

Dariusz Kaliński¹

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa

WPŁYW WŁAŚCIWOŚCI KOMPOZYTU CuC_F NA POZIOM NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH W LUTOWANYM UKŁADZIE CuC_F/GaAs

Przedstawione wyniki obliczeń, przeprowadzonych metodą elementów skończonych, obejmują analizę porównawczą stanu naprężeń własnych w lutowanych układach: dioda laserowa (GaAs)/odbiornik ciepła, różniących się między sobą rodzajem zastosowanego na odbiornik ciepła materiału (Cu, CuC_F). Pozwoliło to zweryfikować, z punktu widzenia poziomu i rozkładu naprężeń, zastosowany na odbiornik ciepła materiał kompozytowy CuC_F . Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń można m.in. stwierdzić, że w modelu z kompozytowym odbiornikiem ciepła CuC_F poziom największych naprężeń rozciągających (σ_{MAX}) występujących w GaAs jest o ok. 6 razy mniejszy niż w układzie z konwencjonalnym miedzianym odbiornikiem.

EFFECT OF CuC_F COMPOSITE PROPERTIES ON RESIDUAL STRESSES IN BRAZED CuC_F/GaAs SYSTEM

The paper presents the results of calculations, performed using the finite element method (FEM), which include a comparative analysis of the residual stress state induced in the GaAs laser diode (DL)/heatsink (OC) joint systems (Fig. 1) that differed from one another in the material used for the heatsink (Cu, CuC_F) (Tab. 1). This analysis permitted us to test the materials examined in terms of the level and distribution of the residual stresses developed in the system. The calculation results show, that in the model with the CuC_F composite the maximum level of the tensile stresses generated in GaAs ($\sigma_{\text{MAX}} - S_{\text{MAX}}$) is about 6 times lower ($S_{\text{MAX}} = 3.31$ MPa) than that in the systems with a conventional copper heatsink ($S_{\text{MAX}} = 21.0$ MPa) (Fig. 2 and Tab. 2). We also observe a considerable difference in the level and distribution of the axial stress S_x (Fig. 3). Within the semiconductor device, the values of this stress component are negative (compression). In the copper heatsink system, the magnitude of S_x varies from about -325.0 MPa at the central region of GaAs ($x = 0.0$, $y = 0.01$) to 0.0 MPa at its outer wall ($x = 6.0$, $y = 0.01$) (Fig. 3). In the CuC_F/GaAs system, the stress S_x remains almost constant and ranges from -4.5 to -6.0 MPa (Fig. 3).

For comparison, Fig. 4 shows the principal stress curves S_{MAX} in Cu/GaAs model system, soldering using SnPb40 alloy (Tab. 1, heat load $450 \Rightarrow 293$ K). In this case extreme magnitude of tensile principal stress S_{MAX} in GaAs is about 4.5 times higher ($S_{\text{MAX}} = 15.52$ MPa) than that in the systems with the composite CuC_F heatsink, even jointed AgCu28 braze alloy. This advantageous reduction of the stress level is due, among other factors, to the decreased difference between the values of the thermal expansion coefficient of the CuC_F composite and GaAs ($\Delta\alpha = 0.5 \cdot 10^{-6}$ 1/K) compared to the difference that occurs in a system with a copper heatsink ($\Delta\alpha = 11.3 \cdot 10^{-6}$ 1/K).

WPROWADZENIE

Materiałom służącym do wykonywania odbiorników ciepła dla układów półprzewodnikowych stawiane są szczególnie ostre wymagania. Powinny one charakteryzować się m.in.: dobrym przewodnictwem cieplnym, niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej (zbliżonym do współczynnika rozszerzalności cieplnej materiału półprzewodnikowego) oraz materiał odbiornika powinien umożliwiać jego połączenie z elementem półprzewodnikowym bez wprowadzania znacznych naprężeń. W technologii laserów półprzewodnikowych odbiorniki ciepła wykonywane są przeważnie z miedzi [1]. Charakteryzuje się ona co prawda bardzo dobrym przewodnictwem cieplnym (390 W/mK), ale jednocześnie ma duży współczynnik rozszerzalności cieplnej α ($16,8 \cdot 10^{-6}$ 1/K) i jest pod tym względem niedopasowana do GaAs ($\alpha = 5,5 \cdot 10^{-6}$ 1/K), stanowiącego pod-

stawowy materiał półprzewodnikowy stosowany do wytwarzania laserów. To niedopasowanie współczynników rozszerzalności cieplnych prowadzi w procesach spajania (lutowanie) do generowania się w takich układach naprężeń własnych tzw. termicznych. Naprężenia te mają zasadniczy wpływ na jakość otrzymywanych układów. Lepsze dopasowanie współczynników cieplnej rozszerzalności liniowej uzyskuje się, stosując np. diamentowe odbiorniki ciepła ($\alpha = 1,0 \cdot 10^{-6}$ 1/K) [2]. Rozwiązanie to jest jednak z oczywistych powodów trudne i kosztowne. W przypadku stosowania miedzianych odbiorników ciepła jako środek zaradczy stosuje się jego łączenie z diodą laserową za pomocą indu [3]. Ind ma wprawdzie duży współczynnik α ($30,5 \cdot 10^{-6}$ 1/K), ale jest bardzo plastyczny, co ułatwia relaksację naprężeń. Jednak przewodność cieplna indu jest niska

¹ dr inż.

i wynosi 71 W/mK. Warstwa indu musi być zatem cienka (np. 6 μm). Jest to wprawdzie zgodne z innymi wymaganiami technologicznymi, ale sprzeczne z intencją obniżenia poziomu naprężeń.

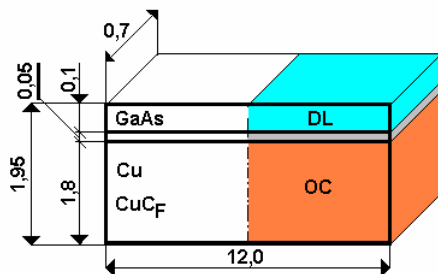
W świetle tego co powiedziano powyżej przyjęto, że interesujące rozwiązanie może przynieść zastosowanie na odbiornik ciepła materiału kompozytowego CuC_F (kompozyt wzmacniany krótkimi dowolnie zorientowanymi włóknami węglowymi - 40% obj. C_F; $\alpha = \text{ok. } 6,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) [4]. Przedstawione w artykule wyniki obliczeń, przeprowadzonych metodą elementów skończonych, obejmują analizę porównawczą stanu naprężeń własnych w lutowanym układzie: dioda laserowa (DL-GaAs)/odbiornik ciepła (OC), w zależności od rodzaju zastosowanego na odbiornik ciepła materiału (Cu, CuC_F).

ANALIZA STANU NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH W LUTOWANYM UKŁADZIE CuC_F (Cu)/GaAs

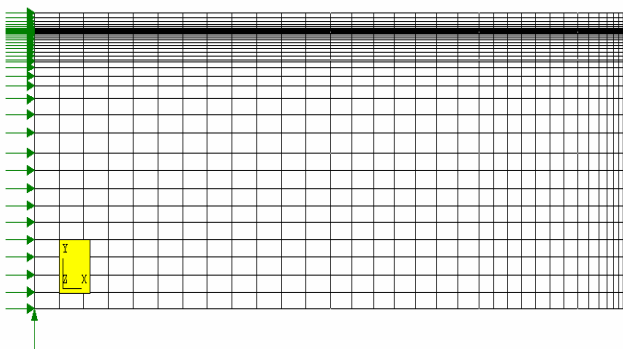
Przedmiot i założenia do obliczeń naprężeń własnych

Przedmiotem analizy numerycznej naprężeń własnych był model układu (rys. 1) odbiornik ciepła (OC)-dioda laserowa (DL) odpowiednio: Cu (OC)/GaAs (DL) i CuC_F (OC)/GaAs (DL).

a)



b)



Rys. 1. Model układu odbiornik ciepła (OC⇒Cu lub CuC_F)/dioda laserowa (DL⇒GaAs) (a) wraz z siatką elementów skończonych (b) przyjęty do analizy numerycznej naprężeń własnych termicznych

Fig. 1. Model of heatsink (OC⇒Cu or CuC_F)/laser diode (DL⇒GaAs) system (a) and finite element mesh (b) used for calculations of thermal residual stresses

Do obliczeń zastosowano numeryczny program metody elementów skończonych FEA LUSAS².

Właściwości materiałów do analizy naprężeń własnych określone przez współczynnik rozszerzalności cieplnej (WRC) α , moduł Younga E, granicę plastyczności Re oraz liczbę Poissona ν przyjęto z literatury (tab. 1). Z wyjątkiem liczby Poissona, którą przyjęto jako stałą niezależnie od temperatury, pozostałe wielkości były zmienne z temperaturą. W przypadku materiału kompozytowego CuC_F, ze względu na brak dokładnych danych odnośnie do zmiany jego współczynnika rozszerzalności cieplnej α , jak i modułu Younga E w analizowanym zakresie temperatur, do obliczeń przyjęto stałe ich wartości (tab. 1). Granicę plastyczności Re kompozytu CuC_F przyjęto o 30% większą od Re czystej miedzi. Analizę numeryczną stanu naprężeń w badanym modelu przeprowadzono przy następujących założeniach: a) materiały w przyjętej analizie wykazują właściwości izotropowe, b) w analizowanych materiałach zachodzą zjawiska w zakresie termo-sprężysto-plastycznym; c) odkształcenia w materiałach są opisywane zależnościami z zakresu liniowej teorii sprężystości i małych odkształceń plastycznych, d) własności materiałów przyjęte w analizie (współczynnik rozszerzalności cieplnej, moduł Younga, granica plastyczności) są liniową lub kwadratową funkcją temperatury, e) zachowanie plastyczne materiału opisano równaniami teorii plastycznego płynięcia, przyjmując warunek plastyczności Hubera-Misesa, f) założono, że nie występuje gradient temperatury w spajanych materiałach.

TABELA 1. Właściwości fizyczne i mechaniczne materiałów (w temperaturze otoczenia) przyjęte do obliczeń numerycznych rozkładu naprężeń własnych

TABLE 1. Materials data of the components (at room temperature) used for calculation of thermal residual stresses

Materiał	WRC α , $\cdot 10^{-6}$ 1/K	E, GPa	Re , MPa	ν
Cu	16,5	131,5	50,0	0,345
Cu-C _F	(5,0÷8,0)	80,8	-	0,289
GaAs	5,5	86,3	-	0,32
AgCu28	17,4	58,082	35,0	0,34
SnPb40	24,0	30,0	18,0	0,40

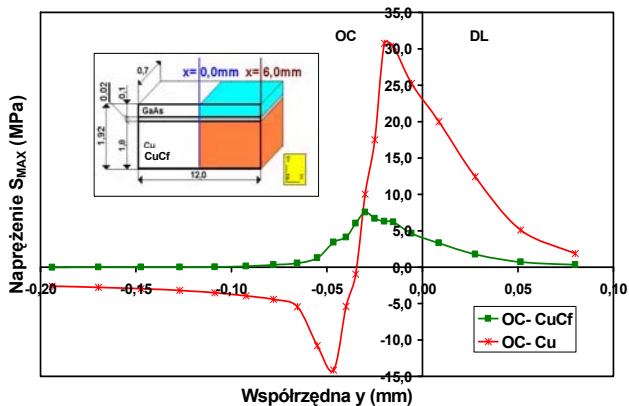
Warunki obciążenia modelu wynikają z procesu jego spajania. Przyjęto więc, że naprężenia własne są generowane w układzie w czasie jego studzenia od temperatury krzepnięcia lutu do temperatury otoczenia (293 K). W celu wyeksponowania znaczenia, jakie ma dla poziomu naprężeń własnych generujących się w spajanym układzie OC-DL rodzaj materiału, z którego jest wykonany odbiornik ciepła (Cu lub CuC_F), prze-

² Obliczenia przeprowadzono w Zakładzie Inżynierii Spajania Politechniki Warszawskiej.

proszono obliczenia naprężeń w układach lutowanych twardym stopem AgCu28. Takie potraktowanie zagadnienia miało wykazać, że zastosowanie na odbiornik ciepła (OC) innego niż miedź materiału, nawet w tak ekstremalnych warunkach (naprężenia generują się od temperatury krzepnięcia spoiwa 1003 K), jest bardzo celowe.

WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH

W wyniku obliczeń numerycznych otrzymano mapy rozkładu naprężeń własnych termicznych oraz liczbowe wartości naprężeń w środkach ciężkości elementów. Program umożliwił otrzymanie wyników dla następujących składowych stanu naprężenia: naprężenie osiowe ($S_Y - \sigma_Y$), naprężenie $S_X - \sigma_X$, naprężenie styczne ($S_{XY} - \tau_{XY}$), naprężenie główne maksymalne ($S_{MAX} - \sigma_{MAX}$), naprężenie główne minimalne ($S_{MIN} - \sigma_{MIN}$). Do analizy porównawczej przyjęto zalecaną dla materiałów kruchych hipotezę wytrzymałościową Mohra, wg której można przyjąć, że o wytrzymałości połączenia decydują największe naprężenia rozciągające występujące w elemencie półprzewodnikowym S_{MAX} .



Rys. 2. Przebiegi zmian naprężenia głównego S_{MAX} w układzie Cu lub $Cu_Cf/AgCu/GaAs$, wzdłuż osi y ($y \in -0,2 \div 0,1$) dla $x = 6,0$

Fig. 2. Residual principle stress S_{MAX} in Cu or $Cu_Cf/AgCu/GaAs$ system, along y -axis ($y \in -0,2 \div 0,1$) for $x = 6,0$

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że maksymalne naprężenie w elemencie półprzewodnikowym (GaAs) S_{MAX} występuje na jego zewnętrznej ścianie ($x = 6,0$) w niewielkiej odległości od linii spajania z miedzianym lub kompozytowym odbiornikiem ciepła. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie przebiegu zmian naprężenia głównego maksymalnego S_{MAX} , a w tabeli 2 ekstremalne jego wartości (w wybranych punktach elementu półprzewodnikowego), w modelach układów: $Cu/AgCu28/GaAs$ i $Cu_Cf/AgCu28/GaAs$. Z rysunku 2, jak i tabeli 2 wynika, że poziom maksymalnego naprężenia S_{MAX} (w miejscu największej koncentracji) w elemencie półprzewodnikowym układu,

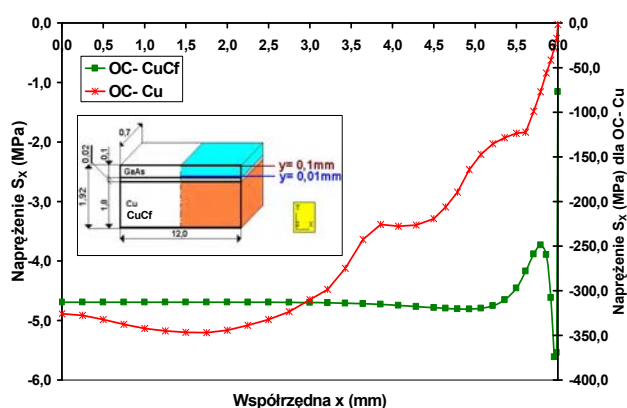
w którym zastosowano na odbiornik ciepła materiał kompozytowy Cu_Cf , jest o ok. 6 razy mniejszy ($S_{MAX} = 3,31$ MPa) niż w układzie z konwencjonalnym miedzianym odbiornikiem ciepła ($S_{MAX} = 20,0$ MPa). W analizowanym obszarze układów OC/DL zbliżonymi wartościami (jak i rozkładem w materiale półprzewodnikowym) charakteryzowało się także naprężenie osiowe S_Y (tab. 2)³, którego wartość wynosiła odpowiednio: 19,99 MPa w układzie $Cu/GaAs$ oraz 3,31 MPa w układzie $Cu_Cf/GaAs$. Znaczne różnice w poziomie i rozkładzie naprężeń obserwuje się także w przypadku naprężenia osiowego S_X , jak i naprężenia głównego minimalnego S_{MIN} (tab. 2). Naprężenia te są ujemne (ściskanie) w elemencie półprzewodnikowym. W układzie z miedzią wartość np. naprężenia S_X zmienia się od ok. $-325,0$ MPa w środkowej części GaAs ($x = 0,0$ mm), w odległości $y = 0,01$ mm do $0,0$ MPa na jego zewnętrznej ścianie (rys. 3). W przypadku układu $Cu_Cf/GaAs$ naprężenie S_X charakteryzuje się niemal stałą wartością, ok. $-4,5 \div -6,0$ MPa (rys. 3).

TABELA 2. Ekstremalne wartości naprężeń własnych termicznych w wybranych punktach GaAs, w modelu układu: Cu lub Cu_Cf (OC)/GaAs, spajany z użyciem stopu AgCu28

TABLE 2. Maximum values of residual stresses calculated, within GaAs of the Cu or Cu_Cf (OC)/GaAs system, joints using AgCu28 alloy

Współrzędne punktu (x,y)	Naprężenie, MPa									
	S_Y		S_{MAX}		S_X		S_{XY}		S_{MIN}	
	OC		OC		OC		OC		OC	
	Cu	Cu_Cf	Cu	Cu_Cf	Cu	Cu_Cf	Cu	Cu_Cf	Cu	Cu_Cf
(0,0;0,01)	-0,60	0,00	-0,44	0,00	-325,74	-4,69	-7,15	0,00	-325,87	-0,02
(0,0;0,1)	0,26	0,00	0,43	0,00	-310,56	-4,66	7,19	0,00	-310,73	-0,02
(6,0;0,01)	19,99	3,31	20,0	3,31	-1,58	-1,15	8,24	3,65	-4,55	3,14
(6,0;0,1)	1,69	0,33	1,87	0,34	0,28	0,16	-0,53	0,33	0,11	-0,03

³ W analizie niezawodności połączeń zamiast naprężeniem S_{MAX} można posługiwać się równoważną mu składową naprężenia osiowego S_Y [5].



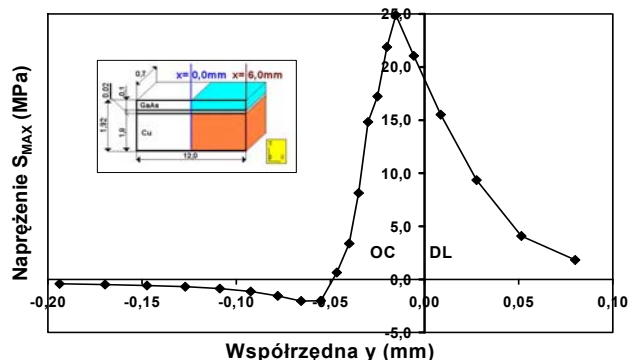
Rys. 3. Przebiegi zmian naprężenia osiowego S_x w układzie Cu lub $CuC_F/AgCu/GaAs$; wzdluz osi x dla $y = 0,01$

Fig. 3. Residual normal stress S_x in Cu or $CuC_F/AgCu/GaAs$ system, along x -axis for $y = 0.01$

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Jak już wcześniej zaznaczono, naprężenia własne - termiczne mają zasadniczy wpływ na jakość (wytrzymałość termomechaniczną i eksploatacyjną) otrzymywanych układów dioda laserowa-odbiornik ciepła. W ekstremalnych przypadkach, bezpośrednio po zakończonym cyklu cieplnym spajania, może dojść do zniszczenia układu na skutek pęknięć występujących w materiale półprzewodnikowym. Z przeprowadzonej analizy naprężeń w lutowanych układach odbiornik ciepła (Cu lub CuC_F)/dioda laserowa (GaAs) wynika, że zastosowanie na odbiornik ciepła materiału kompozytowego CuC_F prowadzi do znacznego obniżenia poziomu naprężeń w porównaniu do układu z konwencjonalnym miedzianym odbiornikiem ciepła. W układzie z kompozytowym odbiornikiem przyjęte do analizy porównawczej naprężenia główne maksymalne S_{MAX} są ok. 6 razy mniejsze ($S_{MAX} = 3,31$ MPa) niż w przypadku miedzianego odbiornika ciepła ($S_{MAX} = 20,0$ MPa). Dla porównania na rysunku 4 przedstawiono poziom i rozkład naprężenia głównego S_{MAX} w układzie Cu/GaAs spajany lutom miękkim SnPb40 (tab. 1, obciążenie termiczne $450 \Rightarrow 293$ K). W tym przypadku naprężenie S_{MAX} osiągnęło maksymalną wartość ok. 15,52 MPa i jest ok. 4,5 razy większe

niż w układzie z kompozytowym odbiornikiem ciepła, nawet spajany lutom twardym AgCu28. Tak korzystne obniżenie poziomu naprężeń jest wynikiem m.in. mniejszego zróżnicowania wartości współczynników rozszerzalności cieplnej kompozytu CuC_F i GaAs ($\Delta\alpha = 0,5 \cdot 10^{-6}$ 1/K) w porównaniu do układu z miedzianym odbiornikiem ciepła ($\Delta\alpha = 11,3 \cdot 10^{-6}$ 1/K).



Rys. 4. Przebieg zmian naprężenia głównego S_{MAX} w układzie Cu/GaAs spajany lutom miękkim SnPb40 wzdluz osi y ($y \in -0,2 \div 0,1$) dla $x = 6,0$

Fig. 4. Residual principle stress S_{MAX} in Cu/GaAs system soldering using SnPb40 alloy along y -axis ($y \in -0.2 \div 0.1$) for $x = 6.0$

LITERATURA

- [1] SDL Inc. (USA), 96/97 Producent Catalog, 59-61.
- [2] Casey Jr H.C., Panish M.B., Heterostructure Lasers, Part B. Materials and Operating Characteristics, Academic Press 1978.
- [3] Beach R. et al., Modular Microchannel Cooled Heatsinks for High Average Power Laser Diode Arrays, IEEE J. Quantum Electron. 1992, 28, 4, 966-976.
- [4] Kaliński D. i in., Analiza termofizycznych właściwości wybranych materiałów kompozytowych, przeznaczonych na odbiorniki ciepła dla mikroelektroniki, IV Seminarium Kompozyty 2000 - teoria i praktyka, Jaszowiec 29-31.03.2000.
- [5] Golański D., Wpływ rozkładu temperatury i kształtu złącza na stan naprężeń własnych w spajanych kołowo symetrycznych elementach ceramiki korundowej ze stalą, Rozprawa doktorska, WPW, Warszawa 1995.

Recenzent
Andrzej P. Wilczyński