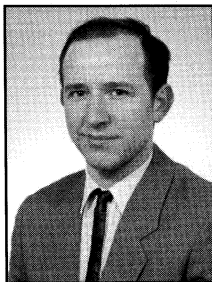


Krzysztof GÓRECKI, Janusz ZARĘBSKI
 AKADEMIA MORSKA W GDYNI, WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
 KATEDRA RADIOELEKTRONIKI MORSKIEJ

Pomiary rezystancji termicznej tranzystorów mocy z wykorzystaniem metod pirometrycznych

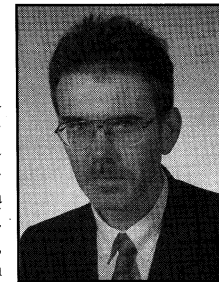
Dr inż. Krzysztof GÓRECKI

Adiunkt w Katedrze Radioelektroniki Morskiej Akademii Morskiej w Gdyni. Tytuł zawodowy magistra inżyniera elektronika o specjalności mikroelektronika uzyskał w 1990 r., a stopień naukowy doktora nauk technicznych o specjalności elementy i układy elektroniczne uzyskał w 1999. Jego zainteresowania naukowe dotyczą badania wzajemnych oddziaływań elektrotermicznych w elementach półprzewodnikowych i w układach elektronicznych.



Dr hab. inż. Janusz ZARĘBSKI
 Prof. Akademii Morskiej

Kierownik Katedry Radioelektroniki Morskiej Akademii Morskiej w Gdyni. Tytuł zawodowy magistra inżyniera elektronika o specjalności aparatura elektroniczna uzyskał w 1978 r., stopień naukowy doktora nauk technicznych o specjalności układy elektroniczne - w 1987 r., natomiast stopień naukowy doktora habilitowanego w dyscyplinie elektronika - w 1997 r. Jego zainteresowania naukowe dotyczą modelowania, analizy i pomiarów elementów półprzewodnikowych i układów elektronicznych z uwzględnieniem efektów termicznych.



Streszczenie

Praca dotyczy pomiarów rezystancji termicznej wybranych tranzystorów mocy przy wykorzystaniu metod pirometrycznych. Zamieszczono szereg wyników pomiarów tego parametru w funkcji mocy wydzielanej w elemencie, uzyskanych przy zastosowaniu różnych radiatorów, obudów i orientacji przestrzennej badanych tranzystorów. Zbadano również nierównomierność przestrzennego rozkładu temperatury w badanej strukturze.

Abstract

In this paper the problem of measurements of the thermal resistance (R_{th}) of the selected power transistors with the use of the pirometric method is considered. The measuremental results R_{th} of bipolar transistors 2N3055 and MOS transistors IRF840 for the dissipated power changing as well as for the various kinds of device cases and the heat-sinks geometry are presented. For the uncapsulated devices the temperature distribution on the chip has been estimated.

1. Wprowadzenie

Tranzystory mocy stanowią podstawowe elementy składowe układów energoelektronicznych. Jednym z czynników, który w istotny sposób wpływa na charakterystyki i parametry oraz na niezawodność tych elementów jest temperatura.

Temperatura wnętrza elementu półprzewodnikowego lub układu scalonego może różnić się w istotny sposób od temperatury otoczenia na skutek zjawiska samonagrzewania oraz wzajemnych sprzężeń termicznych między elementami umieszczonymi w jednej strukturze półprzewodnikowej lub na wspólnym radiatorze. Zjawisko samonagrzewania spowodowane jest przez zamianę na ciepło energii elektrycznej wydzielanej w elemencie i przez nieidealne chłodzenie tego elementu.

Przy wydzielaniu w badanym elemencie mocy o znacznej wartości istnieje niebezpieczeństwo przekroczenia przez temperaturę wnętrza elementu T_j katalogowej wartości temperatury dopuszczalnej, co z kolei może prowadzić do uszkodzenia elementu. A zatem istotnym problemem jest oszacowanie wartości temperatury wnętrza elementu na podstawie znanego przebiegu wydzielanej w nim mocy. Często do obliczania tej temperatury wykorzystuje się skupiony model termiczny [4], w którym występują dwa parametry termiczne - rezystancja termiczna R_{th} , charakteryzującą zdolność do odprowadzania ciepła wydzielonego w elemencie w stanie ustalonym oraz przejściowa impedancja termiczna $Z(t)$ dla stanów przejściowych. Rezystancja termiczna jest definiowana jako iloraz nadwyżki temperatury wnętrza elementu ponad temperaturę pewnego punktu odniesienia T_0 (typowo temperatury otoczenia lub obudowy) przez moc P wydzielaną w tym elemencie.

Wyznaczanie wartości rezystancji termicznej elementu półprzewodnikowego na podstawie definicji wymaga m.in. pomiaru temperatury jego wnętrza. Wartość tej temperatury można wyznaczyć przy wykorzystaniu pośredniej metody elektrycznej na podstawie pomiaru wartości parametru termoczułego oraz wyznaczonej uprzednio krzywej kalibracji [1, 2, 3, 4, 5] lub przy wykorzystaniu metod pirometrycznych, czyli detekcji promieniowania podczerwonego emitowanego przez badaną strukturę [1, 6]. Drugi sposób postępowania umożliwia jednocześnie określenie nierównomierności rozkładu temperatury wewnątrz elementu, podczas gdy w pierwszym przypadku uzyskuje się informację tylko o jednej uśrednionej wartości temperatury. Stosowanie pośrednich metod elektrycznych jest wygodne i w wielu przypadkach daje zadowalające rezultaty, co wykazano m.in. w pracach [4, 5].

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów rezystancji termicznej oraz przestrzennego rozkładu temperatury unipolarnego i bipolarnego tranzystora mocy, uzyskane przy zastosowaniu metod pirometrycznych. Przedstawione wyniki badań stanowią uzupełnienie pomiarów rozkładów temperatury w strukturze monolitycznego tranzystora Darlingтона mocy [6].

Zbadano wpływ warunków chłodzenia oraz zasilania tranzystorów mocy na rozkład temperatury na powierzchni ich struktur. Do badań wykorzystano tranzystory mocy 2N3055 oraz IRF840 w obudowach TO-3 i TO-66. Aby umożliwić detekcję promieniowania podczerwonego, emitowanego przez struktury półprzewodnikowe badanych tranzystorów, w każdym z nich usunięto górną część obudowy.

W kolejnych rozdziałach opisano zasadę realizacji pomiarów termowizyjnych oraz zaprezentowano wyniki badań wymienionych typów tranzystorów mocy przy różnych warunkach zasilania oraz chłodzenia tych elementów.

2. Realizacja bezstykowych pomiarów temperatury

Klasyczne przyrządy do pomiaru temperatury (termometry, termoelementy, termistory itp.) wymagają bezpośredniego kontaktu z powierzchnią badanego obiektu. Przyrządy te mierzą zatem temperaturę na podstawie wymiany ciepła z badanym ośrodkiem, głównie na drodze przewodnictwa i konwekcji. Ten sposób pomiaru powoduje zmianę warunków odprowadzania ciepła z badanego obiektu, co może być przyczyną błędów pomiaru. Problem ten został wyeliminowany przez zastosowanie pirometrów i termografów, wykorzystywanych do zdalnych i bezstykowych pomiarów temperatury [7].

Zarówno pirometry jak i termografy optyczne działają na zasadzie detekcji promieniowania podczerwonego i różnią się jedynie

systemem zobrazowania informacji, tzn. wynikiem pomiaru przy użyciu pirometru jest uśredniona wartość temperatury określonego obszaru badanej powierzchni (typowo o średnicy 1-3 mm), natomiast termograf umożliwia uzyskanie informacji o przestrzennym rozkładzie temperatury badanego obiektu w postaci barwnego rysunku lub zestawu liczb, reprezentujących temperatury w poszczególnych punktach badanej powierzchni. Zarówno termografy, jak i pirometry są urządzeniami biernymi, przetwarzającymi energię promieniowania podczerwonego emitowanego przez badany obiekt na sygnał elektryczny, nie pobudzając go żadnym promieniowaniem. Ponieważ są to urządzenia cyfrowe, umożliwiają one odczyt wartości temperatury w dowolnym punkcie termogramu. Prezentacja wyniku pomiaru w postaci obrazu stanowi złożenie wyników pomiarów pirometrycznych dla wszystkich punktów [12].

Zasada działania urządzenia termograficznego została przedstawiona m.in. w pracach [1, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Urządzenia te działają na zasadzie pomiaru energii promieniowania elektromagnetycznego, najczęściej w zakresie podczerwieni, emitowanego przez każdy obiekt o temperaturze wyższej od zera bezwzględnej. Energia ta rośnie wraz ze wzrostem temperatury obiektu, a zatem pomiar temperatury można zrealizować poprzez pomiar energii promieniowania.

Z prawa Stefana-Boltzmana wynika, iż całkowita energia emitowana w jednostce czasu w postaci promieniowania cieplnego przez powierzchnię ciała doskonale czarnego jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej.

Na wynik pomiarów pirometrycznych ma również wpływ emisyjność badanej powierzchni. Jest ona definiowana jako stosunek energii wypromieniowanej przez obiekt w określonej temperaturze do energii wyemitowanej przez idealne źródło promieniowania, albo ciało doskonale czarne, w tej samej temperaturze. Emisyjność ciała doskonale czarnego wynosi 1. Wszystkie rzeczywiste obiekty są ciałami szarymi, których emisyjność zawierają się w przedziale od 0 do 1. Wartość tego parametru zależy m.in. od chropowatości powierzchni oraz jej barwy.

W badaniach stanowiących przedmiot niniejszej pracy wykorzystano dwa przyrządy do bezstykowego pomiaru temperatury: kamerę termograficzną serii V-20 z przystawką MACRO [13, 14] oraz system termowizyjny Thermovision 900 [8]. Wartości najważniejszych parametrów obu urządzeń przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane parametry wykorzystywanych termografów

Parametr	V-20	Thermovision 900
Zakres mierzonych temperatur	-10 +200°C	-10 +500°C
Rozmiar obrazu	240 linii x 240 punktów	128 linii x 140 punktów
Niepewność pomiaru	±5°C	±1%

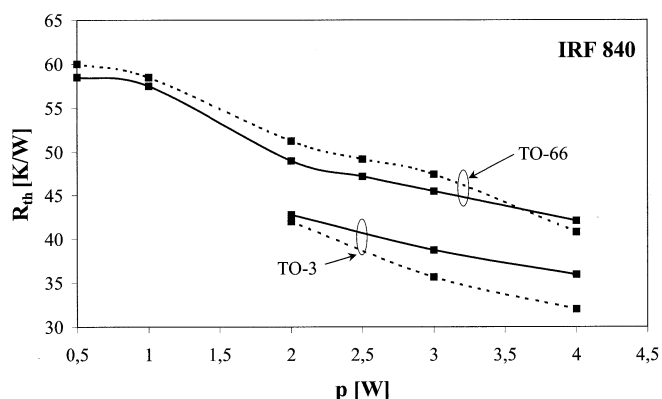
3. Wyniki pomiarów

Wykonano pomiary termograficzne dla dwóch tranzystorów polowych VDMOS typu IRF840 w obudowach TO-66 i TO-3 (różniących się wymiarami geometrycznymi) oraz tranzystora bipolarnego 2N3055 w obudowie TO-3, umieszczonymi na radiatorach o różnych powierzchniach lub bez radiatorów. Zmierzono rozkłady temperatur na powierzchni badanych struktur półprzewodnikowych, obudów oraz radiatorów. Na podstawie analizy termogramów wyznaczono zależność rezystancji termicznej między złączem a otoczeniem R_{thj-a} , między obudową a radiatorem R_{thc-r} oraz między radiatorem a otoczeniem R_{thr-a} od mocy wydzielanej w badanym elemencie, wielkości obudowy lub radiatora oraz przestrzennego ułożenia elementu lub radiatora. Przy wyznaczaniu wartości R_{thj-a} wykorzystywano w charakterze temperatury wnętrza elementu maksymalną

temperaturę struktury półprzewodnikowej. Dodatkowo określono nierównomierność rozkładu temperatury w strukturze półprzewodnikowej oraz w całym elemencie łącznie z radiatorem.

W celu zapewnienia jednakowej emisyjności całego badanego obiektu, zarówno tranzystor, jak i radiator zostały pokryte czarną matową farbą, a dodatkowo, w celu uzyskania dostępu do struktury krzemowej badanych tranzystorów, usunięto górną część obudów metalowych (TO-66 i TO-3). Badania przeprowadzono w stanie termicznie ustalonym, który dla elementów bez radiatora występował w badanych strukturach po upływie kilku minut, natomiast dla elementów umieszczonych na radiatorze - po upływie nawet kilkudziesięciu minut od chwili załączenia zasilania badanego elementu.

Na rys. 1 przedstawiono wyniki pomiarów rezystancji termicznej złącze-otoczenie tranzystorów IRF840 w obudowach TO-66 oraz TO-3 bez radiatora w funkcji wydzielanej w nich mocy. Na rysunku tym oraz na pozostałych rysunkach zamieszczonych w niniejszej pracy linią ciągłą oznaczono wyniki pomiarów uzyskanych dla tranzystora ustawionego poziomo, natomiast linią kreskową - wyniki dla tranzystora ustawionego pionowo.



Rys. 1. Zależność rezystancji termicznej od mocy dla tranzystorów IRF840 bez radiatora.

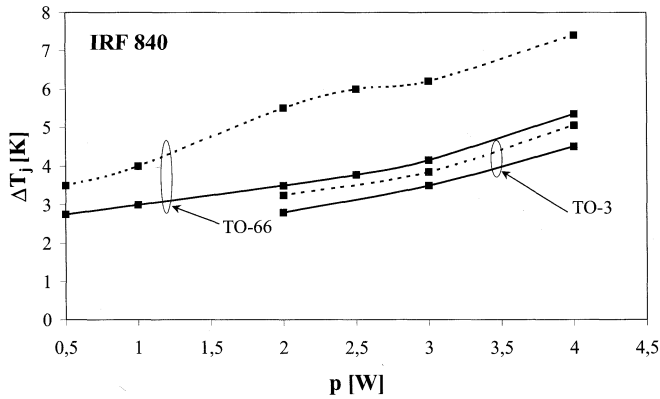
Jak widać, dla obu badanych tranzystorów rezystancja termiczna maleje wraz ze wzrostem mocy, przy czym dla tranzystora w obudowie TO-66 zmiany wartości tego parametru przy zmianach mocy wydzielanej w tym elemencie w zakresie od 0,5 W do 4 W dochodzą do aż 50%. Z kolei tranzystor w obudowie TO-3 charakteryzuje się mniejszą, nawet o około 30%, wartością tego parametru niż tranzystor tego samego typu w obudowie TO-66. W przypadku tranzystora w obudowie TO-3, rezystancja termiczna tranzystora ustawionego poziomo jest o kilkanaście procent większa niż dla tego samego tranzystora ustawionego pionowo. W przypadku tranzystora w obudowie TO-66, wpływ orientacji przestrzennej tego elementu na wynik pomiaru R_{th} jest mniej widoczny niż dla tranzystora w obudowie TO-3, a różnice wartości tego parametru nie przekraczają 10%.

Dla obudowy TO-66 zbadano także wpływ sposobu wydzielania mocy w tranzystorze IRF840 na jego rezystancję termiczną. W tym celu wydzielano moc równą 3 W przy pracy tranzystora w zakresie nasycenia oraz w połączeniu diodowym (dla napięcia $u_{GS}=0$ oraz $u_{DS}<0$). W obu przypadkach uzyskano wartość rezystancji termicznej równą około 50 K/W, co dowodzi, że dla rozważanego elementu o wartości tego parametru decyduje tylko wartość mocy, a nie sposób jej realizacji.

Na rys. 2 przedstawiono zależność maksymalnej różnicy temperatur na powierzchni struktury półprzewodnikowej badanych tranzystorów w funkcji wydzielanej w nich mocy.

Jak wynika z wykonanych pomiarów, wraz ze wzrostem mocy wydzielanej w tranzystorze, rosną różnice temperatur występujących na powierzchni elementu. Różnice te rosną wraz ze wzrostem mocy, natomiast nie zmieniają się w istotny sposób przy zmianie położenia elementu oraz osiągają większe wartości dla mniejszej spośród

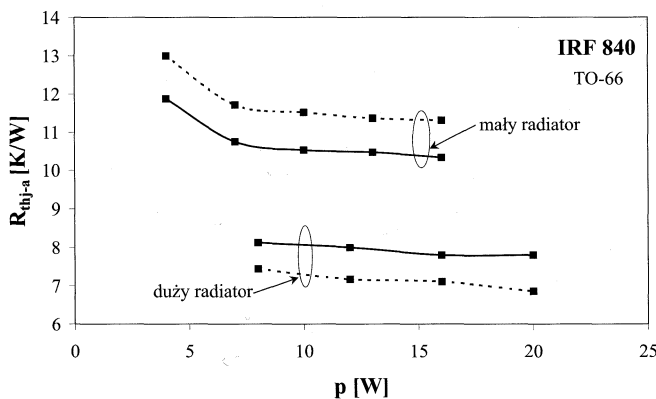
badanych obudów (TO-66). Wyniki przedstawione na rys. 2 potwierdzają, iż podobnie jak dla tranzystora Darlingtona [6], różnice temperatur na powierzchni struktury półprzewodnikowej bez radiatora są niewielkie i nie przekraczają kilku kelwinów. Także różnice wartości rezystancji termicznej tranzystora IRF840 pomiędzy ustawieniem poziomym i pionowym są niewielkie, co wynika z małej powierzchni tranzystora, na której zachodzi konwekcja ciepła do otoczenia oraz z małej gęstości mocy wydzielanej w strukturze.



Rys. 2. Zależność maksymalnych różnic temperatury na powierzchni struktury tranzystora IRF840 bez radiatora w funkcji mocy

W celu określenia wpływu wielkości radiatora oraz jego orientacji przestrzennej na rezystancję termiczną elementu półprzewodnikowego, przeprowadzono pomiary rozkładu temperatury na powierzchni tranzystora IRF840 w obudowie TO-66, umieszczonego na radiatorach wykonanych z kształtki A-4240 o długości 60 mm (nazywanego dalej dużym radiatorem) oraz o długości 18 mm (nazywanego dalej małym radiatorem).

Na rys. 3 przedstawiono zależność rezystancji termicznej rozważanego tranzystora zamontowanego na opisanych radiatorach w funkcji wydzielanej w nim mocy.



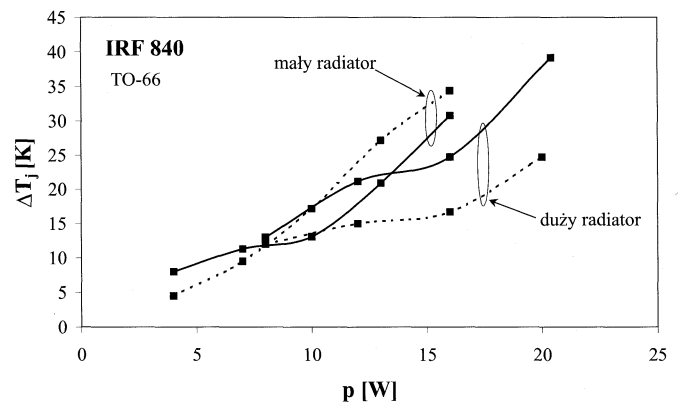
Rys. 3. Zależność rezystancji termicznej od mocy dla tranzystora IRF840 z radiatorem

Jak widać, dla obu wykorzystywanych radiatorów uzyskano malejącą zależność $R_{th}(p)$, przy czym w rozważanym zakresie zmian mocy wydzielanej w tranzystorze, rezystancja termiczna tranzystora zamontowanego na małym radiatorze zmienia się aż o kilkanaście procent, podczas gdy dla tranzystora na dużym radiatorze - tylko o kilka procent. Zauważalny jest także wpływ ustawienia radiatora na wynik pomiaru rezystancji termicznej. Dla tranzystora na dużym radiatorze ustawionym pionowo, wartości R_{th} są o około 10% mniejsze niż dla tego samego radiatora ustawionego poziomo. Odwrotną relację między wynikami pomiarów dla różnych ustawień radiatora zaobserwowano dla tranzystora zamontowanego na małym

radiatorze, a różnica wartości rezystancji termicznych dla wybranej wartości mocy dochodzi do 10%. Porównując wyniki pomiarów uzyskane przy zastosowaniu obu radiatorów widać, że przy ustawieniu poziomym uzyskano 25-cio procentową różnicę między wartościami R_{th} uzyskanymi dla tranzystora zamontowanego na tych radiatorach, a przy ustawieniu pionowym różnica ta wynosi aż 45%.

Zbadano także rezystancję termiczną tranzystora IRF840 w obudowie TO-3, umieszczonego na dużym radiatorze ustawionym poziomo. W rozważanym przypadku uzyskano wzrost wartości R_{th} o ponad 10% przy wzroście mocy wydzielanej w tranzystorze z 3 do 8 W.

Na rys. 4 przedstawiono zależność maksymalnej różnicy temperatur na powierzchni struktury krzemowej tranzystora IRF840 w obudowie TO-66 zamontowanego na obu opisanych powyżej radiatorach. Jak widać, nierównomierność rozkładu temperatury w strukturze półprzewodnikowej rośnie wraz ze wzrostem wydzielanej mocy, dochodząc nawet do 40 K, przy czym dla poziomego ustawienia radiatora różnice temperatur na strukturze są o kilka kelwinów większe niż dla ustawienia pionowego.

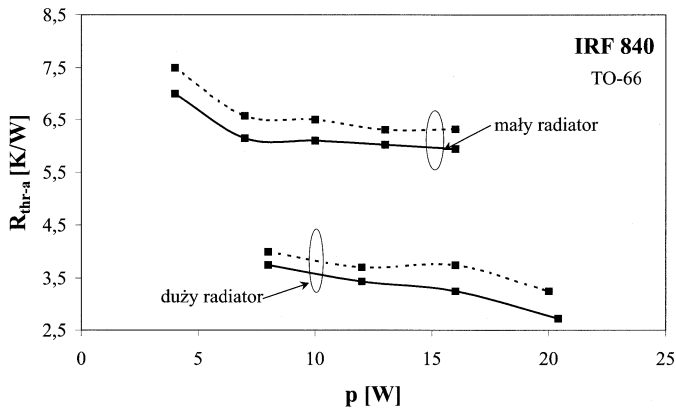


Rys. 4. Zależność maksymalnych różnic temperatury na powierzchni struktury tranzystora IRF840 z radiatorem w funkcji mocy

Z termogramów, nie zamieszczonych w niniejszej pracy wynika, że na obu radiatorach w stanie ustalonym występuje praktycznie równomierny rozkład temperatury, a zatem można mówić o jednej temperaturze radiatora, której wartość wzrasta wraz ze wzrostem mocy wydzielanej w tranzystorze. Na rys. 5 przedstawiono zależność rezystancji termicznej radiator-otoczenie R_{th-a} . Jak widać rezystancja ta maleje w funkcji mocy wydzielanej w tranzystorze zamocowanym na tym radiatorze, co spowodowane jest wzrostem skuteczności konwekcji. Na rys. 5 widoczny jest także wpływ ustawienia radiatora na wartość R_{th-a} , a wynikające stąd różnice wartości tego parametru dochodzą do kilku procent.

Wykonano także pomiary termowizyjne dwóch tranzystorów bipolarnych typu 2N3055 umieszczonych na radiatorze wykonanym z kształtki aluminiowej A-4129 o długości 142 mm. Radiator ten w czasie pomiarów ustawiony był poziomo. Obudowa jednego tranzystora wykonana jest z aluminium, natomiast drugiego z miedzi pokrytej chromem lub niklem. W obu tranzystorach wydzielono moc równą 32 W.

Jak wynika z przeprowadzonych pomiarów, temperatura wnętrza tranzystora z obudową aluminiową dochodzi do 230°C, podczas gdy dla obudowy miedzianej - zaledwie do 135°C. Oznacza to, że rezystancje termiczne R_{th-a} wynoszą odpowiednio około 6,6 K/W oraz 3,6 K/W. Także nierównomierność rozkładu temperatury struktury półprzewodnikowej jest znacznie większa dla tranzystora z obudową aluminiową, gdzie różnice temperatur na powierzchni struktury dochodzą do 100 K, podczas gdy dla obudowy miedzianej nie przekraczają 50 K.



Rys. 5. Zależność rezystancji termicznej radiator-otoczenie od mocy dla tranzystora IRF840 z radiatorem

Z kolei, w celu zilustrowania wpływu emisyjności na wynik pomiaru temperatury wnętrza elementu półprzewodnikowego, w tranzystorze 2N3055 wydzielono moc równą 6 W i zmierzono jego temperaturę wnętrza za pomocą pośredniej metody elektrycznej [3] oraz temperaturę jego obudowy z wykorzystaniem kamery termograficznej V-20. Pomiaru wykonano dla niepoczernionej obudowy fabrycznej oraz dla obudowy poczernionej. W pierwszym przypadku uzyskano z pomiarów pośrednich wartość temperatury wnętrza $T_j=460$ K oraz z pomiarów pirometrycznych temperaturę obudowy $T_c=384$ K, natomiast w drugim przypadku temperatury te wynoszą odpowiednio $T_j=447$ K oraz $T_c=444$ K. Stąd rezystancja termiczna złącze-otoczenie R_{th-ja} dla tranzystora niepoczernionego wynosi 27,2 K/W, a dla tranzystora poczernionego 21,1 K/W. Zgodnie z danymi katalogowymi [15] dla tranzystora 2N3055 rezystancja termiczna złącze-obudowa $R_{th-jc}=1,5$ K/W. A zatem w rozważanych przypadkach wynik pomiaru temperatury uzyskany metodą pirometryczną powinien być o około 9 K niższy od wyniku uzyskanego metodą elektryczną. Wynika stąd, że pomiary wykonane metodą elektryczną i pirometryczną dają zbliżone wyniki tylko dla poczernionej obudowy badanego elementu. Z kolei, poczernienie obudowy badanego tranzystora spowodowało spadek wartości jego rezystancji termicznej, nawet o 20% w relacji do rezystancji termicznej tego samego elementu z obudową niepoczernioną. Z drugiej strony błąd określenia emisyjności dla obudowy niepoczernionej spowodował zaniżenie, wyznaczonej metodą pirometryczną, wartości nadwyżki temperatury obudowy ponad temperaturę otoczenia o około 50%.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań parametrów termicznych unipolarnych oraz bipolarnych tranzystorów mocy uzyskane za pomocą metod pirometrycznych, a także przeprowadzono ocenę nierównomierności rozkładu temperatury na powierzchni tych elementów pracujących zarówno bez radiatora, jak i zamontowanych na radiatorach. Jak widać z przedstawionych w pracy wyników pomiarów, zakres pracy tranzystora IRF840 nie wpływa na jego rezystancję termiczną, która dla określonego mocowania elementu jest silną malejącą funkcją mocy. Sposób zasilania elementu wpływa natomiast na zmianę lokalizacji najcieplejszego punktu w strukturze półprzewodnikowej. W przypadku tranzystorów pracujących bez radiatora, rozkład temperatury na powierzchni struktury jest praktycznie równomierny i słabo zależy od orientacji przestrzennej obudowy. Różnice wartości rezystancji termicznej przy ustawieniu pionowym i poziomym obudowy nie przekraczają 10%. Z kolei dla tranzystora IRF840 umieszczonego w obudowie TO-66 uzyskano wartość R_{th-ja} o około 25% większą niż dla tranzystora tego samego typu umieszczonego w obudowie TO-3 oraz bardziej nierównomierny rozkład temperatury w strukturze półprzewodnikowej.

W przypadku tranzystora zamontowanego na radiatorze o rezystancji termicznej decyduje wielkość radiatora oraz jego orientacja przestrzenna, przy czym dla dużego radiatora skuteczniejsze chłodzenie elementu zapewnia pionowe ustawienie radiatora, a dla małego radiatora - poziome.

Z pomiarów tranzystora 2N3055 w obudowach wykonanych z różnych materiałów wynika, że dla tego samego typu elementu, przy zastosowaniu identycznego radiatora i punktu pracy można uzyskać wartości rezystancji termicznej, różniące się między sobą nawet o ponad 40%.

Przy wykonywaniu pomiarów pirometrycznych należy zwrócić szczególną uwagę na problem emisyjności badanej powierzchni, która zgodnie z przykładem przedstawionym w rozdziale trzecim, może powodować błąd pomiaru nawet na poziomie 50%.

5. Podziękowania

Autorzy serdecznie dziękują panu dr Piotrowi Dumani z Instytutu Technologii Elektronowej w Warszawie za udostępnienie nieobudowanych struktur tranzystorów IRF840.

Literatura

- [1] A. Nowakowski: Badanie procesów termicznych w przyrządach półprzewodnikowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektronika, Zeszyt LX, Gdańsk, 1985.
- [2] J. Kołodziejki, L. Spiralski, E. Stolarski: Pomiary przyrządów półprzewodnikowych. Warszawa, WKŁ, 1990.
- [3] K. Górecki, J. Zarębski: System mikrokomputerowy do pomiaru parametrów termicznych elementów półprzewodnikowych i układów scalonych. Metrologia i Systemy Pomiarowe, Nr 4, 2001, s. 379.
- [4] J. Zarębski: Modelowanie, symulacja i pomiary przebiegów elektrotermicznych w elementach półprzewodnikowych i układach elektronicznych. Prace Naukowe WSM w Gdyni, Gdynia, 1996.
- [5] K. Górecki: Elektrotermiczny makromodel tranzystora Darlingtona do analizy układów elektronicznych. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, 1999.
- [6] K. Górecki, J. Zarębski: Pomiary rozkładu temperatury na powierzchni struktury tranzystorów Darlingtona mocy. Elektronizacja, Not-Sigma, Warszawa, nr 12, 2000, s. 13.
- [7] G. Rudowski: Termowizja i jej zastosowanie, WKiŁ, Warszawa, 1978.
- [8] Thermovision 900 Series, Users' Manual, Agema Infrared Systems.
- [9] T. Suchenia, M. Szczerkowski: Badanie wpływu mocowania wybranych elementów półprzewodnikowych na ich rezystancję termiczną. Praca dyplomowa inżynierska, Wydział Elektryczny, Akademia Morska w Gdyni, 2002.
- [10] W. Minkinia, P. Rutkowski, W. Wild: Podstawy pomiarów termowizyjnych. Część I – Istota termowizji i historia jej rozwoju. PAK, Nr 1, 2000, s. 7.
- [11] W. Minkinia, P. Rutkowski, W. Wild: Podstawy pomiarów termowizyjnych. Część II – Współczesne rozwiązania systemów termowizyjnych, błędy pomiaru. PAK, Nr 1, 2000, s. 11.
- [12] A. Nowakowski i inni: Postępy termografii – aplikacje medyczne, Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001.
- [13] Instrukcja obsługi kamery termograficznej serii V-20, Vigo-System, Warszawa 2001.
- [14] M. Rzeczkowski: Bezkontaktowe pomiary temperatury. Kamera termograficzna V-20. PAK, Nr 4, 2002, s. 23.
- [15] Low frequency transistors, Low frequency power transistors. Semiconductors and integrated circuits, M.B.L.E. Electronics, Part 2, 1974.