\text{m}$  i szerokość = 2,5 x wymiary chipu. Stosowane przez nas przekładki o wymiarach 1,5 mm x 1 mm i grubości 300  $\mu\text{m}$  firmy Diamonex w przybliżeniu spełniają to kryterium.

I tym razem sprawdzono dwie metody nakładania lutu Au80Sn20 na przekładkę diamentową: sto-

sując folię Au80Sn20 i napyłając Au i Sn w różnych konfiguracjach.

Ponieważ CTE diamentu (2 ppm/K) jest niższy niż chipu (5,8 ppm/K dla GaAs), podczas procesu chłodzenia po lutowaniu diament kurczy się mniej niż sam chip, odwrotnie niż przy lutowaniu bezpośrednio na chłodnicę Cu. Dlatego w tym przypadku mamy do czynienia z naprężeniem rozciągającym heterostruktury i stąd przesunięcie piku widma akcji laserowej w kierunku długofalowym o ponad 2 nm przedstawione na Rys. 4.1.

Przylutowanie przekładki diamentowej z chipem do chłodnicy Cu za pomocą indu powoduje lekkie odprężenie, czyli przesunięcie w kierunku krótkofalowym o  $\sim 1$  nm. Wygrzewanie (w tym przypadku przed montażem drutowym) nie zmienia parametrów diody, natomiast dołączenie drutów aluminiowych wprowadza naprężenie ściskające, stąd dalsze prze-



**Rys. 4.2.** Charakterystyki P-I (a) i spektralne (b) dla DL lutowanej przy pomocy napylnych warstw Sn + 3,5  $\mu\text{m}$  Au do diamentu i indom do chłodnicy Cu. Poniżej widok chipa z wyprowadzeniami drutowymi. Widoczna warstwa Sn+Au na diamentowej przekładce. Obok zdjęcie struktury od strony przedniego lustra.

**Fig. 4.2.** P-I (a) and spectral (b) characteristics of LD soldered with evaporated Sn + 3,5  $\mu\text{m}$  Au layers onto diamond heat-spreader and then, using In, onto Cu heat sink. Below left – photographs of chip with bonding wires. Sn + Au layer on diamond heat-spreader is seen. Below right – of LD front facet photograph.

sunięciu charakterystyki spektralnej akcji laserowej w kierunku krótkofalowym. Zmiany spowodowane naprężeniami indukowanymi w czasie lutowania widoczne są również, tak jak w pozostałych metodach lutowania, w charakterystykach spektralnych emisji spontanicznej. Pik tego promieniowania przesuwają się w tym samym kierunku i o taką samą wartość co pik charakterystyki spektralnej akcji laserowej. Na Rys.4.1.d pokazano składowe polaryzacji TM i TE. Tak jak poprzednio, są to wartości znormalizowane i jest zachowany stosunek pomiędzy tymi składowymi. Nieznacznie, wraz z postępującymi procesami montażowymi, wzrasta udział polaryzacji TE.

Różnica położenia pików charakterystyki spektralnej lasera pracującego w reżimie pracy impulsowej i CW wynosi  $\sim 5$  nm, a dla promieniowania spontanicznego przesunięcie wynosi 1 nm.

Tak więc przy zastosowaniu przekładek diamentowych przy montażu DL z zastosowaniem folii Au80Sn20 uzyskano parametry diod porównywalne z diodami montowanymi przy pomocy indu. Powinny one być bardziej wytrzymałe i mniej zawodne, niż DL lutowane indem, ale do stwierdzenia tego potrzebne są długotrwałe badania starzeniowe.

Dla warstw Sn i Au napyłanych w jednym procesie próżniowym na wypolerowaną stronę przekładki diamentowej wyniki eksperymentu dla przykładowej struktury pokazane są na Rys. 4.2. Po przylutowaniu chipu do przekładki diamentowej całość była lutowana do chłodnicy za pomocą indu. I w tym przypadku trudno mówić o składzie stopu wytworzonego pomiędzy chipem a przekładką. Wystąpiło duże przesunięcie ( $\sim 6$  nm) charakterystyki spektralnej przylutowanego chipu w porównaniu z charakterystyką samego chipu. Nie widać natomiast

istotnych różnic w charakterystykach spektralnych promieniowania laserowego po wykonaniu połączeń drutowych i wygrzewaniu. Jak dla wszystkich diod i w tym przypadku występuje grzanie w czasie pracy CW (przesunięcie pików charakterystyki spektralnej CW o  $\sim 2$  nm). Dla diod montowanych tą metodą wystąpiły w tym miejscu stosunkowo duże rozbieżności. Największe przesunięcie wynosiło  $\sim 5$  nm.

Nie powiodły się natomiast próby lutowania chipów do przekładek diamentowych przy pomocy napyłanego na przekładki stopu Au80Sn20. Żadna z DL montowanych stopem Au80Sn20 na przekładce diamentowej nie laserowała przy pracy ciągłej (CW).

Nie powiodły się również próby jednoczesnego lutowania chipu do przekładki diamentowej i całości do chłodnicy przy pomocy napyłanej warstwy Sn i Au na przekładkę i na chłodnicę. Od początku montażu chipy były bardzo naprężone, miały bardzo szerokie charakterystyki spektralne promieniowania laserowego i ostatecznie nie laserowały przy CW.

## 5. PODSUMOWANIE

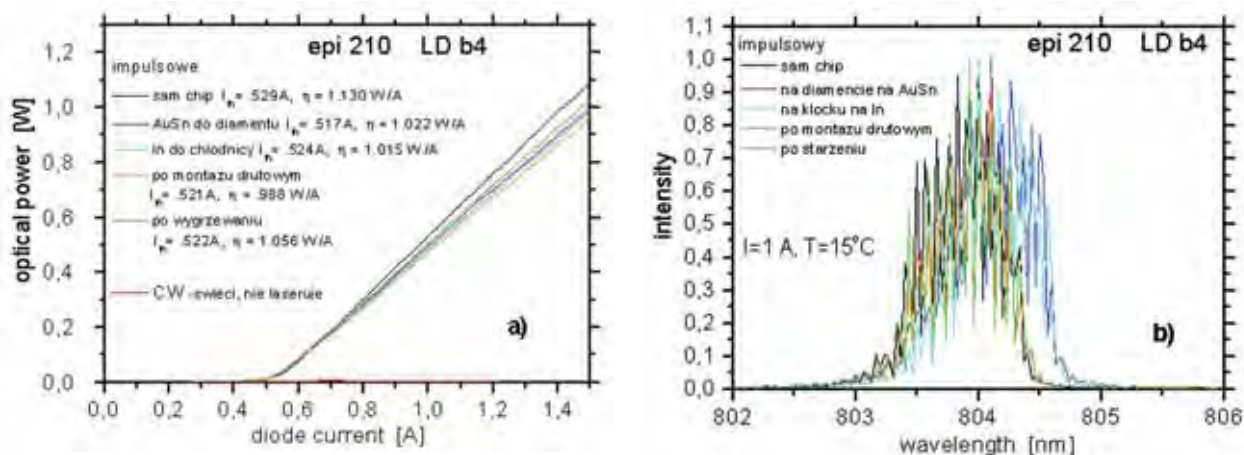
W trakcie realizacji tematu stwierdzono że:

1. Każdy stosowany przez nas sposób montażu wprowadza naprężenia do warstwy aktywnej diody laserowej zmieniając jej parametry elektrooptyczne, a przede wszystkim przesuwając charakterystyki spektralne. Średnie wartości przesunięć pokazano w Tab. 3. Symbol  $\leftarrow$  oznacza przesunięcie (w stosunku do poprzedniego etapu montażu) w kierunku krótkofalowym (naprężenie ściskające), symbol  $\rightarrow$  oznacza przesunięcie w kierunku długofalowym (naprężenie rozciągające).

**Tabela 3.** Wielkość przesunięcia charakterystyki spektralnej.

**Table 3.** Thermal shift of spectral characteristics.

Metoda lutowania \ Etap montażu	Po przylutowaniu do przekładki diamentowej	Po przylutowaniu do chłodnicy	Po montażu drutowym	Po wygrzewaniu	CW
Lutowie indowe napyłarka		$\leftarrow 2$ nm	$\leftarrow 0,5$ nm	$\rightarrow 1,5$ nm	$\rightarrow 4$ nm
Lutowie indowe die-bonder		$\leftarrow 2$ nm	$\rightarrow 0,5$ nm	$\rightarrow 1$ nm	$\rightarrow 4$ nm
Folia 25 $\mu$ m Au80Sn20 na Cu		$\leftarrow 3$ nm	$\rightarrow 0,5$ nm	$\rightarrow 0,5$ nm	
Sn + 3,5 $\mu$ m Au		$\leftarrow 9$ nm	$\rightarrow 1$ nm	$\rightarrow 2,5$ nm	$\rightarrow 4$ nm
3 $\mu$ m Sn		$\leftarrow 7$ nm	$\rightarrow 0,5$ nm	$\rightarrow 0,5$ nm	$\rightarrow 2,5$ nm
Folia 25 $\mu$ m Au80Sn20	$\rightarrow 2,5$ nm	$\leftarrow 0,8$ nm	$\leftarrow 0,8$ nm	0	$\rightarrow 5$ nm
Sn + 3,5 $\mu$ m Au	$\rightarrow 6$ nm	$\leftarrow 0,1$ nm	$\leftarrow 0,1$ nm	$\leftarrow 0,1$ nm	$\rightarrow 2 \div 5$ nm



Rys. 5.1. Charakterystyki P-I i spektralne promieniowania laserowego dla DL z tak zwanym „zimnym” lutowaniem.

Fig. 5.1. Light-current and spectral characteristics of LD with so-called „cold soldering”.

- Jeśli dla przylutowanych chipów laserowych przesunięcia charakterystyk spektralnych są niewielkie (mniejsze niż 1 nm w pierwszym etapie montażu), to mimo niezmiennych się charakterystyk impulsowych P-I i niskoprądowych I-V, takie lasery nie będą pracować w reżimie CW. Dotyczy to wszystkich metod lutowania (Rys. 5.1). Być może mamy tu do czynienia z tak zwanym „zimnym” lutowaniem i w związku z tym złym kontaktem cieplnym.
- Ultradźwięki, przy pomocy których następuje przyłączenie drutów aluminiowych do chipu powodują wprowadzenie naprężeń, co przejawia się rozszerzeniem lub przesunięciem charakterystyki spektralnej promieniowania laserowego. Nie powodują natomiast zmian w charakterystykach P-I
- Parametry diod laserowych montowanych indem w atmosferze azotu przy wykorzystaniu *die-bondera* są porównywalne z parametrami diod montowanych w próżni.
- Mimo wielu prób zmian parametrów lutowania dla żadnej DL, montowanej lutowniem eutektycznym AuSn w postaci 25  $\mu m$  folii bezpośrednio do chłodnicy, nie uzyskano akcji laserowej CW. Ten sposób montażu nie może być zatem stosowany dla diod wysokiej mocy ze względu na bardzo duże naprężenia wprowadzane do diody.
- Dużo lepsze wyniki, choć jeszcze niezadowalające, osiągnięto dla warstw Sn i Au napyłanych na chłodnicę Cu. Przy warstwie Au grubości  $\sim 3,5 \mu m$  po montażu zwiększył się prąd progowy w porównaniu z prądem progowym dla samego chipu. Uzyskano akcję laserową CW, jednak dioda szybko (przy prądzie 0,9A) przegrzała się. Przy cieńszych warstwach Au dla żadnej DL nie uzyskano akcji laserowej.
- Przy napyleniu na chłodnicę tylko warstwy Sn o grubości  $\sim 3,5 \mu m$  uległy pogorszeniu parametry diody takie jak prąd progowy i nachylenie charakterystyki P-I, uzyskano natomiast akcję laserową przy CW i dioda nie uległa zniszczeniu.
- Wydłużenie czasu studzenia w procesie lutowania warstwą Sn pogarsza parametry diod.
- Przy napyłonym stopie Au80Sn20, o różnej grubości, nie uzyskano akcji laserowej CW. W tym przypadku wystąpiły stosunkowo duże różnice pomiędzy poszczególnymi diodami w przesunięciach charakterystyk spektralnych promieniowania laserowego.
- Przy zastosowaniu przekładki diamentowej i montażu przy użyciu 25  $\mu m$  folii Au80Sn20 uzyskano parametry diod porównywalne z parametrami diod montowanych indem.
- Dla wszystkich montowanych diod bez względu na sposób montażu nieznacznie wzrasta udział polaryzacji TE w porównaniu z polaryzacją TM wraz z postępującymi procesami montażowymi.
- Wygrzewanie diod laserowych w temperaturze  $70^\circ C$  zmniejsza wprowadzone naprężenia w przypadku montażu indem. Natomiast przy zastosowaniu lutownia twardego efekt ten jest słabszy i staje się niezauważalny przy zastosowaniu przekładki diamentowej.

## LITERATURA

- [1] Liu X., Song K., Davis R. W., Hughes L.C., Hu M. H., Zah C.E. : A metallization scheme for junction-down bonding of high-power semiconductor lasers, *IEEE Transactions on Advanced Packagign*, 29, 3, (2006), 533 - 541



- [2] Lee C.C., Wang C.Y., Matijasevic G. S.: A new bonding technology using gold and tin multilayer composite structures, *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 14, 2, (1991), 407 - 412
- [3] Tomm J.W., Müller R., Bärwolff A., Elsaesser T., Gerhardt A., Donecker J., Lorenzen D., Daiminger F.X., Weiß S., Hutter M., Kaulfersch E., Reichl H.: Spectroscopic measurement of packaging-induced strains In quantum-well laser diodes, *Journal of Applied Physics*, 86, 3, (1999), 1196 - 1201
- [4] Teodorczyk M., Kozłowska A., Wróbel S., Małag A., Gajewski M., Krzyżak K., Krzyżak L., Morawski K., Wiśniewska A., Dąbrowska E.: Opracowanie technologii montażu struktur indywidualnych diod laserowych dużej mocy metodą samopozycjonowania w obudowach TO-3.- Kontynuacja tematu z roku 2002. Praca statutowa ITME-2003
- [5] Teodorczyk M., Krzyżak K., Małag A., Kozłowska A., Wawrzyniak P., Latoszek M., Gajewski M., Krzyżak L., Morawski K., Wiśniewska A., Dąbrowska E.: Technologia montażu chipów i matryc diod laserowych na podkładkach o podwyższonym, w stosunku do miedzi, przewodnictwie cieplnym. Praca statutowa ITME –2006.
- [6] Martin E., Landesman J. P., Hirtz J.P., Fily A.: Microphotoluminescence mapping of packaging-induced stress distribution in high-power AlGaAs laser diodes, *Applied Physics Letters*, 75, 17, (1999), 251 - 253
- [7] 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*, 14, 7, (2002), 893 - 895
- [8] Mizuishi K.: Some aspects of bonding-solder deterioration observed In long-lived semiconductor lasers: Solder migration and whiskey growth, *J. Appl. Phys.* 55, 2, (1984), 289 - 295
- [9] Fujiwara K., Fujiwara T., Hori K., Takusagawa M.: Aging characteristics of  $Ga_{1-x}Al_xAs$  double-heterostructure lasers bonded with gold eutectic alloy solder *Appl. Phys. Lett.*, 34, 10, (1979), 668 - 670
- [10] J.W.R. Tew, X.Q. Shi, S. Yuan, Au/Sn solder for face-down bonding of AlGaAs/GaAs ridge waveguide laser diodes, *Materials Letters*, 58, 21, (2004), 2695 - 2699
- [11] Weiss S., Zakel E., Reichl H.: Mounting of high power laser diodes on diamond heatsinks, *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 19, 1, (1996), 46-53
- [12] Merritt S.A., Heim P.J.S., Cho S.H., Dagenais M.: Controlled solder interdiffusion for high power semiconductor laser diode die bonding, *IEEE Transactions, Packaging, and Manufacturing Technology*, 20, 2, (1997), 141 - 145
- [13] Zimmer J., Palen E.: Diamond heat spreaders maximize emitter power and lifetime, [www.sp3inc.com](http://www.sp3inc.com)

## INVESTIGATION OF SOLDER-INDUCED STRAINS IN LASER DIODES SOLDERED BY INDIUM OR EUTECTIC AuSn

Mounting of laser diodes (LDs) introduces strains into LD's heterostructures, affecting their electro-optical parameters. In this paper, for the strain characterization various device characteristics, such as light-current, low current I-V, spectral characteristics above and below lasing threshold have been investigated, after each step of the mounting process. Diodes have been soldered in vacuum or in  $N_2$  atmosphere, using soft (In) and hard solder (eutectic AuSn). In the second case laser chips have been mounted on Cu heat sinks directly or using a diamond heat-spreaders between a chip and Cu heat sink. Various kinds of AuSn solder alloy have been used such as a perform foil or evaporated on the heat sink or the heat-spreader thin films of Sn and Au or sputtered eutectic AuSn layers. At each step of the mounting process LDs featured different strain magnitudes, depending on the mounting method (as mentioned above). Effectiveness of the strains relaxation by LDs after-mounting heating sequence has been investigated as well.

**Keywords:** laser diode, heterostructure, LD mounting, indium, eutectic AuSn