

Stanisław KUCYPERA

Edward KOSTOWSKI

WPLYW ZEWNĘTRZNYCH WARUNKÓW TERMICZNYCH NA TEMPERATURĘ
OBSZARU CZYNNEGO PÓŁPRZEWODNIKA W UKŁADACH SCALONYCH

Streszczenie. Przedstawiono założenia modelu matematycznego pola temperatury w pracujących przyrządach półprzewodnikowych na przykładzie układów scalonych. Model zweryfikowano eksperymentalnie. Przeanalizowano wpływ zewnętrznych warunków termicznych na temperaturę obszaru czynnego półprzewodnika. Model może być przydatny do obliczeń konstrukcyjnych i eksploatacyjnych przyrządów półprzewodnikowych.

1. Wstęp

Temperatura złącza w pracujących przyrządach półprzewodnikowych jest jednym z najistotniejszych czynników decydujących o niezawodności urządzeń elektronicznych. Poziom niezawodności całego urządzenia zdeterminowany jest niezawodnością pojedynczego elementu półprzewodnikowego. Dopuszczalne wartości mocy cieplnej wydzielanych na płytkach półprzewodnikowych układów scalonych, dla których nie występuje termiczne zniszczenie złącza półprzewodnikowego, ustalane są zasadniczo eksperymentalnie. Również dobór odpowiednich układów chłodzenia przeprowadza się na podstawie wyników pomiarów [3]. Zamiast kosztownych i czasochłonnych badań eksperymentalnych można stosować modelowanie matematyczne zjawisk cieplnych zachodzących w przyrządach półprzewodnikowych. Obliczenia modelowe umożliwiają dobór właściwych cech konstrukcyjnych przyrządu i układów chłodzenia już w fazie projektowania. Ogólny i dokładny model matematyczny umożliwia ponadto badanie wpływu dowolnych parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na rozkład temperatury w przyrządzie, co nie zawsze jest możliwe do osiągnięcia za pomocą eksperymentu.

2. Założenie modelu matematycznego pola temperatury w układach scalonych

W pracy [1] przedstawiono przegląd podstawowych metod modelowania zjawisk cieplnych w przyrządach półprzewodnikowych. Zasadniczą grupę stanowią metody oparte na analitycznych rozwiązaniach zagadnień brzegowych przewodzenia ciepła. Metody analityczne, pomimo elegancji matematycznej, mogą być stosowane jedynie w najprostszych (często wyidealizowanych) przypadkach geome-

trycznych i cieplnych. Dla większości przyrządów półprzewodnikowych metody analityczne nie mogą być stosowane.

Z kolei rozwój elektronicznej techniki obliczeniowej zwiększył możliwość stosowania metod numerycznych do rozwiązywania złożonych problemów fizyki matematycznej, w tym również zagadnień cieplnych. Metodami numerycznymi można rozwiązywać nieliniowe zagadnienia wymiany ciepła w materiałach niejednorodnych dla dowolnych warunków brzegowych. Dlatego opracowano model matematyczny pola temperatury w układach scalonych, którego założenia opisano w niniejszej pracy, na podstawie metody bilansów elementarnych [4]. Metoda ta zaliczana do klasy metod różnicowych ma przejrzystą interpretację fizyczną i z tego względu jest przydatna do analizy złożonych procesów cieplnych.

Przepływ ciepła w układach scalonych odbywa się w szczególnych warunkach. Pomimo nieznaczących rozmiarów geometrycznych gęstość mocy cieplnej generowana w strukturze półprzewodnika osiąga bardzo duże wartości. Sam układ scalony składa się z materiałów o różnorodnych właściwościach cieplnych, przy czym kształt geometryczny poszczególnych elementów jest zazwyczaj bardzo zróżnicowany. Analizując warunki wymiany ciepła na powierzchniach zewnętrznych przyrządu należy brać pod uwagę zarówno konwekcję, jak i promieniowanie, bowiem wartości strumieni ciepła są w obydwu przypadkach podobnego rzędu.

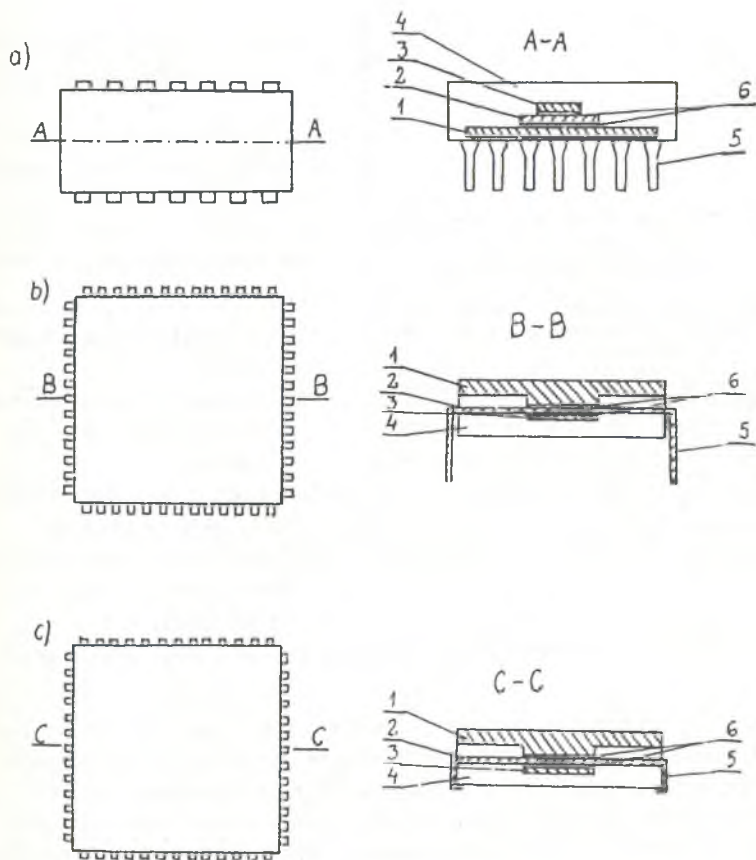
Wymienione czynniki zostały uwzględnione przy opracowywaniu modelu matematycznego w celu osiągnięcia zadowalającej dokładności obliczeń.

Model wymiany ciepła w układach scalonych opracowano przy następujących podstawowych założeniach:

- a) Rozpatruje się trójwymiarowe pole temperatury w kartezjańskim lub cylindrycznym układzie współrzędnych.
- b) Uwzględnia się możliwość analizy ustalonych i nieustalonych pól temperatury.
- c) Uwzględnia się występowanie wielowarstwowej struktury układu o różnych właściwościach termofizycznych (struktura półprzewodnikowa, azur, radiator, tworzywo żywiczne).
- d) Uwzględnia się występowanie płaskich źródeł ciepła o skończonych rozmiarach (generacja ciepła w cienkiej warstwie półprzewodnika).
- e) Uwzględnia się możliwość występowania szczelin powietrznych pomiędzy warstwami układu (szczeliny traktowane są jak skupione opory cieplne).
- f) Na powierzchniach zewnętrznych układu uwzględnia się wymianę ciepła przez konwekcję i promieniowanie. Nieliniowe zagadnienie brzegowe rozwiązuje się metodą iteracyjną.
- g) Uwzględnia się występowanie wyprowadzeń prądowych jako elementów wymieniających ciepło z otoczeniem.
- h) Uwzględnia się zmienność z temperaturą parametrów termofizycznych materiałów oraz współczynników wnikania ciepła na powierzchni przyrządu.

Szczegółowe dane dotyczące założeń modelu i sposobu wyprowadzenia równań różnicowych pola temperatury przedstawiono w pracy [2].

Weryfikację dokładności modelu przeprowadzono w oparciu o wyniki pomiarów temperatury złącza dla układów scalonych w obudowach typu FP. Przykładowe struktury wymienionych układów scalonych przedstawiono na rysunku 1, a wyniki badań weryfikacyjnych na rysunku 2. Uzyskano zadowalającą zgodność wyników obliczeń i pomiarów (rozbieżności temperatury złącza obliczonej i zmierzonej nie przekraczały 10 K). Dokładniejsze dane dotyczące weryfikacji modelu obliczeniowego przedstawiono w pracy [2].



Rys. 1. Przykładowe konstrukcje układów scalonych

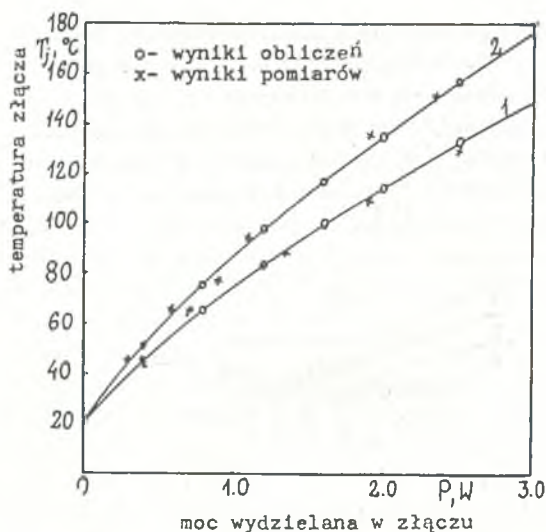
a) układ scalony w obudowie DUAL IN LINE - DIL, b) układ scalony w obudowie FLATPACK - FP, c) układ scalony w obudowie CHIP CARRIER - CC

1 - radiator, 2 - azur, 3 - półprzewodnik, 4 - obudowa zewnętrzna (tłoczywo), 5 - wyprowadzenia prądowe, 6 - szczeliny powietrzne

Fig. 1. The exemplary constructions of the integrated circuits

a) integrated circuit in DUAL IN LINE-DIL pack, b) integrated circuit in FLATPACK-FP pack, c) integrated circuit in CHIP CARRIER-CC pack

1 - radiator, 2 - scrap, 3 - semiconductor, 4 - external pack, 5 - current leads, 6 - air-gaps



Rys. 2. Zależność temperatury złącza od mocy cieplnej dla układu scalonego z radiatorem miedzianym

1 - układ zawieszony w położeniu pionowym,
2 - układ w położeniu poziomym z powierzchnią zaizolowaną od dołu

Fig. 2. Junction temperature as a function of its heat power for integrated circuit in FP pack with copper radiator

1 - integrated circuit hanged in vertical position, 2 - integrated circuit in horizontal position with isolated bottom surface

5) ułożenie elementu w stosunku do kierunku przepływającego strumienia powietrza.

W obliczeniach założono dla uproszczenia równomierne wydzielanie się mocy cieplnej na całej płytce półprzewodnikowej. We wszystkich przypadkach, oprócz pierwszego, wpływ wymienionych parametrów na temperaturę obszaru czynnego obliczano przy założeniu, że powierzchnia czołowa układu od strony tworzywa żywicznego (MG-15) jest zaizolowana. Na pozostałych powierzchniach przyjmowano warunek brzegowy trzeciego rodzaju, uwzględniając odpływ ciepła od powierzchni układu do otoczenia przez konwekcję i promieniowanie. Założenia te są najbardziej zbliżone do rzeczywistych warunków pracy układów scalonych montowanych na płytkach modułowych. Płytki te wykonywane są z materiału o złych własnościach przewodzących (laminat), ponadto bardzo często między układem i płytką modułową występuje szczelina powietrzna o grubości około 1 mm.

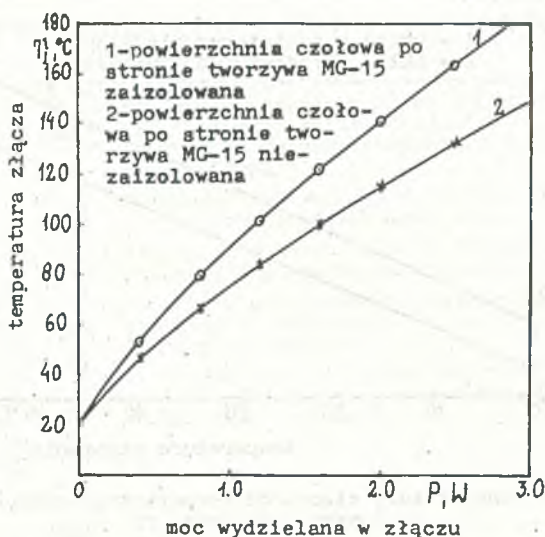
Przykładowe wyniki obliczeń dla układów scalonych w obudowach FP i DIL z radiatorami aluminiowym i miedzianym przedstawiono na rysunkach 3-6. Rysunki 3-5 dotyczą układów scalonych w obudowie FP i wymiany ciepła w warunkach konwekcji swobodnej, rysunek 6 układów w obudowie FP i DIL.

Wykorzystując opracowany model przeprowadzono obliczenia wpływu wybranych termicznych parametrów eksploatacyjnych na rozkład temperatury w układach scalonych.

3. Wyniki przykładowych obliczeń dla stanu ustalonego

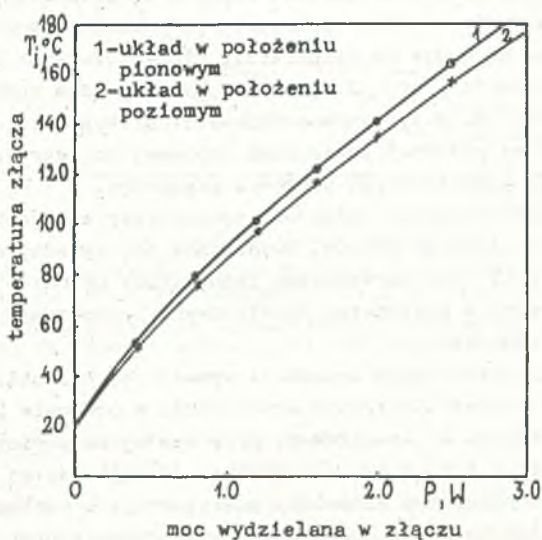
Przedmiotem analizy był ilościowy wpływ na temperaturę obszaru czynnego półprzewodnika następujących parametrów eksploatacyjnych:

- 1) zaizolowanie jednej z powierzchni czołowych przyrządu,
- 2) ułożenie przyrządu w czasie pracy (pionowe lub poziome),
- 3) temperatura ośrodka otaczającego przyrząd,
- 4) prędkość przepływającego powietrza dla konwekcji wymuszonej,



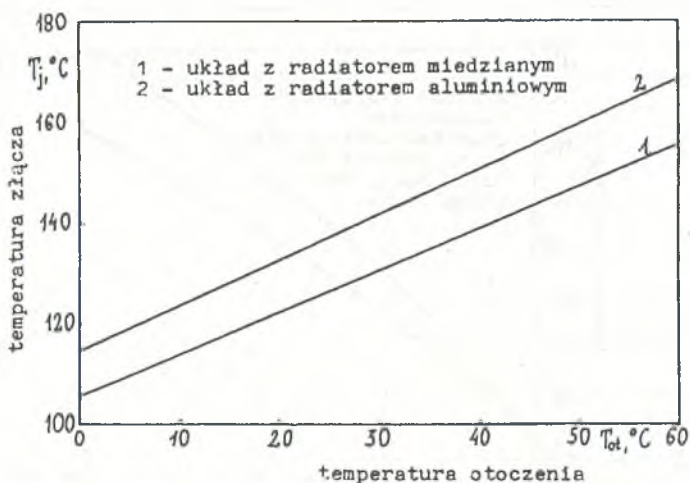
Rys. 3. Zależność temperatury złącza od mocy cieplnej dla układu scalonego w obudowie FP i położeniu pionowym z radiatorem miedzianym

Fig. 3. Junction temperature as a function of its heat power for integrated circuit in FP pack and in vertical position with copper radiator



Rys. 4. Zależność temperatury złącza od mocy cieplnej dla układu scalonego w obudowie FP z radiatorem miedzianym i powierzchnią czołową po stronie tworzywa MG-15 zaizolowaną

Fig. 4. Junction temperature as a function of its heat power for integrated circuit in FP pack with copper radiator and frontal surface isolated to side of material MG-15



Rys. 5. Zależność temperatury złącza od temperatury otoczenia dla układu scalonego w obudowie FP

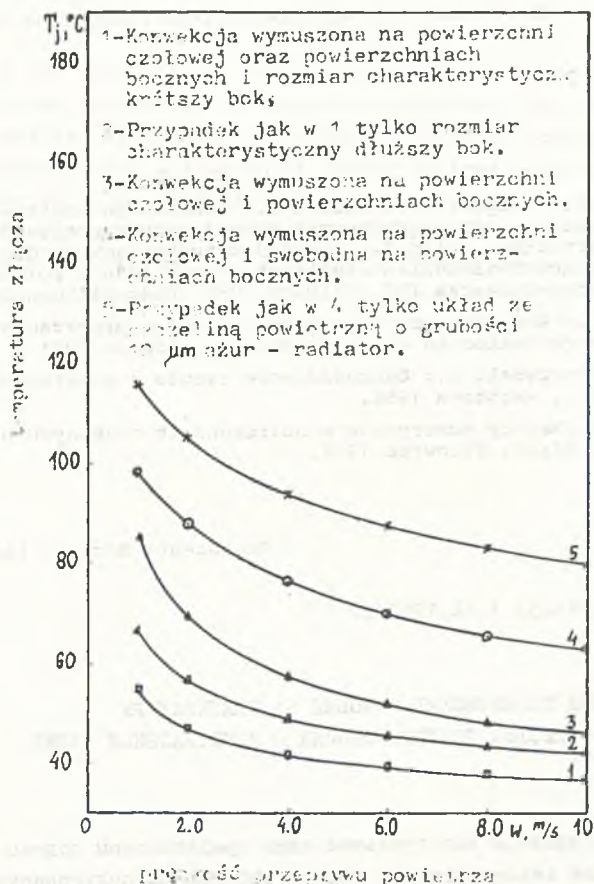
Fig. 5. Junction temperature as a function of surrounding temperature for integrated circuit in FP pack

Na rysunku 3 zwrócono uwagę na wpływ zaizolowania jednej z powierzchni czołowych na temperaturę złącza. Widać wyraźnie negatywny wpływ zaizolowania, co wynika głównie ze zmniejszenia odpływu od powierzchni radiacyjnego strumienia ciepła (emisyjność zaizolowanej powierzchni wynosiła $\epsilon = 0,9$). Na rysunku 4 pokazano wpływ na temperaturę złącza ułożenia pionowego i poziomego układu w czasie pracy. Z rysunku wynika, że dla temperatury dopuszczalnej różnice dla obu przypadków są niewielkie. Wynikają one tylko ze zwiększenia o 30% na poziomej powierzchni czołowej konwekcyjnego współczynnika wnikania ciepła w stosunku do ułożenia pionowego.

Na rysunku 5 przedstawiono zależność temperatury złącza w funkcji temperatury ośrodka otaczającego układy. Uwidacznia się wyraźny negatywny wpływ tej temperatury, przy czym ze wzrostem temperatury ośrodka jest on większy dla układów scalonych z radiatorem aluminiowym. Spowodowane jest to mniejszą emisyjnością aluminium.

Na rysunku 6 pokazano wpływ konwekcji wymuszonej dla układu scalonego w obudowie FP z radiatorem miedzianym oraz układu w obudowie DIL z radiatorem aluminiowym. Zależności te analizowano przy stałej mocy cieplnej generowanej w złączu równej 1,6 W. Z rysunku wynika, że najbardziej niekorzystna sytuacja występuje w przypadku szczeliny powietrznej, a następnie dla konwekcji wymuszonej tylko na powierzchni czołowej układu. W przypadku konwekcji wymuszonej na powierzchni czołowej i powierzchniach bocznych układów widać silniejszy wpływ mniejszej prędkości na temperaturę złącza. Fakt ten wynika z mechanizmu rozwijania się konwekcji na małych powierzchniach. Najbardziej korzystne ułożenie układu scalonego przy chłodzeniu wymuszonym jest takie,

aby krótszy bok powierzchni był równoległy do kierunku przepływającego strumienia powietrza.



Rys. 6. Zależność temperatury złącza od prędkości powietrza chłodzącego dla układu w obudowie DIL (krzywe 1, 2) i FP (krzywe 3, 4, 5)

Fig. 6. Junction temperature as a function of cooling-air speed for integrated circuit in DIL pack (curves 1, 2) and FP pack (curves 3, 4, 5)

4. Wnioski końcowe

Przeprowadzona weryfikacja pomiarowa modelu matematycznego wskazuje na jego dużą dokładność. Oznacza to, że opracowany model może być wykorzystany praktycznie do oceny wpływu różnych parametrów przy projektowaniu nowych przyrządów półprzewodnikowych, udoskonalaniu istniejących oraz do ustalania właściwej eksploatacji przyrządów. Może także być wykorzystany do optymalizacji konstrukcji przyrządów półprzewodnikowych oraz warunków ich działania w celu zapewnienia najlepszego odpływu ciepła z obszaru czynnego przyrządu.

Przeprowadzona analiza wskazuje na duże oddziaływanie zewnętrznych warunków wymiany ciepła na nagrzewanie się złącz półprzewodnikowych. Stąd wynika wniosek praktyczny, że aby otrzymać dokładną informację o polu temperatury w przyrządzie, należy ściśle identyfikować jego zewnętrzne warunki wymiany ciepła.

LITERATURA

- [1] Kostowski E., Kucypera S., Skorek J.: Analiza parametrów termodynamicznych elementów półprzewodnikowych pracujących w przyrządach przy użyciu metod numerycznych. Etap 1. Przegląd dotychczasowych danych literaturowych dotyczących zagadnień cieplnych w przyrządach półprzewodnikowych. Praca naukowo-badawcza ITC. Gliwice 1986 (niepublikowana).
- [2] Kucypera S.: Analiza procesu wymiany ciepła w przyrządach półprzewodnikowych. Praca doktorska w przygotowaniu. Gliwice 1987.
- [3] Pelc T., Borczyński J.: Odprowadzanie ciepła z przyrządów półprzewodnikowych. WKiŁ, Warszawa 1986.
- [4] Szargut J.: Metody numeryczne w obliczeniach cieplnych pieców przemysłowych. Wyd. Śląsk, Katowice 1977.

Recenzent: Doc. dr inż. Antoni Guzik

Wpłynęło do Redakcji 1.12.1987 r.

ВЛИЯНИЕ НАРУЖНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ТЕМПЕРАТУРУ АКТИВНОГО ПРОСТРАНСТВА ПОЛУПРОВОДНИКА В ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЕ

Резюме

В работе на примере интегральных схем представлены основы математического моделирования температурного поля в работающих полупроводниковых приборах. Проведена экспериментальная верификация математической модели, путём сравнения расчётных и измерительных результатов. Используя разработанную модель, дан анализ влияния избранных наружных термических параметров на температуру активной части пространства интегральной схемы. Выводы указывают на возможность применения разработанной математической модели а также те наружные термические параметры, которые влияют особенно сильно на нагревание полупроводникового слоя в интегральной схеме и в связи с этим на необходимость их идентифицирования с возможно наибольшей точностью.

THE INFLUENCE OF EXTERNAL THERMAL CONDITIONS ON THE TEMPERATURE
OF SEMICONDUCTOR ACTIVE AREA IN INTEGRATED CIRCUITS

S u m m a r y

Assumptions of the mathematical model of temperature field in the semiconductor devices and integrated circuits are presented. The mathematical model has been verified by comparison of measurements and calculation results. Using this model the influence of select external thermal parameters on the temperature of active area in integrated circuit have been analysed. The conclusion about possibility of application of mathematical model and importance of exact identification of parameters causing the heating of semiconductor junctions have been specified.