

Krzysztof DZIARSKI\*  
Grzegorz WICZYŃSKI\*

## TERMOWIZYJNY POMIAR TEMPERATURY ZŁĄCZA DIODY PÓLPRZEWODNIKOWEJ

W artykule przedstawiono wyniki badań pomiarów temperatury złącza diody półprzewodnikowej zabudowanej w obudowie do montażu powierzchniowego (SOT-23), przy pomocy metody bezkontaktowej. Przedstawiono układ pomiarowy i otrzymane wyniki pomiarów oraz szczegółowe parametry diody użytej do badania. Omówiono zależność wiążącą temperaturę obudowy diody z temperaturą złącza, warunki panujące w trakcie wykonywania eksperymentu, oraz wnioski wynikające z otrzymanych wyników.

SŁOWA KLUCZOWE: termowizja, dioda półprzewodnikowa, metrologia

### 1. WPROWADZENIE

Temperatura złącza należy do najważniejszych parametrów diody półprzewodnikowej. Od tej wartości zależne są warunki jej pracy. Z uwagi na niewielkie rozmiary poprawne wykonanie pomiaru temperatury złącza półprzewodnikowego nie jest proste. Pomiar jest szczególnie utrudniony dla obudów diod przeznaczonych do montażu powierzchniowego (o rozmiarach 1–3 milimetrów). Ze względu na niewielkie wymiary stykowy pomiar temperatury przy pomocy czujnika temperatury przyłożonego do obudowy jest w praktyce nieskuteczny. Jako najważniejsze powody nieskuteczności kontaktowej metody pomiaru należy wymienić trudności z uzyskaniem właściwego połączenia termicznego pomiędzy czujnikiem i powierzchnią obudowy diody oraz wpływ omawianego połączenia na temperaturę diody (a tym samym na temperaturę złącza półprzewodnikowego). Alternatywnym sposobem pomiaru temperatury jest pomiar termowizyjny. Wykonanie pomiaru tą bezstykową metodą, przy odpowiednim skonfigurowaniu kamery termowizyjnej, dostarcza informacji o temperaturze obudowy diody. W praktyce ważniejsza jest informacja na temat temperatury złącza półprzewodnikowego. Z tego powodu podjęto badania eksperymentalne mające na celu określenie zależności pomiędzy wynikiem termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy diody a temperaturą złącza (znajdującego się wewnątrz obudowy tej diody).

---

\* Politechnika Poznańska.

## 2. BADANIE ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY TEMPERATURĄ ZŁĄCZA I OBUDOWY DIODY PÓŁPRZEWODNIKOWEJ

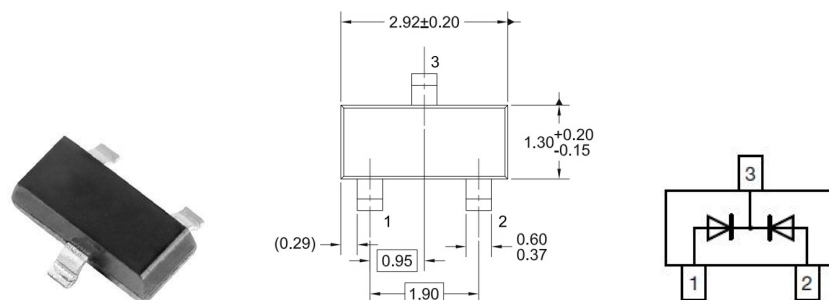
Badanie zależności pomiędzy temperaturą złącza  $\vartheta_j$  i temperaturą obudowy  $\vartheta_C$  wybranej diody półprzewodnikowej przeprowadzono w trzech etapach:

- wybór diody półprzewodnikowej,
- wyznaczenie zależności napięcia przewodzenia  $U_F$  od temperatury złącza  $\vartheta_j$  wybranej diody półprzewodnikowej,
- termowizyjny pomiar temperatur obudowy  $\vartheta_C$  wybranej diody półprzewodnikowej dla znanej temperatury złącza  $\vartheta_j$ .

W trakcie badań dokonano termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy. Przyjmując temperaturę wyznaczoną na podstawie spadku napięcia na złączu jako wartość poprawną, wyznaczono błąd pomiaru temperatury złącza na podstawie termogramu obudowy diody.

### 2.1. Wybór diody półprzewodnikowej

Przystępując do badań założono, że obiektem badań będzie dioda półprzewodnikowa w obudowie do montażu powierzchniowego. Następnie przyjęto, że zastosowanie diody podwójnej (dwa złącza w jednej obudowie) umożliwi jednocześnie zadawanie temperatury jednego złącza (poprzez zadawanie wartości prądu przewodzenia) i wyznaczanie temperatury drugiego złącza (na podstawie napięcia przewodzenia). Ponadto założono, że oba złącza położone są na jednej płytce półprzewodnika lub są umieszczone blisko siebie. Uwzględniając uprzednio sformułowane założenia wybrano diodę BAT 54C w obudowie SOT-23 [5]. Widok i wymiary obudowy oraz układ połączeń wybranej diody pokazano na rys. 1. Wybrano, że złącze dołączone do pinów 2–3 będzie pełniło funkcję grzałki a złącze 1–3 czujnika.



Rys. 1. Widok i wymiary obudowy oraz układ połączeń diody BAT 54C

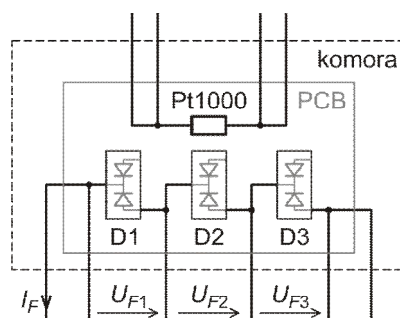
Podstawowe dane katalogowe diody BAT 54C [5]:

- maksymalne napięcie wsteczne: 30 V,
- maksymalny ciągły prąd przewodzenia: 200 mA,
- maksymalna temperatura złącza: 125°C,
- rezystancja termiczna złącze-otoczenia: 500 K/W,
- napięcie przewodzenia dla prądu przewodzenia 0,1 mA: 0,24 V,
- napięcie przewodzenia dla prądu przewodzenia 100 mA: 0,8 V.

W celu przeprowadzenia badań trzy egzemplarze diod BAT 54C umieszczono na płytce PCB.

## 2.2. Wyznaczanie zależności napięcia przewodzenia $U_F$ od temperatury złącza $\vartheta_j$ wybranych diod półprzewodnikowych

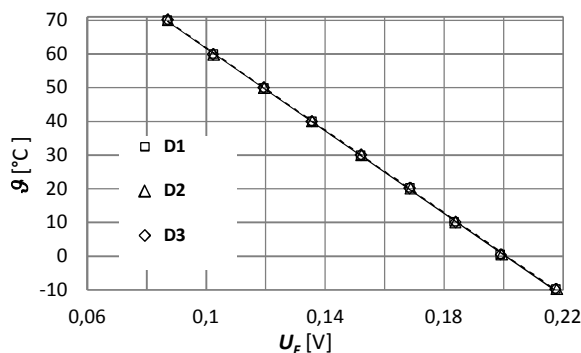
W celu wyznaczenia zależności napięcia przewodzenia od temperatury złącza  $U_F = f(\vartheta_j)$  wybrane diody BAT 54C, umieszczone na jednej płytce PCB, umieszczono w komorze termicznej ILW115TOP [8]. Zastosowana komora umożliwiła zadawanie temperatury w komorze  $\vartheta_A$  od  $-10^\circ\text{C}$  do  $+70^\circ\text{C}$ . Założono, że po odpowiednio długim czasie (dłuższym niż 3 godziny), wszystkie elementy, diody i płytka PCB oraz czujnik Pt1000, osiągną jednakową temperaturę (czyli  $\vartheta_j \cong \vartheta_A$ ). Bieżącą temperaturę  $\vartheta_A$  w komorze określano na podstawie temperatury płytki PCB (czyli na podstawie rezystancji czujnika Pt1000 w obudowie SMD 1206). Napięcia  $U_{F1}$ – $U_{F3}$  diod D1–D3 wyznaczono dla prądu przewodzenia  $I_F = 0,1$  mA. Uproszczony schemat połączeń badanych diod D1–D3 i czujnika Pt1000 przedstawiono na rys. 2. Do pomiaru rezystancji Pt1000 zastosowano omomierz w konfiguracji czteroprzewodowej.



Rys. 2. Uproszczony schemat połączeń badanych diod D1–D3 i czujnika Pt1000 umieszczonych w komorze klimatycznej

Proces wyznaczenia zależności  $U_F = f(\vartheta_j)$  polegał na umieszczeniu płytki PCB z obsadzonymi diodami D1–D3 i czujnikiem Pt1000 w komorze klimatycznej i zadawaniu wartości temperatury  $\vartheta_A$ . Omomierz do pomiaru rezystancji

Pt1000, woltomierze do pomiaru napięć  $U_{F1}$ – $U_{F3}$  oraz źródło prądu  $I_F$  umieszczono poza komorą klimatyczną. Wyniki pomiarów z naniesionymi krzywymi aproksymującymi zamieszczono na rys. 3.



Rys. 3. Wyznaczone zależności  $U_F = f(T_j)$  dla diod D1–D3 i  $I_F = 0,1$  mA

Ze względu na bezwładność cieplną i wynikającą z tego czasochłonność zadano dziewięć wartości. Na potrzeby wyznaczania temperatury złącza, zależność  $T_j = f(U_F)$  aproksymowano funkcją liniową  $T_j = a \cdot U_F + b$ . Za pomocą regresji liniowej obliczono współczynniki równań, oddzielnie dla poszczególnych diod. Obliczone wartości współczynników przedstawiono w tabeli 1.

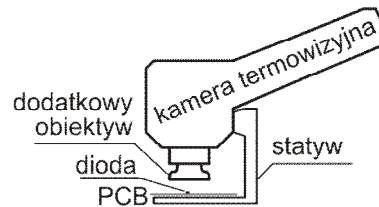
Tabela 1. Zestawienie współczynników równań aproksymujących zależność  $T_j = f(U_F)$

Lp.	dioda	a [°C/V]	b [°C]
1	D1	-613,81	123,16
2	D2	-612,25	123,10
3	D3	-613,10	123,07

### 2.3. Termowizyjny pomiar temperatury obudowy $T_C$ wybranej diody półprzewodnikowej dla znanych temperatur złącza $T_j$

Badanie zależności pomiędzy wynikiem termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy  $T_C$  a temperaturą złącza  $T_j$  diody półprzewodnikowej przeprowadzono na stanowisku o uproszczonej strukturze pokazanej na rys. 4.

Stanowisko złożono z następujących zasadniczych elementów: kamera termowizyjna Flir E50 z dodatkowym obiektywem Close-up 2×, statywu pozycjonującego kamerę, diod BAT 54C zabudowanych na płytce PCB, zestawu zasilaczy i mierników. Zastosowanie dodatkowego wąskokątnego obiektywu o oznaczeniu typu T197214 wynikało z niewielkich rozmiarów obserwowanych diod SMD.



Rys. 4. Struktura stanowiska do badania zależności pomiędzy wynikiem termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy  $\vartheta_C$  a temperaturą złącza  $\vartheta_j$ ; na rysunku pominięto tekturowy cylinder osłaniający obserwowaną diodę

Jednak tak skonfigurowana optyka kamery termowizyjnej charakteryzuje się małą głębią ostrości. A to skutkuje trudnościami w uzyskaniu obrazu o akceptowalnej ostrości. Z tego powodu niezbędne było precyzyjne pozycjonowanie odległość pomiędzy obiektywem a obserwowanym obiektem. W trakcie badań odległość pomiędzy zewnętrzną krawędzią obiektywu i obiektem wynosiła ok. 2,3 cm. Nawet niewielka zmiana odległości (mniejsza niż 1 mm) powodowała znaczący spadek ostrości obrazu. Dlatego do pozycjonowania kamery zastosowano statyw ze śrubą mikrometryczną. Ze względu na małą głębię ostrości niemożliwe było uzyskanie ostrości wszystkich elementów widocznych na termogramie. Konieczność starannego pozycjonowania kamery była znacznym utrudnieniem podczas wykonywania pomiarów termowizyjnych i rejestracji termogramów. W trakcie obserwacji termowizyjnych stwierdzono występowanie odbić promieniowania pochodzącego z spoza stanowiska. Dlatego obiektyw i obserwowany element osłonięto cylindrem wykonanym z czarnej tektury.

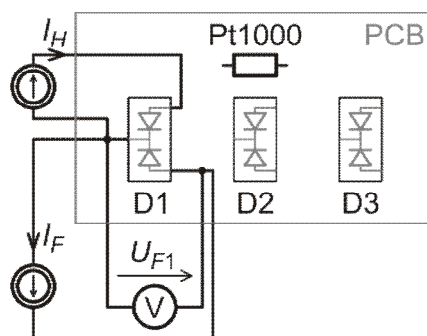
Podstawowe dane katalogowe kamery Flir E50 [7]:

- pole widzenia (FOV):  $25^\circ \times 19^\circ$ ,
- minimalna ogniskowa: 0,4 m,
- wartość F: 1.3,
- zakres widmowy: 7,5–13  $\mu\text{m}$ ,
- zakres temperatur:  $-20^\circ\text{C}$  do  $+120^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$  do  $+650^\circ\text{C}$ ,
- dokładność:  $\pm 2^\circ\text{C}$  lub  $\pm 2\%$  odczytu.

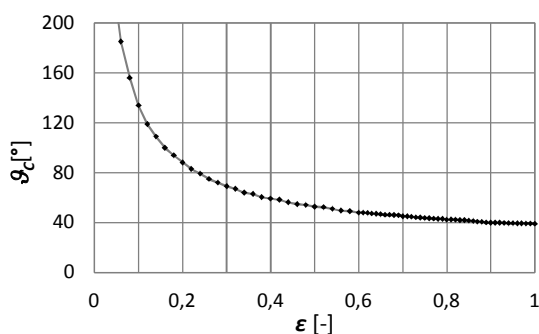
W trakcie pomiarów termowizyjnych wykorzystywano oba złącza obserwowanej diody. Do złącza 2–3, pełniącego funkcję grzałki, dołączono źródło prądu  $I_H$  zadawanego od 0 do 150 mA. Z kolei złącze 1–3 pełniło funkcję czujnika temperatury zasilanego prądem  $I_F = 0,1$  mA. Układ połączeń z obserwowaną diodą zamieszczono na rys. 5.

Specyfika pomiarów termowizyjnych narzuca warunek prawidłowego doboru wartości współczynnika emisyjności  $\varepsilon$  obserwowanej powierzchni. Niespełnienie tego warunku może skutkować dodatkowym błędem o wartości znacznie większej od wartości błędu podstawowego. Zależność wyniku termowizyjnego

pomiaru temperatury  $\vartheta_c$  obudowy diody od współczynnika  $\varepsilon$ , wyznaczoną dla diody D1, przedstawiono na rys. 6.



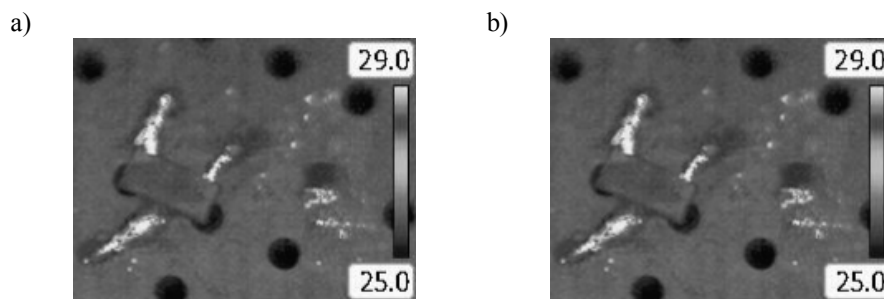
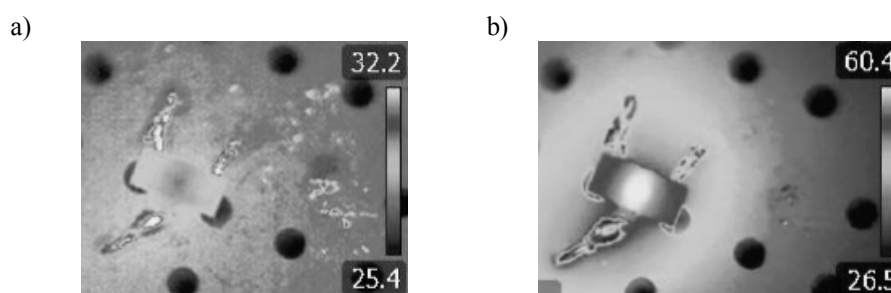
Rys. 5. Schemat układu zasilająco-pomiarowego diodę w trakcie obserwacji termowizyjnej



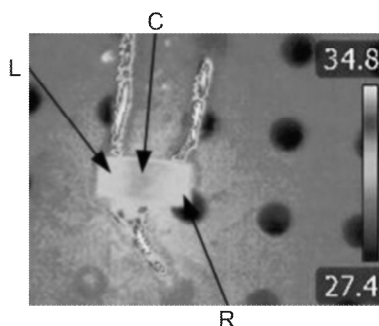
Rys. 6. Zależność  $\vartheta_c=f(\varepsilon)$  dla stałej temperatury złącza  $\vartheta_j=\text{const}$  diody D1

Zależność z rys. 6 dowodzi, jak ważny, ze względu na dodatkowy błąd pomiaru, jest dobór wartości współczynnika emisyjności. W trakcie badań zależności  $\vartheta_c=f(\vartheta_j)$  zadawano stałą wartość współczynnika  $\varepsilon = 0,98$ . Temperatura złącza  $\vartheta_j$  zależy m.in. od temperatury otoczenia i wydzielanej w nim mocy. Pomiar napięcia przewodzenia  $U_F$  wymaga przepływu prądu  $I_F$  (czemu towarzyszy wydzielanie mocy w złączu). Na rys. 7 pokazano termogramy diody dla dwóch wartości prądu  $I_F$ : 0 i 0,1 mA.

Termogramy z rys. 7 wykazują, że przepływ prądu  $I_F = 0,1$  mA nie wywołuje zauważalnego przyrostu temperatury obudowy. Dlatego uznano, że wpływ przepływu prądu  $I_F$  o przyjętej wartości przez złącze pełniące funkcję czujnika na temperaturę diody jest pomijalny. Z kolei przepływ prądu  $I_H$  przez złącze pełniące funkcję grzałki powoduje przyrost temperatury obudowy. Jest to spowodowane zadawaniem dużo większych wartości prądu  $I_H$  od wartości prądu  $I_F$ . Na rys. 8 zamieszczono termogramy diody dla dwóch wartości prądu  $I_H$ .

Rys. 7. Przykładowe termogramy diody dla: a)  $I_F = 0$ ; b)  $I_F = 0,1$  mARys. 8. Przykładowe termogramy diody dla: a)  $I_H = 25$  mA; b)  $I_H = 150$  mA

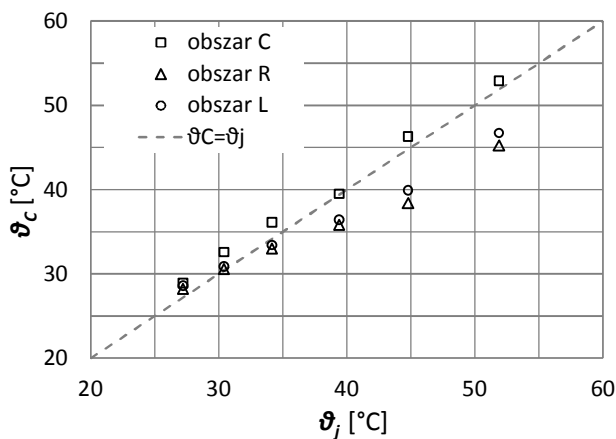
Termogramy z rys. 8 potwierdzają, że za pomocą prądu  $I_H$  możliwe jest wymagane nagrzewanie diody. Zarazem widoczne jest nierównomierne nagrzewanie obudowy. W centralnej części wartość temperatury jest najwyższa, w skrajnych częściach najniższa. Można na tej podstawie domniemywać, że płytka półprzewodnika ze złączami znajduje się w środkowej części obudowy. Zaobserwowana nierównomierność wymusza uwzględnienie położenia punktu obserwacji termowizyjnej względem obudowy. Dlatego na potrzeby badań podzielono obserwowaną powierzchnię diody na trzy części. Na rys. 9 pokazano przyjęty podział.

Rys. 9. Przykładowy termogramy diody dla  $I_H = 25$  mA ze wskazaniem obszarów: L, C i R

Uwzględniając obszary z rys. 9 wynik termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy w obszarze C oznaczono  $\vartheta_{CC}$ , a w obszarach L i R oznaczono odpowiednio  $\vartheta_{CL}$  i  $\vartheta_{CR}$ . Z tego termogramu można wywnioskować, że  $\vartheta_{CL} \cong \vartheta_{CR}$  oraz  $\vartheta_{CC} > \vartheta_{CL}$ . Ze względu na stwierdzone zróżnicowanie temperatur na obserwowanej powierzchni diody badanie zależności  $\vartheta_C = f(\vartheta_j)$  przeprowadzono z uwzględnieniem podziału na obszary L, C i R.

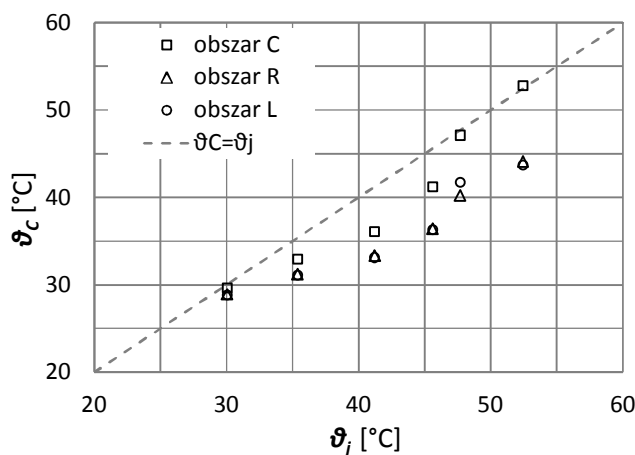
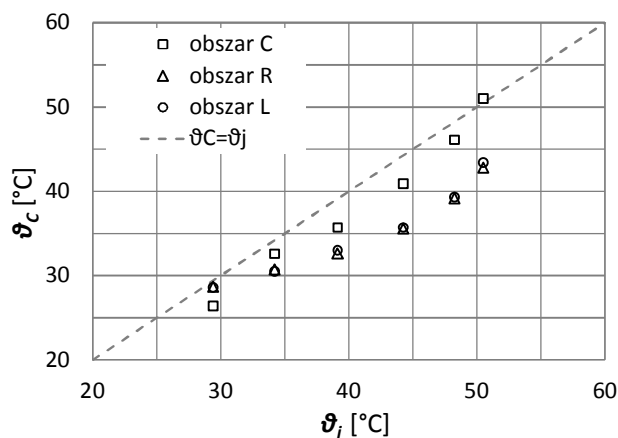
### 3. ZALEŻNOŚĆ POMIĘDZY WYNIKAMI TERMOWIZYJNEGO POMIARU TEMPERATURY OBUDOWY $\vartheta_C$ A TEMPERATURĄ ZŁĄCZA $\vartheta_j$ DIODY PÓLPRZEWODNIKOWEJ

W celu oceny wiarygodności termowizyjnego pomiaru temperatury złącza diody półprzewodnikowej wykonano pomiary na uprzednio opisanym stanowisku. Całe stanowisko umieszczono w temperaturze pokojowej. Tym samym najniższa temperatura obudowy  $\vartheta_C$  i złącza  $\vartheta_j$  diody była równa temperaturze panującej w laboratorium. Za pomocą prądu  $I_H$  nagrzewano obserwowaną diodę. Temperatura diody zależała od temperatury otoczenia, mocy wydzielanej w diodzie i jej rezystancji termicznej. Wyniki badań przedstawiono w postaci zależności temperatury obudowy  $\vartheta_C$  (z uwzględnieniem wskazanych obszarów L, C i R) od temperatury złącza  $\vartheta_j$  dla  $\varepsilon = 0,98$ . Wykresy zależności  $\vartheta_C = f(\vartheta_j)$  z naniesioną prostą  $\vartheta_C = \vartheta_j$  dla poszczególnych diod pokazano na rys. 10–12.



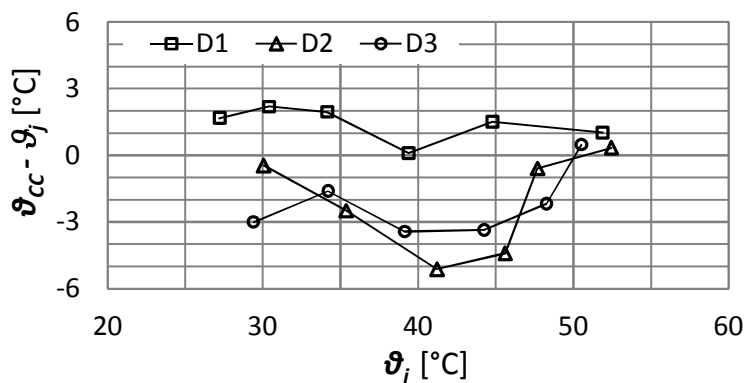
Rys. 10. Wyznaczona zależność  $\vartheta_C = f(\vartheta_j)$  dla diody D1



Rys. 11. Wyznaczona zależność  $\vartheta_c = f(\vartheta_j)$  dla diody D2Rys. 12. Wyznaczona zależność  $\vartheta_c = f(\vartheta_j)$  dla diody D3

Analizując wykresy z rys. 10–12 łatwo dostrzec, że do temperatury złącza  $\vartheta_j$  najbardziej zbliżone są wyniki pomiarów w obszarze C. Dla lepszego zobrazowania zbliżenia wyników pomiarów wyznaczono zależność  $(\vartheta_{CC} - \vartheta_j) = f(\vartheta_j)$  dla poszczególnych diod pokazaną na rys. 13.

Bezwzględny błąd pomiaru  $\vartheta_{CC} - \vartheta_j$  z rys. 13 nie przekracza wartości  $\pm 6^\circ\text{C}$ . Wartość tego błędu jest podstawą oceny wiarygodności pomiaru temperatury złącza diody półprzewodnikowej na podstawie termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy. Czy stwierdzona wartość błędu jest akceptowalna? Trudno o uniwersalną odpowiedź. Wydaje się jednak, że jest wystarczająco mała w typowej diagnostyce układów elektronicznych.



Rys. 13. Zależność  $(\vartheta_{cc} - \vartheta_j) = f(\vartheta_j)$  dla diod D1–D3 dla wyników pomiarów z rys. 10–12

#### 4. PODSUMOWANIE

Pomiar bezkontaktowy to najprostszy sposób określenia temperatury złącza diody półprzewodnikowej. Ze względu na brak bezpośredniego dostępu do złącza pomiarowi podlega temperatura obudowy. Do bezkontaktowego pomiaru temperatury obudowy można zastosować kamerę termowizyjną. Pozornie proste w wykonaniu pomiary termowizyjną posiadają swoją specyfikę. Jest to szczególnie istotne w pomiarach elementów elektronicznych w obudowach do montażu powierzchniowego.

W pracy podjęto próbę oceny wiarygodności pomiaru temperatury złącza diody półprzewodnikowej na podstawie termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy diody BAT 54C w obudowie SOT–23. Ocenę wiarygodności przeprowadzono na podstawie wyników badań laboratoryjnych przedstawionych w postaci zależności temperatury obudowy  $\vartheta_C$  od temperatury złącza  $\vartheta_j$ . Prezentację zasadniczych wyników badań poprzedzono omówieniem wyboru diody półprzewodnikowej, wyznaczania zależności napięcia przewodzenia  $U_F$  od temperatury złącza  $\vartheta_j$  oraz sposobu termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy  $\vartheta_C$ .

Czy termowizyjny pomiar temperatury złącza diody półprzewodnikowej jest wiarygodny? Odpowiadając na to pytanie należy także odpowiedzieć na pytanie: czy prawidłowo określono warunki pracy kamery termowizyjnej? W szczególności dotyczy to doboru współczynnika emisyjności  $\vartheta$  i oddziaływania otoczenia przejawiającego się w odbiciach. Jeżeli tak, to w typowych zastosowaniach diagnostycznych można uznać, że termowizyjny pomiar temperatury złącza diody półprzewodnikowej jest wiarygodny.

### LITERATURA

- [1] Hauser Jacek, Elektrotechnika podstawy elektrotermii i techniki świetlnej, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [2] Cysewska– Sobusiak Anna, Podstawy metrologii i inżynierii pomiarowej, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.
- [3] Praca zbiorowa, Pomiary termowizyjne w praktyce, Agenda wydawnicza PAKu, Warszawa 2004.
- [4] Rudowski Grzegorz, Termowizja i jej zastosowanie, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1978.
- [5] Karat katalogowa BAT54C, <http://www.vishay.com/docs/85508/bat54.pdf>, dostęp 9.02.2017.
- [6] Instrukcja obsługi Inkubator Laboratoryjny ILW TOP, ver. 1.0, Pol–Eko– Aparatura, sp. j.
- [7] Instrukcja kamery E50 prod. Flir, <http://www.kameryir.com.pl>, dostęp 9.02.2017.

### THERMOVISION MEASUREMENT OF SEMICONDUCTOR DIODE JUNCTION TEMPERATURE

Junction temperature is one of the most important parameters of semiconductor diode. Diode operation depends on this temperature, however its correct measurement is difficult because of small size of the object. Measurements are especially complex for SMT (*Surface Mount Technology*) diodes of size 1 to 3 mm. Application of a contact temperature sensor is inefficient. Thus, an alternative way is the noncontact thermovision measurement which can give information on temperature of the diode case. However, in practice information about diode semiconductor junction is more significant. Experimental studies of the relation between a result of diode case thermovision measurement and temperature of junction inside the case have been undertaken. BAT54C diode with two junctions in the same case for SMT was used. One junction was temperature sensor while another one operated as heater. It was found that the temperature difference was not higher than 9°C what allows us to conclude that thermovision measurement of diode junction temperature may be useful in diagnostic testing of electronic circuits.

*(Received: 10. 02. 2017, revised: 17. 02. 2017)*