

*mgr Michał BEDNAREK,  
mł. bryg. prof. dr hab. Janusz RYBIŃSKI  
SGSP, Katedra Nauk Ścisłych,  
Zakład Fizyki i Chemii*

## **TERMOGRAFICZNE BADANIA MIKROSKOPOWE ELEMENTÓW LASERÓW PÓLPRZEWODNIKOWYCH**

Zaprojektowano i wykonano stanowisko pomiarowe do badań mikroskopowych defektów przypowierzchniowych metodą termografii w podczerwieni. Stanowisko umożliwia wykrywanie i identyfikowanie defektów z rozdzielczością przestrzenną  $8\ \mu\text{m}$  i wykrywanie różnic temperatury o wartości  $0,025\text{K}$ . Umożliwia badanie zmian temperatury z częstotliwością próbkowania do ponad  $5\ \text{kHz}$ . Na stanowisku wykonano badania elementów laserów półprzewodnikowych. Określono miejsca wydzielania ciepła i efektywność jego odprowadzania w tych elementach.

The stand for microscopic testing of near – surface defects, using the thermography method, has been designed and built. The stand makes possible detection and identification of defects with the  $8\ \mu\text{m}$  special definition as well as detection of temperature differences of  $0.025\ \text{K}$  value. The stand makes possible testing temperature changes with sampling frequency up to  $6\ \text{kHz}$ . Testing of semiconductor laser elements have been tested there. The points of heat emission have been defined as well as the efficiency of carrying it away.

### **1. Stanowisko pomiarowe**

W Szkole Głównej Służby Pożarniczej powstało nowe stanowisko pomiarowe do badań mikroskopowych defektów metodą termografii w podczerwieni, zbudowane ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (S/E-422/8/2005/2006). Służy ono do wykrywania i identyfikacji mikroskopowych defektów przypowierzchniowych. Ze względu na bardzo dobrą rozdzielczość przestrzenną i wysoką czułość jest to stanowisko unikalne w skali krajowej. W skład stanowiska wchodzi: kamera termowizyjna z oprzyrządowaniem i zestawem obiektywów, w tym przystawką mikroskopową, ława optyczna z uchwytami do mocowania próbek, system rejestracji i wizualizacji wyników. Fotografię stanowiska przedstawiono na rys. 1. Badany element zamontowany jest w statywie wyposażonym w śruby mikrometryczne tak, aby możliwa była precyzyjna regulacja jego położenia. Kamera z przystawką mikroskopową rejestruje rozkład temperatury powierzchni

badanego elementu. Pole widzenia kamery obejmuje kwadrat o boku długości ok. 2 mm.



*Rys. 1. Stanowisko pomiarowe*

Do rejestracji rozkładu temperatury użyto kamery Radiance HSX firmy Raytheon. Jest to kamera radiometryczna z chłodzoną matrycą  $256 \times 256$  detektorów InSb, pracującą w zakresie spektralnym 3 - 5  $\mu\text{m}$ . Jej wyjątkowa wszechstronność wynika z nieograniczonego dostępu użytkownika do jej podstawowych parametrów: czasu integracji detektora, trybu pracy detektora, częstotliwości ramki. Czas integracji detektora ustawialny w granicach 0,002–14 ms pozwala na zoptymalizowanie parametrów kamery dla danego, wymaganego w danym eksperymencie zakresu temperatur. Dzięki takiej optymalizacji możliwe jest osiągnięcie wysokiej rozdzielczości temperaturowej  $\text{NEDT} = 0,025 \text{ }^\circ\text{C}$ . W zależności od trybu pracy detektora i ustawionego przez użytkownika czasu integracji zmienia się częstotliwość ramki, możliwa do uzyskania przy rejestracji sekwencji. Dla trybu  $256 \times 256$  będzie to ok. 140 Hz, dla trybu  $64 \times 64$ –4:1 (co drugi piksel aktywny) udało się osiągnąć częstotliwość 5,5 kHz. Tak duże prędkości pracy kamery pozwalają na rejestrację procesów cieplnych o bardzo szybkim przebiegu. Rejestrowane termogramy za pośrednictwem karty PC zapisywane są bezpośrednio do pamięci RAM, skąd mogą być pobrane i analizowane za pomocą oprogramowania termograficznego.

Przystawka mikroskopowa zapewnia maksymalną rozdzielczość przestrzenną 8  $\mu\text{m}$  przy trzykrotnym powiększeniu. Wymagana minimalna odległość preparatu od obiektywu przystawki wynosi 33 mm.

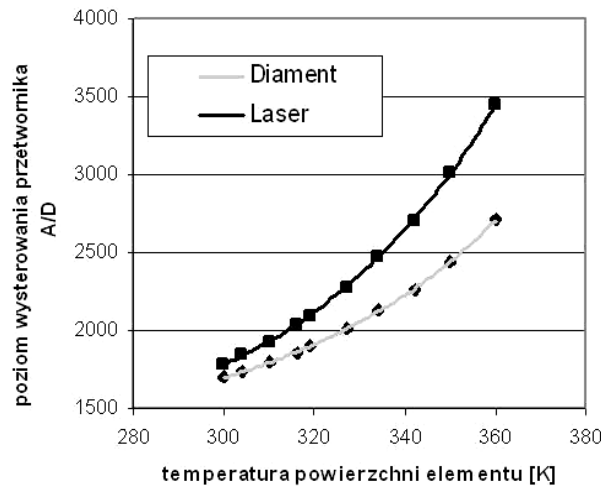
Do analizy termogramów wykorzystano program ThermalAnalyst, który opracowano w specjalnej wersji dla SGSP. Umożliwia on zarówno analizę termogramów, jak i fazogramów i amplitudogramów dla sekwencji termografii dynamicznej. Zastosowano zaawansowane algorytmy przetwarzania termogramów, pozwalające na filtrowanie wyników według zadanych parametrów.

Trudnością występującą przy pomiarach mikroskopowych jest określenie współczynnika emisyjności powierzchni badanego elementu. Współczynniki podawane w literaturze nie uwzględniają mikrostruktury powierzchni. Nieprawidłowe przypisanie wartości tego współczynnika spowodowałoby wystąpienie fałszywych odczytów temperatury badanych obiektów. Problem ten postanowiono rozwiązać, wykonując kalibrację kamery przy zastosowaniu wzorca będącego badanym elementem. Zadana temperaturę osiągnano za pomocą ogniwa Peltiera, a kontrolowano odpowiednio zamontowaną termoparą.

Kamera Radiance HSX jest kamerą z detektorem fotonowym. W fazie odczytu detektora natężenie płynącego prądu jest proporcjonalne do ładunku zgromadzonego w elemencie matrycy, a to z kolei odpowiada liczbie fotonów pochłoniętych w trakcie naświetlania. Analogowy sygnał przetwarzany jest w 12-bitowym przetworniku analogowo-cyfrowym. Sygnał cyfrowy poprzez kartę tzw. frame grabber trafia do komputera, gdzie na jego podstawie może być zinterpretowany jako wskazanie natężenia promieniowania. Dzięki 12-bitowemu przetwornikowi dynamika kamery (zależna od ustawialnego czasu integracji detektora) dzielona jest na 4096 poziomów. Procedura kalibracji polega na przypisaniu wartościom wysterowania przetwornika odpowiadających wartości temperatur wzorca, a następnie dopasowaniu do tych par liczb krzywej kalibracyjnej. Dla ciał wzorcowych o współczynniku emisyjności zbliżonym do jedności otrzymujemy kalibrację wymagającą, przy zastosowaniu narzędzi pomiarowych programu termograficznego, korekcy współczynnikiem emisyjności badanego obiektu. W przypadku wykalirowania kamery przy użyciu badanego elementu jako wzorca, korekcja taka nie jest potrzebna. Wymaga to jednak zachowania takich samych warunków kalibracji i późniejszych pomiarów ze względu na wpływ promieniowania tła, wpływ atmosfery, itp. Warunki te monitorowane były za pomocą drugiej kamery termowizyjnej typu InfraCam. Obserwacja taką kamerą całego stanowiska pozwalała na wyeliminowanie dodatkowych źródeł promieniowania. Źródłem takim może być na przykład operator kamer lub inne osoby uczestniczące w badaniu. Zmieniając swoją pozycję, mogą wprowadzać dodatkowe promieniowanie podające na badany obiekt. Przykładowe krzywe kalibracyjne przedstawiono na rys. 2.

Kolejnym problemem występującym podczas pomiarów mikroskopowych jest wykonanie kalibracji przestrzennej detektora, tzw. NUC. Układ optyczny kamery nie zapewnia równomiernego naświetlania matrycy detektora. Technologia wykonania detektora kamery daje w efekcie matrycę punktów fotoczułych różniących się nieznacznie parametrami. W kamerze Radiance HSX sygnał detektora odczy-

tywany jest dwoma niezależnymi torami. Jeden tor obsługuje linie parzyste, a drugi linie nieparzyste obrazu. Ponieważ jest to analogowa część kamery, nie jest możliwe zapewnienie dokładnej symetrii torów. Wszystkie wymienione niedoskonałości korygowane są tablicą zawierającą 65 536 współczynników tzw. gain i offset dla wszystkich pikseli detektora. Wykonanie kalibracji tego typu wymaga zastosowania wzorców promieniowania o unormowanym współczynniku emisyjności i temperaturze na całej powierzchni wzorca.



Rys. 2. Krzywe kalibracyjne dla poszczególnych elementów badanego obiektu – niebieskiego lasera półprzewodnikowego

Pomiary mikroskopowe z rozdzielczością przestrzenną rzędu mikrometrów związane są z koniecznością zapewnienia dużej stabilności całego stanowiska. Drgania kamery, optyki lub badanego obiektu o amplitudach porównywalnych z rozdzielczością przestrzenną dyskwalifikują pomiary. Występuje wprawdzie możliwość programowego skorygowania drgań i śledzenia w pomiarze zadanego punktu poruszającego się w scenie termograficznej, nie jest to jednak problem trywialny i wymagałby osobnego opracowania. Problemy tego typu spotykane są podczas obserwacji z samolotu lub śmigłowca. Stosowane układy żyroskopowe i pneumatyczne nie zapewniają jednak stabilności układu, wymaganej w pomiarach mikroskopowych.

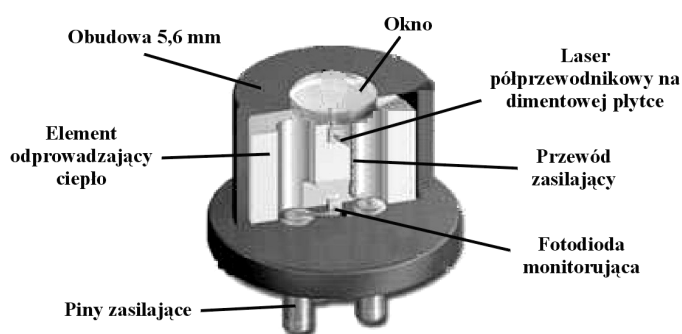
Konstruując stanowisko do termograficznych badań mikroskopowych, postanowiono zapewnić stabilność układu przez zastosowanie podstawy pod ławę optyczną, ławy optycznej oraz zestawu statywów o odpowiednio dużej masie. Starano się jednocześnie zapewnić dużą sztywność połączeń między obiektem badanym, statywem, ławą i kamerą, aby ewentualne drgania miały zgodne amplitudy i fazy. W takim przypadku drgania nie mają wpływu na stabilność sekwencji termogramów.

## 2. Przykładowe pomiary

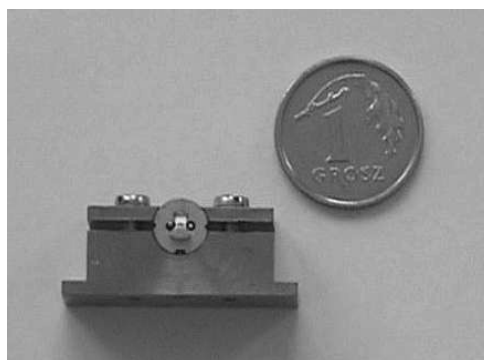
Przedmiotem badań były niebieskie lasery zbudowane w oparciu o azotki galu, indu i aluminium. Przeprowadzone eksperymenty miały na celu zbadanie rozkładu temperatury w laserze półprzewodnikowym, montowanym w obudowie laserowej 5,6 mm z przekładką diamentową rozpraszającą ciepło (rys. 3.). Miało to doprowadzić do oszacowania skuteczności odprowadzenia ciepła z jego warstwy aktywnej. W szczególności chodziło o wykrycie miejsc o największej rezystancji termicznej w układzie: struktura aktywna lasera (pasek laserowy) – spoina (AuSn) – płytka diamentowa – spoina (AuSn) – obudowa 5,6mm (SPC – silver plated copper) – radiator. Laser był montowany na diamentowej płytce rozpraszającej ciepło warstwą aktywną w kierunku diamentu za pomocą eutektyki Au<sub>0,8</sub>Sn<sub>0,2</sub>. Płytkę diamentową była zamontowana na podstawie laserowej umieszczonej w mosiężnym uchwycie 5,6 mm za pomocą eutektyki Au<sub>0,8</sub>Sn<sub>0,2</sub>. Temperaturę uchwytu stabilizowano układem z ogniwami Peltiera.

Program badań zakładał, między innymi, określenie rozkładu temperatury występującego na powierzchni badanego elementu oraz zależności tego rozkładu od wartości prądu zasilania lasera.

a)

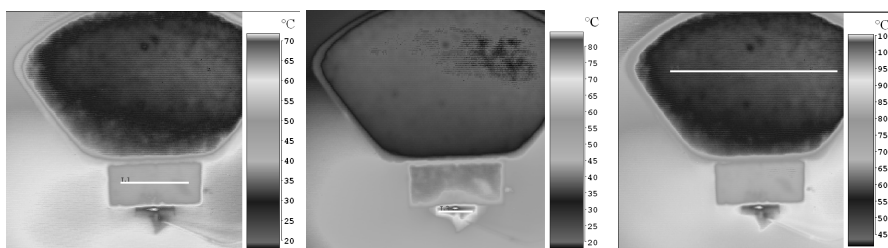


b)



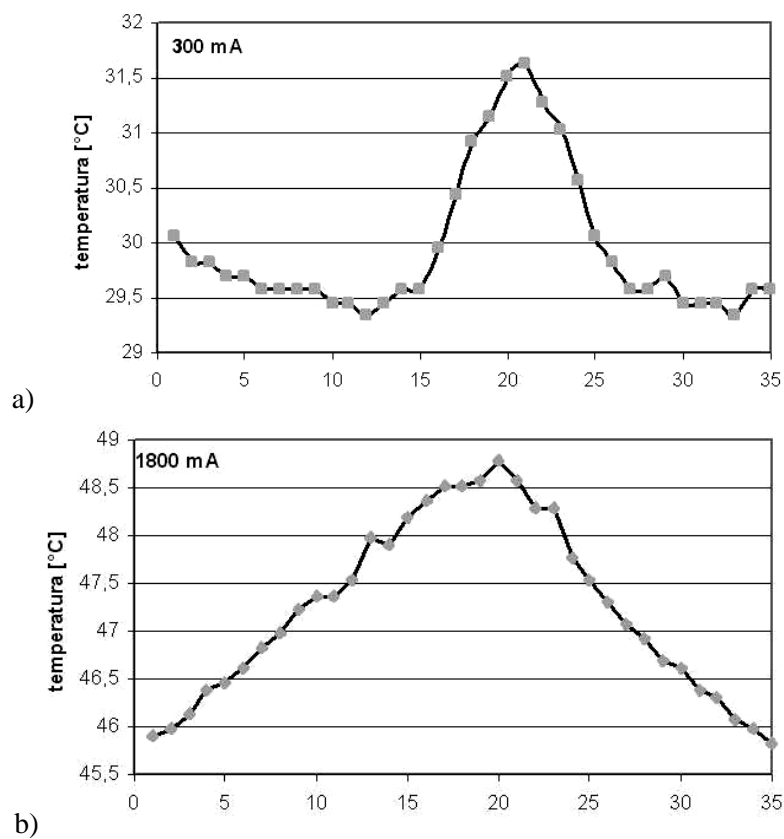
Rys. 3. Dioda laserowa w obudowie 5,6 mm: a) schemat, b) przygotowana do badań (bez obudowy i okna)

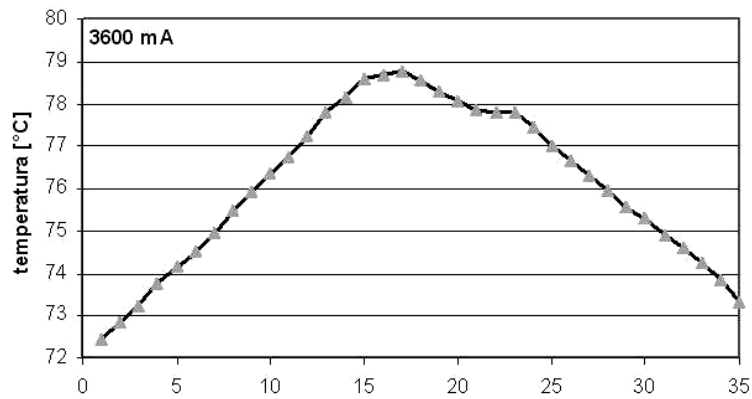
Na rys. 4. przedstawiono przykładowe termogramy powierzchni diamentu, lasera i elementu odprowadzającego ciepło.



Rys. 4. Termogramy powierzchni badanych elementów: a) diamentu, b) lasera, c) elementu odprowadzającego ciepło

Na rys. 5. przedstawiono rozkład temperatury powierzchni lasera wzdłuż linii zaznaczonej na rys. 4a, dla trzech wartości natężenia prądu zasilania: 300 mA, 1800 mA, 3600 mA.

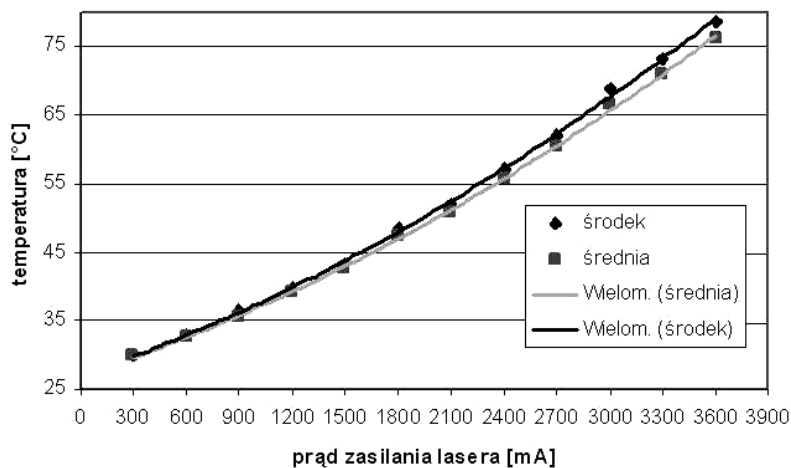




c)

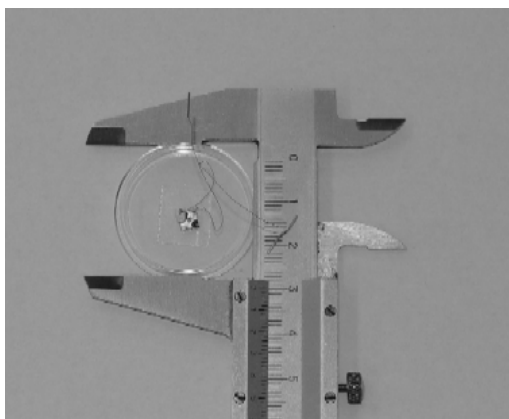
Rys. 5. Rozkład temperatury powierzchni lasera wzdłuż linii znaczonej na rys. 4a, dla trzech wartości natężenia prądu zasilania: a) 300 mA, b) 1800 mA, c) 3600 mA

Na rys. 6. przedstawiono zależność temperatury powierzchni lasera od wartości natężenia prądu zasilania, w punkcie środkowym linii znaczonej na rys. 4. i średniej wartości wszystkich punktów linii.

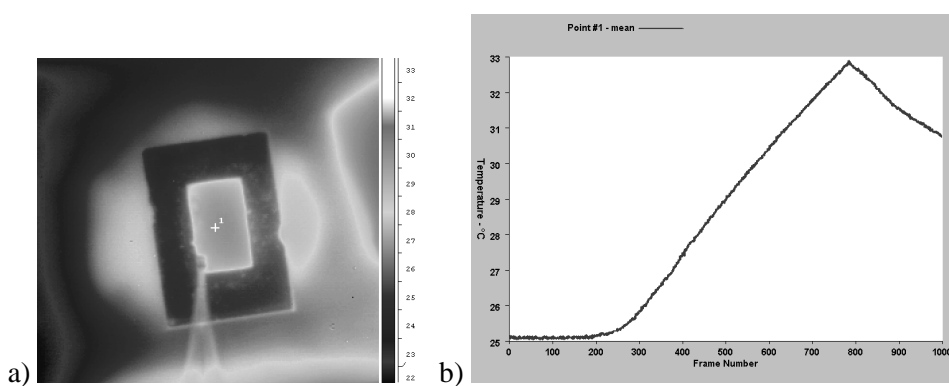


Rys. 6. Zależność temperatury powierzchni lasera od wartości natężenia prądu zasilania

Wykonano również badanie zmian temperatury diody laserowej w zależności od czasu przepływu prądu zasilania. W tym przypadku pomiary wykonywane były na elemencie czynnym lasera nie zamontowanym w obudowie (rys. 7.). Przykładowy termogram oraz profil czasowy w punkcie oznaczonym na termogramie przedstawiono na rys. 8.



Rys. 7. Laser nie zamontowany w obudowie



Rys. 8. Przykładowy termogram (a) oraz profil czasowy w punkcie oznaczonym na termogramie (b)

### 3. Podsumowanie

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że zastosowanie termografii mikroskopowej pozwala na precyzyjne określenie miejsc powstawania ciepła oraz jego przepływu w obszarze badanego elementu. Opisane badania, dotyczące laserów półprzewodnikowych, pozwolą na opracowanie metod utrzymania obszaru aktywnego lasera w optymalnej temperaturze. Lasery półprzewodnikowe pracy ciągłej są przyrządami narażonymi na wydzielanie bardzo dużych ilości ciepła w obszarze aktywnym o bardzo małej objętości. Stanowi to poważny problem, ponieważ wzrost temperatury obszaru aktywnego w istotny sposób pogarsza parametry lasera, do zaniku akcji laserowej włącznie. W związku z tym efektywne odprowadzenie ciepła jest niezbędne do osiągnięcia wysokiej mocy optycznej przy pracy ciągłej, jak i odpowiednio długiego czasu życia lasera.



## **PIŚMIENNICTWO**

1. J. Rybiński, M. Bednarek, A. Jokiel: Stanowisko badawcze do wykrywania i identyfikacji defektów podpowierzchniowych metodą fali cieplnej. „Zeszyty Naukowe SGSP” 2005, nr 32.
2. J. Rybiński, M. Bednarek: Wykrywanie podpowierzchniowych defektów metodą termografii aktywnej. Materiały XXXVIII Zjazdu Fizyków Polskich, Warszawa, 11–16 września 2005.
3. J. Rybiński, M. Bednarek, P. Wiśniewski, T. Świetlik: Zastosowanie termografii w opracowywaniu technologii niebieskich laserów. Materiały Konferencyjne VII Krajowej Konferencji nt. „Termografia i termometria w podczerwieni”, Ustroń-Jaszowiec, 16–18 listopada 2006.

