

Stanisław KUCYPERA  
Instytut Techniki Ciepłej

## METODYKA WYZNACZANIA WSPÓLCZYNNIKA PRZEWODZENIA CIEPŁA MATERIAŁÓW STOSOWANYCH W PRZYRZĄDACH PÓLPRZEWODNIKOWYCH

**Streszczenie.** W pracy omówiono metodę uproszczonych ekwiwalentów oraz podano sposób wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła materiałów stosowanych w elektronice z wykorzystaniem tej metody. Omówiono także warunki pomiarowe zapewniające największą dokładność określenia współczynnika przewodzenia ciepła.

### 1. WSTĘP

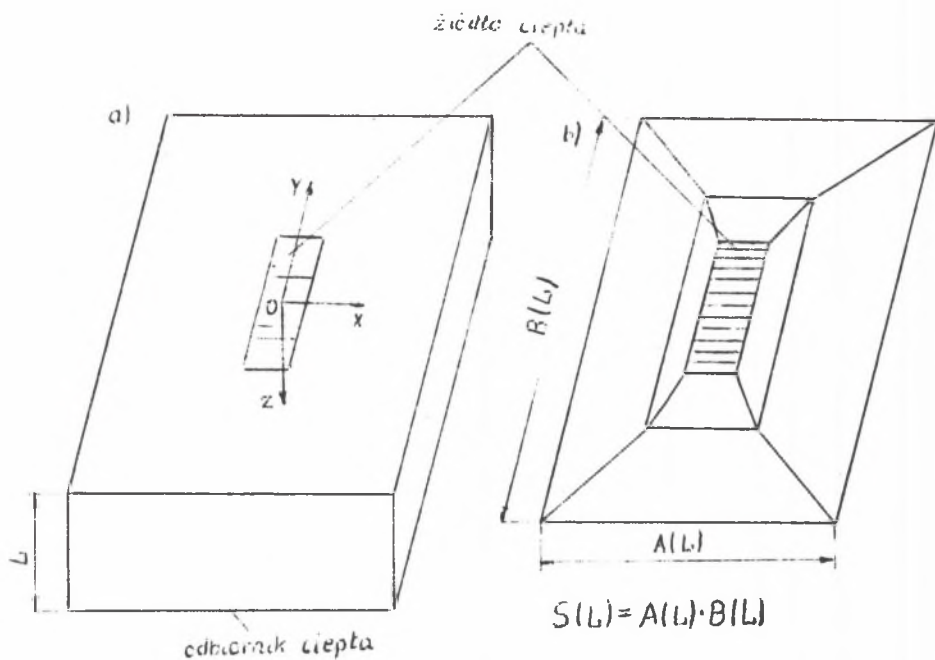
Silne niejednorodności materiałowe struktury wewnętrznej układów scalonych mają duży wpływ na pole temperatury w tych przyrządach. Stąd dla poszczególnych materiałów wymagana jest między innymi dokładna znajomość współczynników przewodzenia ciepła. Dotychczas w elektronice korzystało się wyłącznie z danych literaturowych [1], chociaż materiały tam stosowane w wielu przypadkach są stopami lub tworzywami żywicznymi, które w zależności od składu mogą mieć różne wartości. Z kolei materiały te są przeważnie bardzo drogie i trudno dostępne w dużych ilościach (najczęściej są one dostarczane przez producenta w postaci cienkich blach lub cienkich krążków - materiały żywiczne), a podawane w literaturze metody pomiaru współczynników przewodzenia ciepła wymagają na ogół większych próbek, czyli nie mogą one być w tym przypadku stosowane. Dlatego w pracy tej zaproponowano nową oryginalną koncepcję wyznaczania współczynników przewodzenia ciepła. W koncepcji tej wykorzystuje się metodę uproszczonych ekwiwalentów [2,3,4], która została opracowana w celu wyznaczenia temperatury najczulszych miejsc w strukturze, a mianowicie temperatury złącz w stanie ustalonym i nieustalonym.

Do wyznaczenia współczynnika przewodzenia ciepła wykorzystuje się tylko tę część, która dotyczy stanów ustalonych. Metoda pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła polega w ogólnym przypadku na rozwiązaniu zagadnienia brzegowego w badanej próbce i wyliczeniu tego współczynnika na podstawie zmierzonych temperatur w pewnych punktach próbki. Ten sam sposób stosuje się w metodzie uproszczonych ekwiwalentów.

## 2. DEFINICJA UPROSZCZONEGO EKWIWALENTU

W metodzie uproszczonych ekwiwalentów przy formułowaniu modelu cieplnego przyjmuje się następujące założenia:

- materiał próbki posiada izotropową przewodność cieplną,
- właściwości fizyczne materiału nie zależą od temperatury.



Rys. 1

a) model próbki pomiarowej, b) jego uproszczony ekwiwalent

Fig. 1

a) model of measuring sample, b) its simplified equivalent

Przy tych założeniach zagadnienie brzegowe dla rys. 1a sformułowane jest następująco:

W materiale próbki spełnione jest równanie przewodzenia ciepła

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (1)$$

oraz następujące warunki brzegowe:

$$\begin{aligned}
 \text{a) } \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \begin{cases} -\frac{\dot{q}_f}{\lambda} & \text{- na powierzchni źródła} \\ 0 & \text{- poza powierzchnią źródła} \end{cases} \\
 \text{b) } \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{brzeg } (x,y)} &= 0 \\
 \text{c) } T \Big|_{z=L} &= T_0
 \end{aligned} \tag{2}$$

gdzie:

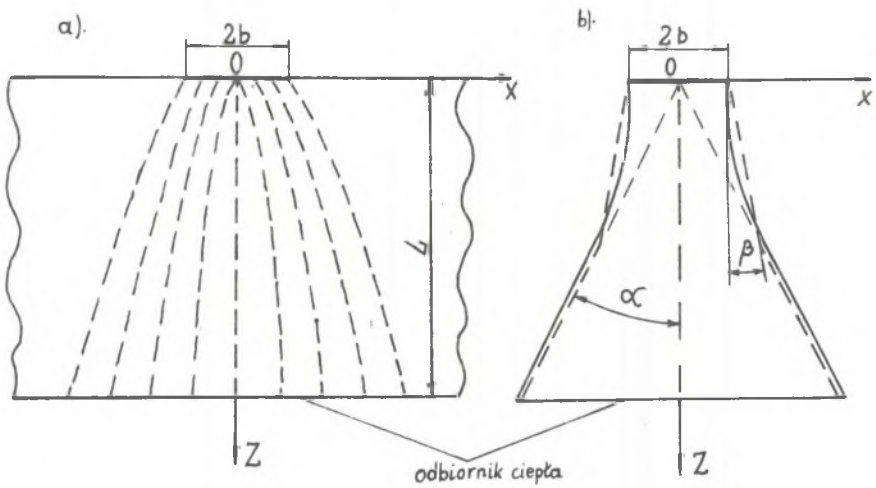
$T_0$  - temperatura dolnej powierzchni (płytki) próbki, °C lub K,

$\dot{q}_f$  - powierzchniowa gęstość strumienia ciepła generowanego na górnej powierzchni próbki,  $W/m^2$ .

Istota metody ekwiwalentów polega na wprowadzeniu pojęcia efektywnego obszaru rozplywu ciepła, nazwanego ekwiwalentem, który w przypadku płyty ma następujące własności:

1. Górną powierzchnię ekwiwalentu jest powierzchnia źródła ciepła.
2. Dolna powierzchnia ekwiwalentu ma stałą temperaturę równą temperaturze początkowej płyty, co jest równoznaczne, że styka się ona z idealnym odbiornikiem ciepła.
3. Materiał ekwiwalentu jest materiałem anizotropowym, dla którego  $\lambda_z = \lambda_{\text{płyty}}$  i  $\lambda_{xy} = \infty$ .
4. Powierzchnie przekroju ekwiwalentu płaszczyznami równoległymi do powierzchni źródła ciepła zwiększają się, tzn. im grubsza jest płyta, tym szerzej rozplywa się w niej strumień ciepła płynący od źródła w głąb płyty.
5. Powierzchnie boczne ekwiwalentu są adiabatyczne. Ich kształt jest taki, że opór cieplny  $R_T$  ekwiwalentu w kierunku osi Z pomnożony przez generowany strumień ciepła równy strumieniowi w płycie rzeczywistej, daje nadwyżkę temperatury źródła równą nadwyżce temperatury w rzeczywistej płycie obliczonej w zagadnieniu trójwymiarowym.

Dzięki założeniu 3 pole temperatury w ekwiwalencie jest polem jednowymiarowym. Boczne powierzchnie adiabatyczne w tak zdefiniowanym ekwiwalencie (rys. 2b) są gładkie. W ekwiwalencie uproszczonym powierzchnie adiabatyczne zastępuje się powierzchniami łamanymi (linia przerywana na rys. 2b) o kątach nachylenia tak dobranych, aby opór cieplny  $R_T$  równał się oporowi cieplnemu w rzeczywistej płycie. Szczegółowo samą metodę oraz sposób budowania ekwiwalentów i doboru kątów dla różnych źródeł podano w poz. [4].



Rys. 2

a) przekrój nieskończenie rozległej płyty, b) przekrój jej ekwiwalentu  
 ——— rzeczywistego, ----- uproszczonego

Fig. 2

a) cross-section of infinitely great plate, b) cross-section of its equivalent: ——— real, ----- simplified

### 3. ISTOTA METODY POMIAROWEJ I WARUNKI POMIARU

Wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła metodą uproszczonych ekwiwalentów sprowadza się do pomiarowego określenia strumienia ciepła płynącego od źródła do idealnego odbiornika ciepła oraz temperatur powierzchni górnej stykającej się ze źródłem i powierzchni dolnej próbki stykającej się z odbiornikiem ciepła. Przy pomiarze powyższych wielkości wymagane jest spełnienie warunku, aby rozmiar próbki w kierunku przepływu strumienia ciepła był znacznie mniejszy od rozmiarów w kierunkach poprzecznych, co jest równoznaczne, że ciepło płynąc w kierunku odbiornika ciepła nie rozplynie się zbyt szeroko po próbce. Dodatkowo rozmiary poprzeczne próbki muszą być większe od rozmiarów poprzecznych źródła. Wynika stąd, że próbki powinny mieć kształt walców o wysokościach znacznie mniejszych od średnic lub płytek prostopadłościennych o stosunkowo niedużych wysokościach. Kształty źródeł ciepła powinny odpowiadać kształtom próbek. Ponieważ rozmiar próbki w kierunku przepływu ciepła nie powinien być zbyt duży, więc w celu uzyskania większego gradientu temperatury należy do pomiarów dobrać odpowiednie wymiary poprzeczne źródeł i wartości strumieni ciepła (moc grzejnika). Większa moc grzejnika musi być doбирана przy pomiarze współczynników przewodzenia ciepła dobrych przewodników. Wykorzystując nastę-

nie dane pomiarowe oraz prawo Fouriera, opór cieplny próbki o grubości  $L$  można określić następująco:

$$R_T = \frac{T_{zr} - T_0}{\dot{Q}} \quad (3)$$

gdzie:

$T_{zr}$  - temperatura powierzchni próbki stykającej się ze źródłem ciepła, °C lub K,

$\dot{Q}$  - strumień generowanego ciepła (moc grzejnika), W.

Z drugiej strony korzystając z definicji ekwiwalentu, opór cieplny próbki o grubości  $L$  można określić z zależności:

$$R_T = \frac{L}{\lambda \cdot S(L)} \quad (4)$$

gdzie:

$S(L)$  - pole przekroju efektywnego obszaru rozprzysku ciepła w próbce (ekwiwalencie) dla  $L = \text{idem}$ ,  $m^2$ ,

$\lambda$  - wyznaczany współczynnik przewodzenia ciepła badanej próbki, W/m.K.

Na podstawie zależności (3) i (4) wzór określający  $\lambda$  ma postać:

$$\lambda = \frac{T_{zr} - T_0}{\dot{Q}} \cdot \frac{S(L)}{L} \quad (5)$$

Sposób wyznaczania poszczególnych wielkości po prawej stronie wzoru (5) omówiono wcześniej, z wyjątkiem  $S(L)$ . Otóż aby wyznaczyć  $S(L)$ , należy skorzystać z własności (5) definiującej ekwiwalent. Wynika z niej, że opór cieplny próbki ma być równy oporowi cieplnemu ekwiwalentu. Stąd przyjmując grubość próbki równą grubości budowanego ekwiwalentu,  $S(L)$  można wyznaczyć korzystając z tablicy 1 oraz opisu metody ekwiwalentów [4].

Tablica 1

Tangensy kątów nachylenia bocznych powierzchni ekwiwalentów do osi Z

Tangens kąta	Kształt źródła			
	kwadratowe	kołowe	prostokątne	pierścieniowe
tg $\alpha$	1,505	1,699	1,527	1,653
tg $\beta$	0,776	0,835	0,790	0,830

W opisie metody [4] podano, jakie kształty będzie mieć powierzchnia  $S(L)$  oraz sposób określenia jej rozmiarów w zależności od kształtu źródła ciepła i grubości badanej próbki. Przeważnie kształt jej będzie zgodny z kształtem źródła, tzn. gdy źródło ma kształt koła, to będzie koło itp. Natomiast pole powierzchni  $S(L)$  będzie zależało od tego, jak szeroko ciepło rozpiłynie się w tej próbce, im grubsza próbka tym to ciepło szerzej się w niej rozpiłynie. Dobór tangensów kątów rozpiływu ciepła dla różnych kształtów źródeł (nachylenia powierzchni bocznych ekwiwalentu rys. 2) podano w tablicy 1.

W celu określenia pola powierzchni  $S(L)$  dla źródeł w kształcie koła, pierścienia lub kwadratu wystarczy wyznaczyć przekrój ekwiwalentu tylko w jednej płaszczyźnie, z którego dla zadanej grubości  $L$  można odczytać średnicę koła lub bok kwadratu, natomiast dla źródła prostokątnego trzeba wyznaczyć przekrój ekwiwalentu w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach i z przekrojów tych odczytać oba boki prostokąta. W opisie metody [4] podano również kryterium doboru kształtu i rozmiaru źródeł ciepła oraz grubości płytek takich, aby przy wyznaczeniu oporu cieplnego, a tym samym  $S(L)$ , popełnić najmniejszy błąd. Z analizy tej wynika, że najmniejsze błędy dają źródła prostokątne i kołowe przy stosunku grubości płyty do średnicy źródła lub do krótszego boku w prostokącie wahającym się w granicach (1-1,5). Wartości tego błędu wynoszą (3-5)%. Wynika z niej również to, że przy pomiarze współczynnika przewodzenia ciepła dobrych przewodników, aby zapewnić mniejszy błąd pomiaru, należy stosować źródła o większej powierzchni, co pociąga za sobą konieczność stosowania grubszych próbek zapewniających większą różnicę temperatur między powierzchnią gorącą i zimną próbki.

#### 4. UWAGI KOŃCOWE

Podsumowując powyższe rozważania można stwierdzić, że zaproponowana metoda może znaleźć duże zastosowanie do pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła materiałów w postaci cienkich próbek, tzn. materiałów stosowanych w przyrządach półprzewodnikowych, gdyż tylko takimi próbkami tam można dysponować. Może również być stosowana do pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła płynów. Ma ona tę podstawową zaletę, że przy pomiarze oporu cieplnego próbki nie wymaga się izolowania bocznych powierzchni próbki. Izolowanie takie jest często trudne do wykonania oraz ze względu na niedoskonałość metod izolacyjnych, często może być źródłem większych błędów. W zaproponowanej metodzie błędów tych się unika. Jednak całkowita dokładność wartości współczynnika przewodzenia ciepła zależy będzie tutaj od dokładności pomiarów: temperatur obu powierzchni czołowych, strumienia ciepła płynącego od źródła do odbiornika, grubości próbki oraz wyznaczenia powierzchni  $S(L)$  ekwiwalentu.

## LITERATURA

- [1] PELC T., BORCZYŃSKI J.: Odprowadzanie ciepła z przyrządów półprzewodnikowych, WKŁ, Warszawa 1986.
- [2] KUCYPERA St.: Analiza procesu wymiany ciepła w przyrządach półprzewodnikowych. Praca doktorska. Pol. Śl. Gliwice 1988.
- [3] KUCYPERA St., KOSTOWSKI B.: Zastosowanie metody uproszczonych ekwiwalentów do rozwiązywania zagadnień cieplnych w przyrządach półprzewodnikowych. ZN Pol. Śl. s. Energetyka, z. 102, Gliwice 1988.
- [4] ZACHAROW A.L., ASWADUROWA E.J.: Rasczet tieplowych parametrov poluprowodnikowych priborow. Radio i swjaz, Moskwa 1983.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
МАТЕРИАЛОВ ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

## Р е з ю м е

В работе описано метод упрощённых эквивалентов а также подано способ определения коэффициента теплопроводности материалов применяемых в электронике с использованием этой методы. Описано макке условия измерения гарантирующие наибольшей точность определения коэффициента теплопроводности.

METHODOLOGY OF DETERMINATION OF THERMAL CONDUCTIVITY  
OF MATERIALS APPLIED IN SEMICONDUCTOR DEVICES

## S u m m a r y

In paper the simplified equivalents method and its application for determination of the thermal conductivity of materials applied in electronics are presented. The measure conditions ensuring the best accuracy of the thermal conductivity determination are also discussed.