

Stanisław KUCYPERA, Edward KOSTOWSKI

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Śląskiej

ZASTOSOWANIE METODY UPROSZCZONYCH EKWIWALENTÓW DO ROZWIĄZYWANIA ZAGADNIENŃ CIEPLNYCH W PRZYRZĄDACH PÓLPRAWODNIKOWYCH

Streszczenie. Przedstawiono charakterystykę wybranych metod obliczeniowych wymiany ciepła i oceniono je pod kątem przydatności stosowania ich do obliczeń cieplnych przyrządów półprzewodnikowych. Szczególną uwagę poświęcono metodzie uproszczonych ekwiwalentów, opisano także metodę pomiarową, którą posłużono się do jej weryfikacji. Podano przykładowe wyniki obliczeń i pomiarów. Przedstawiono wnioski dotyczące zakresu stosowania metody uproszczonych ekwiwalentów w obliczeniach cieplnych przyrządów półprzewodnikowych.

1. Wstęp

Wymiana ciepła w przyrządach półprzewodnikowych jest zagadnieniem złożonym. Wpływają na to w ogólnym przypadku następujące czynniki:

1. Skomplikowany kształt rzeczywistych źródeł ciepła (np. źródła palczaste (patrz rys. 6), grzebieniaste).
2. Duże gęstości strumienia ciepła.
3. Zmiany właściwości fizycznych niektórych materiałów z temperaturą.
4. Często spotykana nieustalona wymiana ciepła spowodowana działaniem zmiennych w czasie źródeł.
5. Wielowarstwowość obudowy struktury półprzewodnikowej.
6. Złożony kształt dodatkowych radiatorów, na których mocowane są elementy o dużych i średnich mocach.
7. Odpyły ciepła przez boczne wyprowadzenia prądowe w układach scalonych.
8. Oddziaływanie na siebie źródeł ciepła o różnych gęstościach strumienia (np. układy scalone).
9. Zróżnicowane i często trudne do ścisłego określenia warunki wymiany ciepła na zewnętrznych powierzchniach przyrządów.

W analizie cieplnej rzeczywiście działających przyrządów przeważnie nie wystąpi konieczność uwzględnienia wszystkich wymienionych czynników równocześnie w jednym zagadnieniu brzegowym. Jeżeli np. w rozpatrywanym

przedziale temperatury własności termofizyczne materiałów nie ulegają istotnym zmianom, można traktować je w obliczeniach jako stałe, wyznaczone dla temperatury średniej. Przy rozpatrywaniu zagadnień cieplnych w układach scalonych nie ma miejsca problem związany ze skomplikowanym kształtem dodatkowych radiatorów. Dlatego przy analizie procesów wymiany ciepła w przyrządach należy dokładnie formułować warunki działania rozpatrywanego przyrządu. Następnie w zależności od sformułowanego problemu określa się warunki brzegowe i dobiera odpowiednią metodę obliczeń umożliwiającą otrzymanie interesującego nas rozwiązania.

2. Charakterystyka wybranych metod obliczeniowych

W teorii wymiany ciepła stosowane są różne metody rozwiązywania równania przewodzenia ciepła wraz z warunkami brzegowymi.

Są to m.in. metody:

- analityczne,
- numeryczne,
- hybrydowe.

Nie wszystkie one jednak są w równym stopniu przydatne do rozwiązywania konkretnego zagadnienia brzegowego. Wynika to przede wszystkim z ograniczenia w stosowaniu danej metody i jej efektywności (czas obliczeń, dokładność, zajmowana pamięć operacyjna komputera).

Nie zawsze jest opłacalne zwiększanie dokładności obliczeń kosztem znacznego wydłużania czasu obliczeń. Tym bardziej, że w obliczeniach cieplnych bardzo cienkich struktur (rzędu mikrometrów) w niektórych przypadkach mogą odgrywać dużą rolę niedokładne wartości danych geometrycznych i materiałowych. Stąd wykonanie obliczeń z założeniami upraszczającymi może dać wynik niewiele różniący się od dokładnego przy znacznie większej ich efektywności. Ma to szczególnie duże znaczenie wówczas, jeżeli obliczenia będą wykonywane wielokrotnie dla różnych wariantów danych.

Do analizy bardziej złożonych procesów wymiany ciepła w przyrządach półprzewodnikowych z uwzględnieniem szerokiej gamy wymienionych wcześniej przynników, należałoby stosować metody hybrydowe lub metody numeryczne (różnicowe i metodę elementów skończonych). Metody numeryczne umożliwiają rozwiązywanie nieliniowych zagadnień wymiany ciepła w materiałach niejednorodnych dla dowolnych warunków brzegowych. Z kolei metody numeryczne stają się mniej efektywne w przypadku wzrostu złożoności zagadnienia ze względu na wymiarowość, a w stanach nieustalonych dodatkowo, gdy wystąpi konieczność stosowania krótkich kroków czasowych (nawet rzędu mikrosekund). Warunki te powodują wydłużenie czasu przygotowania danych oraz czasu obliczeń i wymagają zwiększonej pamięci komputera. Do analizy szyb-

koźmiennych procesów wymiany ciepła, bądź początkowego okresu nagrzewania złącz struktury półprzewodnikowej, metody te mogą okazać się wręcz niemożliwe do zastosowania, z uwagi na konieczność stosowania bardzo krótkich kroków czasowych [5, 8]. Poza tym mogą wystąpić trudności w stosowaniu metod numerycznych w przypadku bardzo dużych gradientów temperatury.

Jeżeli chodzi o metody analityczne to można pokonać nimi pewne ograniczenia występujące w metodach numerycznych, ale z kolei mogą one być stosowane głównie dla zagadnień liniowych i prostych kształtów ciała. Niejednorodność i nieizotropowość ciała wprawdzie nie przeszkadza w stosowaniu metod analitycznych, ale bardzo poważnie utrudnia uzyskanie rozwiązania ze względu na dużą liczbę działań i przekształceń. Uwidacznia się to zwłaszcza dla zagadnień wielowymiarowych [1]. Dlatego w wielu przypadkach w analizie cieplnej przyrządów półprzewodnikowych istnieje konieczność stosowania metod upraszczających i ułatwiających rozwiązanie. Jedną z takich metod analitycznych rozwiązania brzegowego zagadnienia wymiany ciepła, która daje stosunkowo dokładne wyniki dla pewnej klasy problemów jest metoda uproszczonych ekwiwalentów (dosłowne tłumaczenie z jęz. rosyjskiego) [6, 7].

3. Charakterystyka metody uproszczonych ekwiwalentów

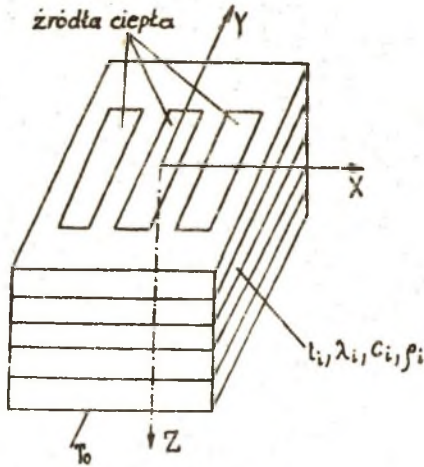
Metoda została opracowana w celu wyznaczania temperatury naczulonych miejsc w strukturze, a mianowicie temperatury złącz w stanie ustalonym i niestabilnym. Istotą metody polega na wprowadzaniu pojęcia efektywnego obszaru rozprywu ciepła, nazwanego ekwiwalentem danej płyty. Metoda uproszczonych ekwiwalentów może być stosowana zarówno dla struktur jednowarstwowych, jak również i wielowarstwowych.

Przy formułowaniu modelu cieplnego przyjmuje się następujące założenia [7]:

- w strukturach wielowarstwowych materiały poszczególnych warstw mają izotropową przewodność cieplną,
- właściwości fizyczne materiałów nie zależą od temperatury,
- wewnątrz struktury przepływ ciepła odbywa się tylko przez przewodzenie.

Ostatnie założenie spełnione jest w przyrządach półprzewodnikowych również w przypadku występowania szczelin powietrznych między warstwami. Wynika to z tego, że grubość szczeliny wynosi od kilku do kilkunastu mikrometrów i w takim przypadku nie rozwinię się konwekcja, a opór przewodzenia w szczelinie dla temperatur występujących w przyrządach jest rzędu ($10^2 - 10^4$) razy mniejszy od oporu radiacyjnego. Model geometryczny do obliczeń cieplnych metodą uproszczonych ekwiwalentów przedstawia rys. 1.

Zagadnienie brzegowe dla modelu z rys. 1 sformułowane jest następująco:



Rys. 1. Model geometryczny przyrządu półprzewodnikowego (do metody ekwiwalentów)

Fig. 1. Geometrical model of semiconductor device (for the equivalent method)

- W każdej warstwie spełnione jest równanie przewodzenia ciepła

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

oraz w całej płycie następujące warunki brzegowe

$$\left. \begin{array}{l} \text{a) } \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = \begin{cases} -\frac{q}{\lambda} & \text{- na powierzchni źródła} \\ 0 & \text{- poza powierzchnią źródła} \end{cases} \\ \text{b) } \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{(x,y)_{gr.}} = 0 \\ \text{c) } T \Big|_{z=l} = 0 \\ \text{d) } \left. \begin{array}{l} \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z} \\ T_i = T_{i+1} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{dla } z = z_{i+1} \\ i = 1, \dots, N-1 \end{array} \\ \text{e) } T \Big|_{z=0} = T_0 \end{array} \right\} \quad (2)$$

gdzie:

- T_0 - temperatura dolnej powierzchni struktury równa początkowej temperaturze w strukturze,
 \dot{q} - powierzchniowa gęstość strumienia ciepła generowanego na górnej powierzchni struktury.

Podstawowa definicja ekwiwalentu zostanie omówiona na przykładzie płyty izotropowej i stanu ustalonego (rys. 2). Pod pojęciem ekwiwalentu płyty z płaskim źródłem ciepła na jednej powierzchni i stałą temperaturą na drugiej, rozumie się ciało posiadające następujące własności:

- 1) Górną powierzchnią ekwiwalentu jest powierzchnia źródła ciepła (źródło ciepła) o tym samym kształcie jak w płycie rzeczywistej.
- 2) Dolna powierzchnia ekwiwalentu ma stałą temperaturę równą temperaturze początkowej.
- 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 zwiększa 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. Jak widać na rysunku 2 powierzchnie adiabatyczne ekwiwalentu rzeczywistego są gładkie.

W ekwiwalencie uproszczonym powierzchnie adiabatyczne zastępuje się powierzchniami łamanymi (linia przerywana) o kątach nachylenia tak dobranych, aby opór cieplny R_T równał się oporowi cieplnemu w rzeczywistej płycie. Szczegółowo samą metodę oraz sposób doboru kątów dla źródeł pojedynczych i złożonych o różnych kształtach dla płyt jednowarstwowych podano w [6,7].

3.1. Uproszczony ekwiwalent dla płyty wielowarstwowej

Ponieważ rzeczywiste struktury przyrządów półprzewodnikowych są wielowarstwowe, dlatego istnieje konieczność budowania ekwiwalentów dla takich struktur.

W tym celu zastępuje się płytę wielowarstwową płytą izotropową wykorzystując podstawienie pozwalające zmienić współrzędną w kierunku osi Z oraz współczynnik przewodzenia ciepła, wg zależności:

$$z_{\text{izo}} = z \sqrt{\frac{\lambda_{xy}}{\lambda_z}} \quad (3)$$

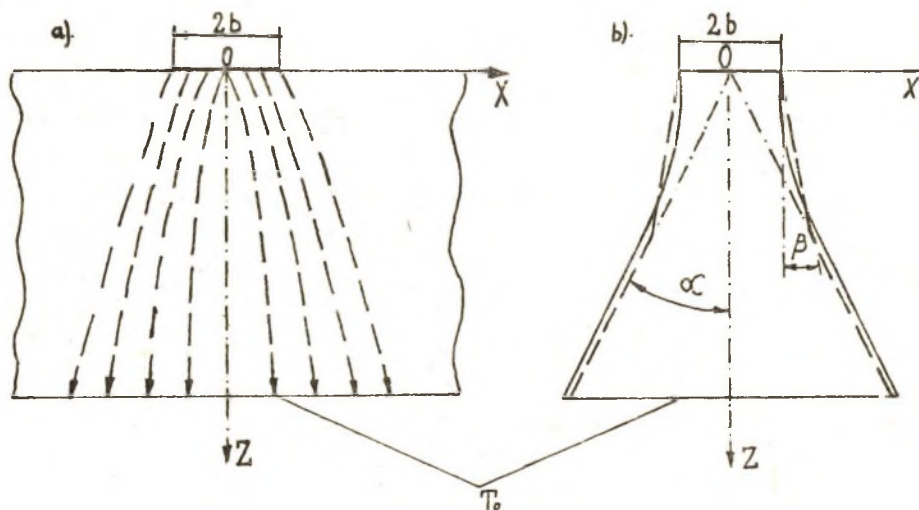
$$\lambda_{izo} = \sqrt{\lambda_{xy} \cdot \lambda_z} \quad (4)$$

gdzie: $\lambda_{xy} = \frac{\sum \lambda_i l_i}{\sum l_i}$ - zastępcza wartość współczynnika przewodzenia ciepła w kierunku osi X i Y,

$\lambda_z = \frac{\sum \frac{l_i}{\lambda_i}}{\sum \frac{1}{\lambda_i}}$ - zastępcza wartość współczynnika przewodzenia ciepła w kierunku osi Z,

l_i - grubość i-tej warstwy.

Następnie ekwiwalent buduje się w skorygowanym układzie współrzędnych. Sposób budowania ekwiwalentu jest taki sam jak dla płyty izotropowej ale współrzędne określające załamania powierzchni adiabatycznych należy określić w nowym, skorygowanym układzie. Jest to szczególnie istotne w przypadku dużej niejednorodności płyty, gdyż zmienia się wtedy znacznie geometria ekwiwalentu, a co za tym idzie i opór cieplny.



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

Korzystając z podanych informacji oraz prawa Fouriera opór cieplny płyty wielowarstwowej można określić następująco:

$$R_T = \int_0^L \frac{dz_{izo}}{\lambda_{izo} S(z_{izo})}, \quad (5)$$

gdzie:

$S(z_{izo})$ - pole przekroju ekwiwalentu przy $z = \text{idem}$ wyznaczone dla płyty izotopowej,

L - grubość płyty w skorygowanym układzie współrzędnych.

Na podstawie związków (3) i (4) oraz definicji λ_{xy} i λ_z zależności określające L i λ_{izo} można zapisać:

$$L = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{l_i}{\lambda_i} \cdot \sum_{i=1}^N \lambda_i l_i}, \quad (6)$$

$$\lambda_{izo} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \lambda_i l_i / \sum_{i=1}^N \frac{l_i}{\lambda_i}} \quad (7)$$

Stąd nadwyżka temperatury źródła ponad temperaturę dolnej powierzchni płyty wynosi:

$$\psi = T_{zr} - T_0 = R_T Q. \quad (8)$$

3.2. Zastosowanie metody uproszczonych ekwiwalentów dla stanu nieustalonego

W celu analizy zagadnień nieustalonych współrzędną L uzależnia się od czasu wykorzystując zależność:

$$\frac{T_{zr}(\xi) - T_0}{T_{zr}(z) - T_0} = 1. \quad (9)$$

Zależność tę interpretuje się w ten sposób, że w płycie dla stanu nieustalonego istnieje ruchoma powierzchnia, na której temperatura wynosi T_0 . W chwili początkowej pokrywa się ona z powierzchnią źródła, a następnie przesuwa się w głąb płyty, osiągając w końcu odległość z_{\max} równą grubości płyty. Z chwilowym położeniem omawianej powierzchni, określonym współrzędną $z(\xi)$ jest związany chwilowy ekwiwalent, który określa zmienny w czasie opór cieplny rozpatrywanej płyty. Autorzy [6, 7] nazywają tę zależność oporu od czasu "prześciową charakterystyką cieplną", używana też jest nazwa "prześciowa impedancja termiczna" [3]. Współrzędną $z(\xi)$

uzyskuje się przez rozwiązanie jednowymiarowego zagadnienia brzegowego w płycie wielowarstwowej dla stanu ustalonego i nieustalonego z warunkami brzegowymi: II rodzaju na górnej powierzchni i I rodzaju na dolnej powierzchni płyty. Celem wyznaczenia $L(\bar{z})$ dla kolejnych czasów w miejsce l_i (wzór 6 i = 1, ..., N) podstawia się $z(\bar{z}) - z_1$. Przy czym z_1 oznacza współrzędną powierzchni i-tej warstwy położonej bliżej źródła ciepła.

Wartość czasu \bar{z}_{\max} , po którym przemieszczająca się powierzchnia osiąga rzeczywistą powierzchnię płyty, wyznacza się z warunku:

$$L(\bar{z}_{\max}) = L_{\max} \quad (10)$$

gdzie:

L_{\max} - współrzędna dolnej powierzchni płyty w skorygowanym układzie współrzędnych.

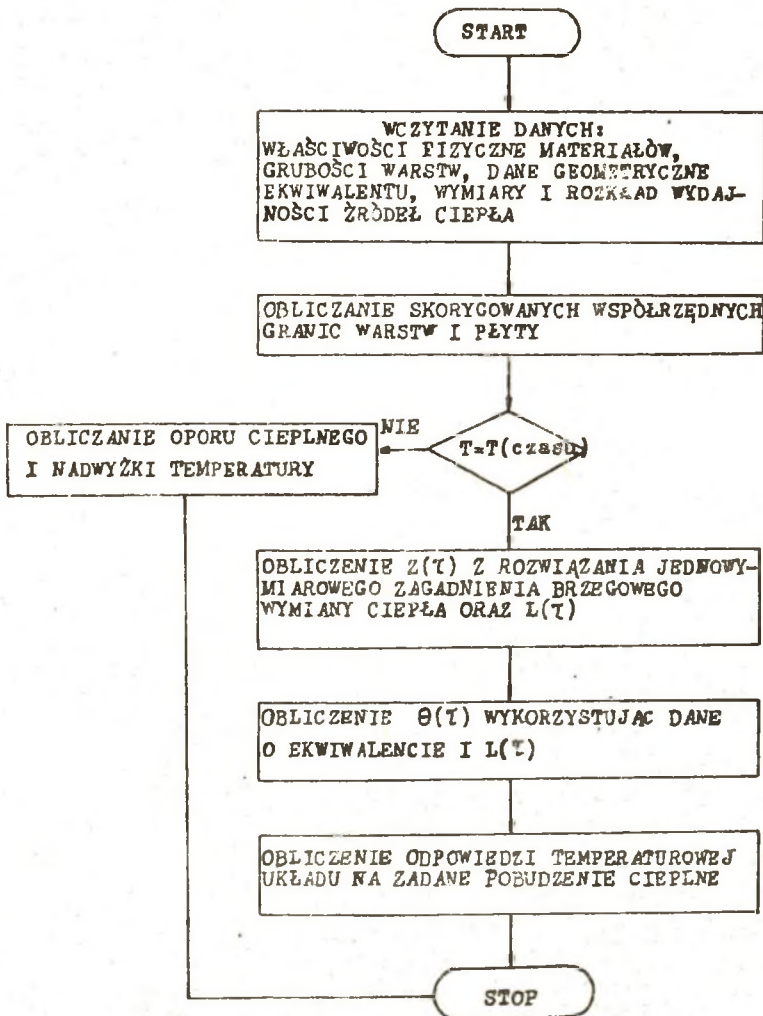
Rozkład temperatury źródła w funkcji czasu oblicza się wykorzystując zależność $\Theta(\bar{z}) = R_T [L(z(\bar{z}))]$ i wartości strumienia ciepła

$$T(\bar{z}) = T_0 + \Theta(\bar{z}) \cdot Q(\bar{z}). \quad (11)$$

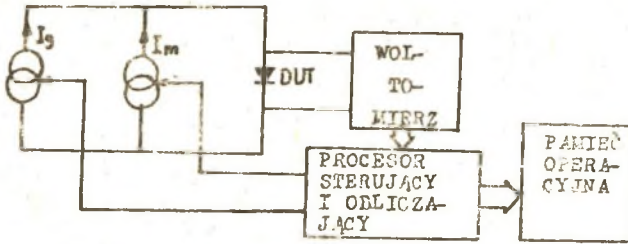
Jak wynika z powyższych rozważań metoda uproszczonych ekwiwalentów dla stanów nieustalonych jest bardzo zbliżona do metody warstwy termicznej [4]. Do obliczeń temperatury źródła w stanach ustalonych oraz nieustalonych dla różnych przebiegów generowanej mocy cieplnej opracowano program na m.c. w języku FORTRAN, którego schemat blokowy przedstawia rys. 3. Przykładowe wyniki obliczeń podano w punkcie 5. Wyniki obliczeń zweryfikowano eksperymentalnie na modelowych strukturach układów scalonych wykonanych w Instytucie Technologii Elektronowej CEMI w Warszawie, wykorzystując do pomiarów miernik rezystancji termicznej opracowany przez Instytut Technologii Elektronicznej Politechniki Gdańskiej.

4. Opis metody pomiarowej

Zastosowany do pomiarów temperatury złącza miernik rezystancji termicznej pracuje metodą impulsową. Polega to na tym, że końcówki obwodu pomiarowego i obwodu grzania dołącza się do tych samych wyprowadzeń badanego elementu. Odpowiedni układ sterujący przełącza obwody ze stanu grzania na stan pomiarowy i odwrotnie. Fazy grzania i pomiaru występują przemienicznie po sobie. Wymagany był tu odpowiedni dobór czasów grzania i pomiaru ze względu na zakłócenia elektryczne i szybkość stygnięcia elementu. Metoda taka umożliwia pomiar temperatury złącza, w którym generowana jest moc cieplna. Schemat blokowy miernika rezystancji termicznej przedstawiono na rys. 4, a samą procedurę pomiarową na rys. 5 [3].



Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy programu obliczeń
 Fig. 3. Simplified block scheme of calculation program



Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego

Fig. 4. Scheme of measuring position

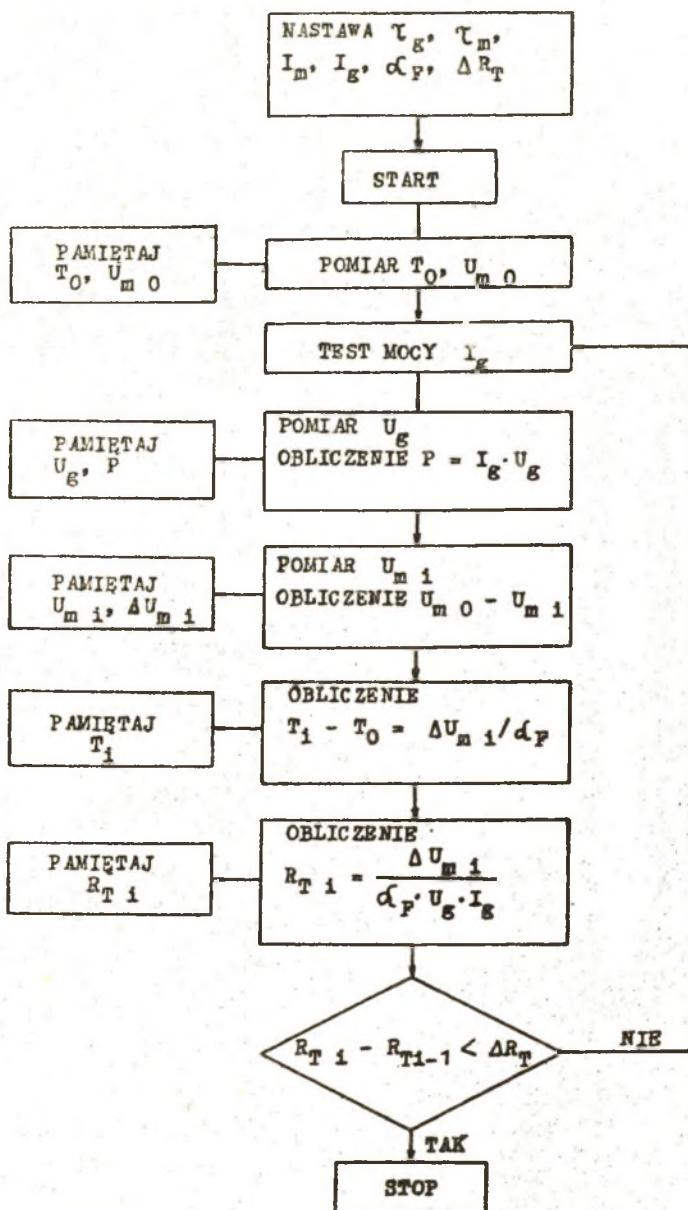
Oznaczenia do rysunków 4 i 5:

- I_g - prąd grzania,
- I_m - prąd pomiarowy,
- P - moc cieplna,
- τ_g - czas grzania,
- τ_m - czas pomiaru,
- U_g - napięcie grzania,
- U_m - napięcie pomiarowe,
- U_{m0} - napięcie pomiarowe dla temperatury początkowej T_0 ,
- T_i - temperatura badanego złącza,
- α_F - temperaturowy współczynnik zmian parametru termoczułego.

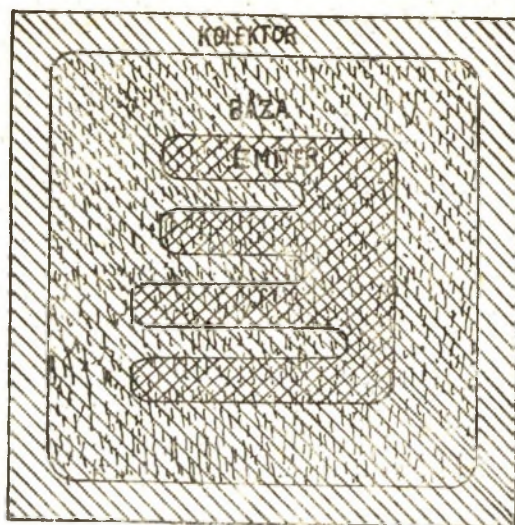
5. Przykładowe wyniki obliczeń i pomiarów

Celem wykonania obliczeń i pomiarów weryfikujących obliczenia wykorzystano układy scalone zbudowane na bazie struktur krzemowych z radiatorami: aluminiowym i miedzianym.

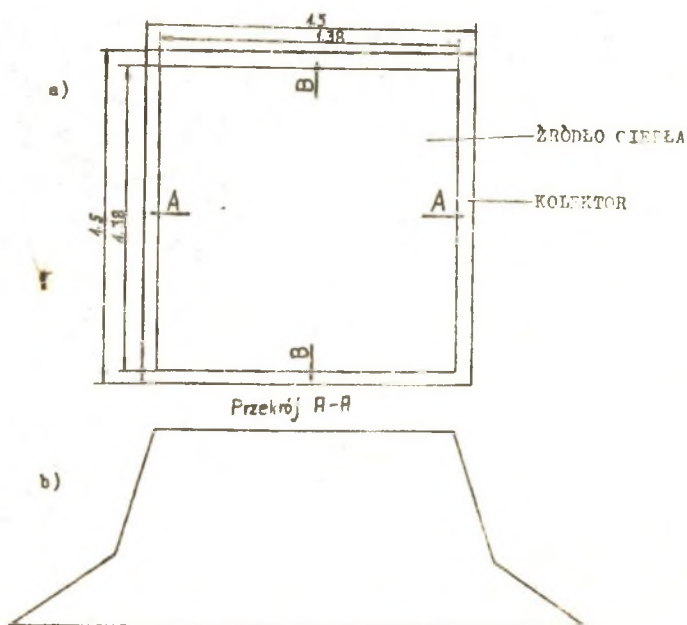
Struktury krzemowe o wymiarach $4,5 \times 4,5 \times 0,2$ mm posiadały na górnych powierzchniach dziewięć identycznych, symetrycznie rozmieszczonych tranzystorów BD-127. Przykładową geometrię jednego z tranzystorów przedstawiono na rys. 6, a przekroje ekwiwalentu dla układu scalonego ze źródłem ciepła generowanym w jednym tranzystorze na rys. 7. Obliczenia i pomiary wykonano dla kilku konfiguracji źródeł ciepła na płytce krzemowej. W pomiarach uzyskano to dzięki odpowiedniemu połączeniu ze sobą tranzystorów. Moc generowano w złączach kolektorowych o powierzchniach równych powierzchniom bazy. W każdej z wybranych konfiguracji źródeł ciepła pomiary były wykonywane dla kilku wartości generowanych mocy cieplnych. Pozwoliło to na sporządzenie wykresów nadwyżki temperatury źródła ciepła w funkcji mocy cieplnej.



Rys. 5. Schemat blokowy procedury pomiarowej
 Fig. 5. Block scheme of measuring procedure



Rys. 5. Widok tranzystora BD-127 od strony emitera
Fig. 6. View of transistor BD-127 from emitter side



Rys. 7. a) Powierzchnia tranzystora z zaznaczonym źródłem ciepła. b) Przekrój ekwiwalentu płaszczyzną A-A

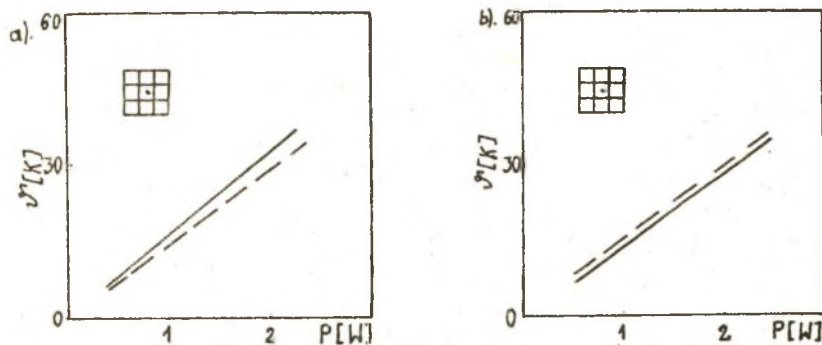
Uwaga: Przekrój ekwiwalentu płaszczyzną B-B jest identyczny z przekrojem A-A

Fig. 7. Surface of transistor with heat source pointed. b) A-A cross-section of its equivalent

Notice: B-B cross-section identical to A-A cross-section

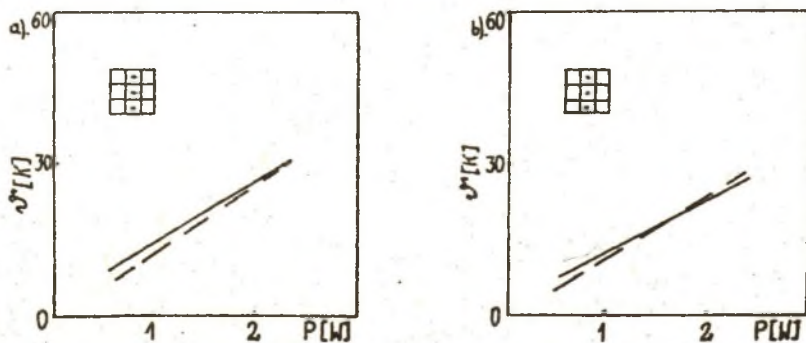
Podczas przeprowadzania pomiarów radiator chłodzony był olejem silikonowym o temperaturze 80°C . Równocześnie kontrolowano temperaturę powierzchni radiatora.

Zastosowany miernik umożliwił odczyt nadwyżki temperatury złącza po ustaleniu się warunków równowagi termicznej. Przykładowe wyniki pomiarów i obliczeń wraz z podaniem informacji, w których tranzystorach generowano moc cieplną zamieszczono na rys. 8 - 10. Jak łatwo zauważyć na podstawie zamieszczonych wykresów wartości nadwyżki temperatury źródła ciepła obliczone metodą ekwiwalentów we wszystkich przypadkach różnią się nieznacznie od wartości zmierzonych. Różnice te mogą wynikać z niedokładnych danych materiałowych i geometrycznych przyjętych do obliczeń, z błędów metody obliczeń oraz błędów metody pomiarowej. Obliczone wartości oporu cieplnego nie różnią się od wartości zmierzonych o więcej niż 10%. Stąd metodę tę, mimo pewnych założeń upraszczających, można uważać za stosunkowo dokładną.



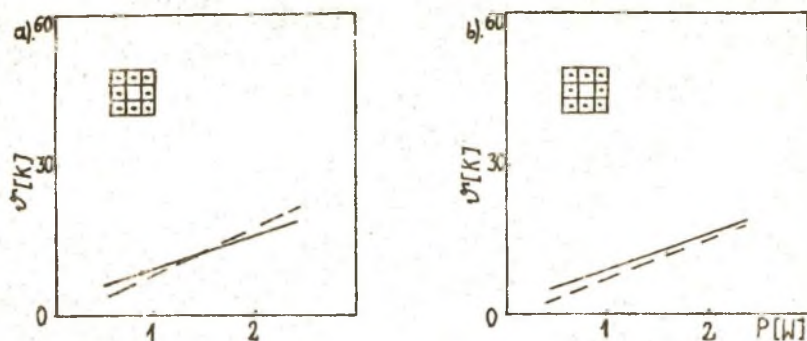
Rys. 8. Zależność nadwyżki temperatury źródła od mocy generowanej w środkowym tranzystorze

Fig. 8. Temperature excess of heat source as a function of heat stream generated in central transistor



Rys. 9. Zależność nadwyżki temperatury źródła od mocy generowanej w środkowej kolumnie trzech tranzystorów

Fig. 9. Temperature excess of heat source as function of heat stream generated in central column of three transistors.



Rys. 10. Zależność nadwyżki temperatury źródła od mocy generowanej w ośmiu zewnętrznych tranzystorach

Uwaga: Rys. a) dotyczą układu scalonego z radiatorom aluminium, rys. b) układu z radiatorom miedzianym. Linie ciągłe na wykresach dotyczą wyników obliczeń, linie przerywane - wyników pomiarów.

Fig. 10. Temperature excess of heat source as a function of heat stream generated in eight external transistors

Notice: Fig. a) it refers to integrated circuit with aluminium radiator, fig. b) it refers to integrated circuit with copper radiator. The full lines in figures refer to calculation results, dashed lines - to measurement results.

6. Wnioski i uwagi końcowe

Metoda uproszczonych ekwiwalentów dzięki dość ścisłej aproksymacji źródeł ciepła oraz łatwości przygotowania danych i szybkości wykonywanych obliczeń może mieć szerokie zastosowanie w obliczeniach cieplnych przyrządów półprzewodnikowych. Zwiększenie szybkości obliczeń wynika z przejścia z zagadnienia trójwymiarowego w płycie rzeczywistej na jednowymiarowe zagadnienie w ekwiwalencie płyty. Posiada ona również stosunkowo dużą dokładność.

Podstawowe jej ograniczenie wynika z przyjmowanych warunków brzegowych, a głównie warunku I rodzaju, na jednej z powierzchni zewnętrznych i adiabatywności powierzchni bocznych. Nie zawsze to ma miejsce podczas rzeczywistej pracy przyrządów. Dlatego podane zostaną przypadki, w których zdaniem autorów metoda ta może znaleźć zastosowanie w obliczeniach cieplnych przyrządów półprzewodnikowych.

W pierwszej kolejności należy określić w jakich przypadkach mogą być zakładane tego rodzaju warunki brzegowe. Wydaje się, że mogą one być przyjmowane w trzech przypadkach:

1) Podczas ustalonej i nieustalonej wymiany ciepła, gdy powierzchnia, na której założono warunek brzegowy I rodzaju jest intensywnie ochłodzona, a na powierzchniach bocznych występuje konwekcja swobodna.

2) W początkowym stadium nagrzewania płyty (dla małych liczb Fouriera) z płaskim źródłem ciepła na jednej powierzchni płyty.

3) W zagadnieniu periodycznym przewodzenia ciepła w płycie (wywołanym periodycznie działającym źródłem ciepła na jednej powierzchni) rozwiązywanym metodą superpozycji, przy rozłożeniu zagadnienia pierwotnego na część ustaloną i nieustaloną. Wówczas w zagadnieniu nieustalonym na drugiej powierzchni płyty może wystąpić warunek brzegowy I rodzaju. Takie rozłożenie zagadnienia na składowe i obliczanie zagadnień składowych różnymi metodami umożliwi również pokonanie trudności obliczeniowych opisanych wcześniej w pracy.

Odnosząc powyższe przypadki do analizowanych zagadnień cieplnych w przyrządach i typów przyrządów półprzewodnikowych można stwierdzić, że:

- przypadek 1 wystąpi w przyrządach dyskretnych, montowanych na dodatkowych radiatorach chłodzonych cieczą o wymuszonym przepływie lub przy zastosowaniu chłodzenia z przemianą fazową,
- przypadek 2 może być użyty do badania wad konstrukcyjnych przyrządu (np. wymiarów szczelin powietrznych), czyli w tzw. odwrotnych zagadnieniach przewodzenia ciepła [2],
- przypadek 3 będzie miał miejsce w przyrządach pracujących w stanach nieustalonych (np. impulsowych) z naturalnym lub wymuszonym chłodzeniem powietrznym, głównie w układach scalonych.

LITERATURA

- [1] Przewodzenie ciepła. Praca zbiorowa pod red. S.J. Gduli. PWN, Warszawa 1984.
- [2] Kozdoba L.A., Krukovskij P.G.: Metody rešenia obratnych zadac teploperenosy. Naukova Dumka, Kiev 1982.
- [3] Instrukcja obsługi miernika rezystancji termicznej. ITE Pol Gdańska, Gdańsk 1985.
- [4] Ozisik M.N. Heat conduction. J.Wiley and Sons, 1980.
- [5] Szargut J.: Metody numeryczne w obliczeniach cieplnych układów przemysłowych. Śląsk, Katowice 1977.
- [6] Zacharov A.L., Asvadurova E.J.: Metod račeta teplovykh soprotivlenij možnykh tranzistorov. Sov. Radio nr 20, Moskwa 1983.
- [7] Zacharov A.L., Asvadurova E.J.: Račet teplovykh parametrov poluprovodnikovykh priborov. Radio i svjaz, Moskwa 1983.
- [8] Zienkiewicz O.C.: Metoda elementów skończonych. (Tłum. z jęz. angielskiego). Arkady, Warszawa 1972.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Kalinowski

Wpłynęło do redakcji w kwietniu 1987.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА УПРОЩЁННОГО ЭКВИВАЛЕНТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

Р е з ю м е.

Рассмотрены избранные методы расчётов теплообмена и целесообразность их применения к расчётам полупроводниковых приборов. Подробно рассмотрен метод упрощённого эквивалента, описан также способ измерения, при помощи которого проведена верификация этого метода. Представлены выводы касающиеся применения метода упрощённого эквивалента к тепловым расчётам полупроводниковых приборов.

APPLICATION OF SIMPLIFIED EQUIVALENTS METHOD TO SOLVE THERMAL
PROBLEMS IN SEMICONDUCTOR DEVICES

S u m m a r y

The characteristic of chosen calculation methods of heat exchange was shown and the methods were evaluated from the point of view of their application to thermal semiconductor devices calculations. Particular attention was paid to the method of simplified equivalents, and the measurement method which was used to its verification was described. Exemplary calculation and measurement results were given. Conclusions concerning the range of application of the simplified equivalents method to calculations of thermal semiconductor devices.