

Stanowisko do badania parametrów cieplnych materiałów stosowanych w elektronice

Streszczenie. W artykule przedstawiono stanowisko pomiarowe do badania parametrów cieplnych szerokiego spektrum materiałów w postaci ciał stałych stosowanych w elektronice. Na stanowisku, pomiar gęstości strumienia ciepła jest zrealizowany z wykorzystaniem ogniwa Peltiera. Przeprowadzone pomiary próbek wykonanych z aluminium oraz laminatu epoksydowo-szklanego weryfikują jego przydatność.

Abstract. Paper presents measurement setup for thermal parameters investigations that can be applied to wide spectrum of electronic solid state materials. At the stand, a heat flux is measured with the aid of Petier cell. Conducted tests of alumina and glass-epoxy samples verify the usefulness of the setup. (**Measurement setup for thermal parameter investigations of electronic materials**).

Słowa kluczowe: przewodność cieplna, rezystancja cieplna, stanowisko pomiarowe, pomiary.

Keywords: thermal conductivity, thermal resistance, measurement setup, measurements.

Wstęp

Efektom nierozzerwalnie związanym z pracą wszystkich elementów elektronicznych jest generacja ciepła, które musi być odprowadzone do otoczenia, tak aby zachować bezpieczną temperaturę pracy przyrządów i układów elektronicznych. W procesie transportu ciepła biorą udział poszczególne części obudowy pojedynczego elementu, jak również dodatkowe elementy układu chłodzenia czy też fragmenty konstrukcji układów i urządzeń elektronicznych. Poprawna identyfikacja „ścieżek”, wzdłuż których ciepło jest transportowane od źródła do otoczenia jest szczególnie istotna w dobie gwałtownie postępującej skali miniaturyzacji i integracji, gdzie przykładowo, poprawnie zaprojektowana mozaika przewodząca może pełnić rolę radiatora, a ilość ciepła odbieranego w wyniku konwekcji od obudowy SMD (Surface Mount Device) może okazać się pomijalnie mała [1].

Analizę wymiany ciepła w danym przyrządzie bądź układzie elektronicznym można przeprowadzić z wykorzystaniem równań transportu ciepła i masy przy uwzględnieniu odpowiednich warunków brzegowych i początkowych [2] lub też w oparciu o skupione modele termiczne bazujące na koncepcji impedancji cieplnej [1, 3]. Z wykorzystaniem tej drugiej metody, można opracować bardzo efektywne modele pozwalające szybko i z dużą dokładnością wyznaczyć temperatury elementów elektronicznych, a co za tym idzie ocenić warunki ich pracy. Ich zastosowanie wymaga jednak znajomości rezystancji oraz pojemności cieplnych poszczególnych elementów potencjalnych dróg transportu ciepła. Niniejszy artykuł poświęcony jest metodzie wyznaczania pierwszego z tych parametrów, czyli rezystancji termicznej oraz powiązanej z nią właściwości materiałowej jaką jest przewodność cieplna.

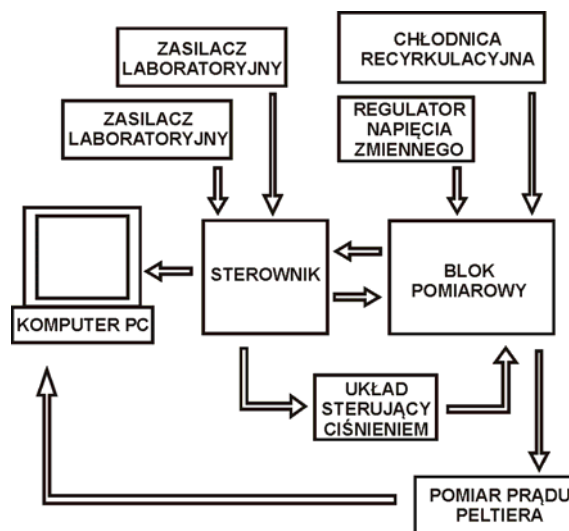
Metod pomiaru przewodności cieplnej jest wiele i ściśle zależą one od stanu skupienia badanej materii, struktury oraz grubości testowanych warstw jak również zakresu mierzonych wielkości. W przypadku ciał stałych, do najpopularniejszych należą metody w których pomiar wykonywany jest w stanie cieplnie ustalonym, a obliczenia wykonywane są w oparciu o znajomość gęstość strumienia ciepła q oraz różnicy temperatur ΔT na badanej próbce o grubości d zgodnie z prawem Fouriera:

$$(1) \quad q = -\lambda \frac{\Delta T}{d}$$

Przykładem mogą być metody bazujące na standardzie ASTM D5470 (Standard Test Method for Thermal Transmission Properties of Thermally Conductive Electrical Insulation Materials) lub standardzie ASTM E1530 (Standard Test for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission by Guarded Heat Flow Meter Technique) [4, 5]. Stanowisko pomiarowe przedstawione w niniejszym artykule również bazuje na powyższej koncepcji, z tą różnicą że pomiar mocy cieplnej transportowanej przez badaną próbkę jest realizowany z wykorzystaniem ogniwa Peltiera jako aktywnego elementu systemu pomiarowego.

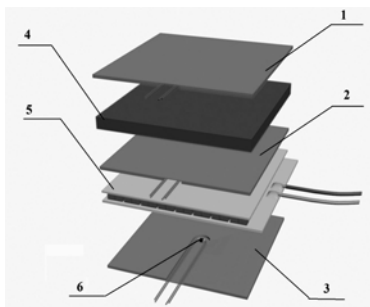
System pomiarowy

Uproszczony schemat blokowy układu pomiarowego parametrów termicznych wybranych elementów toru przepływu ciepła w urządzeniach elektronicznych przedstawiono na rysunku 1. Najważniejszymi elementami układu są: sterownik zbudowany w oparciu o mikrokontroler PSoC 5 oraz blok pomiarowy, w skład którego wchodzi element grzejny i płyta chłodząca jako elementy zapewniające przepływ strumienia ciepła przez badany materiał oraz ogniwo Peltiera umożliwiające pomiar jego gęstości, a co za tym idzie mocy cieplnej [6]. W układzie wykorzystano ogniwo Peltiera firmy Laird Technology [7] o mocy maksymalnej 236 W przy temperaturze strony gorącej 25 °C.



Rys.1. Schemat blokowy układu pomiarowego

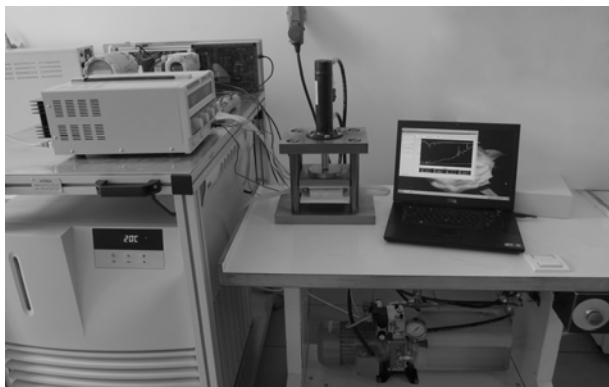
Fragment bloku pomiarowego pokazano na rysunku 2. Próbkę badanego materiału o wymiarach 40 x 40 mm² jest umieszczona pomiędzy elementem grzejnym a układem pomiaru mocy cieplnej. Pomędzy kolejnymi warstwami układu pomiarowego umieszczone są miedziane płytki z czujnikami temperatury zapewniającymi pomiar tej wielkości fizycznej z dwóch stron badanej próbki oraz z dwóch stron ogniwa Peltiera. Wybrano cienkowarstwowe czujniki rezystancyjne Pt100 o wymiarach 2 x 2,3 mm i grubości nie przekraczającej 1,3 mm wykonane w klasie A, które w połączeniu z 19 bitowymi przetwornikami A/C delta-sigma oraz po dodatkowym procesie wzorcowania czujników umożliwiły pomiar z łączną niepewnością względną nie przekraczającą 0,5%.



Rys. 2. Fragment bloku pomiarowego: 1,2,3 - miedziane płytki z czujnikami Pt100, 4 - próbka badanego materiału, 5 - ogniwo Peltiera, 6 - czujnik Pt100 z przewodami pomiarowymi

Płyta chłodząca, mająca zapewnić intensywne odprowadzanie ciepła z ogniwa Peltiera jest podłączona w obiegu zamkniętym z chłodziwą recyrkulacyjną RC030 H03 BG 3 firmy Lytron zapewniającą stabilizację temperatury chłodziwa na wylocie z urządzenia w zakresie 5 ÷ 35 °C z dokładnością do ±0,1 °C. Ponadto, układ zawierający testowy element wraz z ogniwem Peltiera elementem grzejnym oraz płytą chłodzącą jest odizolowany cieplnie od otoczenia z wykorzystaniem płyt teflonowych, które to wraz z dzianiną polarową są również wykorzystane do zapewnienia izolacji termicznej pomiędzy elementem grzejnym a płytą chłodzącą dookoła badanej próbki.

Cały układ poddawany jest sile ściskającej z wykorzystaniem prasy hydraulicznej do 210 N/cm² z możliwością jej regulacji w zakresie od 50 N/cm² do wartości maksymalnej. Nacisk ten ma zapewnić minimalizację wartości rezystancji cieplnych przejścia związanych z kontaktami pomiędzy badaną próbką a elementami układu pomiarowego. Siła nacisku jest monitorowana dzięki zastosowaniu przetwornika ciśnienia A-10 firmy WIKA oraz regulowana przy użyciu proporcjonalnego zaworu redukcyjnego RZMO – A-010/100 sterowanego napięciowo z wykorzystaniem sterownika. Zdjęcie stanowiska pomiarowego pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Zdjęcie stanowiska pomiarowego

System pomiarowy jest sterowany mikroprocesorowym układem kontrolno-pomiarowym. Na wstępie program sterownika sprawdza nastawy związane z ciśnieniem prasy hydraulicznej, załączeniem układu chłodzącego oraz gotowością elementu grzejnego. W głównej pętli programu realizowana jest kontrola nastawionego ciśnienia prasy oraz pomiar temperatury próbki od strony grzałki T_1 , temperatury strony zimnej ogniwa Peltiera T_C (odpowiadającej temperaturze na drugiej stronie próbki T_2) oraz temperatury strony gorącej ogniwa T_H . W przypadku, gdy wartość T_H lub T_1 przekroczy odpowiednio 80 °C lub 100 °C, sterownik wyłącza grzałkę i schładza blok pomiarowy. Ponadto, realizowany jest pomiar natężenia prądu ogniwa Peltiera I_P oraz regulacja wartości I_P mająca na celu uzyskanie $\Delta T_P = T_H - T_C = 0$ [6], co prowadzi do wyeliminowania wpływu dyfuzyjności cieplnej w ogniwie Peltiera na moc odbieraną od badanej próbki.

Na podstawie pomierzonych wartości wyznaczana jest moc cieplna P_C odbierana przez ogniwo od strony zimnej zgodnie ze wzorem [8]:

$$(2) \quad P_C = 2N \cdot \left[s \cdot I_P \cdot T_C - \frac{I_P^2 \cdot \rho}{2G} - \lambda_P \cdot (T_H - T_C) \cdot G \right]$$

gdzie: N oznacza ilość termopar w ogniwie (dla wybranego ogniwa $N = 200$), G – współczynnik geometryczny ogniwa (dla wybranego ogniwa $G = 0,305$ cm), a s , ρ i λ_P – odpowiednio współczynnik Seebecka, rezystywność oraz przewodność cieplną, które w przypadku wybranego ogniwa zmieniają się wraz z temperaturą zgodnie z danymi zestawionymi w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry materiałowe ogniwa Peltiera [8]

| T [K] | ρ [$\Omega \cdot \text{cm}$] | λ_P [W/mK] | s [V/K] |
|-------|-------------------------------------|--------------------|----------|
| 273 | $0,92 \cdot 10^{-3}$ | 1,61 | 0,000194 |
| 300 | $1,01 \cdot 10^{-3}$ | 1,51 | 0,000202 |
| 325 | $1,15 \cdot 10^{-3}$ | 1,53 | 0,000207 |
| 350 | $1,28 \cdot 10^{-3}$ | 1,55 | 0,000210 |
| 375 | $1,48 \cdot 10^{-3}$ | 1,58 | 0,000208 |

Znając moc cieplną P_C , możemy wyznaczyć rezystancję cieplną R_{th} korzystając ze wzoru (3):

$$(3) \quad R_{th} = \frac{T_2 - T_1}{P_C}$$

gdzie: T_1 i T_2 oznaczają temperaturę na powierzchni próbki odpowiednio od strony elementu grzejnego i od strony ogniwa Peltiera.

Wartość R_{th} uwzględnia również cieplną rezystancję przejścia wynikającą z połączenia próbki z miedzianymi płytkami czujników. W przypadku materiałów charakteryzujących się dobrą przewodnością cieplną jak np. miedź, aluminium czy ceramika AlN, rezystancja przejścia stanowi istotną część rezystancji cieplnej R_{th} i wykorzystanie jej bezpośrednio do obliczenia przewodności cieplnej próbki może powodować znaczne niedoszacowania tej wielkości. W tej sytuacji wymagane jest przeprowadzenia pomiaru przy tej samej mocy cieplnej P_C dla dwóch próbek o różnych grubościach i wyznaczeniu odpowiednio rezystancji termicznych R_{th_gr} i R_{th_cien} . W efekcie wartość przewodności cieplnej dla danego materiału można obliczyć korzystając z wzoru (4):

$$(4) \quad \lambda = \frac{d_{gr} - d_{cien}}{A} \cdot \frac{1}{R_{th_gr} - R_{th_cien}}$$

gdzie: d_{gr} , d_{cien} i A oznaczają odpowiednio grubość grubszej i cieńszej próbki oraz ich pole przekroju.

Dla materiałów o niskich wartościach przewodności cieplnej jak np. laminat epoksydowo szklany czy folie poliamidowe, wzór (4) upraszcza się poprzez przyjęcie grubości oraz rezystancji cieplnej cienkiej próbki odpowiednio równych 0.

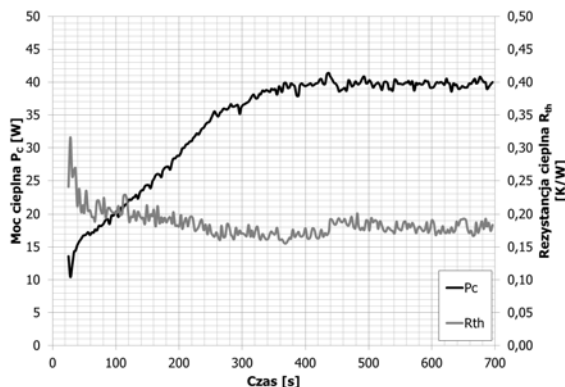
Pomiary

Pomiary weryfikujące poprawność działania stanowiska zostały przeprowadzone na próbkach wykonanych z aluminium oraz z laminatu epoksydowo-szklanego FR4. Wymiary przebadanych próbek wraz z rodzajem materiału zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wymiary i materiał badanych próbek

| Nr | MATERIAŁ | grubość [mm] | szerokość [mm] | długość [mm] |
|----|-----------|--------------|----------------|--------------|
| 1. | FR4 | 1,57 | 39,99 | 39,86 |
| 2. | Aluminium | 9,95 | 39,70 | 39,72 |
| 3. | Aluminium | 4,88 | 39,70 | 39,72 |

Przykładowy przebieg pomiaru mocy cieplnej oraz rezystancji cieplnej dla cieńszej próbki aluminiowej (próbka nr 3) pokazano na rysunku 4. Istotą pomiaru dla potrzeb wyznaczania przewodności cieplnej badanego materiału było uzyskanie stanu cieplnie ustalonego.



Rys. 4. Moc cieplna oraz wyznaczona wartość rezystancji cieplnej w funkcji czasu pomiaru

W tabeli 3 zestawiono wyniki średnich wartości pomiarów mocy P_c i rezystancji cieplnej R_{th} badanych próbek w stanie cieplnie ustalonym. Wyniki te wykorzystano do wyznaczenia przewodności cieplnej testowanych materiałów (tabela 4).

Tabela 3. Moc i rezystancja cieplna badanych próbek

| Nr | MATERIAŁ | P_c [W] | R_{th} [K/W] |
|----|-----------|-----------|----------------|
| 1. | FR4 | 15 | 3,534 |
| 2. | Aluminium | 40 | 0,2082 |
| 2. | Aluminium | 50 | 0,2023 |
| 2. | Aluminium | 60 | 0,1982 |
| 3. | Aluminium | 40 | 0,1888 |
| 3. | Aluminium | 50 | 0,1831 |
| 3. | Aluminium | 60 | 0,1790 |

Zgodnie z wcześniejszymi założeniami, wartość przewodności cieplnej dla materiałów będących dobrymi przewodnikami ciepła (w tym wypadku aluminium) była wyznaczana w oparciu o pomiar rezystancji cieplnej dwóch próbek o różnych grubościach wykonanych z tego samego materiału. W przypadku aluminium wykonano pomiary dla trzech różnych wartości mocy cieplnej transportowanej przez próbkę. Wraz ze wzrostem wartości P_c , nieznacznie maleje wartość R_{th} , co przekłada się na pomijalne zmiany w obliczonej wartości przewodności cieplnej aluminium. Co

istotne, zgodnie z oczekiwaniami rezystancja cieplna badanych aluminiowych próbek jest wysoka i znacząca część mierzonych wartości związana jest z rezystancją przejścia związaną z mocowaniem próbki w trakcie pomiarów. W przypadku materiałów o niskiej przewodności cieplnej nie ma konieczności wykonywanie próbek o dwóch różnych grubościach w celu wyeliminowania termicznych rezystancji przejścia. Otrzymane wartości przewodności cieplnej są zgodne z oczekiwaniami.

Tabela 4. Przewodność cieplna badanych materiałów

| Nr | MATERIAŁ | P_c [W] | $R_{th,gr}$ [K/W] | $R_{th,cien}$ [K/W] | R_{th} [K/W] | λ [W/mK] |
|----|-----------|-----------|-------------------|---------------------|----------------|------------------|
| 1. | FR4 | 15 | 3,534 | - | 3,534 | 0,28 |
| 2. | Aluminium | 40 | 0,2082 | 0,1888 | 0,0194 | 165,7 |
| 3. | Aluminium | 50 | 0,2023 | 0,1831 | 0,0193 | 167,1 |
| 4. | Aluminium | 60 | 0,1982 | 0,1790 | 0,0192 | 167,5 |

Podsumowanie

Przedstawione stanowisko pomiarowe umożliwia badanie parametrów cieplnych typowych materiałów stosowanych w konstrukcji sprzętu elektronicznego w szerokim zakresie zmienności przewodności cieplnej. Przykładowe pomiary przeprowadzone dla próbek wykonanych z aluminium i laminatu epoksydowo-szklanego potwierdziły przydatność zbudowanego stanowiska. Z jego najistotniejszych ograniczeń należy wskazać konieczność przygotowania próbek o wymiarach 40 x 40 mm i grubości odpowiedniej dla badanego materiału. Granice minimalnej i maksymalnej grubości próbki wynikają z jednej strony z dokładności pomiarów, a z drugiej z ograniczeń temperaturowych stanowiska związanych zarówno z maksymalną temperaturą pracy ogniwa Peltiera, jak i dopuszczalną temperaturą pracy grzałki.

Praca współfinansowana ze środków na naukę w latach 2011-2014 jako projekt badawczy nr 2011/01/B/ST7/06740.

LITERATURA

- [1] K. Górecki, J. Zarębski, Paths of the Heat Flow from Semiconductor Devices to the Surrounding, 19th Int. Conf. Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, MIXDES'2012, Warszawa, 2012, str. 313-318
- [2] M. Langer, Z. Lisik, E. Raj, N. Kyun Kim, Thermal Analyse of MOSFET Intelligent Power Module with Insulator - Metal - Substrate Plate, 5th Int. Conf. on Thermal Problems in Electronics, MicroTherm'2003, Łódź, 2003, str. 41-47
- [3] K. Górecki, J. Zarębski, Nonlinear Compact Thermal Model of Power Semiconductor Devices, IEEE Trans. Compon. Packag. Technol., vol. 33, nr 3, 2010, str. 643-647
- [4] J.J.W. Tzeng, T.W. Weber, D.W. Krassowski, Technical Review on Thermal Conductivity Measurement Techniques for Thin Thermal Interfaces, 16th IEEE SEMI-THERM Symposium, 2000, str. 174-181
- [5] B. Platek, T. Falat, J. Felba, An Accurate Method for Thermal Conductivity Measurement of Thermally Conductive Adhesives, 34th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, 2011, str. 313-319
- [6] Lisik Z., Raj E., Sposób pomiaru przewodności cieplnej, zgłoszenie patentowe P.404900 z dn. 29.07.2013
- [7] UltraTECTM Series UT15,200,F2,4040, Thermoelectric Module, katalog, Laird Technology, www.lairdtech.com, [dostęp 09.2014]
- [8] Thermoelectric HANDBOOK: Product Information, Assembly Information, Performance and Properties, Laird Technology, www.lairdtech.com, [dostęp 09.2014]

Autorzy: dr inż. Ewa Raj, dr inż. Roman Gozdur, prof. dr hab. Zbigniew Lisik, inż. Mateusz Sołyga, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: ewa.raj@p.lodz.pl, roman.gozdur@p.lodz.pl, zbigniew.lisik@p.lodz.pl