

Stanisław KUCYPERA
Politechnika Śląska

MATEMATYCZNE MODELOWANIE WYMIANY CIEPŁA W PRZYRZĄDACH PÓŁPRZEWODNIKOWYCH
CHŁODZONYCH CIECZAMI

Streszczenie. Przedstawiono założenia modelu matematycznego pola temperatury w przyrządach półprzewodnikowych na przykładzie dyskretnych elementów chłodzonych cieczami. Porównano wyniki uzyskane za pomocą modelu z danymi eksperymentalnymi. Podano analizę wpływu współczynnika wnikania ciepła i strumienia masy chłodziwa na temperaturę złącza półprzewodnikowego.

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT EXCHANGE IN THE SEMICONDUCTOR DEVICES
FLUIDS-COOLED

Summary. Assumptions of the mathematical model of the temperature field in the semiconductor devices are presented. Some results of the experimental verification of described mathematical model are shown in the paper. The influence of the heat-transfer coefficient and mass-flow of coolant on the semiconductor junction temperature has been analysed.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ ОХЛАЖДЕННЫХ ЖИДКОСТЯМИ

Резюме. Представлены основы математической модели температурного поля в полупроводниковых приборах на примере дискретных элементов. Экспериментальные результаты сравнены с расчетными результатами, полученными из приведенных моделей. Указано как коэффициент теплоотдачи и поток массы охлаждающего вещества влияют на температуру полупроводниково соединения.

1. WSTĘP

Nagrzewanie się złącza (obszaru czynnego) pod wpływem rozpraszanej mocy elektrycznej w pracujących przyrządach półprzewodnikowych jest jednym z najważniejszych czynników decydujących o niezawodności urządzeń elektronicznych. Przy zbyt dużej ilości wydzielanego ciepła i złych warunkach chłodzenia może nastąpić przekroczenie dopuszczalnej temperatury struktury pół-

przewodnikowej T_{dop} . Doboru maksymalnych wartości mocy wydzielanej w przyrządzie oraz odpowiednich układów chłodzenia bardzo często dokonuje się opierając się na wynikach pomiarów. Ze względu na koszty oraz czas trwania pomiarów coraz większego znaczenia nabiera modelowanie matematyczne zjawisk cieplnych zachodzących w przyrządach półprzewodnikowych. Modele matematyczne umożliwiają badanie wpływu różnych parametrów na rozkład temperatury w przyrządzie (co nie zawsze jest możliwe do osiągnięcia w przypadku eksperymentu), a także dobór cech konstrukcyjnych przyrządu już w okresie jego projektowania.

Jednym z ważnych czynników decydujących o nagrzewaniu się złącza, a tym samym o trwałości i niezawodności pracy przyrządu, jest sposób jego chłodzenia. W przypadku wymuszonego chłodzenia cieczowego przyrządu modelowanie matematyczne umożliwia badanie wpływu różnych parametrów (np. strumienia masy czy współczynnika wnikania ciepła) na temperaturę złącza, a tym samym właściwy dobór układu chłodzenia przy założeniu maksymalnych wartości generowanego w złączu strumienia ciepła.

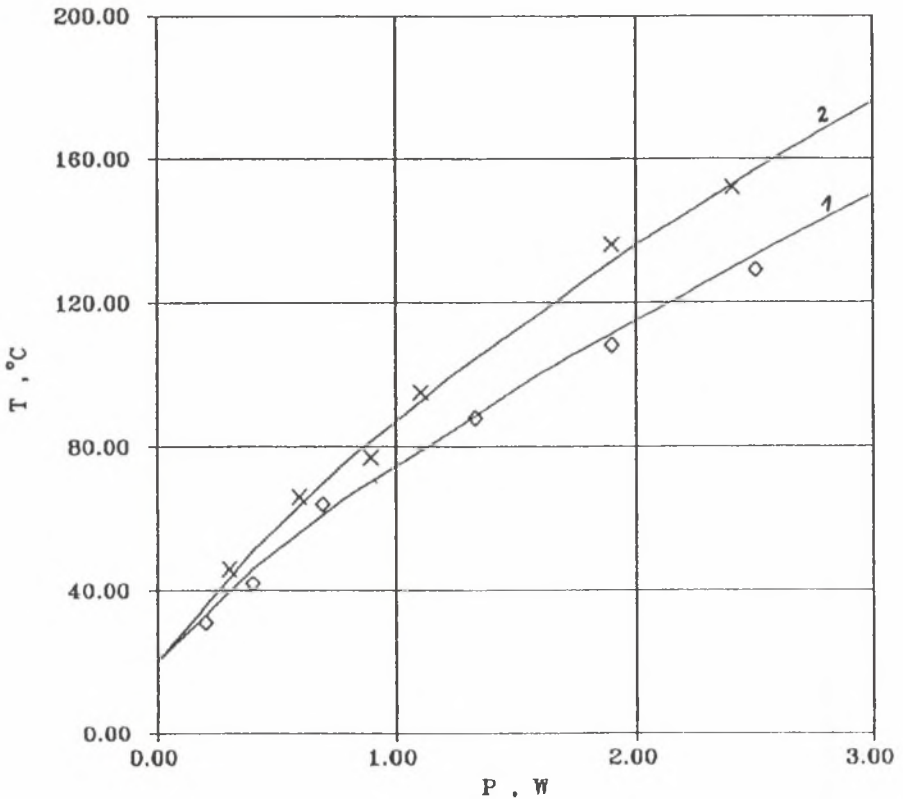
2. ZAŁOŻENIA MODELU MATEMATYCZNEGO WYMIANY CIEPŁA W PRZYRZĄDACH PÓŁPRZEWODNIKOWYCH

Zagadnieniu analizy zjawisk cieplnych zachodzących w przyrządach półprzewodnikowych poświęconych jest wiele prac. W poz. [1] przedstawiono przegląd podstawowych metod matematycznego modelowania tych zjawisk. Z przeglądu wynika, że dość liczną grupę stanowią metody oparte na analitycznym rozwiązaniu zagadnień brzegowych przewodzenia ciepła. Metody te mogą służyć jedynie do analizy najprostszych przypadków geometrycznych i cieplnych. Dla większości przyrządów półprzewodnikowych wyniki obliczeń otrzymane metodami analitycznymi nie mogą mieć praktycznego zastosowania.

W parcy tej zostaną podane założenia upraszczające modelu matematycznego wymiany ciepła w przyrządach półprzewodnikowych. Model ten opracowano opierając się na metodzie bilansów elementarnych [2].

Przepływ ciepła w przyrządach półprzewodnikowych odbywa się w dosyć szczególnych warunkach, gdyż ich rozmiary geometryczne są bardzo małe, natomiast gęstość mocy cieplnej generowana w strukturze półprzewodnikowej osiąga bardzo duże wartości. Poza tym struktura przyrządu najczęściej składa się z materiałów o różnych własnościach cieplnych i różnych kształtach geometrycznych poszczególnych elementów. Od powierzchni zewnętrznych przyrządów półprzewodnikowych ciepło odprowadza się bardzo często na drodze konwekcji wymuszonej. Stąd przy modelowaniu matematycznym wymiany ciepła między powierzchnią zewnętrzną przyrządu i czynnikiem chłodzącym (metodą bilansów elementarnych)

Łatwo jest uwzględnić zmienność kierunków i natężenia przepływu czynnika chłodzącego w poszczególnych elementach różnicowych.



Rys. 1. Zależność temperatury złącza od mocy cieplnej dla układu scalonego 1-położenie pionowe układu, 2-położenie poziome układu, x, \diamond -wyniki pomiarów

Fig. 1. Steady-state junction temperature as the function of the heat power of the integrated circuit 1-vertical position of device, 2-horizontal position of device, x, \diamond - measurements

W pracy tej analizując wymianę ciepła na powierzchniach zewnętrznych przyrządu rozpatrywano możliwość chłodzenia go powietrzem lub cieczą opływającą jego radiator.

Wymienione czynniki uwzględnione są w omawianym modelu matematycznym celem osiágnięcia lepszej dokładności obliczeń. Dlatego opracowując model przyjęto następujące założenia:

1. Rozpatruje się trójwymiarowe pole temperatury w układzie współrzędnych kartezjańskim lub cylindrycznym.
2. Rozpatruje się możliwość analizy ustalonych lub niestabilnych pól temperatury.
3. Rozpatruje się możliwość uwzględniania wielowarstwowej struktury przyrządu o różnych własnościach termofizycznych materiału.
4. Uwzględnia się możliwość występowania objętościowych lub powierzchniowych źródeł ciepła o skończonych rozmiarach.
5. Rozpatruje się możliwość uwzględniania zmienności parametrów termofizycznych materiałów i współczynników wnikania ciepła jako funkcję temperatury.
6. Na powierzchniach zewnętrznych przyrządów przyjęto, że ciepło może być wymieniane z otoczeniem na drodze:
 - a) konwekcji i promieniowania (chłodzenia powietrzem),
 - b) tylko konwekcji (chłodzenia cieczą opływającą powierzchnie zewnętrzne przyrządu).

Model zweryfikowano eksperymentalnie poprzez porównanie wyników pomiarów i obliczeń temperatury złącza dla kilku układów scalonych w obudowie (FP). W większości przypadków uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników (rysunek 1).

Wykorzystując opracowany model przeprowadzono badania wpływu różnych parametrów na rozkład temperatury w dyskretnych przyrządach półprzewodnikowych chłodzonych cieczami.

3. KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA METOD CHŁODZENIA PRZYRZĄDÓW PÓŁPRZEWODNIKOWYCH ORAZ PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ

Podstawową wielkością określającą sposób chłodzenia przyrządu półprzewodnikowego jest ilość ciepła generowanego w jego strukturze. Dlatego stosowane są głównie trzy metody chłodzenia przyrządów:

- chłodzenie powietrzne,
- chłodzenie termoelektryczne,
- chłodzenie cieczowe.

Dwie pierwsze metody wykorzystywane są do chłodzenia przyrządów, w których moc cieplna generowana w obszarze czynnym półprzewodnika nie przekracza rzędu kilkudziesięciu watów. Uwarunkowane to jest efektywnością systemów chłodzenia. Gdyż odprowadzanie ciepła z przyrządów dużej mocy za pomocą radiatorów chłodzonych powietrzem spowodowałoby nadmierne zwiększenie rozmiarów układu chłodzenia, a w konsekwencji całego urządzenia elektronicznego, w którym pracuje dany przyrząd. W przypadku zaś gdy moc cieplna generowana w złączu półprzewodnikowym osiąga wartości kilkuset watów, zawsze stosuje się chłodzenie cieczowe. W układach chłodzenia cieczowego jako czynnik chłodzący stosuje się wodę, olej lub inne ciecze, w których można również wykorzystać ich właściwości w zakresie ciepła parowania. Zjawisko to wykorzystuje się wtedy, gdy temperatura omywanej powierzchni jest wyższa od temperatury nasycenia chłodzącej cieczy. Wówczas oprócz klasycznej konwekcji występuje dodatkowo odbiór ciepła związany z wrzeniem cieczy (chłodzenie wapotronowe i rury ciepłe [3]). Jednak nie wszystkie ciecze można w równym stopniu stosować do chłodzenia przyrządów półprzewodnikowych. Niektóre z nich mimo dobrych własności przejmowania ciepła mają ograniczoną stosowalność ze względu na swoje właściwości fizyczne (np. duża przewodność elektryczna i duża aktywność chemiczna).

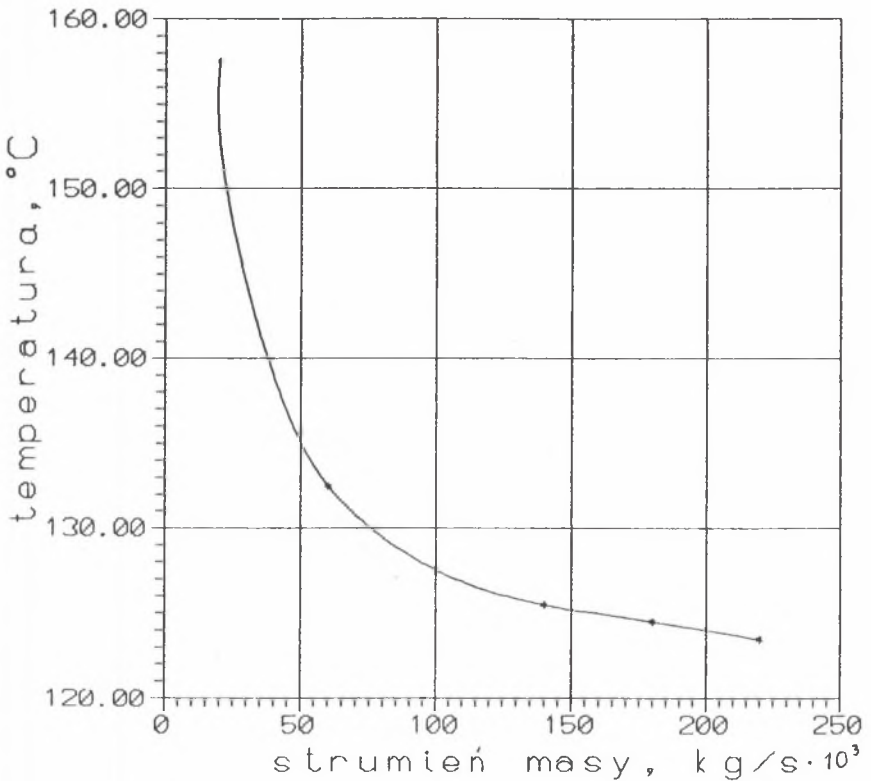
Stąd przy chłodzeniu cieczowym przyrządów półprzewodnikowych istnieje konieczność zaprojektowania odpowiedniego układu chłodzenia (dobierając właściwy czynnik chłodzący oraz natężenie i kierunek jego przepływu wzdłuż powierzchni chłodzącej). Dlatego przeprowadzono analizę wpływu tych czynników na temperaturę złącza półprzewodnikowego dla różnych przyrządów półprzewodnikowych chłodzonych cieczami. Rozpatrywano działanie przyrządów w warunkach ustalonych i nieustalonych.

W pracy pokazano wpływ natężenia przepływu czynnika chłodzącego i współczynnika wnikania ciepła na wartość temperatury obszaru czynnego półprzewodnika dla tranzystora KT 904 pracującego w stanie ustalonym poz [4]. Zakładając, że tranzystor pracuje w stanie ustalonym, w obliczeniach przyjęto (zgodnie z warunkami rzeczywistymi), że tranzystor posiada bardzo cienki radiator miedziany o grubości 0,2 mm, który jest jedną ze ścian chłodnicy omywanej strumieniem różnych czynników chłodzących. Omywana powierzchnia radiatora ma wymiary 15,0 * 15,0 mm. Przepływ czynnika chłodzącego wynika z konstrukcji chłodnicy i odbywa się tylko w jednym kierunku.

Analizę wykonano w ten sposób, że jeden z parametrów był ustalony, natomiast analizowano wpływ drugiego. W pierwszym przypadku dla ustalonego współczynnika wnikania ciepła (ustalonego rodzaju czynnika chłodzącego) analizowano

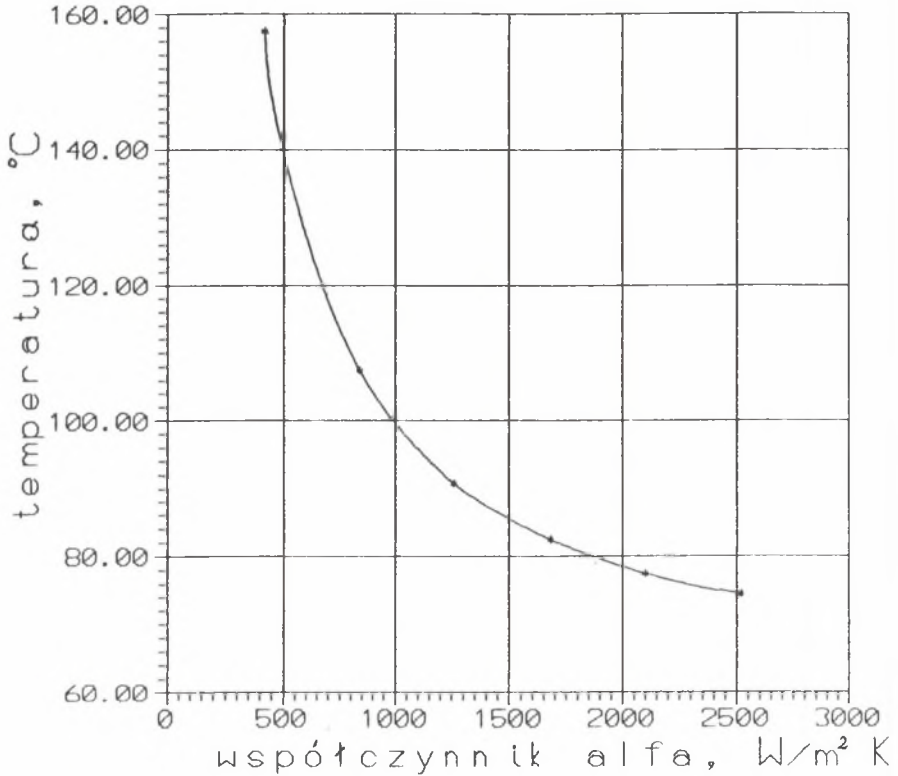
wpływ jego natężenia przepływu. W drugim zaś dla ustalonej wartości natężenia przepływu analizowano wpływ wartości współczynnika wnikania ciepła, czyli rodzaju użytej cieczy.

Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Zależność temperatury złącza półprzewodnikowego od strumienia czynnika chłodzącego

Fig. 2. The temperature of the semiconductor junction as the function of the mass-flow of the cooling medium



Rys.3. Zależność temperatury złącza półprzewodnikowego w funkcji wartości współczynnika wnikania ciepła

Fig.3. The temperature of the semiconductor junction as the function of the heat-transfer coefficient

Analizując wyniki obliczeń, widać wyraźnie, że rodzaj użytego czynnika chłodzącego ma dużo większy wpływ na wartość temperatury obszaru czynnego półprzewodnika niż natężenie przepływu. Stąd wynika wniosek, że dobierając układ chłodzenia przyrządu, należy szczególną uwagę zwrócić na dobór czynnika chłodzącego, pamiętając jednak o ograniczeniach podanych wyżej.

4. WNIOSKI

Weryfikacja pomiarowa modelu matematycznego dała dobrą zgodność wyników pomiarów i obliczeń. Stąd opracowany model matematyczny może być wykorzystany do celów praktycznych przy projektowaniu nowych przyrządów półprzewodnikowych i doboru układu chłodzenia. Ze względu na jego praktyczne zastosowanie zamierza się udoskonalić go w taki sposób, aby można nim było analizować wpływ różnych parametrów dla układów chłodzenia, w których wykorzystuje się przemiany fazowe. Analizy takie będą mieć szczególne zastosowanie w przypadku przyrządów półprzewodnikowych, gdyż mają one bardzo małe zewnętrzne powierzchnie wymiany ciepła.

LITERATURA

- [1] Kucypera S.: Analiza procesu wymiany ciepła w przyrządach półprzewodnikowych. Praca doktorska. Gliwice 1987.
- [2] Szargut J.: Metody numeryczne w obliczeniach cieplnych pieców przemysłowych. Wyd. Śląsk, Katowice 1977.
- [3] Plec T., Borczyński J.: Odprowadzanie ciepła z przyrządów półprzewodnikowych. WKiŁ, Warszawa 1986.
- [4] Zacharow A.I., Aswadurowa E.J.: Rasczot tieplowych parametrov poluprowodnikowych priborow. Radio i swjaz, Moskwa 1983.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Kalinowski

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT EXCHANGE IN THE SEMICONDUCTOR DEVICES FLUIDS-COOLED

A b s t r a c t

Temperature of active zone of working semiconductor devices, is one of the most important factor determining reliability of electronic devices due to the fact that reliability of the complex electronic devices is determined by the reliability of inique semiconductor element.

To determine temperature distribution within semiconductor device both experimental and theoretical methods are developed. The cost of the experiment is rather higher and due to the mathematical modeling of thermal pro-

cesses occurring in semiconductor devices become the most popular. In addition theoretical approach to the thermal analysis allows to consider the problem of influence of wide range of the factors on thermal behaviour of device what is not always possible by experiments.

In this paper a mathematical model of temperature distribution within semiconductor devices has been worked out on the base of discrete control volume method. Control volume approach to the problem of heat transfer allows to consider odd geometry of semiconductor device, multi layer structure, nonlinear properties of materials, time dependant on heat generation and other factors which can have a significant on thermal behaviour of working device.

To verify of the accuracy of the mathematical model experimental and numerical results have been compared (fig.1).

The experimental verification has confirmed agreement between measurements and numerical results obtained using described mathematical model.

Worked out model can be used in practice for designing and improving of construction of semiconductor devices as well as for investigation of optimal conditions of exploitation (for example cooling conditions).

The influence of the heat-transfer coefficient and mass-flow of the coolant on the semiconductor junction temperature has been analysed.

Some numerical examples are presented (fig.2 i 3).