

Stanisław KUCYPERA
Instytut Techniki Ciepłej
Politechnika Śląska

MATEMATYCZNE MODELOWANIE POLA TEMPERATURY W CHŁODNICY KANAŁOWEJ STOSOWANEJ W URZĄDZENIACH ELEKTRONICZNYCH

Streszczenie. Przedstawiono założenia modelu matematycznego pola temperatury w przeciwprądowej chłodnicy kanałowej stosowanej w urządzeniach elektronicznych. Porównano wyniki uzyskane za pomocą opracowanego modelu z danymi literaturowymi. Podano krótki opis chłodnicy kanałowej oraz wykonano analizę wpływu niektórych parametrów pracy (np. rozkładu generowanego strumienia ciepła, strumienia masy chłodziwa i współczynnika wnikania ciepła) na temperaturę złącz półprzewodnikowych .

MATHEMATICAL MODELLING OF THE TEMPERATURE FIELD IN THE MULTIPLE-CHANNEL COOLER APPLIED IN THE ELECTRONIC DEVICES

Summary. The assumptions of the mathematical model of the temperature field in the counterflow multiple-channel cooler applied in the electronic devices have been presented. The results from the described mathematical model have been compared with the results of the previously published. The short description of the multiple-channel cooler has been given and the influence of some parameters of the work (eg. the distribution of the generated heat-flux, mass-flow of coolant and heat-transfer coefficient) on the semiconductor junctions temperature has been analysed..

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУР- НОГО ПОЛЯ В КАНАЛЬНОМ ХОЛОДИЛЬНИКЕ ПРИМЕНЕНОМ В ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

Резюме Представлены основы математической модели температурного поля в противотоковом канальном холодильнике примененном в электронных устройствах. Литературные результаты сравнены с расчётными результатами полученными из приведенной модели. Указано короткое описание канального холодильника а также выполнено анализ влияния некоторых параметров (например: распределения генерированного потока тепла, потока массы охлаждающего вещества, коэффициента теплоотдачи) на температуру полупроводниковых соединений.

1. WSTĘP

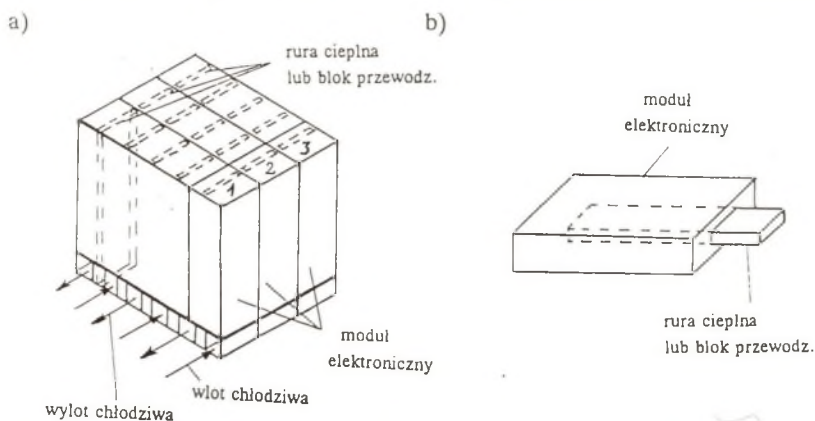
Budowane współcześnie urządzenia elektroniczne montowane są głównie w oparciu o przyrządy półprzewodnikowe (diody, tranzystory i tyrystory - nazywane często elementami dyskretnymi) oraz układy scalone.

W związku ze wzrostem miniaturyzacji oraz złożoności konstrukcyjnej współczesnych urządzeń elektronicznych istnieje konieczność upakowywania większej liczby przyrządów półprzewodnikowych w danym urządzeniu, co w przypadku elementów o dużej mocy wiąże się ze zwiększoną ilością wydzielanego ciepła. Dlatego też analiza cieplna staje się jednym z ważniejszych zagadnień w projektowaniu i konstruowaniu urządzeń elektronicznych. Zagadnienie to staje się tym ważniejsze ze względu na fakt, że współczesnym urządzeniom elektronicznym stawia się coraz większe wymagania dotyczące trwałości i niezawodności ich działania. Jednym zaś z głównych czynników określających poziom niezawodności i trwałości działania urządzenia jest nieprzekraczanie dopuszczalnej temperatury poszczególnych złącz półprzewodnikowych i założonych różnic temperatur między dwoma dowolnymi punktami wewnątrz urządzenia elektronicznego (wynika to z naprężeń termicznych).

Dlatego ważnym problemem w projektowaniu urządzeń elektronicznych jest dobór odpowiedniego układu chłodzenia. Podstawową wielkością określającą układ chłodzenia przyrządów półprzewodnikowych jest ilość ciepła generowana w ich strukturach. Z uwagi na to kryterium stosuje się trzy sposoby chłodzenia: powietrzne, termoelektryczne i cieczowe. Dwa pierwsze sposoby wykorzystywane są do chłodzenia przyrządów, w których ilość generowanego ciepła nie przekracza kilkudziesięciu watów. Uwarunkowane to jest efektywnością układu chłodzenia. Odprowadzenie dużej ilości ciepła z przyrządu za pomocą radiatorów chłodzonych powietrzem spowodowałoby nadmierne zwiększenie rozmiarów układu chłodzenia, a w konsekwencji całego urządzenia elektronicznego. Z tego też powodu efektywnym sposobem chłodzenia przyrządów półprzewodnikowych jest użycie przeciwprądowej chłodnicy kanałowej, której jedna ze ścian może być jednocześnie płytą montażową dla poszczególnych przyrządów półprzewodnikowych lub chłodnica ta jest strefą kondensacji dla rur cieplnych odprowadzających ciepło od poszczególnych przyrządów półprzewodnikowych. Określenia maksymalnych wartości mocy wydzielanych w przyrządach półprzewodnikowych oraz odpowiednich parametrów chłodnicy dokonuje się często na podstawie wyników pomiarów [1] lub uproszczonych modeli matematycznych [2]. Koszty i czas trwania pomiaru oraz trudności w zbadaniu wpływu wielu czynników na parametry pracy układów chłodzenia uniemożliwiają stosowanie na szeroką skalę badań eksperymentalnych. Z kolei uproszczonymi modelami matematycznymi można analizować tylko bardzo proste przypadki geometryczne i cieplne, a otrzymane wyniki obliczeń nie mogą mieć praktycznego zastosowania. Dlatego w pracy opracowano ogólny model matematyczny umożliwiający badanie wpływu różnych parametrów na pole temperatury oraz dobór cech konstrukcyjnych chłodnicy już w fazie jej projektowania.

2. OMÓWIENIE KONCEPCJI I ZAŁOŻENIA MODELU MATEMATYCZNEGO

Schemat poglądowy rozważanego układu chłodzenia pokazano na rysunku 1a, zaś widok chłodzonego modułu elektronicznego na rysunku 1b.



Rys.1. a). Schemat wielokanałowej chłodnicy stos. w urządzeniach elektronicznych,
 b). Schemat pojedynczego chłodzonego modułu elektronicznego
 Fig.1. a). Sketch of a multiple-channel cooling system for electronics devices,
 b). Sketch of the individual electronic module

Ciepło generowane w module lub przyrządzie półprzewodnikowym odprowadzane jest przez rurę cieplną lub blok miedziany do ścian rozdzielających kanały chłodzące chłodnicy, a stamtąd następnie do chłodziwa. Od powierzchni ścian działowych ciepło odprowadzane jest do chłodziwa w wyniku konwekcji wymuszonej. Chłodziwo wpływa do sąsiadujących przez ściany działowe kanałów z przeciwnych kierunków z zadaną wartością strumienia masy. Dlatego używa się nazwy przeciwprądowa chłodnica kanałowa. Ponieważ ilość ciepła generowana w poszczególnych modułach może być różna, dlatego rozkład strumienia ciepła wzdłuż ścian rozdzielających kanały jest funkcją położenia. Dodatkowo, ze względu na sposób działania poszczególnych przyrządów półprzewodnikowych ilość generowanego w nich ciepła może się zmieniać w funkcji czasu.

Wymienione czynniki uwzględnione są między innymi w opracowanym modelu matematycznym, którego założenia podano poniżej. Model ten opracowano wykorzystując metodę bilansów elementarnych. Metoda ta ma bardzo prostą interpretację fizyczną i z tego powodu nadaje się do matematycznego modelowania złożonych procesów cieplnych [3].

W celu osiągnięcia lepszej dokładności obliczeń przy opracowaniu w modelu przyjęto następujące założenia:

1. Rozpatruje się trójwymiarowe pole temperatury w ścianach działowych chłodnicy.
2. Rozpatruje się możliwość analizy ustalonych i nieustalonych pól temperatury.
3. Uwzględnia się możliwość występowania objętościowych źródeł ciepła o skończonych rozmiarach i różnej wydajności zależnej od położenia i zmiennej z czasem. Dla ułatwienia obliczeń zakłada się, że źródła ciepła działają bezpośrednio w ściankach chłodnicy.
4. Uwzględnia się możliwość zmienności parametrów termofizycznych ścian z temperaturą.
5. Zakłada się, że na powierzchniach zewnętrznych ścian rozdzielających ciepło wymieniane jest z chłodziwem na drodze konwekcji wymuszonej, przy czym

współczynnik wnikania ciepła może być funkcją położenia. Występuje to bardzo często w odcinkach rozbiegowych kanałów.

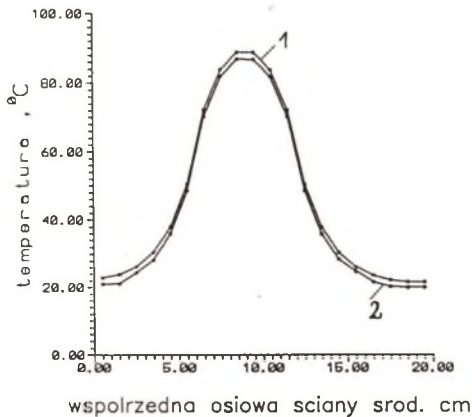
6. Zakłada się, że oba końce zewnętrzne ścian rozdzielających kanały wymieniają ciepło z otoczeniem w wyniku konwekcji i promieniowania. Nieliniowe zagadnienie brzegowe rozwiązuje się metodą iteracyjną.

7. Rozpatruje się możliwość uwzględnienia zmian temperatury i prędkości przepływu chłodziwa na wlocie do kanałów.

8. Zaniedbano wpływ ciśnienia i energii potencjalnej chłodziwa na rozkład temperatury.

9. W pracy nie uwzględnia się modelowania zjawisk cieplnych zachodzących w kolektorach dolotowych i wylotowych chłodnicy.

Model zweryfikowano poprzez porównanie wyników obliczeń z dostępnymi danymi literaturowymi dla uproszczonych przypadków [4]. W większości uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników (rys.2). Wykorzystując opracowany model matematyczny przeprowadzono badania wpływu różnych parametrów na rozkład temperatury w chłodnicy.



Rys.2. Porównanie wyników obliczeń dla stanu ustalonego

1 - wyniki z obecnego modelu,
2 - wyniki wcześniej opublikowane

Fig.2. Comparison of steady-state results.

1 - results from present model,
2 - results previously published

3. PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ

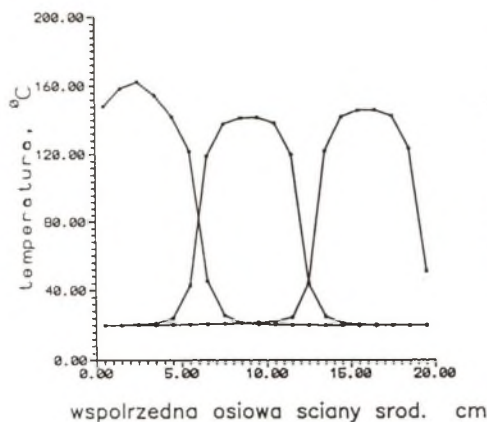
W pracy wykonano przykładową analizę cieplną chłodnicy czterokanałowej (jakkolwiek modelem można analizować dużo większą) o rozmiarach kanałów ($20 \times 1 \times 1$) cm i ścian działowych ($20 \times 0.5 \times 1$) cm. Wykonane obliczenia pozwoliły (bez popełnienia większego błędu) przyjąć założenie, że oba końce ścian rozdzielających są zaizolowane cieplnie. Wynika to z tego, że powierzchnie czołowe ścian są małe i współczynnik wnikania ciepła do otoczenia jest dużo mniejszy niż do cieczy. Na podstawie obliczeń wstępnych stwierdzono również, że temperatura w przekrojach poprzecznych ścian działowych jest wyrównana. Uzasadnić to można tym, że rozmiary poprzeczne ścian są dużo mniejsze w porównaniu z ich długością i wykonane z materiału dobrze przewodzącego ciepło, czyli liczba $Bi < 1.0$.

W dalszych obliczeniach zbadano między innymi wpływ na temperaturę ścian chłodnicy, a tym samym na temperaturę złącz półprzewodnikowych następujących parametrów:

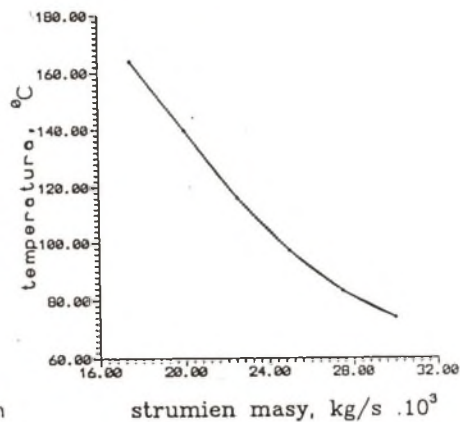
- rozkładu miejscowego generowanego strumienia ciepła,
- strumienia masy chłodziwa i współczynnika wnikania ciepła dla zadanej

wartości strumienia generowanego ciepła,
- rozkładu czasowego źródeł ciepła.

Z powodu ograniczeń związanych z liczbą stron referatu na rysunkach 3 i 4 przedstawiono tylko niektóre wyniki obliczeń. Należy jednak podkreślić, że opracowany model matematyczny może być użyty do analizy bardzo złożonych przypadków.



Rys. 3. Rozkład temperatury ściany w funkcji położenia źródła ciepła
Fig. 3. Wall temperature distribution as the function of location of heat generated



Rys. 4. Zależność temp. złącza w funkcji strumienia czynnika chłodzącego
Fig. 4. Temperature of the junction as function of the mass-flow of coolant

Z przedstawionych wyników obliczeń widać, że istotny wpływ na temperaturę złącza ma położenie źródeł ciepła (najgorzej, gdy ciepło generowane jest w module 1). Natomiast z analizy wpływu strumienia masy na temperaturę złącza wynika większe znaczenie mniejszych wartości tego strumienia.

4. WNIOSKI

Weryfikacja modelu matematycznego dała dobrą zgodność wyników obliczeń. Stąd opracowany model matematyczny może być wykorzystany do celów praktycznych przy projektowaniu i doborze cech konstrukcyjnych układów chłodzenia urządzeń elektronicznych. Ze względu na jego praktyczne zastosowanie zamierza się go udoskonalić w taki sposób, aby można nim było analizować wpływ różnych parametrów na pole temperatury w układach chłodzenia urządzeń elektronicznych z uwzględnieniem przemian fazowych zachodzących w rurach cieplnych oraz na powierzchniach rozdzielających kanały (w elektronice nazywane chłodzeniem wapotronowym [1]). Analizy takie będą mieć duże zastosowanie dla elektroników, gdyż przyrządy półprzewodnikowe mają bardzo małe powierzchnie zewnętrzne wymiany ciepła.

LITERATURA

- [1] Pelc T., Borczyński J.: Odprowadzanie ciepła z przyrządów półprzewodnikowych. WKŁ, Warszawa 1986.
- [2] Yeb L.T.: Analytical solution for a counterflow heat exchanger with space-dependent wall heat dissipation. Heat transfer in electronic equipment, ASME, Vol 48, New York 1986.
- [3] Modelowanie numeryczne pól temperatury. Praca zbiorowa pod red. J. Szarguta, WNT, Warszawa 1992.
- [4] Yeb L.T., Gingrich W. K.: Numerical solutions for a multiple-channel counterflow heat exchanger with space-dependent wall heat dissipations, 8th International Heat Transfer Conference, Vol. 6, San Francisco 1989.

Recenzent: Doc. dr inż. Antoni Guzik.

Wpłynęło do Redakcji w grudniu 1993 r.

Abstract

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 unique semiconductor element.

To determine temperature distribution within multiple-channel cooler both experimental and theoretical methods are developed. The cost of the experiment is rather high and due to the mathematical modeling of thermal processes occurring in multiple-channel cooler 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 the multiple-channel cooler 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 multiple-channel cooler, nonlinear properties of materials, time and space dependent on heat generation and other factors which can have a significant influence on thermal behaviour of working devices.

To verify the accuracy of the mathematical model results from the model have been compared with the results of the previously published (fig.2).

The verification of the model confirmed agreement between both results.

The worked out model can be used in practice for designing and improving of the construction of the cooling systems as well as for investigation of optimal conditions of exploitation. The influence of the many parameters of the work of the cooling system on the semiconductor junctions temperature has been analysed.

Some numerical examples are presented (fig. 3 i 4).