

doi:10.15199/48.2015.04.31

Zależność parametrów modelu przejściowej impedancji termicznej tranzystora MOS mocy od konstrukcji układu chłodzenia

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, ilustrujących wpływ takich czynników jak wielkość pól lutowniczych, powierzchnia miedzi na płycie drukowanej oraz zastosowanie wodnego systemu chłodzenia na parametry modelu przejściowej impedancji termicznej $Z_{th}(t)$ tranzystora MOS mocy. Pomiary $Z_{th}(t)$ wykonano pośrednią metodą elektryczną, a wartości parametrów jej modelu wyznaczono przy wykorzystaniu autorskiego algorytmu. W oparciu o uzyskane wyniki badań wskazano zależność między konstrukcją układu chłodzenia a parametrami modelu cieplnego tego elementu.

Abstract. The paper presents the results of experimental studies that illustrate the influence of the selected factors, i.e. the size of soldering pads, the PCB copper area as well as the use of aqueous cooling system on the transient thermal impedance model parameters of MOSFET. Measurements of thermal parameters were performed using the indirect electrical method. Parameters of the transient thermal impedance model were calculated using the estimation procedure elaborated by the authors. The obtained results show an influence of the system cooling parameters on the thermal model parameters of the semiconductor device. (**Dependence of parameters of the transient thermal impedance model of power MOSFET on the construction of the cooling system**)

Słowa kluczowe: zjawiska termiczne, przejściowa impedancja termiczna, skupiony model termiczny.

Keywords: thermal phenomena, transient thermal impedance, compact thermal model.

Wprowadzenie

Jednym z istotnych zjawisk zachodzących w przyrządach półprzewodnikowych jest zjawisko samonagrzewania [1-5], skutkujące wzrostem temperatury wnętrza T_j tych przyrządów powyżej temperatury otoczenia. Wzrost ten jest spowodowany zamianą energii elektrycznej wydzielanej w tych przyrządach na ciepło przy nieidealnych warunkach chłodzenia. Wzrost temperatury wnętrza przyrządu półprzewodnikowego wynikający ze zjawiska samonagrzewania może w istotny sposób wpływać na jego charakterystyki i parametry [1, 2, 3] oraz niezawodność [6-10]. W celu ograniczenia wartości przyrostu temperatury wnętrza przyrządu półprzewodnikowego ponad temperaturę otoczenia, stosowane są odpowiednie systemy chłodzące [11 – 13]. Oprócz klasycznych systemów chłodzenia swobodnego, wykorzystuje się również systemy chłodzenia wymuszonego, obejmujące systemy chłodzenia mikrokanalowego [14], chłodzenie termoelektryczne [15] raz chłodzenie wodne [16]. Wzrost gęstości mocy wydzielanej w nowoczesnych strukturach półprzewodnikowych powoduje często konieczność wykorzystywania niekonwencjonalnych systemów chłodzenia, np. radiatorów mikrokanalowych [17, 18].

Przekazywanie ciepła z wnętrza przyrządu półprzewodnikowego do otoczenia jest realizowane z wykorzystaniem trzech podstawowych mechanizmów transportu tj.: przewodzenia, konwekcji oraz promieniowania [19]. Skuteczność wymienionych mechanizmów zależy między innymi od temperatury wnętrza przyrządu oraz nadwyżki temperatury obudowy przyrządu powyżej temperatury otoczenia. Dodatkowo, jak pokazano w pracach [20, 21], transport ciepła ze struktury półprzewodnikowej do otoczenia realizowany jest wielodrogowo. W związku z tym, należy oczekiwać, że efektywność wymiany ciepła między wnętrzem przyrządu a otoczeniem będzie zależeć od wartości mocy cieplnej wydzielanej w przyrządzie oraz od sposobu montażu i chłodzenia tego przyrządu.

Parametrami termicznymi charakteryzującymi transport ciepła z wnętrza przyrządu półprzewodnikowego do otoczenia są przejściowa impedancja termiczna $Z_{th}(t)$ oraz rezystancja termiczna R_{th} . Pierwszy parametr opisuje właściwości termiczne przyrządu w stanach przejściowych,

natomiast drugi – w stanie ustalonym. Przejściowa impedancja termiczna $Z_{th}(t)$ modelowana jest przy wykorzystaniu klasycznej zależności o postaci [1, 3, 4, 22]:

$$(1) \quad Z_{th}(t) = R_{th} \cdot \left[1 - \sum_{i=1}^N a_i \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{thi}}\right) \right]$$

gdzie τ_{thi} oznacza i -tą termiczną stałą czasową, a_i – współczynnik wagowy związany z tą stałą czasową, zaś N jest liczbą termicznych stałych czasowych.

Konstruktorzy obudów elementów półprzewodnikowych opracowują nowe konstrukcje, zapewniające małą wartość rezystancji termicznej między wnętrzem elementu a jego obudową [21]. Jednak ten składnik rezystancji termicznej nie jest typowo dominującą składową rezystancji termicznej między wnętrzem elementu a otoczeniem. Dlatego przy projektowaniu systemu chłodzenia elementu półprzewodnikowego należy uwzględnić wszystkie zewnętrzne elementy toru przepływu ciepła. Jak opisano m. in. w pracach [22-28], czasowy przebieg przejściowej impedancji termicznej zależy między innymi od mocy cieplnej wydzielanej w przyrządzie półprzewodnikowym, sposobu jego zamontowania oraz temperatury otoczenia. Ponadto, jak wykazano w pracach [22, 23, 29], właściwości termiczne przyrządu zależą również od długości jego wyprowadzeń oraz wielkości pól lutowniczych.

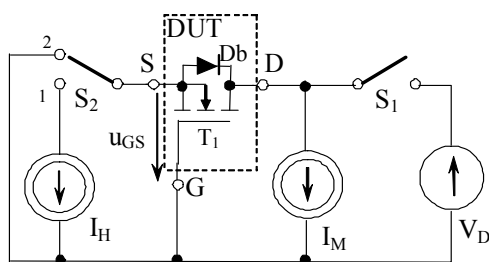
Z drugiej strony, komputerowa analiza układu elektronicznego wymaga zastosowania modeli elementów występujących w tym układzie, przy czym wiarygodność uzyskanych wyników zależy od dokładności użytych modeli. W analizach właściwości termicznych przyrządu półprzewodnikowego stosowany jest typowo skupiony model termiczny. Wartości parametrów takiego modelu, opisanego wzorem (1), zależą m.in. od konstrukcji układu chłodzenia oraz punktu pracy rozważanego elementu [20, 24, 28, 29].

W pracy [29] przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz zaproponowano zależności analityczne opisujące wpływ wybranych czynników na wartości rezystancji termicznej przyrządu półprzewodnikowego. Ponadto, w pracach [2, 28, 30] wykazano, że kształt czasowych przebiegów przejściowej

impedancji termicznej przyrządu półprzewodnikowego zależy od mocy cieplnej wydzielanej w tym przyrządzie. Niestety, wyniki badań prezentowane w cytowanych pracach odnoszą się do różnych przyrządów półprzewodnikowych i różnych systemów chłodzenia. Dlatego celowe było przeprowadzenie systematycznych badań wpływu wybranych czynników na przebieg przejściowej impedancji termicznej i wartości parametrów skupionego modelu termicznego dla jednego elementu półprzewodnikowego pracującego w różnych warunkach chłodzenia. W pracy [31] przeanalizowano wpływ warunków chłodzenia na przejściową impedancję termiczną elementu umieszczonego w obudowie SMD. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań tranzystora MOS mocy typu IRF540, zawartego w obudowie typu TO-220 przeznaczonej do montażu przewlekane.

Układ pomiarowy

Przejściową impedancję termiczną badanego tranzystora wyznaczono przy wykorzystaniu pośredniej metody elektrycznej, opisanej szczegółowo w pracy [30]. W metodzie tej mierzona jest krzywa chłodzenia badanego tranzystora [26], a parametrem termoczułym jest napięcie na spolaryzowanej w kierunku przewodzenia diodzie podłożowej. Jak wynika z pomiarów wykonanych przez autorów, charakterystyka ta dla badanego tranzystora, przy prądzie przewodzenia równym 1 mA, jest liniowa w zakresie od 25 do 110°C. Pomiary zrealizowano przy wykorzystaniu układu pomiarowego, którego schemat przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Układ do pomiaru przejściowej impedancji termicznej tranzystora MOS mocy

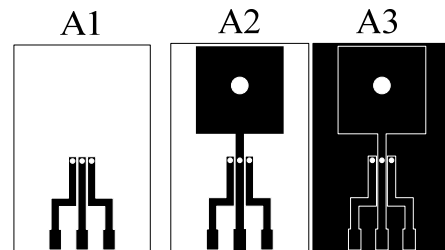
W prezentowanym układzie pomiarowym źródło prądowe I_M wymusza przepływ prądu pomiarowego przez diodę podłożową Db zawartą w badanym tranzystorze DUT. Źródło napięciowe V_D oraz źródło prądowe I_H decydują o wartości mocy wydzielanej w czasie grzania badanego tranzystora. Przełączniki S_1 oraz S_2 zrealizowano za pomocą tranzystorów MOS mocy sterowanych z komputera PC. Położenie tych przełączników zmienia się w poszczególnych etapach pomiaru. W czasie kalibracji i w czasie chłodzenia przełącznik S_1 jest otwarty, a przełącznik S_2 znajduje się w pozycji 2. W czasie grzania, przełącznik S_1 jest zwarty, a przełącznik S_2 znajduje się w pozycji 1. Wartości napięć i prądów badanego tranzystora są rejestrowane za pomocą 16-bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego firmy Measurement Computing typu USB-1608GX-2AO. Przetwornik ten umożliwia rejestrowanie wyników pomiarów z krokiem równym 2 μs .

Badane systemy chłodzenia

Za pomocą układu pomiarowego, przedstawionego w rozdziale 2, wykonano pomiary przejściowej impedancji termicznej rozważanego tranzystora MOS mocy przy różnej konstrukcji systemów jego chłodzenia.

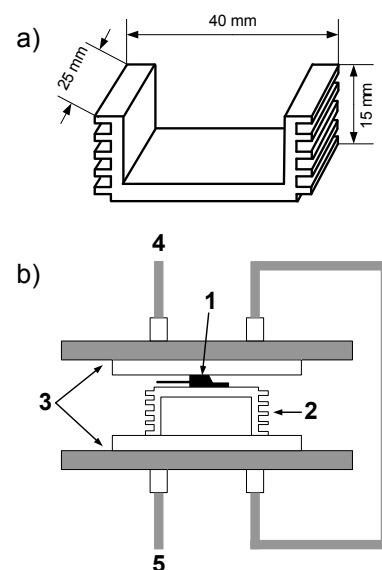
Pierwsza grupa pomiarów dotyczy tranzystora zamocowanego na jednej z płytek drukowanych, których

mozaikę pokazano na rys. 2. Na rysunku tym czarny kolor oznacza obszar pokryty warstwą miedzi. Wymiary wszystkich płytek wynoszą 51 x 33 mm. Jak widać, płytka A1 zawiera miedź tylko w obszarze pól lutowniczych i ścieżek przewodzących, zaś płytki A2 oraz A3 – dodatkowo zawierają obszary miedziane pełniące rolę elementów wspomagających odprowadzanie ciepła. Tranzystor był zamocowany prostopadle do płaszczyzny laminatu. Dla porównania, wykonano również badania dla tranzystora przylutowanego bezpośrednio do przewodów (bez płytki drukowanej). Ten wariant montażu oznaczono akronimem A0.



Rys.2. Mozaiki płytek drukowanych wykorzystywanych w badaniach

Druga grupa pomiarów dotyczy tego samego tranzystora zamocowanego na aluminiowym radiatorze, którego widok wraz z wymiarami pokazano na rys. 3a. Tranzystor wraz z radiatorem umieszczono pomiędzy dwoma cieczowymi wymiennikami ciepła typu EK-Sumpreme ATX firmy EK Water Blocks w sposób pokazany na rys. 3b. Na tym rysunku: 1 oznacza badany tranzystor, 2 – radiator, 3 – wymienniki ciepła, natomiast 4 i 5 – odpowiednio wlot i wylot cieczy chłodzącej.



Rys.3. Zwymiarowany widok radiatora (a) oraz widok cieczowego systemu chłodzącego (b)

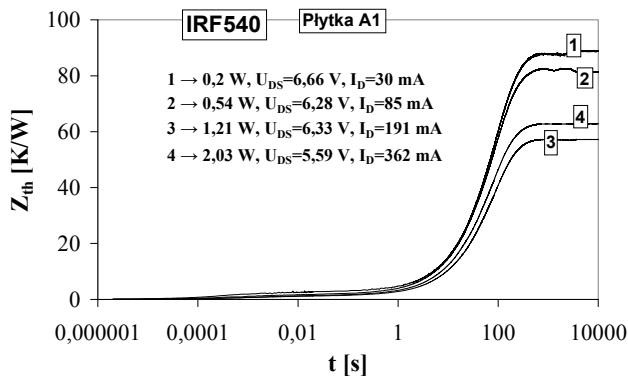
W układzie chłodzącym zastosowano następujące komponenty: ciecz chłodząca EK-Ekoolant, miedziana chłodnica Nexxos XT145 wraz z czterema wentylatorami 120mm oraz pompą Aquastream XT firmy Aquacomputer.

Wyniki pomiarów

Na rys. 4 zilustrowano wpływ mocy wydzielanej w badanym tranzystorze umieszczonym na płytce A1 na przebieg jego przejściowej impedancji termicznej, a w Tabeli 1 zebrano wartości parametrów modelu $Z_{th}(t)$ dla 3

wybranych wartości mocy wydzielanej w tym tranzystorze. Wartości te wyznaczono przy wykorzystaniu programu ESTYM opisanego przez autorów w pracach [24, 30].

Jak można zauważyć, wartość rezystancji termicznej jest malejącą funkcją wydzielanej mocy i przyjmuje wartości z zakresu od około 60 do 90 K/W. Liczba termicznych stałych czasowych nie zależy od wartości wydzielanej mocy i wynosi 5. Wartości termicznych stałych czasowych przyjmują wartości z zakresu od 40 μ s do blisko 170 s.

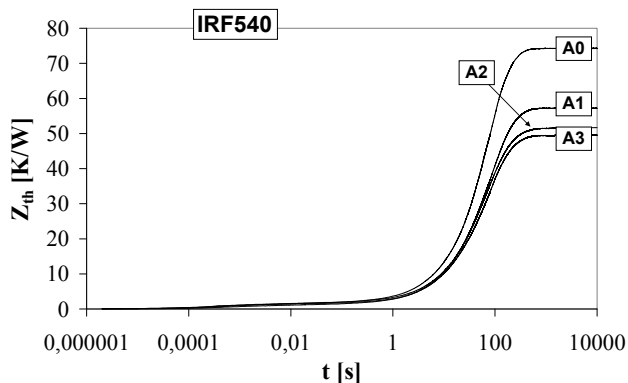


Rys.4. Zmierzone przebiegi przejściowej impedancji termicznej tranzystora IRF540 zamocowanego na płytce A1

Tabela 1. Wartości parametrów modelu przejściowej impedancji termicznej tranzystora IRF540 zamocowanego na płytce A1

P [W]	0,2	0,54	1,21
R_{th} [K/W]	88,82	81,34	57,20
a_1	0,391	0,792	0,648
τ_{th1} [s]	168,45	97,54	108,67
a_2	0,540	0,152	0,285
τ_{th2} [s]	60,97	26,88	41,19
a_3	0,033	0,028	0,039
τ_{th3} [s]	4,399	3,028	3,899
a_4	0,016	0,016	0,012
τ_{th4} [ms]	6,47	7,51	34,75
a_5	0,017	0,012	0,014
τ_{th5} [ms]	0,27	0,04	0,70

Na rys. 5 przedstawiono wyniki pomiarów przejściowej impedancji termicznej badanego tranzystora uzyskane przy różnych warunkach mocowania tego elementu i przy mocy równej około 1,25 W, a w Tabeli 2 zebrano wartości parametrów modelu $Z_{th}(t)$ odpowiadające uzyskanym wynikom pomiarów.



Rys.5. Zmierzone przebiegi przejściowej impedancji termicznej tranzystora IR540 zamontowanego na różnych płytkach

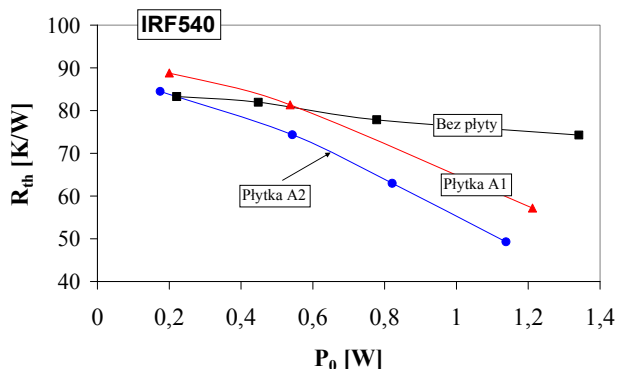
Jak widać na rys. 5, największą wartość rezystancji termicznej uzyskano dla tranzystora pracującego bez płytki drukowanej. Wartość ta jest o około 50% większa od wartości tego parametru uzyskanej przy zamontowaniu

badanego tranzystora na płytce A2. Porównując przebiegi $Z_{th}(t)$ dla tranzystora umieszczonego na płytce A1 oraz na płytkach A2 i A3 można zauważyć, że wzrost powierzchni warstwy miedzianej na płytce drukowanej powoduje istotne ograniczenie wartości rezystancji termicznej, ale jednocześnie obserwowany jest stosunkowo niewielki wzrost czasu niezbędnego do uzyskania stanu ustalonego. Jest to spowodowane wzrostem pojemności cieplnej układu związanej ze wzrostem objętości miedzi.

Tabela 2. Wartości parametrów modelu przejściowej impedancji termicznej tranzystora IR540 zamontowanego na różnych płytkach

P [W]	Bez płytki A0	Płytki A1	Płytki A2	Płytki A3
R_{th} [K/W]	74,27	57,20	51,69	49,55
a_1	0,742	0,648	0,333	0,480
τ_{th1} [s]	88,032	108,67	149,27	119,19
a_2	0,196	0,285	0,582	0,440
τ_{th2} [s]	45,89	41,19	50,52	45
a_3	0,036	0,039	0,047	0,046
τ_{th3} [s]	3,087	3,898	3,83	3,95
a_4	0,012	0,012	0,012	0,014
τ_{th4} [ms]	11	34,75	24,67	6,76
a_5	0,012	0,014	0,023	0,017
τ_{th5} [ms]	0,47	0,70	0,43	0,32

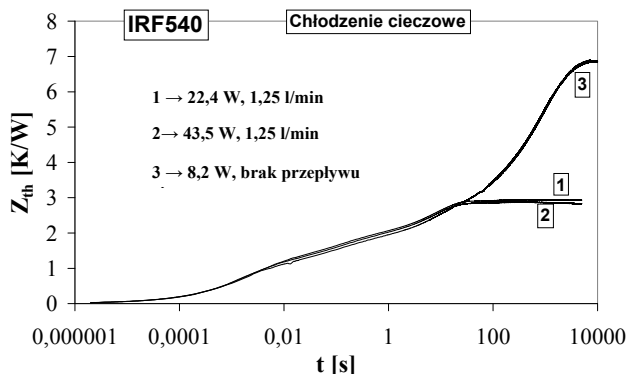
Rys. 6 ilustruje wpływ mocy wydzielanej w badanym tranzystorze i mozaiki płytki drukowanej na rezystancję termiczną R_{th} badanego tranzystora. Dla wszystkich mocowań tranzystora można zauważyć malejącą zależność rezystancji termicznej od mocy, spowodowaną wzrostem skuteczności konwekcji przy wzroście temperatury obudowy. Przykładowo, w rozważanym zakresie zmian mocy rezystancja termiczna badanego tranzystora zamocowanego na płytce A3 maleje nawet o połowę.



Rys. 6. Zmierzone zależności rezystancji termicznej tranzystora IRF540 od wydzielanej w nim mocy przy różnych warunkach jego mocowania

Powszechnie stosowanym sposobem obniżenia wartości rezystancji termicznej elementów półprzewodnikowych jest osadzanie ich na radiatorze. Jak pokazano m.in. w pracy [29], rezystancja termiczna jest malejącą funkcją długości radiatora i zależy również od orientacji przestrzennej radiatora [30]. Inną metodą poprawienia skuteczności odprowadzania ciepła jest zastosowanie chłodzenia ciecowego, które jest bardziej efektywne od chłodzenia powietrznego. Na rys. 7 przedstawiono zmierzone przebiegi przejściowej impedancji termicznej rozważanego tranzystora MOS zamontowanego na radiatorze z rys. 3a, który dodatkowo umieszczono pomiędzy ciecowymi wymiennikami ciepła. Krzywa 1 i 2 odpowiada mocy cieplnej wydzielanej w tranzystorze równej odpowiednio 22,4 W oraz 43,5 W, przy czym prędkość przepływu cieczy wynosi około 1,25 l/min. Krzywa 3 dotyczy

sytuacji, w której przepływ cieczy jest zatrzymany, a moc cieplna jest równa 8,2 W. Wartości parametrów modelu $Z_{th}(t)$, dla rozważanych warunków chłodzenia, zebrano w Tabeli 3.



Rys. 7. Zmierzone przebiegi przejściowej impedancji termicznej tranzystora umieszczonego na radiatorze wraz z wymiennikami ciepła

Tabela 3. Wartości parametrów modelu przejściowej impedancji termicznej tranzystora umieszczonego na radiatorze wraz z wymiennikami ciepła

P [W]	Krzywa 1	Krzywa 2	Krzywa 3
R_{th} [K/W]	2,93	2,83	6,85
a_1	0,034	0,321	0,388
τ_{th1} [s]	38,51	7,25	1377,5
a_2	0,283	0,129	0,177
τ_{th2} [s]	7,33	0,32	316,13
a_3	0,091	0,121	0,056
τ_{th3} [s]	0,546	0,061	57,09
a_4	0,143	0,143	0,096
τ_{th4} [s]	0,096	0,007	7,77
a_5	0,181	0,212	0,042
τ_{th5} [ms]	8,42	1	792
a_6	0,186	0,048	0,057
τ_{th6} [ms]	1,35	0,14	116
a_7	0,052	-	0,053
τ_{th7} [ms]	0,19	-	16
a_8	-	-	0,085
τ_{th8} [ms]	-	-	1,5

Z danych przedstawionych na rys. 7 wynika, że dla wartości czasu $t < 20$ s zmierzone przebiegi $Z_{th}(t)$ dla różnych wartości mocy cieplnych, a także z przepływem cieczy lub przy braku tego przepływu, są praktycznie nierozróżnialne. Wynika to z faktu, że w początkowej fazie chłodzenia badanego tranzystora, za odprowadzanie ciepła odpowiedzialne są procesy zachodzące wewnątrz badanego elementu oraz na granicy jego obudowy i radiatora. Z kolei, wpływ zastosowania przepływu cieczy jest widoczny już po upływie około 20 s aż do momentu osiągnięcia stanu ustalonego. Wartość rezystancji termicznej tranzystora pracującego z mocą 43,5 W umieszczonego w rozważanym systemie chłodzącym z włączonym przepływem cieczy chłodzącej jest najmniejsza. Wartość tego parametru nieznacznie rośnie wraz ze zmniejszaniem się mocy cieplnej, a gwałtownie wzrasta przy wyłączeniu przepływu cieczy. Różnice w wartości R_{th} dla wszystkich rozważanych warunków chłodzenia przekraczają nawet 60%. Również czas niezbędny do uzyskania stanu termicznie ustalonego w badanym tranzystorze gwałtownie rośnie w sytuacji wyłączenia przepływu cieczy. W tym przypadku ciepło od badanego tranzystora z radiatorem jest odprowadzane poprzez

poszczególne elementy wymienników ciepła oraz zgromadzoną w węzłach ciecz, która nie przepływa w układzie chłodzącym.

Uwagi końcowe

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących wpływu konstrukcji układu chłodzenia tranzystora MOS na parametry modelu jego przejściowej impedancji termicznej. Potwierdzono, znaną z poprzednich prac autorów [20, 29] malejącą zależność rezystancji termicznej od mocy wydzielanej w badanym tranzystorze oraz od powierzchni pól lutowniczych. Dodatkowo wykazano, że zamontowanie badanego tranzystora na płytce drukowanej zawierającej dodatkowo powierzchnie miedzi, znajdujące się w otoczeniu wyprowadzeń tranzystora, może skutkować spadkiem wartości rezystancji termicznej nawet o 25%.

Ponadto, w pracy pokazano wyniki pomiarów parametrów termicznych tranzystora umieszczonego na radiatorze przy zastosowaniu chłodzenia ciecowego. Wykazano, że zastosowanie chłodzenia ciecowego wyraźnie wpływa na polepszenie skuteczności wymiany ciepła między wnętrzem tranzystora a otoczeniem oraz umożliwia istotne skrócenie czasu niezbędnego do uzyskania stanu ustalonego. Obecnie Autorzy pracują nad sformułowaniem zależności analitycznych opisujących uzyskane wyniki pomiarów.

Podziękowania

Praca finansowana ze środków na naukę, jako projekt badawczy NCN nr DEC-2011/01/B/ST7/06740

LITERATURA

- [1] Zarębski J., Górecki K.: The electrothermal large-signal model of power MOS transistors for SPICE. IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 25, No. 5-6, 2010, pp. 1265 – 1274.
- [2] Górecki K., Zarębski J.: Nonlinear compact thermal model of power semiconductor devices. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 33, No. 3, 2010, pp. 643-647.
- [3] Zarębski J., Górecki K.: SPICE-aided modelling of dc characteristics of power bipolar transistors with selfheating taken into account. International Journal of Numerical Modelling Electronic Networks, Devices and Fields, Vol. 22, No. 6, 2009, pp. 422-433.
- [4] Székely V., Thermal Testing and Control by Means of Built-in Temperature Sensors. Electronics Cooling, Vol. 4, 1998, No. 3, pp.36-39.
- [5] Székely V., Rencz M., Courtois B., Thermal Investigations of IC's and Microstructures. Microelectronics Journal, Vol. 28, 1997, No.3, pp. 205-207
- [6] Castellazzi A., Gerstenmaier Y.C., Kraus R., Wachutka G.K.M.: Reliability analysis and modeling of power MOSFETs in the 42-V-PowerNet, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, 2006, No. 3, pp.603-612
- [7] Parry J., Rantala J., Lasance C.: Temperature and reliability in electronics systems – the missing link. Electronics Cooling, Vol. 7, No. 4, 2001, pp. 30 – 36
- [8] Ciappa M., Carbognani F., Cora P., Fichtner W.: A novel thermomechanics-based lifetime prediction model for cycle fatigue failure mechanisms in power semiconductors. Microelectronics Reliability, Vol. 42, 2002, pp.1653-1658
- [9] Castellazzi A., Kraus R., Seliger N., Schmitt-Landsiedel D.: Reliability analysis of power MOSFET's with the help of compact models and circuit simulation. Microelectronics Reliability, Vol. 42, 2002, pp.1605-1610
- [10] Coquery G., Carubelli S., Ousten J.P., Lallemand R.: Power module lifetime estimation from chip temperature direct measurement in an automotive traction inverter. Microelectronics Reliability, Vol. 41, 2001, pp.1695-1700
- [11] Happer C.A.: Electronic packaging and interconnection handbook McGraw-Hill Handbooks, 2000.
- [12] Lidow A., Knzer D., Sheridan G., Tam D.: The Semiconductor Roadmap for Power Management in the New

- Millennium. Proceedings of the IEEE, Vol. 89, 2001, No. 6, pp. 803-812.
- [13] Sarno C., Moulin G.: Thermal management of highly integrated electronic packages in avionics applications. Electronics Cooling, Vol. 7, No. 4, 2001, pp. 12-20
- [14] Raj E., Lisik Z., Fiks W.: Influence of the manufacturing technology on microchannel structure efficiency. Materials Science and Engineering B, Vol. 176, No. 4, 2011, pp. 311-315.
- [15] Gould C.A., Shammas N.Y.A., Grainger S., Taylor I.: Thermoelectric cooling in microelectronic circuits and waste heat electrical power generation in a desktop personal computer. Materials Science and Engineering B, Vol. 176, No. 4, 2011, pp. 316-325.
- [16] Simons R.E.: Estimating temperatures in a water – to – air hybrid cooling system. Electronics Cooling, Vol. 8, No. 2, 2002, pp. 8-9
- [17] Garimella S.V., Singhal V., Liu D.: On-chip thermal management with microchannel heat sinks and integrated micropumps. Proceedings of the IEEE, Vol. 94, 2006, No. 8, pp. 1534-1548.
- [18] Zhang H.Y., Pinjala D., Wong T.N., Toh K.C., Joshi Y.K.: Single-phase liquid cooled microchannel heat sink for electronic packages. Applied Thermal Engineering, Vol. 25, 2005, No. 10, pp. 1472-1487.
- [19] Blackburn D.L.: Temperature Measurements of Semiconductor Devices – A Review. 20th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium SEMI-THERM, 2004, pp. 70-80.
- [20] Górecki K., Zarębski J.: The semiconductor device thermal model taking into account non-linearity and multipathing of the cooling system. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 494, 2014, 012008, doi:10.1088/1742-6596/494/1/012008
- [21] Carver L.: Innovative packaging design for electronics in extreme environments. IEEE Spectrum, No. 5, 2014, pp. S26-S28.
- [22] Szekely V.: A New Evaluation Method of Thermal Transient Measurement Results. Microelectronic Journal, Vol. 28, No. 3, 1997, pp. 277-292.
- [23] Górecki K., Rogalska M., Zarębski J.: Parameter estimation of the electrothermal model of the ferromagnetic core. Microelectronics Reliability, Vol. 54, No. 5, 2014, pp. 978-984.
- [24] Górecki K., Zarębski J., Estymacja parametrów modelu termicznego elementów półprzewodnikowych. Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji, Vol. 52, 2006, No. 3, pp. 347-360
- [25] Zarębski J., Górecki K.: A New Method for the Measurement of the Thermal Resistance of the Monolithic Switched Regulator LT1073. IEEE Trans. on Instr. and Meas., Vol. 56, No. 5, 2007, pp. 2101-2104.
- [26] Blackburn D.L., Oettinger F.F., Transient Thermal Response Measurements of Power Transistors. IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrum., IECI-22, 1976, No. 2, pp. 134-141
- [27] Oettinger F. F., Blackburn D. L.: Semiconductor Measurement Technology: Thermal Resistance Measurements, U. S. Department of Commerce, NIST/SP-400/86, 1990.
- [28] Górecki K., Zarębski J.: The influence of the selected factors on transient thermal impedance of semiconductor devices. Proceedings of the 21st International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES, 2014, Lublin, pp. 309-314.
- [29] Górecki K., Zarębski J.: Modeling the influence of selected factors on thermal resistance of semiconductor devices. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 4, No. 3, 2014, pp. 421-428.
- [30] Górecki K., Zarębski J.: Badanie wpływu wybranych czynników na parametry cieplne tranzystorów mocy MOS. Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 85, No. 4, 2009, pp. 159-164.
- [31] Górecki K., Zarębski J., Bisewski D.: An influence of the selected factors on the transient thermal impedance model of power MOSFET. Informacje MIDEM (artykuł w recenzji).

Autorzy: dr inż. Damian Bisewski, dr hab. inż. Krzysztof Górecki, prof. nadzw. AMG, prof. dr hab. inż. Janusz Zarębski, Akademia Morska w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225, Gdynia, E-maile: bisewski@am.gdynia.pl, gorecki@am.gdynia.pl, zarebski@am.gdynia.pl.