

Stanisław KUCYPERA

EMPIRYCZNE BADANIE PRZEPLYWU CIEPŁA OD MAŁYCH PŁASKICH POWIERZCHNI ZNAJDUJĄCYCH SIĘ W GAZACH ROZRZEDZONYCH

Streszczenie. W pracy podano ogólną charakterystykę próżni i jej zastosowania w nauce, technice i przemyśle. Opisano sposób przepływu ciepła w gazach rozrzedzonych. Opisano także skomputeryzowane stanowisko pomiarowe do badań przepływu ciepła w gazach rozrzedzonych. Wykonano analizę wpływu podciśnienia gazu na temperaturę złącza półprzewodnikowego elementu grzejnego. Przedstawiono wybrane wyniki badań.

EMPIRICAL INVESTIGATION OF THE HEAT TRANSFER FROM SMALL PLATE SURFACES LOCATED IN THE RAREFIED GASES

Summary. In this paper the general characterization of the vacuum and its application in the science, engineering and industry has been given. The way of the heat transfer in the rarefied gases has been described. The computerized measuring stand to investigations of the heat transfer in the rarefied gases has been described too. The influence of the gas pressure below atmospheric pressure on the semiconductor junction temperature of the heating element has been analysed. The chosen results of the investigations have been presented.

1. Wstęp

Próżnia (gazy rozrzedzone) jest to ośrodek gazowy o ciśnieniu niższym od ciśnienia atmosferycznego. Im niższe jest ciśnienie gazów, tym gazy są bardziej rozrzedzone i tym samym wyższa jest próżnia [1,2]. Wytwarzanie próżni odgrywa coraz ważniejszą rolę w nowoczesnej nauce i technice, a także coraz częściej w przemyśle. Dla przykładu można wymienić takie dziedziny nauki, jak: fizyka ciała stałego, nukleonika, elektronika, badanie przestrzeni kosmicznej itp.. Loty w przestrzeni kosmicznej nie byłyby możliwe bez uprzedniego zbadania statków kosmicznych w komorach próżniowych, w których wytwarzane są warunki podobne do tych, jakie występują w przestrzeni kosmicznej. Próżnia ma coraz większe znaczenie w

takich dziedzinach przemysłu, jak: chemia, farmaceutyka, elektrotechnika czy metalurgia. We wszystkich dziedzinach nauki i techniki, gdzie wykorzystywana jest próżnia, stosuje się aparaturę składającą się z urządzeń elektronicznych, które montowane są w oparciu o dyskretne przyrządy półprzewodnikowe lub układy scalone. Jak wiadomo, w przyrządach tych, na skutek przepływu prądu elektrycznego, generowane jest ciepło. Ciepło to poprzez obudowę przyrządu odprowadzane jest do otoczenia - gazu rozrzedzonego. Stąd analiza cieplna musi uwzględniać te specyficzne warunki. Warunki te zapewne nie sprzyjają polepszeniu konwekcyjnej wymiany ciepła. Dlatego obecna praca poświęcona jest badaniu na stanowisku laboratoryjnym wymiany ciepła od małych płaskich płytek grzejnych, symulujących układy scalone, do otoczenia o obniżonym ciśnieniu.

2. Krótka charakterystyka przepływu ciepła w gazach rozrzedzonych

Przepływ ciepła w gazach rozrzedzonych jest zagadnieniem stosunkowo nowym i nie do końca jeszcze dopracowanym. Powszechnie dostępna literatura naukowa, dotycząca przepływu ciepła, zagadnieniom tym poświęca bardzo mało miejsca [3,4] lub w ogóle nie zajmuje się tymi problemami, np. poz.[6,7]. Stąd wydaje się, że istnieje pewna luka w badaniach podstawowych dotyczących tych problemów. W zagadnieniach konwekcji w gazach przy ciśnieniu normalnym gaz traktowany jest jako ośrodek ciągły, dlatego fakt, że składa się on z cząsteczek, w rozważaniach przepływu ciepła nie powoduje większych błędów. Jednak przy bardzo niskim ciśnieniu zaczynają występować zjawiska, które wytłumaczyć można tylko przy zastosowaniu kinetycznej teorii gazów. Kinetyczna teoria gazów zakłada, że każdy gaz składa się z kulistych cząsteczek o jednakowej średnicy. Cząstki te znajdują się w ciągłym ruchu i zderzają się ze sobą sprężysto. Podczas zderzeń następuje między nimi wymiana energii kinetycznej. Energia ta jest uzewnętrzniana w postaci temperatury gazu oraz rozkładu prędkości cząsteczek. Rozkład ten podlega prawu Maxwella. Kinetyczna teoria gazów pozwala wyznaczyć istotne wielkości z punktu widzenia zagadnień przepływu ciepła. Jedną z nich jest swobodna droga cząsteczki λ_s , która określa średnią statystyczną długość drogi przebytej przez cząsteczkę między kolejnymi zderzeniami. Droga ta zależy od ciśnienia gazu i zwiększa się, gdy ciśnienie maleje. Następnymi wielkościami istotnymi z punktu widzenia teorii przepływu ciepła są lepkość i przewodność cieplna gazu. Wielkości te w kinetycznej teorii gazów wyznaczane są z praw zachowania energii i pędu zderzających się cząsteczek. Lepkość oraz przewodność cieplną łączy ze sobą następująca zależność [4]:

$$\lambda = \frac{1}{4} \cdot (9N - 5) \cdot \eta \cdot c_v \quad (1)$$

gdzie:

\bar{c} - przewodność cieplna gazu,

$N = c_p / c_v$ - stosunek ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu do ciepła właściwego przy stałej objętości,

η - dynamiczny współczynnik lepkości gazu.

Innymi wielkościami stosowanymi w teorii konwekcyjnej przepływu ciepła są następujące liczby kryterialne: Nusselta (Nu), Prandtla (Pr), Grashofa (Gr), Reynoldsa (Re) i Macha (Ma). Ważną liczbą stosowaną w zagadnieniach przepływu ciepła w gazach rozrzedzonych, a charakteryzująca stopień rozrzedzenia gazu, jest liczba Knudsenowa (Kn). Liczba ta zdefiniowana jest jako stosunek długości średniej swobodnej drogi cząsteczki λ_s do wymiaru charakterystycznego ciała l . Matematycznie wyrażenie określające tę liczbę można zapisać:

$$Kn = \frac{\lambda_s}{l} = 1,26 \sqrt{N} \cdot \frac{Ma}{Re} \quad (2)$$

Jak wspomniano wcześniej, przy niskim ciśnieniu wartość λ_s zwiększa się dość szybko i staje się porównywalna z wymiarem charakterystycznym ciała l . Wówczas w analizie przepływu ciepła należy uwzględnić fakt, że gaz składa się z cząsteczek. Kryterium traktowania gazu jako ośrodka ciągłego lub składającego z cząsteczek jest wartość liczby Knudsenowej. Tsien [5], analizując zakres zmiany wartości liczby Knudsenowej, rozdzielił jej pełny zakres na cztery podzakresy i nazwał je odpowiednio:

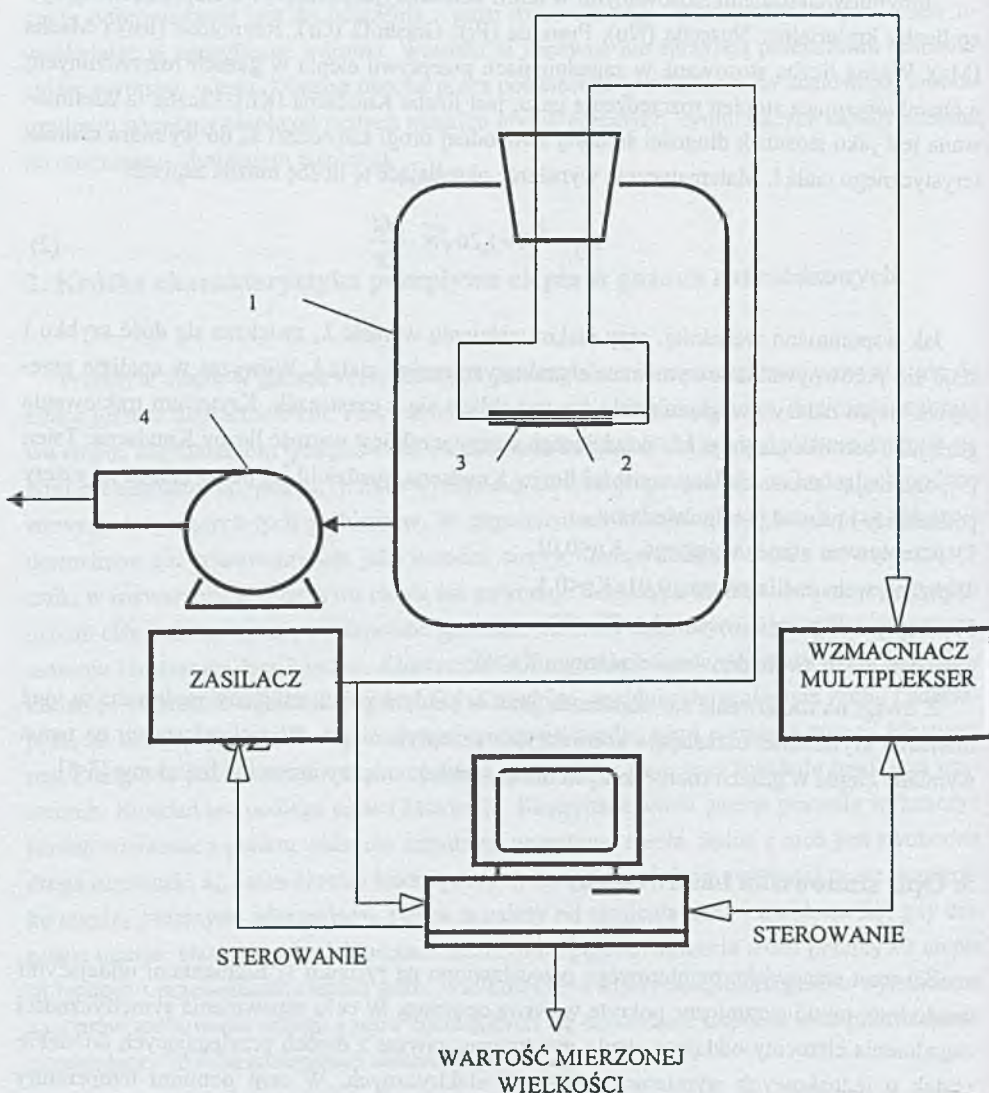
- 1) przepływem ośrodka ciągłego, $Kn < 0,01$,
- 2) przepływem poślizgowym, $0,01 < Kn < 0,1$,
- 3) przepływem przejściowym, $0,1 < Kn < 10$,
- 4) przepływem swobodno - molekularnym $Kn > 10$.

Z uwagi na zachowanie się cząsteczek gazu w każdym z tych zakresów podawane są inne równania kryterialne, określające konwekcyjny przepływ ciepła. Więcej informacji na temat wymiany ciepła w gazach rozrzedzonych można znaleźć między innymi w literaturze [3-5].

3. Opis stanowiska badawczego

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 1. Elementami oddającymi ciepło były płytki ceramiczne pokryte warstwą oporową. W celu zapewnienia symetryczności zagadnienia elementy oddające ciepło montowano zawsze z dwóch przylegających do siebie płytek o jednakowych wymiarach i oporach elektrycznych. W celu pomiaru temperatury płytek w środku między nimi umieszczano termoparę. Płytki łączone były ze sobą jako oporniki równolegle. Przedstawione na rysunkach wyniki pomiarów dotyczą płytek o wymiarach $26 \cdot 27 \text{ mm}^2$ i $26 \cdot 52 \text{ mm}^2$. Temperatura w butli mierzona była również za pomocą termopary i wynosiła $21,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Płytki grzane były elektrycznie za pomocą zasilacza sterowanego kom-

puterem. Wartości napięcia i prądu przepływającego przez płytki rejestrowane były poprzez kartę pomiarową w komputerze. Wartości sygnału z termopar: mierzącej temperaturę płytki grzejnej i temperaturę w butli były wzmacniane w multiplexerze, a następnie przesyłane i zapamiętywane w komputerze. Komputer stanowił układ sterujący - pomiarowy. Następnie wyniki pomiarów wykorzystano do dalszej obróbki.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego:

1 - butla próżniowa, 2 - płytki grzejne, 3 - termopara, 4 - pompa próżniowa

Fig. 1. Schema of the measurement stand:

1 - vacuum bottle, 2 - heat plates, 3 - thermocouple, 4 - vacuum pump

Niskie ciśnienie w butli uzyskiwano za pomocą pompy próżniowej. Ciśnienie to mierzone było manometrem rtęciowym, a ciśnienie otoczenia barometrem. Z uwagi na bezpieczeństwo dla butli szklanej wartość podciśnienia manometrycznego nie mogła przekroczyć 62 kPa, a dla butli metalowej 96 kPa. Płytki o elektrycznym oporze zastępczym 26,3 Ω umieszczano w butlach w pozycjach: poziomej i pionowej. Temperatura w butlach była na ogół stała i równała się temperaturze otoczenia. Aby zapewnić większą dokładność odczytu przed rozpoczęciem pomiarów dokonano skalowania termopar za pomocą ultratermostatu, a charakterystyki skalowania wprowadzono do programu sterująco – pomiarowego. Dzięki temu podczas pomiarów w komputerze były zapisywane rzeczywiste wartości temperatury. Do sterowania całością pomiarów i opracowywania wyników napisane zostały programy komputerowe w języku Pascal. Programy te są dosyć uniwersalne i umożliwiają między innymi:

- 1) zadawanie z klawiatury wartości mocy grzejącej i odłączanie jej w przypadku korzystania z zewnętrznego źródła ciepła,
- 2) zawsze przed pomiarem skalowanie nowo używanych termopar i zasilaczy,
- 3) obserwowanie na monitorze wartości prądu i napięcia zasilającego płytki,
- 4) zadawanie z klawiatury liczby używanych termopar (max można używać 24 termopary),
- 5) obserwowanie zmian temperatury na wszystkich lub tylko wybranych termoparach,
- 6) zadawanie z klawiatury maksymalnych wartości obserwowanej temperatury (w przypadku , gdy układ nie dochodzi do stanu ustalonego),
- 7) zadawanie z klawiatury czasu trwania eksperymentu,
- 8) zapisywanie wyników pomiarów do zbioru w celu ewentualnej dalszej ich obróbki,
- 9) opracowanie wyników pomiarów.

4. Przykładowe wyniki pomiarów

Na opisanym w punkcie 3 stanowisku pomiarowym wykonano wiele serii pomiarów. Ponieważ dla tej samej geometrii płytek wyniki pomiarów niewiele różniły się między sobą, dlatego do opracowania ich wykorzystywano średnie wartości otrzymywane z kilku pomiarów. Dla zmierzonych wartości temperatury i ciśnienia obliczono konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła z zależności kryterialnych [4], a radiacyjny z ogólnie dostępnych zależności dla zadanych emisyjności. W przypadku pomiarów całkowity współczynnik wnikania ciepła obliczano z zależności:

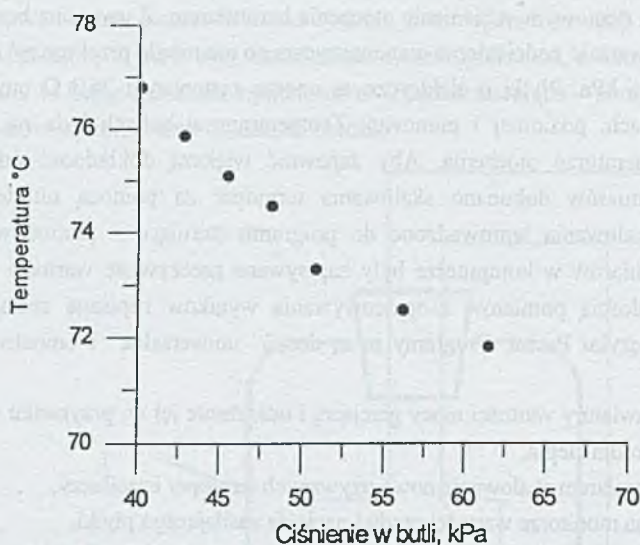
$$\alpha_z = \frac{P}{A \cdot \Delta t}, \quad (3)$$

gdzie: P – moc generowana, W,

A – powierzchnia przepływu ciepła, m²,

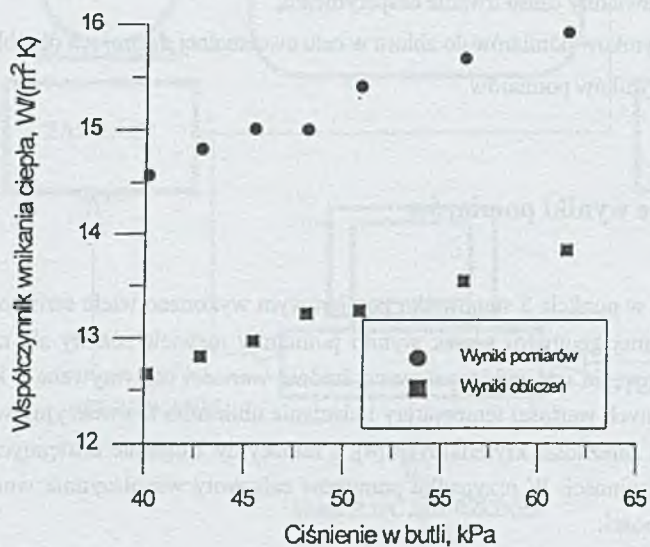
Δt – różnica temperatury płytki i otoczenia, °C.

Wybrane wyniki przeprowadzonej analizy przedstawiono na wykresach (rys.2-9).



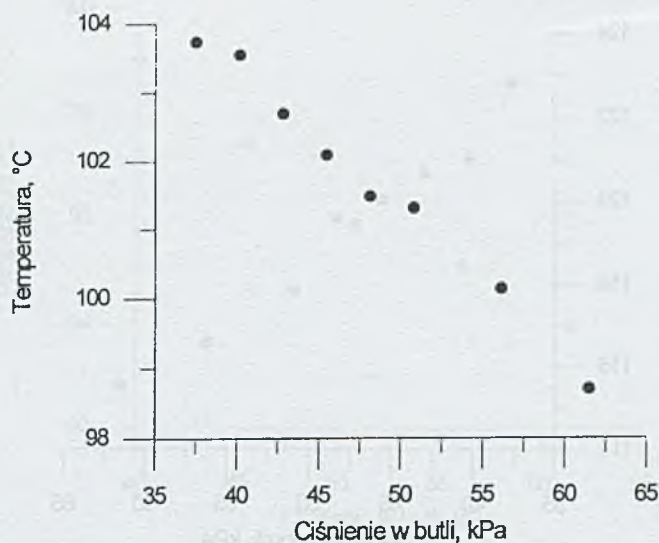
Rys. 2. Zależność temperatury obszaru czynnego w funkcji ciśnienia w butli dla płytki poziomej i mocy generowanej $P = 2,26$ W

Fig. 2. Temperature of semiconductor junction as a function of pressure in the bottle for the horizontal plate and generated power $P = 2,26$ W



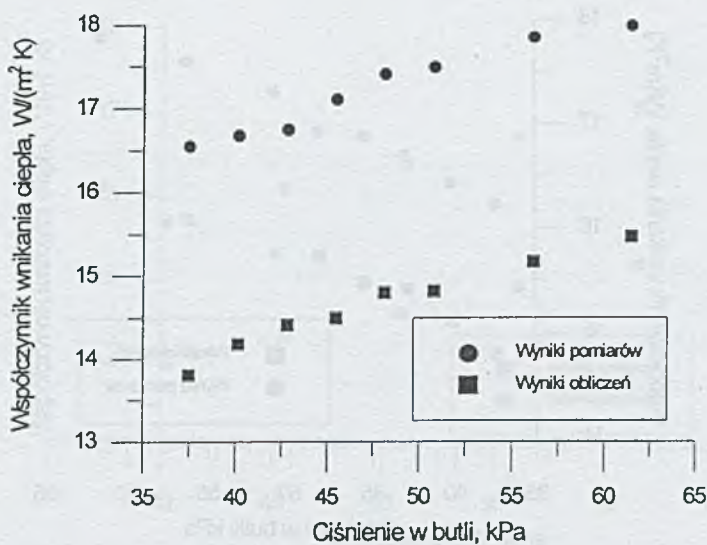
Rys. 3. Zależność współczynnika wnikańia ciepła α w funkcji ciśnienia w butli dla płytki poziomej i mocy generowanej $P = 2,26$ W

Fig. 3. Heat transfer coefficient as a function of pressure in the bottle for the horizontal plate and generated power $P = 2,26$ W



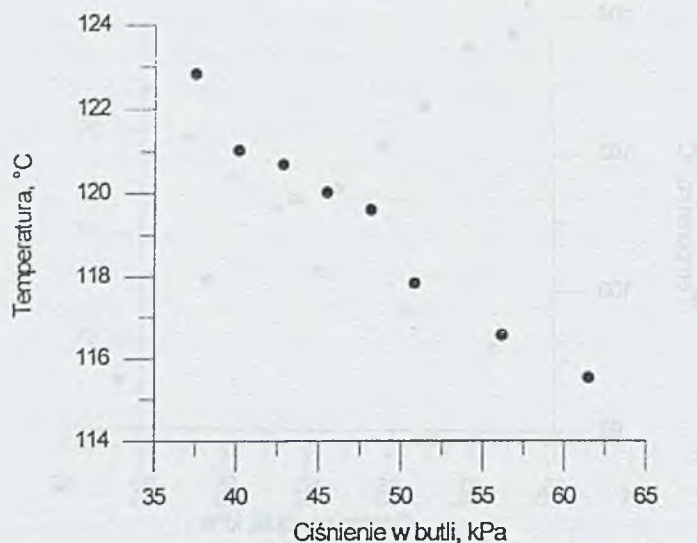
Rys. 4. Zależność temperatury obszaru czynnego w funkcji ciśnienia w butli dla płytki poziomej i mocy generowanej $P = 3,85$ W

Fig. 4. Temperature of semiconductor junction as a function of pressure in the bottle for horizontal plate and generated power $P = 3,85$ W



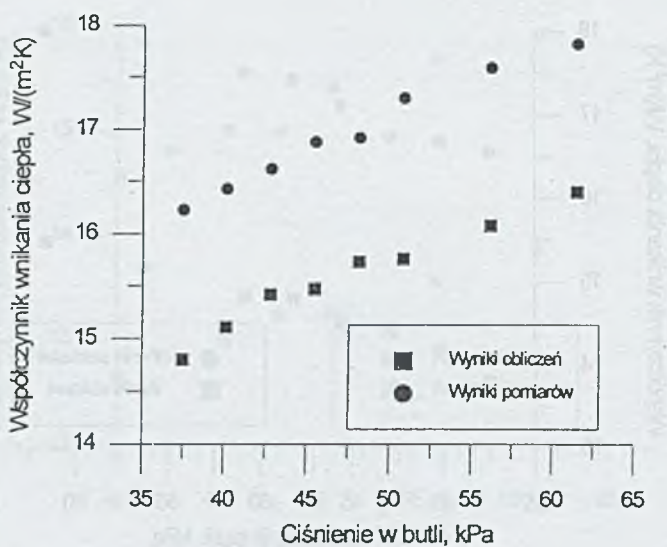
Rys. 5. Zależność współczynnika wnikańia ciepła α w funkcji ciśnienia w butli dla płytki poziomej i mocy generowanej $P = 3,85$ W

Fig. 5. Heat transfer coefficient as a function of pressure in the bottle for the horizontal plate and generated power $P = 3,85$ W



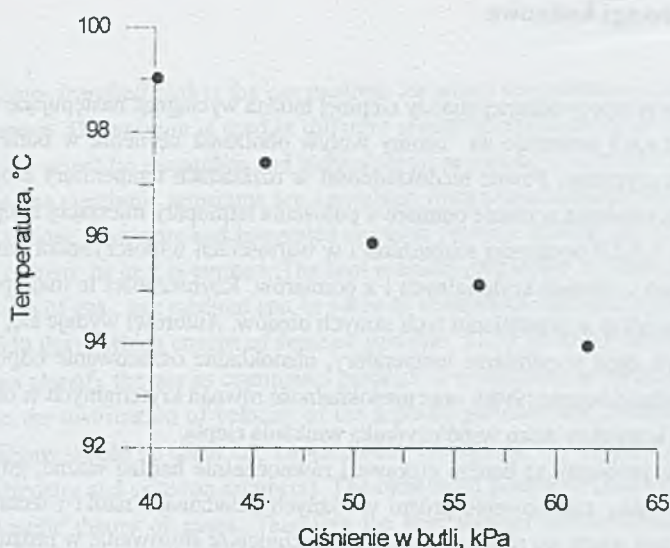
Rys. 6. Zależność temperatury obszaru czynnego w funkcji ciśnienia w butli dla płytki poziomej i mocy generowanej $P = 5,15$ W

Fig. 6. Temperature of semiconductor junction as a function of pressure in the bottle for horizontal plate and generated power $P = 5,15$ W



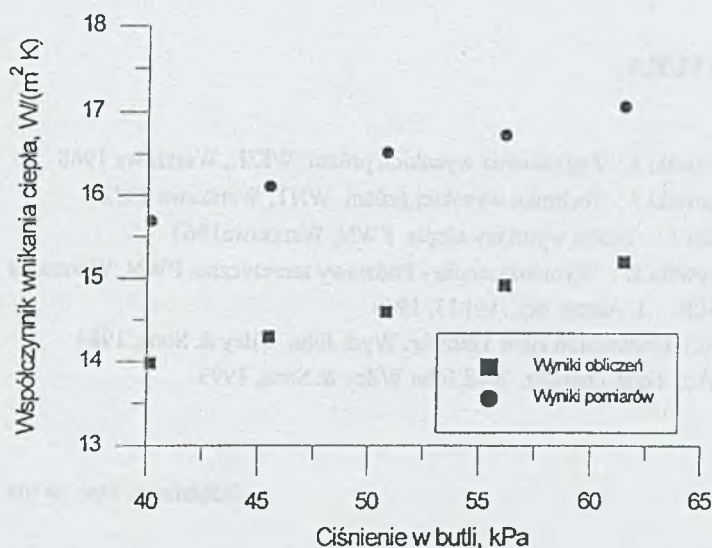
Rys. 7. Zależność współczynnika wnikańia ciepła α w funkcji ciśnienia w butli dla płytki poziomej i mocy generowanej $P = 5,15$ W

Fig. 7. Heat transfer coefficient as a function of pressure in the bottle for the horizontal plate and generated power $P = 5,15$ W



Rys. 8. Zależność temperatury obszaru czynnego w funkcji ciśnienia w butli dla płytki pionowej i mocy generowanej $P = 3,85$ W

Fig. 8. Temperature of semiconductor junction as a function of pressure in the bottle for the vertical plate and generated power $P = 3,85$ W



Rys. 9. Zależność współczynnika wnikańia ciepła α w funkcji ciśnienia w butli dla płytki pionowej i mocy generowanej $P = 3,85$ W

Fig. 9. Heat transfer coefficient as a function of pressure in the bottle for the horizontal plate and generated power $P = 2,26$ W

5. Wnioski i uwagi końcowe

Na podstawie przeprowadzonej analizy cieplnej można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Analiza rys. 2,4,6,8 wskazuje na istotny wpływ obniżania ciśnienia w butli na temperaturę obszaru czynnego. Pewne niedokładności w rozkładach temperatury mogły wynikać z trudności ustalenia w czasie pomiarów położenia termopary mierzącej temperaturę.
2. Na rysunkach 3,5,7,9 występują rozbieżności w wartościach współczynnika wnikania ciepła, obliczonych z równań kryterialnych i z pomiarów. Rozbieżności te mają prawie stałą wartość, co świadczy o popełnianiu tych samych błędów. Autorowi wydaje się, że błędami tymi mogą być: błąd w pomiarze temperatury, niedokładne oszacowanie odpływu ciepła przez powierzchnie boczne płytek oraz niedokładność równań kryterialnych w obliczeniach teoretycznych konwekcyjnego współczynnika wnikania ciepła.

Przedstawione problemy są bardzo ciekawe i równocześnie bardzo ważne, gdyż, jak powiedziano we wstępie, zastosowanie próżni w różnych dziedzinach nauki i techniki będzie coraz szersze. Z tym wiąże się również coraz powszechniejsze stosowanie w próżni aparatury elektronicznej. W swoich badaniach, oprócz wymienionych wyżej błędów, autor miał problemy z utrzymaniem w czasie pomiarów przez dłuższy okres czasu wyższych wartości próżni. Dlatego w dalszych badaniach zostanie zwrócona uwaga na zmniejszenie błędów przeprowadzanej analizy oraz rozszerzenie badań przepływu ciepła na warunki coraz niższego ciśnienia.

LITERATURA

1. Groszkowski J.: Zagadnienia wysokich próżni. WKiŁ, Warszawa 1968
2. Groszkowski J.: Technika wysokiej próżni. WNT, Warszawa 1972
3. Madejski J.: Teoria wymiany ciepła. PWN, Warszawa 1963
4. Staniszewski B.: Wymiana ciepła - Podstawy teoretyczne. PWN, Warszawa 1980
5. Tsien H.S.: J. Aeron. Sci., vol.13, 1946
6. Bejan A.: Convection Heat Transfer, Wyd. John Wiley & Sons, 1984
7. Bejan A.: Heat Transfer, Wyd. John Wiley & Sons, 1993

Recenzent: Doc. dr inż. Antoni Guzik

Wpłynęło do Redakcji 20. 07.1998 r.

Abstract

The vacuum (rarefied gas) is the gas medium for which the pressure is below then atmospheric pressure. The vacuum is used in different scientific researches and technological processes. During scientific researches and technological processes is used an electronic apparatus. The present electronic apparatus are assembled from semiconductor devices (discrete - the diodes, triodes, thyristors and integrated circuits). In these devices under the influence of the electric current the heat is emitted. The heat is transferred to the rarefied gas. According to the rarefy ratio of gas , gas medium can be taken as continuous medium or discontinuous medium (rarefied gas) - which consist of separate particles. The Knudsen's number is the criteria which allows classify the gas as continuous medium or discontinuous medium. In discontinuous medium the distribution of velocity of the separate particles and change of theirs energy during collisions should be taken into consideration the thermal and flow parameters (eg. conductivity, viscosity and criterion numbers). The mentioned parameters can only be determined using the kinetic theory of gases. Therefore the heat transfer in the rarefied gases is very complicated problem and according to the author information this problem is not completely known. In this paper the experimental method is used to analysis the heat transfer in the rarefied gases. For experimental purposes an computerized measuring stand has been built. The series of the measurements have been carried out. Some chosen results of the measurements are presented in fig. (2+9).