

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Chłodzenie mikroelektroniki z wykorzystaniem mikrostrumieni

ARTUR RUSOWICZ^{1,2}, PIOTR A. BARANOWSKI¹, MACIEJ LESZCZYŃSKI¹

¹CENTRALNY OŚRODEK BADAWCZO ROZWOJOWY APARATURY BADAWCZEJ I DYDAKTYCZNEJ COBRABID sp. z o. o.

²POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY ENERGETYKI I LOTNICTWA, INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ

Słowa kluczowe: chłodzenie, wymiana ciepła, mikrostrumienie, mikroprocesor

STRESZCZENIE

Rozwój elektroniki, którego celem jest wzrost funkcjonalności urządzeń elektronicznych, polega na zwiększaniu upakowania tranzystorów w układach scalonych oraz zwiększaniu szybkości taktowania, czyli liczby elementarnych operacji wykonywanych w ciągu sekundy. Osiągnięciu założonego celu towarzyszy narastający problem o charakterze cieplnym. Każde przełączenie stanu logicznego na elementarnym poziomie układu scalonego jest związane z generacją ciepła. Duża liczba tranzystorów oraz duże szybkości taktowania prowadzą do wzrostu strumienia ciepła wydzielanego w mikroprocesorze do poziomu, przy którym konieczne jest jego intensywne chłodzenie, w przeciwnym razie nastąpi jego przegrzanie. W pracy przedstawiono chłodzenie elementów mikroelektronicznych z wykorzystaniem mikrostrumieni.

Cooling of microelectronics using microjets

Keywords: cooling, heat transfer, microjets, microprocessor

ABSTRACT

The development of electronics, which aims to increase the functionality of electronic devices is increasing the packing of transistors on a chip and increasing clock speed, which is the number of elementary operations per second. To achieve the objective pursued is accompanied by the growing problem of thermal nature. Each switch logic state at the elementary level, the integrated circuit is associated with the generation of heat. A large number of transistors and high clock speeds lead to higher heat flux emitted by the microprocessor to a level where it needs to be intensively cooled, otherwise it will overheat. This paper presents the cooling microelectronic components using microjets.

1. WPROWADZENIE

Na przestrzeni ostatnich dekad bardzo dynamicznie rozwija się szybkość przetwarzanych informacji oraz wydajność urządzeń elektronicznych. Wraz ze wzrostem wydajności oraz dążeniem do miniaturyzacji elementów elektronicznych pojawia się problem odprowadzania od nich znacznych strumieni ciepła generowanych podczas ich pracy [1-3]. Gęstości strumieni ciepła emitowanych z nagrzewających się procesorów, są porównywalne do gęstości mocy emitowanych przez rdzeń reaktora jądrowego. Stała redukcja wymiarów urządzeń elektronicznych pociąga za sobą konieczność szukania nowych, bądź rozwijania istniejących już technik chłodzenia, które odbierałyby duże gęstości strumieni ciepła. W konsekwencji efektywniejsze odprowadzanie ciepła służy do utrzymywania temperatury urządzenia w optymalnym zakresie. Warunkiem poprawnej pracy elementów półprzewodnikowych jest niedopuszczenie do wzrostu ich temperatury ponad dopuszczalny poziom (w zależności od wykonania od 85 do 120°C), powyżej którego półprzewodnik traci swoje właściwości [3, 4].

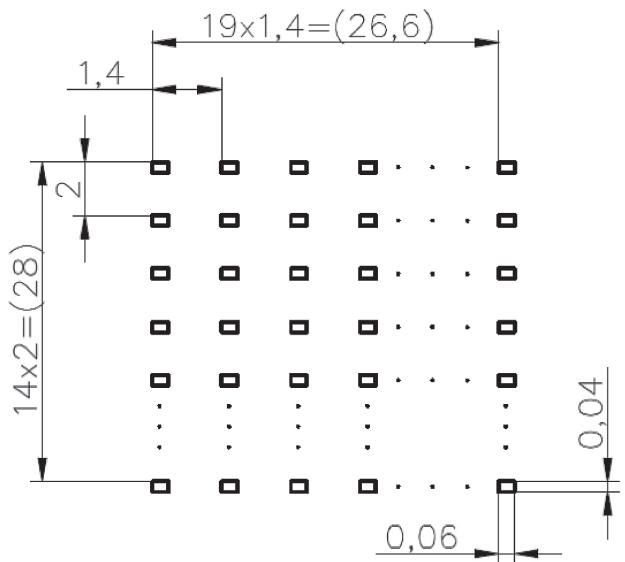
W pracy zwrócono uwagę na zastosowanie mikrostrumieni do odprowadzania ciepła z nagrzewających się elementów. Zainteresowanie techniką mikrostrumieniową wynika z faktu odbierania przy takim chłodzeniu bardzo dużych strumieni ciepła oraz równomiernego chłodzenia elementów. Niewątpliwą zaletą takiego chłodzenia jest także możliwość kontroli intensywności odbierania ciepła oraz dostosowanie wymiarów układu do chłodzonej powierzchni. Technika ta polega, na chłodzeniu powierzchni poprzez kierowanie na nią generowanych przez specjalną głowicę strug czynnika roboczego, którym może być ciecz albo gaz. Ilość dysz w głowicy zależy od jej konstrukcji i może być łatwo modyfikowana przez uniwersalną budowę głowicy [5].

W zastosowaniach inżynierskich stosuje się dwa rodzaje strug [6, 7]. Pierwszy z nich to tzw. strugi zanurzone (ang. submerged jets) [7, 8]. Są to strugi, które chłodząc dany element wpływają do środowiska o podobnych właściwościach hydrodynamicznych co sama struga, np. struga powietrza lub innego gazu wpływa do środowiska, jakim jest powietrze. Drugim typem są strugi swobodne (ang. free jets), które charakteryzują się innymi właściwościami hydrodynamicznymi niż otaczające środowisko, np. struga cieczy wpły-

wająca do powietrza [7]. W pracy przedstawiono wyniki badań dla strug zanurzonych.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Chłodzenie przy pomocy mikrostrumieni realizowano na stanowisku badawczym (opisanym w pracy [5]), w którym na płycie głównej komputera w miejscu procesora zamontowano element grzejny. Wymiary elementu grzejnego wykonanego z duraluminium (4x4 cm) odpowiadały geometrii procesora. Grzejnik wykonano z drutu oporowego w płaszczu z Inconelu o średnicy 1 mm (rezystancja 14,6 W). Centralnie w górnej i dolnej pokrywie grzejnika umieszczono po jednym termoelemencie (typu K, płaszczowe, średnica 0,5 mm). Oprzyrządowanie stanowiska pozwalało na ciągły pomiar temperatury górnej i dolnej powierzchni oraz mocy wydzielanej na grzałce przez pomiar napięcia i natężenia prądu stałego w zasilaczu (model NDN DF1730SL10A). Sygnał z termoelementów przesyłano do karty pomiarowej, co wyświetlano i rejestrowano w komputerze. Do rejestracji przebiegów temperatury wykorzystywano przetworniki analogowo-cyfrowe firmy National Instruments (NI 9213, oprogramowanie Lab View). Nad elementem grzejnym znajdowała się głowica wytwarzająca mikrostrumienie. Na Rysunku 1 został przedstawiony schemat geometrii mikroszczelin w badanej głowicy generującej mikrostrumienie. Głowicę zasilano powietrzem, regulując jego ciśnienie i strumień. Zmieniano odległość głowicy od elementu grzejnego przy pomocy śruby mikrometrycznej. Odległości, dla jakich badano efektywność wymiany ciepła, wynosiły odpowiednio 2 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm. Dla każdej z wymienionych odległości wykonano serię pomiarów pod różnym, nastawionym ciśnieniem wylotowym powietrza z głowicy. Ciśnienie było ustawiane dla wartości: 1 bar, 2 bar, 3 bar, 4 bar, 5 bar oraz 6 bar. Podczas zmiany ciśnienia automatycznie zmieniał się wydatek przepływającego powietrza, który w badaniu mieścił się w zakresie $1 \text{ dm}^3/\text{min} < Q_v < 3,7 \text{ dm}^3/\text{min}$. Badanie rozpoczynało się od ustawienia odpowiedniej odległości oraz ciśnienia wylotowego. Następnie, w tym samym czasie, włączano zasilacz oraz uruchamiano program rejestrujący temperatury. Wyniki były zapisywane z częstotliwością 50 Hz. Czas jednego badania wynosił 500 sekund i został przyjęty na podstawie analizy wykresu wyświetlanego na ekranie komputera.



300 otworów prostokątnych 0,06 x 0,04 mm

Rysunek 1 Układ mikrootworów w głowicy zastosowanej w badaniach stanowiskowych

Figure 1 Alignment microholes in the head of bench tests used

Na Rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów w postaci zmierzonych temperatur powierzchni chłodzonej mikrostrumieniami i niechłodzonej dla różnych gęstości strumieni ciepła generowanych przez element grzewczy, przy ciśnieniu powietrza zasilającego głowicę mikrostrumieniową wynoszącym 6 bar.

Przy wyznaczaniu strumienia ciepła przekazywanego mikrostrumieniom wyznaczano różnicę całkowitej mocy grzejnika i mocy odczytanej z wykresu kalibracyjnego w funkcji mierzonej temperatury dolnej grzejnika; metodykę wyznaczania przedstawiono w pracy [5]. Ze względu na stosunkowo niskie ciśnienie zasilania głowicy (poniżej 6 barów) pominięto efekt Joule'a-Thomsona. Na podstawie wzoru (1) możliwe jest określenie średniego współczynnika przejmowania ciepła

$$Q_{heater} - Q_{loss} = h \cdot A_h \cdot (\bar{T}_s - T_n) \quad (1)$$

gdzie:

Q_{heater} – strumień ciepła od grzejnika [W]

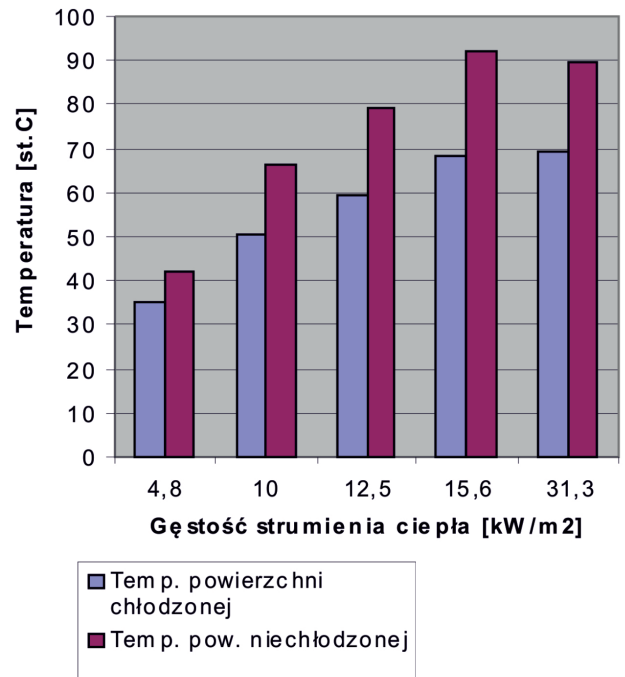
Q_{loss} – strumień strat ciepła do otoczenia [W]

\bar{h} – średni współczynnik przejmowania ciepła [W/m²K]

A_h – powierzchnia grzejnika [m²]

\bar{T}_s – średnia temperatura powierzchni [K]

T_n – temperatura czynnika chłodzącego [K].



Rysunek 2 Temperatury powierzchni elementu grzewczego w zależności od gęstości strumienia ciepła

Figure 2 Surface temperature of the heating element depending on heat flux

Następnie wyznaczono wartość liczby podobieństwa Nusselta na podstawie eksperymentu z zależności:

$$Nu_{-exp} = \frac{h \cdot d}{\lambda} \quad (2)$$

gdzie:

h – współczynnik przejmowania ciepła [W/(m²K)]

d – charakterystyczny wymiar liniowy [m]

λ – współczynnik przewodzenia ciepła [W/mK].

Wyniki eksperymentalne porównano z korelacjami pochodzącymi z literatury [9-12] dla mikrostrumieni. Zaproponowano szereg wzorów korelacyjnych opartych na teorii podobieństwa, służących bezpośrednio do obliczenia bezwymiarowej średniej liczby Nusselta, która pośrednio pomaga obliczyć współczynnik przejmowania ciepła. Zawierają one między innymi stosunki odpowiednich wielkości charakterystycznych dla danego zjawiska. I tak parametrem charakterystycznym dla chłodzenia za pomocą mikrostrumieni może być stosunek H/d_n , gdzie H to jest odległość nagrzewającej się powierzchni od głowicy mikrostrumieniowej, a d_n jest to średnica jednego mikrootworu. W niniejszej pracy w obliczeniach skorzystano z korelacji zaproponowanych przez Meola [9, 12] i Womaca [11].

Korelacja podana przez Meola w pracy [9] ma postać:

$$Nu_d = 0,3 \cdot Pr^{0,42} \cdot Re_d^{0,68} \cdot C_f^{0,56} \cdot \left(\frac{H}{d_n}\right)^{-0,3} \cdot A_r^{0,15} \quad (3)$$

gdzie:

Pr – liczba Prandtla [-]

Re_d – liczba Reynoldsa [-]

C_f – współczynnik oporu przepływu [-]

H – odległość między głowicą a chłodzoną powierzchnią [m]

d_n – średnica jednego mikrootworu [m]

A_r – stosunek powierzchni mikrootworów do powierzchni chłodzonej.

Womac w pracy [11] podaje inną korelację, która jest następująca:

$$Nu_d = 0,509 \cdot Pr^{0,4} \cdot Re_d^{0,5} \cdot A_{r,W} + 0,0363 \cdot Re_L^{0,8} \cdot \frac{d_n}{L} \cdot (1 - A_{r,W}) \quad (4)$$

gdzie:

Pr – liczba Prandtla [-]

Re_d – liczba Reynoldsa dla mikrootworu [-]

Re_L – zmodyfikowana liczba Reynoldsa dla wymiaru charakterystycznego L [-]

H – odległość między głowicą a chłodzoną powierzchnią [m]

d_n – średnica jednego mikrootworu [m]

$A_{r,W}$ – zmodyfikowany stosunek powierzchni mikrootworów do powierzchni chłodzonej [-]

$$A_{r,W} = \frac{N \cdot \pi \cdot (1,9 \cdot d_n)^2}{L^2} \quad (5)$$

gdzie:

N – liczba mikrootworów [-]

oraz zmodyfikowany wymiar charakterystyczny:

$$L = \frac{\left[\sqrt{2} \cdot \frac{s}{2} - 1,9 \cdot d_n\right] + \left[\frac{s}{2} - 1,9 \cdot d_n\right]}{2} \quad (6)$$

s – odstęp między sąsiadującymi mikrootworami w rzędzie [m].

We wszystkich wzorach korelacyjnych występuje liczba Reynoldsa dla dyszy Re_d zdefiniowana wzorem:

$$Re_d = \frac{u \cdot d_n}{\nu} \quad (7)$$

gdzie:

u – prędkość gazu w mikrootworze [m/s]

ν – współczynnik lepkości kinematycznej gazu [m²/s].

Wymiarem charakterystycznym jest tutaj średnica mikrootworu d_n . Jednakże w niniejszej pracy otwory mają przekrój prostokątny. Obliczono średnicę zastępczą dla przekrojów niekołowych wyrażoną wzorem:

$$d_n = \frac{4 \cdot A}{O} \quad (8)$$

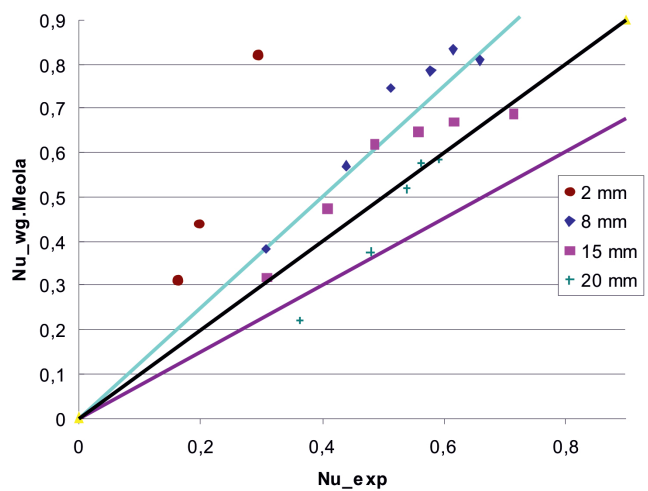
gdzie:

d_n – średnica zastępcza mikrootworu [m]

A – pole przekroju mikrootworu [m²]

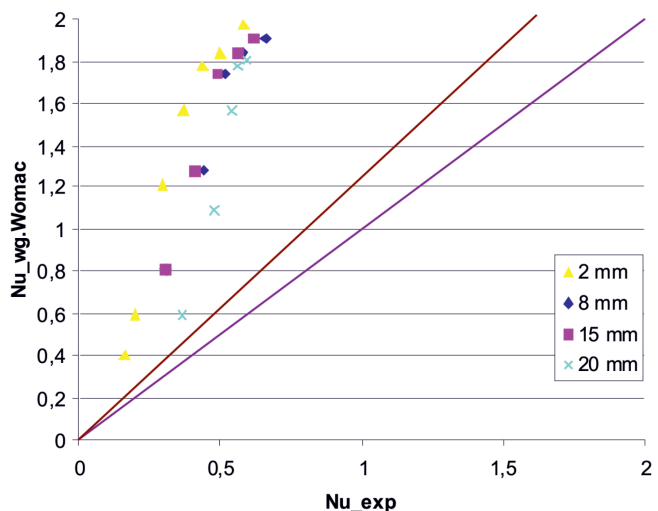
O – obwód przekroju omywanego mikrootworu [m].

Porównanie liczb Nusselta otrzymanych eksperymentalnie i z korelacji Meola przedstawiono na Rysunku 3, a na Rysunku 4 porównano dane eksperymentalne z korelacją Womaca.



Rysunek 3 Porównanie eksperymentalnych danych z korelacją Meola

Figure 3 Comparison of prediction by Meola to the experimental data



Rysunek 4 Porównanie eksperymentalnych danych z korelacją Womac'a

Figure 4 Comparison of prediction by Womac to the experimental data

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Porównując wyniki eksperymentu ze wzorami korelacyjnymi stwierdzono, że korelacja Womaca (4) odbiega swoimi przewidywaniami od wyników uzyskanych podczas badań. Najlepsze wyniki, zbliżone do wyników uzyskanych eksperymentalnie, uzyskuje się za pomocą korelacji Meola danej wzorem (3). Dla odległości 15 mm oraz 20 mm otrzymuje się wyniki mieszczące się w przyjętym

zakresie zgodności wzoru z eksperymentem i dla tych odległości można przyjąć korelację jako poprawną. Wszystkie korelacje przewidują wzrost średniego współczynnika przejmowania ciepła wraz ze zmniejszaniem się odległości dla stałego ciśnienia, czego nie zauważono podczas badań eksperymentalnych [5]. Otrzymano wspomnianą już odległość 15 mm, przy której uzyskano największą ilość odbieranego ciepła, dla tej konfiguracji głowicy mikrostrumieniowej.

LITERATURA

- [1] Lin S., Sefiane K., Christy J. R. E., Prospects of confined flow boiling in thermal management of microsystems, *Applied Thermal Engineering* 22 (2002), 825-837.
- [2] Lorenc M., Cegielski K., Nowe trendy rozwoju mikroprocesorów, Zakopane, Materiały Konferencji Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, 2012.
- [3] Jaworski M., Techniki chłodzenia elementów elektronicznych, *Chłodnictwo*, 2007, nr 12, 32-39; 2008, nr 1-2, 50-52.
- [4] Rusowicz A., Grzebielec A., Baranowski P. A., Poprawa bezpieczeństwa danych poprzez chłodzenie elementów mikroelektronicznych, *Zarządzanie Energią i Teleinformatyka, Materiały i Studia, Nałęczów 20-22 lutego 2013, Kaprint 2013*, 177-187.
- [5] Rusowicz A., Pospiech E., Baranowski P. A., Leszczyński M., Stanowisko pomiarowe do wyznaczenia współczynników przejmowania ciepła pomiędzy powierzchnią a mikrostrumieniami, *Aparatura Badawcza i Dydaktyczna* Nr 3, 2013, 253-258.
- [6] Mikielwicz D., Mikielwicz J., Chłodzenie powierzchni za pomocą osiowosymetrycznych strug cieczy, Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2005.
- [7] Robinson A. J., Schnitzler E., An experimental investigation of free and submerged miniature liquid jet array impingement heat transfer, *Experimental Thermal and Fluid Science* 32, 2007, 1-13.
- [8] Peng T., Qing L., Yimin X., Investigation of the submerged liquid jet arrays impingement cooling, *Applied Thermal Engineering* 31, 2011, 2757-2763.
- [9] Meola C., A new correlation of Nusselt number for impinging jets, *Heat Transfer Engineering* 30, 2009, 221-228.
- [10] Michna G. J., Browne E. A., Peles Y., Jensen M. K., The effect of area ratio on microjet array heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54, 2011, 1782-1790.
- [11] Womac D. J., Incropera F. P., Ramadhvani S., Correlating Equations for Impingement Cooling of Small Heat Sources With Multiple Circular Liquid Jets, *Journal of Heat Transfer* 116, 1994, 482-486.
- [12] Browne E. A., Michna G. J., Jensen M. K., Peles Y., Experimental Investigation of Single-Phase Microjet Array Heat Transfer, *Journal of Heat Transfer*, 132, 2010.