

Stanisław KUCYPERA

NUMERYCZNE BADANIE WYMIANY CIEPŁA W URZĄDZENIACH ELEKTRONICZNYCH Z CHŁODNICĄ CIECZOWĄ

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 dokonano analizy wpływu niektórych parametrów pracy (np. rozkładu generowanego strumienia ciepła, strumienia masy chłodziwa i współczynnika wnikania ciepła), a także niedokładności określenia zewnętrznych warunków chłodzenia na temperaturę złącz półprzewodnikowych.

NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER IN THE ELECTRONIC DEVICES WITH THE FLUID COOLER

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) and unprecise determining of the external cooling conditions on the semiconductor junctions temperature has been analysed.

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 większego ich integrowania, tzn. upakowywania większej liczby przyrządów półprzewodnikowych w danym urządzeniu. Dlatego pojedyncze elementy półprzewodnikowe (np. diody, tranzystory czy tyrystory) łączy się w zintegrowane moduły, które są osadzone na odpowiednich radiatorach lub wmontowuje się je w ściany chłodnic. Dobór odpowiednich cech konstrukcyjnych, geometrycznych i mate-

rialowych chłodnicy musi wynikać z wnikliwie przeprowadzonych analiz cieplnych i przepływowych w całym urządzeniu elektronicznym. Dlatego też analiza cieplna staje się jednym z ważniejszych zagadnień w projektowaniu i konstruowaniu urządzeń elektronicznych. Potrzeba rozwiązywania tych zagadnień wynika również z faktu, 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 wartość dopuszczalnej temperatury złączy półprzewodnikowych poszczególnych przyrządów wmontowanych w to urządzenie. Trwałość całego urządzenia elektronicznego może być przedłużona, jeżeli wartość temperatury pracy poszczególnych przyrządów pozostanie niższa niż maksymalna dopuszczalna temperatura podawana przez ich producenta.

Z danych literaturowych [1] wynika, że czas pracy urządzenia elektronicznego może być przedłużony nawet o 50%, jeżeli będzie ono pracować przy temperaturze o 10% niższej niż dopuszczalna temperatura pracy pojedynczych przyrządów. Dlatego tak ważnym problemem w produkcji urządzeń elektronicznych jest projektowanie dla zadanej ilości generowanego ciepła odpowiedniego układu chłodzenia. Określenia maksymalnych wartości mocy wydzielanych w przyrządach półprzewodnikowych oraz odpowiednich parametrów układów chłodzenia dokonuje się często na podstawie wyników pomiarów [3] lub uproszczonych modeli matematycznych [4]. 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, które znacznie odbiegają od warunków rzeczywistych, a otrzymane wyniki obliczeń nie mogą mieć praktycznego zastosowania. Dlatego w pracy opracowano ogólny model matematyczny (z małą liczbą założeń upraszczających), umożliwiający badanie wpływu różnych parametrów na pole temperatury oraz dobór cech konstrukcyjnych chłodnicy cieczowej już w czasie jej projektowania.

2. Krótka charakterystyka metod chłodzenia przyrządów półprzewodnikowych i czynników chłodzących

Podstawową wielkością określającą układ chłodzenia przyrządów półprzewodnikowych jest ilość ciepła generowana w obszarach czynnych (złączach) półprzewodników. Ze względu na to kryterium stosuje się trzy sposoby chłodzenia:

- powietrzne,
- termoelektryczne,
- cieczowe (w tym wapotronowe i rury ciepłone).

Dwa pierwsze sposoby wykorzystywane są do chłodzenia przyrządów, w których ilość ciepła generowanego w obszarach czynnych półprzewodników 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 i w konsekwencji całego urządzenia elektronicznego. Z tego też powodu efektywnym sposobem chłodzenia urządzeń elektronicznych jest użycie przeciwprądowej chłodnicy kanałowej, której jedna ze ścian może być jednocześnie:

- płytą montażową dla poszczególnych przyrządów półprzewodnikowych,
- strefą kondensacji dla rur ciepłych odprowadzających ciepło od przyrządów półprzewodnikowych.

W układach chłodzenia cieczowego jako czynnik chłodzący stosuje się wodę, olej lub inne ciecze. Ciecze te powinno się jednak tak dobrać, aby można było wykorzystywać (gdy jest to konieczne) ich właściwości cieplne związane z przemianą fazową. Stosowanie chłodzenia cieczowego połączonego z przemianą fazową ma tę zaletę, że powoduje znaczne zmniejszenie rozmiarów urządzeń elektronicznych, szczególnie w przypadku chłodzenia elementów o dużej mocy. 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 aktywność chemiczna). Wymaganą cechą charakterystyczną czynników do chłodzenia cieczowego z przemianą fazową jest to, aby posiadały one duży współczynnik wnikania ciepła przy parowaniu i kondensacji oraz niską temperaturę wrzenia. Przy obciążeniu nominalnym temperatura ta powinna być znacznie niższa od temperatury dopuszczalnej dla złącz półprzewodnikowych podawanej przez producenta przyrządów. Optymalny zakres temperatury parowania cieczy w tych przypadkach powinien mieścić się w przedziale (35 - 65) °C. Z danych literaturowych [2] wynika, że najbardziej spełniają powyższe kryteria następujące ciecze: Flutec PP1, Fluorocarbon i Freon 113. Niektóre dane dotyczące tych cieczy podano w tabeli 1.

Tabela 1

Temperatura nasycenia i ciepło parowania niektórych cieczy dla ciśnienia otoczenia

Nazwa cieczy	Temperatura nasycenia t_s [°C]	Ciepło parowania [Ws/kg]
Flutec PP1	57	$84.2 \cdot 10^3$
Fluorocarbon	50	$96.3 \cdot 10^3$
Freon 113	40,6	$147 \cdot 10^3$

Jak wynika z tabeli, najbardziej interesujące właściwości z punktu widzenia wymiany ciepła ma Freon 113, gdyż posiada najniższą temperaturę wrzenia oraz dużą wartość ciepła parowania. Wprowadza on jednak pewne ograniczenia w stosowalności materiałów konstrukcyjnych, ponieważ żywice fenolowe, silikony i polistyren nie mogą być stosowane w bezpośredniej obecności freonu.

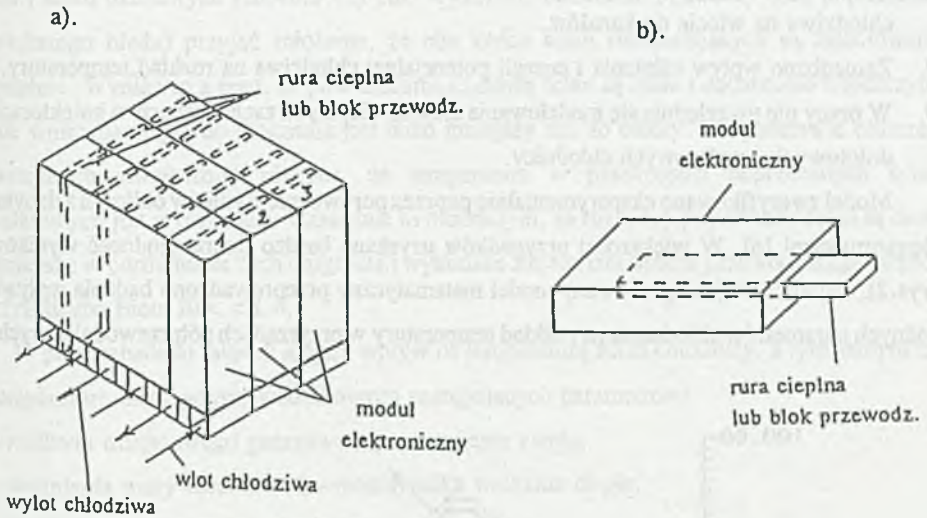
3. Omówienie konstrukcji chłodnicy i założenia modelu matematycznego

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

Ciepło generowane w module lub przyrządzie półprzewodnikowym odprowadzane jest przez rurę cieplną lub blok miedziany do ścian rozdzielających kanały chłodnicy, a stamtąd do chłodziwa. Od powierzchni ścian działowych do chłodziwa ciepło odprowadzane może być w wyniku czystej konwekcji wymuszonej lub konwekcji wymuszonej połączonej z przemianą fazową. Chłodziwo wpływa do sąsiadujących przez ściany działowe kanałów z przeciwnych kierunków. Stąd nazwa przeciwpądowa 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, w którym wykorzystano metodę bilansów elementarnych. Metoda ta ma

bardzo prostą interpretację fizyczną i z tego powodu nadaje się do matematycznego modelowania złożonych procesów cieplnych [5].



Rys.1. a) Schemat wielokanałowej chłodnicy stosowanej w urządzeniach elektronicznych

b) Schemat pojedynczego chłodzonego modułu elektronicznego

Fig.1. a) Sketch of a multiple-channel cooling system for electronics devices

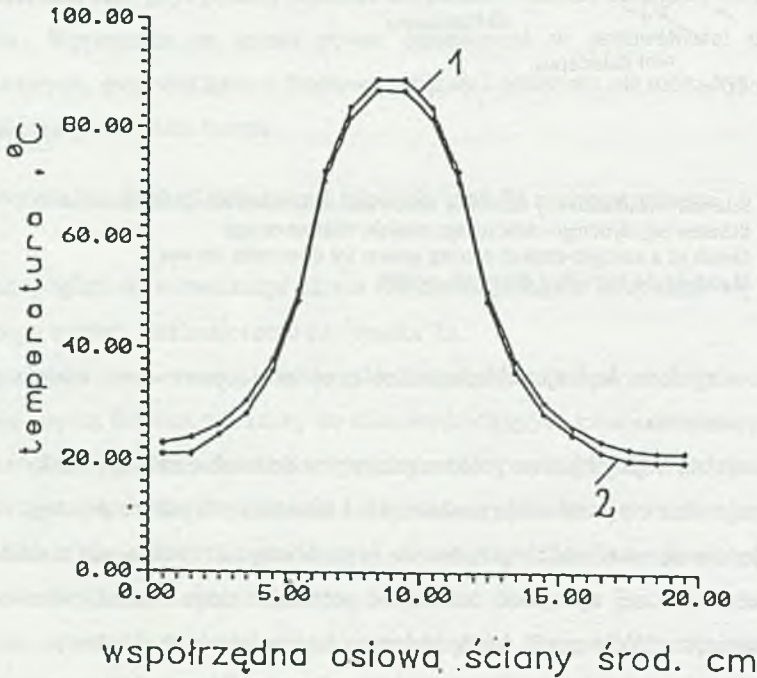
b) Sketch of the individual electronic module

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

1. Rozpatruje się trójwymiarowe pole temperatury w ścianach działowych chłodnicy.
2. Rozpatruje się możliwość analizy ustalonych i niustalonych pól temperatury.
3. Uwzględnia się możliwość występowania objętościowych źródeł ciepła o skończonych rozmiarach i różnej wydajności zależnej od położenia i czasu. 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 w wyniku konwekcji wymuszonej lub konwekcji wymuszonej połączonej z przemianą fazową, 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 uwzględniania zmian temperatury i prędkości przepływu chłodziwa na wlocie do kanałów.
8. Zanedbano 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 eksperymentalnie poprzez porównanie wyników obliczeń z danymi literaturowymi [6]. W większości przypadków uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników (rys.2). Wykorzystując opracowany model matematyczny przeprowadzono badania wpływu różnych parametrów chłodzenia na rozkład temperatury w przyrządach półprzewodnikowych.



Rys.2. Porównanie wyników dla stanu ustalonego; 1- wyniki otrzymane opracowanym modelem, 2 - wyniki wcześniej opublikowane [6]
 Fig.2. Comparison of steady-state results; 1 - results from worked out model, 2 - results previously published [6]

4. Przykładowe wyniki analizy

W pracy wykonano przykładową analizę cieplną chłodnicy czterokanałowej (jakkolwiek modelem można analizować dużo większą liczbę kanałów) 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 dodatkowo 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 Biota $Bi \ll 1.0$.

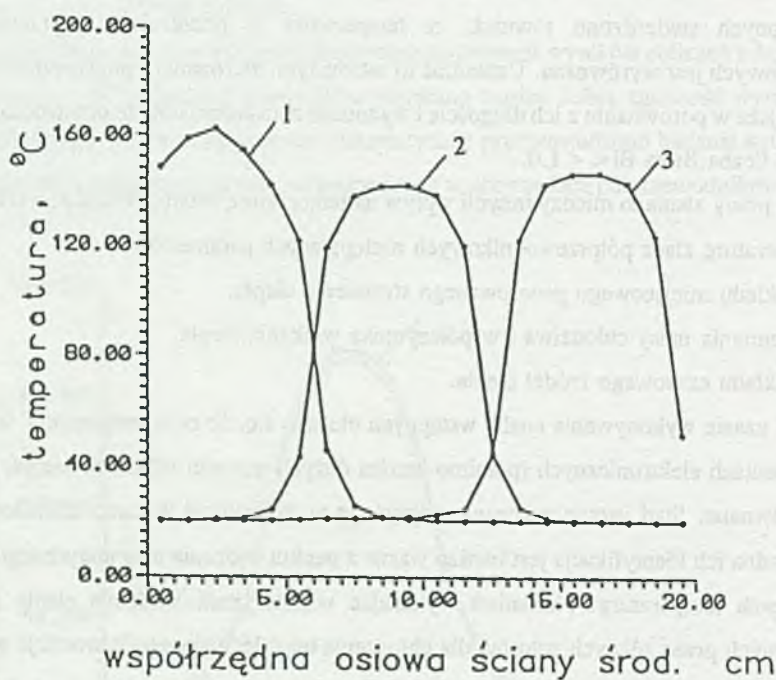
W pracy zbadano między innymi wpływ na temperaturę ścian chłodnicy, a tym samym na temperaturę złącz półprzewodnikowych następujących parametrów:

- rozkładu miejscowego generowanego strumienia ciepła,
- strumienia masy chłodziwa i współczynnika wnikania ciepła,
- rozkładu czasowego źródeł ciepła.

W czasie wykonywania analiz wstępnych okazało się, że pole temperatury w tak małych elementach elektronicznych (pomimo bardzo dużych gęstości strumieni ciepła) jest na ogół wyrównane. Stąd istotne znaczenie odgrywają tu zewnętrzne warunki chłodzenia. Dlatego dokładna ich identyfikacja jest bardzo ważna z punktu widzenia matematycznego modelowania pola temperatury. Natomiast wyliczając współczynnik wnikania ciepła z zależności podanych przez różnych autorów dla chłodzenia uwzględniającego konwekcję wymuszoną i przemianę fazową otrzymuje się w wyniku obliczeń różne pola temperatury. Dlatego przeanalizowano jak duży wpływ na wartość współczynnika wnikania ciepła ma postać zależności kryterialnej oraz wpływ tych wartości na temperaturę obszaru czynnego półprzewodnika. W analizie uwzględniono zależności kryterialne określające współczynnik wnikania ciepła (dla konwekcji wymuszonej i przemiany fazowej) podane przez następujących autorów:

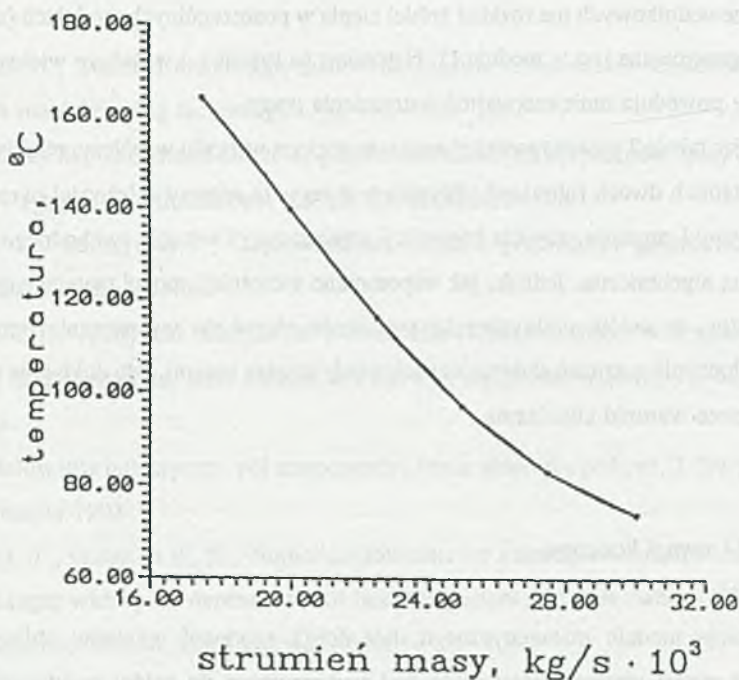
1. S.S. Kutateladze [7],
2. D.A. Łabuncow [8],
3. A.A. Iwaszkiewicz [9],
4. F.P. Incropera i inni [10],
5. T.Y. Lee i T.W. Simon [11].

Analizę tę przeprowadzono dla wody z uwagi na łatwy dostęp do jej wszystkich parametrów potrzebnych dla poszczególnych zależności. Obliczenia wykonano przy zachowaniu stałego strumienia ciepła oraz pozostałych parametrów materiałowych i geometrycznych chłodnicy. Niektóre wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 3 i 4 oraz w tabeli 2.



Rys.3. Rozkład temperatury ściany w funkcji położenia źródeł ciepła; 1 - ciepło generowane w module 1, 2 - ciepło generowane w module 2, 3 - ciepło generowane w module 3

Fig.3. Wall temperature distribution as a function of location of heat sources; 1 - heat generated in modul 1, 2 - heat generated in modul 2, 3 - heat generated in modul 3



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

Tabela 2

Przykładowe wyniki obliczeń współczynników wnikania ciepła i temperatury złącz półprzewodnikowych dla różnych zależności kryterialnych

Autor	Wartość współczynnika $\alpha, \text{W/m}^2\text{K}$	Wartość temperatury złącza $t, ^\circ\text{C}$
S.S. Kutateladze	10656	124
D.A. Łabuncow	8290	128
A.A. Iwaszkiewicz	12111	118
F.P. Incropera	21090	103
T.Y. Lee i T.W. Simon	18987	112

Z przedstawionych wyników obliczeń widać (rys. 3), że istotny wpływ na temperaturę złącz półprzewodnikowych ma rozkład źródeł ciepła w poszczególnych modułach (najgorzej, gdy ciepło generowane jest w module 1). Natomiast na rysunku 4 widać, że większe zmiany temperatury powodują mniejsze wartości strumienia masy.

Analizując tabelę 2 można zauważyć znacznie większe wartości współczynników wnikania ciepła w ostatnich dwóch rubrykach. Wynika to z tego, że autorzy zależności określających te współczynniki sugerują, aby dla konwekcji wymuszonej i wrzenia swobodnego były one zwykłą sumą algebraiczną. Jednak, jak wspomniano wcześniej, model matematyczny może być przydatny do celów praktycznych, tzn. może służyć do wyznaczania optymalnych układów chłodzenia urządzeń elektronicznych wtedy między innymi, gdy dokładnie określone będą zewnętrzne warunki chłodzenia.

5. Wnioski i uwagi końcowe

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. Należy jednak zauważyć, że przeprowadzona analiza wykazała istnienie pewnych braków w badaniach podstawowych dotyczących chłodzenia małych elementów, na powierzchniach których występuje odparowanie cieczy połączone z konwekcją wymuszoną. Z analizy tej widać, że na tak małych powierzchniach i krótkich odcinkach kanału w objętości kanału nie uformuje się jeszcze dokładnie określony rodzaj przepływu płynu. Również jeżeli chodzi o odparowanie cieczy, to można przypuszczać, że będzie to tylko odparowanie lokalne. Natomiast zależności podawane w literaturze dotyczą zawsze ściśle określonego przepływu i na ogół uwzględniają odparowanie w całej objętości. Dokładna identyfikacja zewnętrznych warunków chłodzenia przyrządów półprzewodnikowych wpływa istotnie na dokładność matematycznego modelowania pola temperatury w urządzeniach elektronicznych. Ma to wpływ na trwałość i niezawodność działania urządzeń. Stąd jest to bardzo ważne zagadnienie w elektronice.

Dlatego w dalszych badaniach zamierza się opracować stanowisko pomiarowe, na którym można będzie wyznaczać współczynnik wnikania ciepła dla tego typu przypadków.

LITERATURA

1. Genet M., Thermal architecture made with specific components. Session PII. Components manufacturing technologies, pp 773 - 803, 1982
2. Zabłocki Z., Chłodzenie cieczowe półprzewodnikowych przyrządów mocy z przemianą fazową czynnika chłodzącego. Referat ZE LAMINA 1978
3. Pelc T., Borczyński J., Odprowadzanie ciepła z przyrządów półprzewodnikowych. WKŁ, Warszawa 1986
4. 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
5. Modelowanie numeryczne pól temperatury. Praca zbiorowa pod red. J.Szarguta, WNT, Warszawa 1992
6. Yeb L.T., Gingrich W. K., Numerical solutions for a multiple-channal counterflow heat exchanger with space-dependent wall heat dissipations, 8th International Heat Transfer Conference, Vol. 6, San Francisco 1989
7. Kutateladze S., Osnovy teorii tieploobmiena. Atomizdat. Moskwa 1979
8. Łabuncow D.A.: Obobszczennyje zawisimosti dla tieplootdaczi pri puzirkowom kipienii židkosti, Tieploenergetika 1960, nr 5, s.79
9. Iwaszkiewicz A.A., Kriticzeskije tieplowyje potoki i koefficient tieplootdaczi pri kipienii židkosti w kanałach w usłowijach wynużdiennogo dwiženija. Tieploenergetika 1961, nr 10 s. 74
10. Incropera F.P. i inni, Convection heat transfer from discrete heat sources in a rectangular channel, Int. J. of Heat and Mass Transfer, vol.29, pp. 1051-1058
11. Lee T.Y., Simon T.W., High - heat - flux forced convection boiling from small regions, Heat Transfer in Electronics vol.111, pp. 7-16

Recenzent: Prof. dr hab.inż. Eugeniusz Kalinowski
Prof. Politechniki Wrocławskiej

Wpłynęło do Redakcji 27.03.1995 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 higher 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 on thermal behaviour of working devices.

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

The verification of the model confirmed agreement between both results.

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 and table 2.