ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1991

Seria: ENERGETYKA z. 112 Nr kol. 1093

Stanisław KUCYPERA, Edward KOSTOWSKI
Instytut Techniki Cieplnej

ANALIZA ODPŁYWU CIEPŁA OD ZEWNĘTRZNYCH POWIERZCHNI UKŁADÓW SCALONYCH DO OTOCZENIA

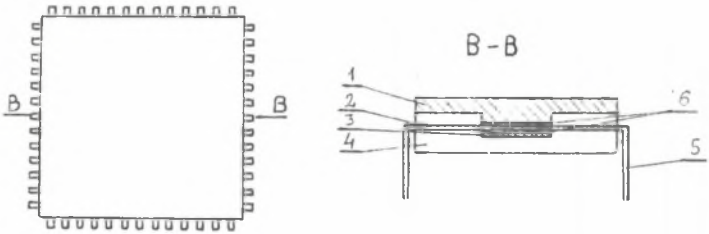
Streszczenie. W pracy przeprowadzono analizę wymiany ciepła między powierzchniami zewnętrznymi układów scalonych i otoczeniem oraz przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń. Ponadto podano sposób wyznaczania współczynnika wnikania ciepła od małych powierzchni do otoczenia w warunkach konwekcji swobodnej.

1. WSTĘP

Budowa współczesnych urządzeń elektronicznych oparta jest głównie na przyrządach półprzewodnikowych, w szczególności układach scalonych. Jednym z wymogów decydujących o możliwości praktycznego stosowania urządzenia elektronicznego jest jego niezawodność w działaniu. Z kolei niezawodność całego urządzenia elektronicznego zdeterminowana jest niezawodnością pojedynczego układu scalonego wmontowanego w to urządzenie. Zaś podstawowym czynnikiem określającym poziom niezawodności układów scalonych jest nagrzewanie się struktury półprzewodnikowej, a ściślej, obszaru czynnego, czyli złącza (złącz) pod wpływem rozpraszanej mocy elektrycznej. Ponieważ są to elementy małe i temperatura w całej objętości ich jest stosunkowo wyrównana, więc o nagrzewaniu obszaru czynnego decydują w większości przypadków zewnętrzne warunki chłodzenia. Przy zbyt dużej ilości wydzielanego ciepła i złych warunkach chłodzenia może nastąpić przegrzanie obszaru czynnego i początkowo zakłócenie parametrów elektrycznych, a w ostateczności zniszczenie struktury półprzewodnikowej, co jest równoznaczne z uszkodzeniem urządzenia elektronicznego. Stąd istnieje konieczność ścisłego określania zewnętrznych warunków chłodzenia układów scalonych, czyli parametrów wpływających na odprowadzenie ciepła od ich powierzchni zewnętrznej do otoczenia. Dlatego w pracy przeprowadzono analizę wymiany ciepła między powierzchniami zewnętrznymi układów scalonych a otoczeniem. Ponieważ w czasie przeprowadzanej analizy okazało się, że dla tak małych powierzchni, jakie występują w układach scalonych, wartość współczynnika wnikania ciepła w warunkach konwekcji swobodnej określana z równań kryterialnych podawanych przez różnych autorów daje w wielu przypadkach duże różnice, więc w pracy zaproponowano sposób eksperymentalny wyznaczania tego współczynnika.

2. ANALIZA WYMIANY CIEPŁA MIĘDZY POWIERZCHNIAMI ZEWNĘTRZNYMI UKŁADÓW SCALONYCH I OTOCZENIEM

W celu wyznaczania pola temperatury wewnątrz układów scalonych należy mieć wcześniej określone warunki wymiany ciepła między ich powiwierzchniami zewnętrznymi i otoczeniem (określone warunki brzegowe). Układy scalone wmontowane w urządzenie elektroniczne pracują zawsze w otoczeniu gazowym (powietrze), dlatego odpływ ciepła od ich powierzchni odbywa się na drodze promieniowania i konwekcji (przeważnie swobodnej). Z uwagi na to, że konstrukcje zewnętrzne układów scalonych geometrycznie są bardzo podobne do siebie, do analizy cieplnej wybrano najczęściej stosowany w urządzeniach elektronicznych układ scalony w obudowie FLATPACK (FP) rys. 1. W układzie tym powierzchniami wymiany ciepła z otoczeniem są: powierzchnie czołowe (często z wtopionym radiatorem) i powierzchnie boczne, z których wychodzą wyprowadzenia prądowe.



Rys. 1. Przykładowa konstrukcja układu scalonego
1 - radiator, 2 - ażur, 3 - półprzewodnik, 4 - obudowa zewnętrzna (tłoczywo), 5 - wyprowadzenia prądowe, 6 - szczeliny powietrzne

Fig. 1. The exemplary construction of the integrated circuit
1 - radiator, 2 - scrap, 3 - semiconductor, 4 - external pack, 5 - current leads, 6 - air-gaps

W ogólnym przypadku radiacyjny strumień ciepła $\dot{Q}_r$ odpływający od powierzchni ciała stałego do otoczenia określany jest zależnością:

$$\dot{Q}_r = F \cdot \varepsilon_{F-ot} \cdot C_c \left[\left(\frac{T_f}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{ot}}{100}\right)^4 \right] \tag{1}$$

gdzie:

F - powierzchnia zewnętrzna wymieniająca ciepło z otoczeniem, m^2,

ε_{F-ot} - współczynnik emisji wzajemnej,

C_c - techniczna stała promieniowania, W/m^2K^4,

T_f, T_{ot} - odpowiednio: temperatura powierzchni zewnętrznej układu i otoczenia, K.

Występujący we wzorze (1) współczynnik emisji wzajemnej dla układów scalonych jest równy emisyjności powierzchni ε_F (co wynika z wzoru Christiansena $F \ll F_{otoczenia}$).

Ze względów obliczeniowych wygodniej jest określić radiacyjny strumień ciepła zależnością podobną do równania wynikającego z prawa Newtona:

$$\dot{Q}_r = F \cdot \alpha_r \cdot (T_f - T_{ot}) \tag{2}$$

gdzie α_r jest radiacyjnym współczynnikiem wnikania ciepła.
Wartość jego po uwzględnieniu zależności (1) i (2) określa wzór:

$$\alpha_r = \varepsilon_F \cdot C_c \cdot 10^{-8} \cdot (T_f^2 + T_{ot}^2) \cdot (T_f + T_{ot}) \tag{3}$$

Określony zależnościami (2) i (3) strumień ciepła przyjęto przy modelowaniu matematycznym odpływu ciepła na drodze promieniowania od powierzchni układów scalonych.

Drugim sposobem odprowadzania ciepła od powierzchni układów scalonych jest konwekcja (głównie swobodna). Zaś wielkością określającą intensywność konwekcyjnej wymiany ciepła jest współczynnik wnikania ciepła. Dotychczas w elektronice współczynnik ten określano z równań kryterialnych (1), gdyż jak podaje literatura, np. [2], zagadnienie wymiany ciepła w warunkach konwekcji swobodnej dla płyty pionowej i poziomej (a tak położone są powierzchnie układów scalonych) jest stosunkowo dobrze opracowane. Okazuje się jednak, że wartości temperatury złącza półprzewodnikowego obliczane na podstawie wzorów określających współczynnik wnikania ciepła podawanych przez różnych autorów dla tak małych powierzchni i różnicy temperatur między powierzchniami i otoczeniem rzędu (100-120)°C różnią się znacznie między sobą. Dlatego przeanalizowano wpływ rozmiaru charakterystycznego i zależności określającej współczynnik wnikania ciepła na jego wartość dla układu scalonego o wymiarach 1,8*1,8*0,24 cm.

W przypadku małych powierzchni o różnych rozmiarach boków pojawił się problem, który z rozmiarów wybrać jako rozmiar charakterystyczny. W literaturze można spotkać dwa podejścia do tego typu zagadnienia. Niektórzy autorzy [3] zalecają wybierać jako rozmiar charakterystyczny dla płyty pionowej rozmiar zgodny z kierunkiem siły wyporu a dla poziomej krótszy bok. Inni zaś [4] proponują w obu przypadkach obliczenie go z zależności:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \tag{4}$$

gdzie:

a, b - długość i szerokość rozpatrywanej powierzchni, m.

Przeprowadzenie dokładnej analizy cieplnej układów scalonych wymagało dodatkowego uwzględnienia wymiany ciepła przez wyprowadzenia prądowe. Z punktu widzenia wymiany ciepła każde wyprowadzenie prądowe potraktowano jako pręt zamocowany w ścianie o stałej temperaturze. Analizując wymianę ciepła od powierzchni wyprowadzania do otoczenia założono, że płaszczyzny prostopadłe do osi wyprowadzenia są izotermiczne, co wynikało z warunku spełnianego przez liczbę Biota ($Bi \ll 1$) [5].

W celu wykonania obliczeń opracowano model matematyczny i program obliczeniowy [6]. Ze względu na możliwość weryfikacji temperatury obliczeniowej złącza metodą pomiarową, dane do wyznaczenia współczynników wnikania ciepła przyjęto zgodnie z danymi pomiarowymi. Pomiary wykonane były metodą elektryczną poprzez pomiar spadku napięcia na badanym złączu [7]. Wartość zmierzona temperatury złącza wynosiła 108°C.

Przykładowe wyniki obliczeń oraz postacie zależności określające konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła i rozmiar charakterystyczny powierzchni podano w tablicy 1. Dokładną analizę zamieszczono w pozycji [6].

Tablica 1

Przykładowe wyniki obliczeń temperatury złącza półprzewodnikowego dla różnych zależności kryterialnych określających konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła i różnie określonego rozmiaru charakterystycznego

Typ zależności kryterialnej $A = \frac{C \cdot \lambda}{L} \cdot \left(\frac{g\beta \cdot L^3}{\nu^2} \cdot P_r\right)^n$	Rozmiar charakterystyczny L w metrach	Temperatura złącza w °C
$\alpha_k = A \cdot (T_f - T_{ot})^{0.25}$ Schmit i Beckman C = 0.526	zgodny z kierunkiem działania siły wyporu 0.0024	106,7
	obliczony z zależności (4) 0.00212	107,5
$\alpha_k = A \cdot (T_f - T_{ot})^{0.25}$ Eckert C = 0.63	zgodny z kierunkiem działania siły wyporu 0.0024	98,0
	obliczony z zależności (4) 0.00212	98,5
$\alpha_k = A \cdot (T_f - T_{ot})^{0.25}$ dla L = 0.018 $\alpha_k = A \cdot (T_f - T_{ot})^{0.125}$ dla L < 0.018 C=0.54 lub C=1.18 Michiejew	zgodny z kierunkiem działania siły wyporu 0.0024	96,4
	obliczony z zależności (4) 0.00212	98,6

Analizując tablicę 1 dostrzec można różnicę w temperaturach obliczeniowych złącza dla różnych zależności określających współczynnik wnikania ciepła.

Aby jednak model matematyczny mógł być w pełni przydatny do celów praktycznych, tzn. służył do wyznaczania optymalnych parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych układów scalonych, wymagane jest ścisłe określenie ich zewnętrznych warunków chłodzenia. Dlatego opracowano metodę wyznaczania konwekcyjnego współczynnika wnikania ciepła dla małych powierzchni w sposób eksperymentalny. Ponieważ na obecnym etapie nie jest jeszcze gotowe stanowiska pomiarowe, więc w punkcie następnym tej pracy podano tylko procedurę pomiarową i schemat ideowy stanowiska pomiarowego.

3. ISTOTNA METODY POMIAROWEJ I KONCEPCJA STANOWISKA POMIAROWEGO

Konwekcja swobodna jest takim sposobem wymiany ciepła, w którym ruch płynu wywołany jest siłami masowymi (siłą wyporu i grawitacyjną) spowodowanymi różnicą temperatury powierzchni ściany i płynu. Czyli w konwekcji swobodnej narzucone jest zawsze pole temperatury, a wywołana tym polem różnica ciężarów właściwych cząstek płynu ma bezpośredni wpływ na wartość współczynnika wnikania ciepła. Oznacza to, że w celu wyznaczania wartości tego współczynnika należy mieć ściśle określone: strumień wymienianego ciepła $\dot{Q}_k$ lub $\dot{q}_k$, pole powierzchni wymieniającej ciepło z otoczeniem oraz temperatury powierzchni i otoczenia, co można zapisać:

$$\alpha_k = \frac{\dot{Q}_k}{F(T_f - T_{ot})} \tag{5}$$

lub dla jednostkowego strumienia ciepła:

$$\alpha_k = \frac{\dot{q}_k}{(T_f - T_{ot})} \tag{6}$$

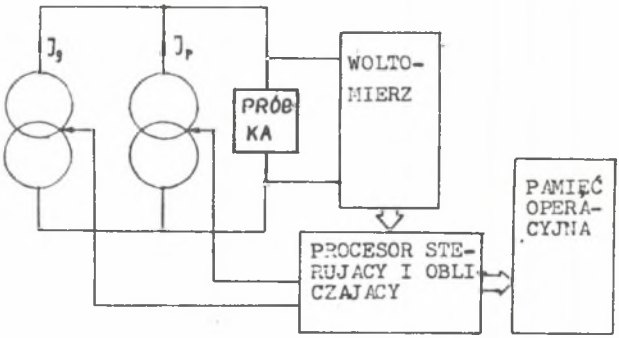
gdzie:

α_k - konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła, W/m^2K.

Jak wiadomo, wymianie ciepła od powierzchni ciała stałego do otoczenia gazowego oprócz konwekcji towarzyszy zawsze promieniowanie, stąd wyznaczenie konwekcyjnego współczynnika wnikania ciepła wymaga wyeliminowania lub pomiarowego określenia radiacyjnego strumienia ciepła. Ponieważ wyeliminowanie promieniowania cieplnego w warunkach pomiarowych jest niemożliwe, więc w proponowanej metodzie przewiduje się określenia konwekcyjnego strumienia ciepła jako różnicę całkowitego strumienia i radiacyjnego dla ściśle zdeterminowanych następujących wielkości: ε_F, F, T_f i T_{ot}.

W praktyce procedura pomiarowa przedstawia się następująco:

1. W próbkach wykonanych z papierów przewodzących prąd elektryczny, o kształtach i wymiarach ściśle odpowiadającym kształtom i wymiarom powierzchni układów scalonych, będzie generowany elektrycznie strumień ciepła. Zastosowanie papierów przewodzących pozwoli na ścisłą identyfikację badanych powierzchni, gdyż ich grubość z punktu widzenia wymiany ciepła można pominąć. Wówczas można przyjąć, że cały strumień ciepła odpływa do otoczenia przez powierzchnie czołowe. Wielkość tego strumienia będzie określona przez pomiar prądu i napięcia.
2. W celu dokładnego wyznaczenia radiacyjnego strumienia ciepła zamierza się badane powierzchnie pokryć bardzo cienkimi foliami (aby zminimalizować gradient temperatury w kierunku grubości folii) o wymiarach poprzecznych ściśle odpowiadających badanym próbkom i z materiału o znanej emisyjności, np. aluminiowymi.
3. Jedną z większych trudności jest dokładne pomiarowe wyznaczenie temperatury tych powierzchni. Otóż zastosowanie próbek z papieru przewodzącego pokrytych bardzo cienkimi foliami ma tę zaletę, że temperatura powierzchni z dużą dokładnością będzie równa temperaturze źródła ciepła. Z kolei do pomiaru pośredniego temperatury źródła ciepła wykorzystany zostanie miernik rezystancji termicznej, którym równocześnie mierzony będzie generowany strumień ciepła. (Schemat ideowy stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 2).



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego
Fig. 2. Scheme of measuring position

Miernik ten pracuje w sposób impulsowy. Polega to na tym, że końcówki obwodu pomiarowego i obwodu grzania dołącza się do wypracowań prądowych próbki. Odpowiedni układ sterujący przełącza obwody ze stanu grzania na stan pomiarowy i odwrotnie. Fazy grzania i pomiaru występują przemiennie po sobie aż do uzyskania przez próbkę równowagi termicznej. Wskaźnikiem równowagi termicznej jest zadana wartość różnicy temperatury próbki dla dwóch kolejnych czasów pomiarowych. Ze względu na zakłócenia elektryczne i szybkość stygnięcia próbki wymagany jest tutaj odpowiedni dobór czasów grzania i pomiaru.

4. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Przeprowadzona analiza wykazała istnienie luki w badaniach podstawowych dotyczących konwekcyjnej wymiany ciepła w przyrządach półprzewodnikowych (układach scalonych). W dodatku należy zauważyć, że powierzchnie układów scalonych są tak małe, że w warstwie przyściennej nie uformuje się jeszcze dokładnie określony rodzaj przepływu płynu. Natomiast podawane w literaturze zależności kryterialne dotyczą zawsze określonego przepływu. Stąd nie wiadomo, czy zgodność wyników obliczeń i pomiaru dla zależności Schmidta i Beckmana nie jest spowodowana pojawieniem się kompensujących błędów obliczeniowych. Z kolei dokładna identyfikacja zewnętrznych warunków chłodzenia przyrządów, a tym samym temperatury złącz półprzewodnikowych, od której zależy ich poziom niezawodności i trwałości, jest zagadnieniem bardzo ważnym we współczesnej elektronice. Stąd zaproponowana metoda pomiarowa wyznaczania współczynnika wnikania ciepła może okazać się bardzo przydatna. Podstawową jej zaletą jest to, że do pomiaru temperatury powierzchni i strumienia ciepła wykorzystuje się to samo urządzenie. W przypadku gdyby okazało się, że pole temperatury powierzchni próbki jest niejednorodne i różne od temperatury źródła ciepła, rozważa się możliwość zastosowania do jego pomiaru metody termowizyjnej (8).

LITERATURA

[1] PELC T., BORCZYŃSKI J.: Odprowadzenie ciepła z przyrządów półprzewodnikowych. WKiŁ, Warszawa 1986.

[2] STANISZEWSKI B.: Wymiana ciepła - Podstawy teoretyczne. PWN, Warszawa 1980.

[3] MICHIEJEW M., MICHIEJEWA I.: Osnowy tepłoperedači. Wydawnictwo Energia, Moskwa 1977.

[4] KING W.J.: The basic laws and date of heat transmission part. III. Free convection. Mechanical Enginnering. Vol. 54, May 1932.

[5] Przewodzenie ciepła. Praca zbiorowa pod red. S.J. Gduli. PWN, Warszawa 1984.

[6] KUCYPERA S.: Analiza procesu wymiany ciepła w przyrządach półprzewodnikowych. Praca doktorska. Gliwice 1988.

[7] Instrukcja obsługi miernika rezystencji termicznej ITE Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1985.

[8] RUDOWSKI G.: Termowizja i jej zastosowanie. WKiŁ, Warszawa 1978.

Recenzent
Prof. dr hab. inż. Leon Troniewski

АНАЛИЗ ОТВОДА ТЕПЛА ОТ ВНЕШНЫХ ПОВЕРХНОСТИ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Р е з ю м е

В работе проведён анализ теплообмена между внешными поверхностями и окружающую среду а также подано примерные результаты расчётов. Кроме того подано способ определения коэффициента теплоотдачи от малых поверхности в окружающую среду в условиях свободной конвекции.

ANALYSIS OF HEAT TRANSFER FROM EXTERNAL SURFACES
OF INTEGRATED CIRCUITS TO SURROUNDINGS

S u m m a r y

Analysis of the heat transfer from external surfaces of integrated circuits to surroundigs made and results of exemplary calculations have been presented. Berides the method of determination of surface heat-transfer coefficient between a little surfaces and their surroundings in natural convection has been described.