

Ćwiczenie 133

Element Peltiera

Cel ćwiczenia

Zapoznanie ze zjawiskiem Seebecka i Peltiera. Zastosowanie elementu Peltiera do chłodzenia i zamiany energii cieplnej w energię elektryczną.

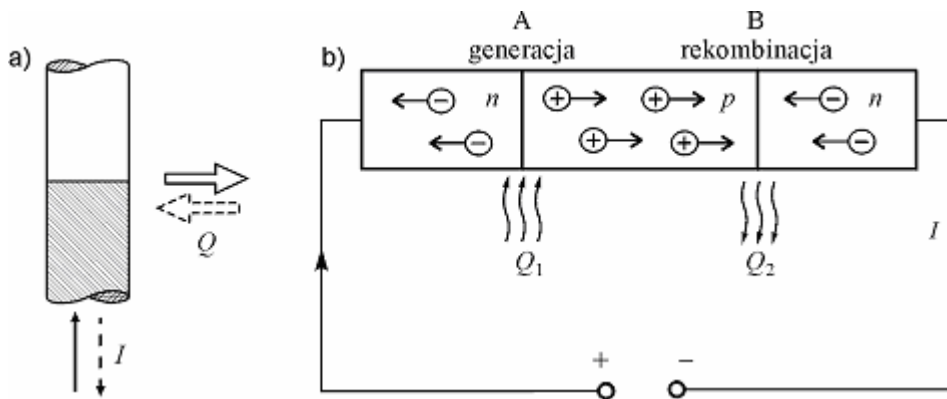
Wprowadzenie

Zjawiska fizyczne warunkujące działanie elementu Peltiera

Działanie i zastosowania elementu Peltiera warunkuje kilka zachodzących w nim zjawisk. Samo zjawisko Peltiera polega na tym, że przy przepływie prądu elektrycznego przez złącza dwu materiałów obserwujemy wytwarzanie względnie pochłanianie ciepła, zwanego ciepłem Peltiera (rys. 1a). Zjawisko Peltiera jest odwracalne: jeżeli przy danym kierunku przepływu prądu stwierdzamy wydzielanie ciepła Peltiera, to przy zmianie kierunku prądu na przeciwny zaobserwujemy pochłanianie ciepła (prowadzące do ochładzania złącza). Moc ciepła Peltiera (ciepła Q w czasie t) jest proporcjonalna do przepływającego prądu,

$$Q/t = pI. \quad (1)$$

Współczynnik Peltiera p zależy od rodzaju materiałów złącza i temperatury.



Rys. 1. Zjawisko Peltiera: a) obraz makroskopowy (patrz tekst); b) mikroskopowa interpretacja zjawiska Peltiera w półprzewodnikach

Zjawisko Peltiera zostało najpierw wykryte dla metali, ale efekt jest najsilniejszy dla półprzewodników. Dla półprzewodników łatwiej też jest podać mikroskopowe wytłumaczenie zjawiska. Rysunek 1b przedstawia dwa złącza wykonane z materiału półprzewodnikowego o przewodnictwie elektronowym (typu n) i dziurowym (typu p). Kierunek przepływu dodatnich dziur jest przeciwny niż ujemnych elektronów. Dlatego w złączu A, w którym spotykają się strumienie elektronów i dziur, następuje ich rekombinacja. Elektrony wskazują na puste

poziomy dziurowe, a uwolniona energia wydziela się w postaci ciepła. Odwrotny proces zachodzi w drugim złączu (B). Aby podtrzymać prąd elektronów i dziur następuje tam generacja par elektron–dziura kosztem dopływającego do złącza ciepła. Oczywisty jest powód zmiany kierunku strumieni ciepła przy zmianie kierunku prądu.

Uważny czytelnik zaniepokoić się może, że pokazany na rysunku 1b układ ma własności prostujące: przynajmniej jedno ze złącz (konkretnie złącze B) spolaryzowane jest w kierunku zaporowym, zatem przez obwód popłynie co najwyżej znikomo mały prąd wsteczny! Prąd wsteczny jest rzeczywiście bardzo mały w półprzewodniku takim jak krzem, w którym szerokość przerwy energetycznej (1,1 eV) jest znacznie większa energii termicznej ($k_B T$ dla temp. pokojowej wynosi 0,026 eV). Do produkcji elementu Peltiera użyć trzeba półprzewodnika o wąskiej przerwie energetycznej, porównywalnej z $k_B T$, dla którego prąd wsteczny jest bardzo duży. Stosuje się np. tellurek bizmutu Bi_2Te_3 , z domieszkami Sb i Se w celu uzyskania materiału typu p i n .

Z faktu, że efekt Peltiera jest odwracalny wynika, że w obwodzie, którego złącza A i B mają różne temperatury może być generowany prąd. Aby prąd mógł popłynąć, w układzie dwu złączy powstać musi *napięcie termoelektryczne*. W pierwszym przybliżeniu jest ono proporcjonalne do różnicy temperatur,

$$U = a(T_2 - T_1). \quad (2)$$

Powstawanie napięcia termoelektrycznego nazywane bywa zjawiskiem Seebecka^{*}, zaś współczynnik proporcjonalności a – współczynnikiem Seebecka. Napięcie termoelektryczne w metalach wykorzystywane jest do pomiaru temperatury. (Patrz ćwiczenie 121 „Termometr oporowy i termopara”).

Zjawisku Peltiera w półprzewodnikach czy metalach towarzyszą nieuchronnie dwa zjawiska nieodwracalne. Pierwszym jest przewodzenie ciepła od złącza o temperaturze wyższej do niższej. Strumień płynącego ciepła jest proporcjonalny do różnicy temperatur $T_1 - T_2$, przekroju poprzecznego S i współczynnika przewodnictwa cieplnego K , zaś odwrotnie proporcjonalny do długości l elementu,

$$Q_{\text{przew}} / t = K \frac{S}{l} (T_2 - T_1). \quad (3)$$

Drugim niekorzystnym zjawiskiem jest wydzielanie się ciepła Joule’a przy przepływie prądu. Wydzielone ciepło wynosi

$$Q_{\text{Joule}} / t = I^2 R = I^2 \frac{\rho l}{S}, \quad (4)$$

gdzie ρ oznacza opór właściwy materiału.

Najważniejszym zastosowaniem elementów Peltiera jest wytworzenie temperatury niższej od temperatury otoczenia. Jak niskiej? Rozpatrzmy bilans cieplny złącza zimnego izolowanego od otoczenia. W wyniku efektu Peltiera ciepło równe Ip jest usuwane ze złącza. Do złącza napływa ciepło przewodnictwa i połowa (w przybliżeniu) wytworzonego ciepła Joule’a

^{*} Powstawanie prądu termoelektrycznego zostało odkryte w 1821 r. przez fizyka niemieckiego Thomasa J. Seebecka. Do detekcji prądu w obwodzie używał igły magnetycznej i początkowo błędnie interpretował swoje obserwacje jako wytwarzanie pola magnetycznego pod wpływem różnicy temperatur. Zjawisko Peltiera odkrył francuski uczoney Jean C. Peltier w roku 1834.

$$Ip = K \frac{S}{l} (T_2 - T_1) + \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho l}{S}, \quad (5)$$

Z równania (5) obliczamy wartość spadku temperatury $\Delta T = T_2 - T_1$ w funkcji prądu

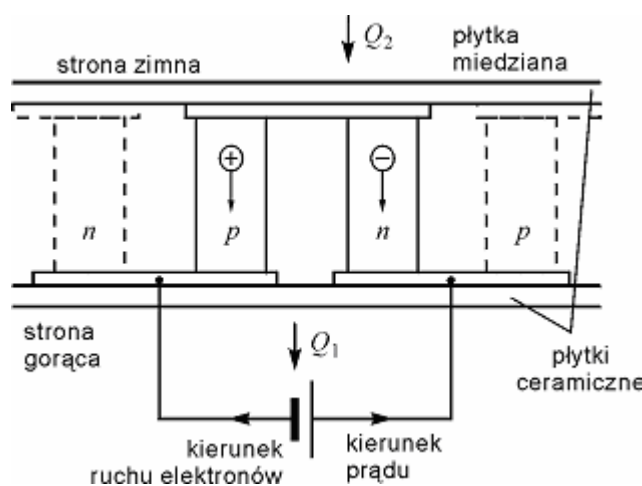
$$\Delta T(I) = \frac{l}{KS} \left(Ip - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho l}{S} \right). \quad (6)$$

Z równania (6) wynika, że istnieje optymalna wartość prądu, przy którym wartość spadku temperatury jest największa. Obliczając w zwykły sposób maksimum funkcji $\Delta T(I)$,

$$\Delta T_{\max} = \frac{p^2}{K\rho^2}, \quad (7)$$

przekonujemy się, że ΔT_{\max} nie zależy od wymiarów geometrycznych, lecz wyłącznie od parametrów materiałowych. Dla metali ΔT_{\max} jest zawsze mniejsze niż 1 stopień, natomiast dla półprzewodników osiągnąć może wartości sięgające 60 ÷ 70 stopni.

Rysunek 2 przedstawia budowę elementu Peltiera.

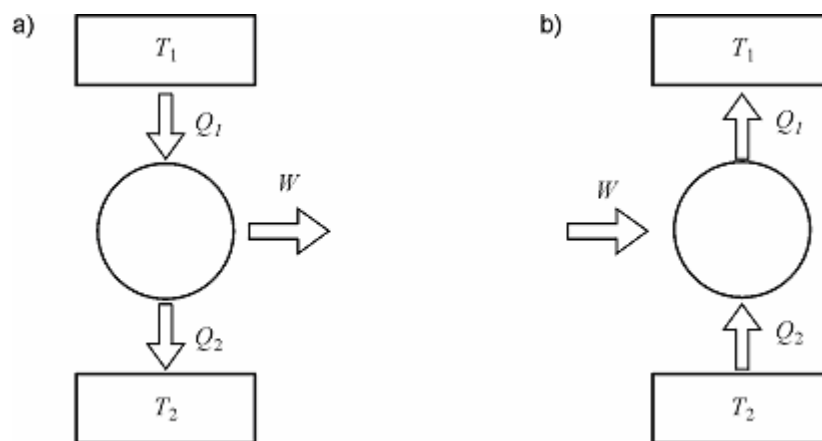


Rys. 2. Budowa elementu Peltiera (wg Górnicki P.: *Ogniwa Peltiera*. Elektronika Praktyczna, nr 1-3, 1996)

Słupki półprzewodnika typu p i n połączone są szeregowo przy użyciu miedzianych płytek (metodą lutowania). Elementy czynne znajdują się między płytkami ceramicznymi zapewniającymi sztywność mechaniczną oraz doprowadzenie ciepła. Całość ma kształt kwadratowej płytki o boku kilku cm i grubości kilku mm.

Element Peltiera jako maszyna cieplna

W elemencie Peltiera zachodzi przemiana pracy (prądu elektrycznego) na ciepło, lub odwrotnie. Niezależnie od mikroskopowego obrazu tych zjawisk podlegają one ogólnym prawom termodynamiki. Ogólny schemat silnika cieplnego przedstawia rysunek 3a.



Rys. 3. Schemat przepływu ciepła i pracy dla: a) silnika cieplnego; b) chłodziarki względnie pompy cieplnej

Silnik pobiera ciepło Q_1 ze zbiornika o wyższej temperaturze T_1 , wytwarza pracę W i pozostałe ciepło równe $Q_2 = Q_1 - W$ przekazuje do chłodnicy o temperaturze T_2 (rys. 3a). Sprawność silnika η definiujemy jako stosunek uzyskanej pracy W do włożonego ciepła Q_1

$$\eta = \frac{W}{Q_1}. \quad (8)$$

Dla teoretycznego zbadania zamiany ciepła na pracę tego analizuje się wymagowany idealny silnik cieplny, zwany silnikiem Carnota. Niezależnie od szczegółów budowy silnika Carnota, jego sprawność zależy tylko od temperatur źródła ciepła i chłodnicy

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (9)$$

Kierunek działania silnika można odwrócić (rys. 3b). Do silnika dostarczamy pracę W . Silnik pobiera wtedy ciepło Q_2 ze zbiornika o temperaturze niższej i dostarcza ciepło Q_1 do zbiornika o temperaturze wyższej.

Jeżeli celem działania maszyny cieplnej jest uzyskiwanie temperatury niższej od temperatury otoczenia, wtedy mówimy o *chłodziarce*. Wydajność chłodzenia definiujemy jako stosunek uzyskanego odpływu ciepła o niższej temperaturze do włożonej pracy

$$\eta_c = \frac{Q_2}{W}. \quad (10)$$

Używamy słowa „wydajność” zamiast „sprawność” dlatego, że η_c pozostaje liczbą bezwymiarową, ale może być większą od jedności.

W przypadku *pompy cieplnej* kierunki przepływu ciepła i pracy są takie same jak chłodziarki (rys. 3b), ale celem jest uzyskanie ciepła Q_1 (o wyższej temperaturze T_1) kosztem pracy W i ciepła Q_2 pobranego z otoczenia. Wydajność grzania η_h

$$\eta_h = \frac{Q_1}{W}, \quad (11)$$

może być większa od jedności. Oznacza to, że pompa ciepła pozwala np. ogrzewać dom^{*} kosztem mniejszego zużycia energii elektrycznej niż zwykły grzejnik, dla którego η_h jest co najwyżej jest równe 1.

Na czym zasadza się idealność silnika Carnota? W silniku tym zachodzą wyłącznie zjawiska odwracalne, np. przemiany izotermiczne i adiabatyczne gazu. Sprawność (wydajność) rzeczywistych maszyn cieplnych może być tylko niższa od silnika Carnota. (Znak równości we wzorach (8) – (11) winien być zastąpiony znakiem nierówności <.) Przyczyną są występujące w nich zjawiska nieodwracalne. W przypadku elementu Peltiera są to: przewodzenie ciepła przy skończonej różnicy temperatur i wydzielanie ciepła Joule'a.

Maszyny cieplne oparte o własności cieczy i gazów są duże, o skomplikowanej konstrukcji. Przykładem jest współczesna elektrownia ciepła. Źródłem ciepła Q_1 jest kocioł parowy ogrzewany ciepłem ze spalania węgla, ropy, gazu lub z reaktora jądrowego, praca W uzyskiwana jest w turbinie, a nieuniknione ciepło odpadowe Q_2 jest przekazywane do wody w rzece lub do atmosfery (za pomocą chłodni kominowej). Przyznać trzeba, że sprawność współczesnej elektrowni jest bliska wartości (9) dozwolonej przez zasady termodynamiki.

Element Peltiera stanowi maszynę cieplną, która działać może jako silnik, chłodziarka i pompa ciepła. W przeciwieństwie do klasycznych maszyn cieplnych jest elementem małym, nie zawierającym żadnych części ruchomych. Pracę W stanowi tu praca prądu elektrycznego równa iloczynowi napięcia, natężenia i czasu.

W naszych eksperymentach stwierdzimy jednak, że sprawność elementu Peltiera pozostaje znacznie niższa od wartości granicznych. Dlatego prowadzone są prace badawcze mające na celu podniesienie ich sprawności. Jak wskazuje wzór (7), problem sprowadza się do poszukiwania materiałów posiadających jednocześnie wysoką wartość współczynnika Peltiera p , oraz małą oporność właściwą ρ i mały współczynnik przewodzenia ciepła K .

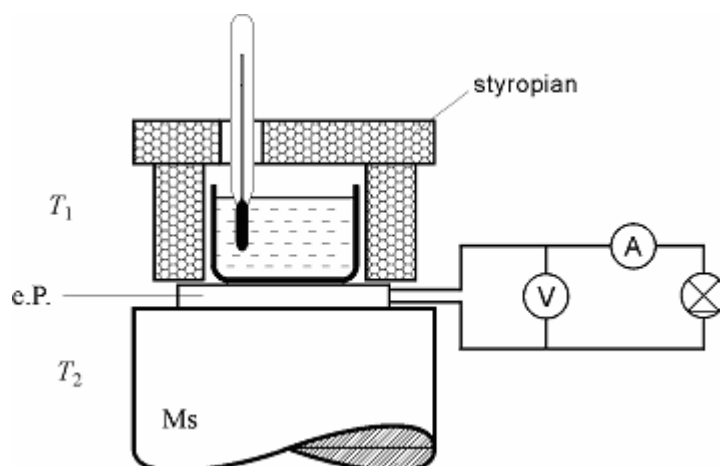
Postęp (choć niedostateczny) w poszukiwaniu optymalnych materiałów termoelektrycznych sprawił, że produkcja elementów Peltiera szybko rośnie. Znajdują różnorodne zastosowanie w elektronice, biologii, badaniach kosmicznych etc. – wszędzie tam, gdzie potrzebna jest miniaturowa chłodziarka lub termiczny generator prądu elektrycznego. Dzięki zastosowaniu elementów Peltiera nastąpił w ostatnich latach przełom w konstrukcji detektorów półprzewodnikowych promieniowania X i γ : wyeliminowano konieczność używania ciekłego azotu do chłodzenia elementu czynnego detektora.

Pomiar współczynników sprawności i wydajności elementu Peltiera

Działanie elementu jako silnika cieplnego sprawdzić można w eksperymencie pokazanym na rysunku 4. Element Peltiera w formie płytki przyklejony jest do chłodnicy – masywnego bloku metalu. Położenie na elemencie zlewki z wodą o temperaturze 100°C wytwarza energię wystarczającą do zaświecenia małej żarówki (lub układu żarówek). Pomiar polega na pomiarze w funkcji czasu temperatury zlewki T_1 oraz wartości napięcia i natężenia prądu.

W celu wyznaczenia sprawności zgodnie z wzorem (8) wyznaczyć trzeba ciepło i pracę. Wartość ciepła, które wypłynęło ze zlewki w skończonym przedziale temperatur ΔT_1 (np. od 90 do 80°C), wynosi $Q_1 = (m_w c_w + m_n c_n) \Delta T_1$. (Symbole m_w i m_n oznaczają masę wody i naczynia, natomiast c_w i c_n – odpowiednie wartości ciepła właściwego.) Pracę prądu elektrycznego określa całka z iloczynu natężenia I i napięcia U . Całkę tę obliczyć trzeba numerycznie w przedziale czasu, w którym nastąpił spadek temperatury ΔT_1 .

^{*} Pompy ciepłe do ogrzewania budynków są stosowane na dużą skalę np. w Szwecji, choć są drogie, a ich instalowanie jest kłopotliwe. Potrzebne ciepło Q_2 trzeba czerpać z otoczenia, np. z rur umieszczonych w gruncie czy na dnie jeziora. Szerokiego zastosowania pomp ciepła w Polsce można się spodziewać w przypadku znacznego wzrostu cen energii.

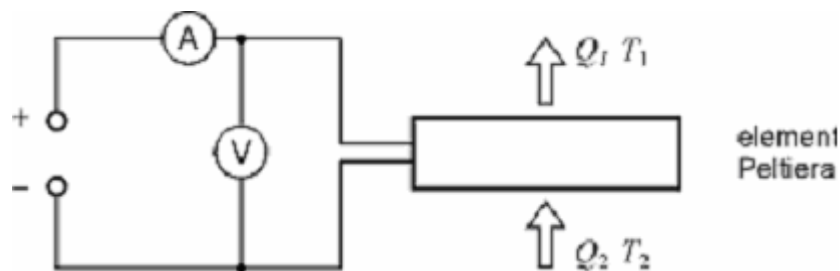


Rys. 4. Pomiar sprawności elementu Peltiera pracującego jako silnik cieplny

Sprawność przetwarzania energii cieplnej na pracę wyraża wzór

$$\eta = \frac{\int U I dt}{(m_w c_w + m_n c_n) \Delta T_1} \quad (12)$$

Aby element Peltiera zadziałał jako chłodziarka, względnie pompa ciepła, trzeba go zasilić z zewnętrznego źródła prądu (rys. 5).



Rys. 5. Układ elektryczny dla elementu Peltiera pracującego jako chłodziarka lub pompa ciepła

Ze względu na małą oporność elektryczną elementu najlepiej jest użyć zasilacza stabilizowanego, który działa jako źródło prądowe. W zależności od kierunku prądu zaobserwujemy obniżanie temperatury wody w zbiorniczku aż do osiągnięcia temperatur bliskich 0°C, względnie wzrost temperatury. Wydajność chłodzenia (względnie grzania) obliczamy jako

$$\eta_{c,h} = \frac{(m_w c_w + m_n c_n) \Delta T}{\int U I dt} \quad (13)$$

(Symbol ΔT oznacza tu, podobnie jak we wzorze (12), zmianę temperatury zlewki, a nie różnicę temperatur między obydwoma stronami elementu Peltiera.)

Literatura

[1] Podręczniki fizyki ciała stałego (patrz ćwic. 122)

[2] Górecki P.: Ogniwa Peltiera. *Elektronika Praktyczna*, nr 1/96 s. 64, nr 2/96 s. 77 i nr 3/96 s. 65

Aparatura

Element Peltiera w kształcie kwadratowej płytki przyklejony jest do bloku mosiężnego o masie kilku kg. Źródłem lub odbiornikiem ciepła jest aluminiowe naczynie. Jego dno jest przyklejone do elementu Peltiera przy użyciu smaru dobrze przewodzącego ciepło.

Pozostałe przyrządy to: zasilacz stabilizowany, amperomierz, woltomierz, układ żarówek, termometr do pomiaru temperatury, czajnik elektryczny.

Wykonanie ćwiczenia

A. Silnik cieplny.

1. Zestawić układ elektryczny wg rysunku 4.

2. Pomiar próbny.

a) Do zbiorniczka nalać wrzącej wody do około 3/4 objętości, założyć osłony styropianowe.

b) Podłączać różne liczby żarówek (od jednej do czterech). Zmierzyć generowane napięcie i prąd. Podczas pomiaru mieszać wodę w zbiorniku.

c) Sprawdzać, przez obliczenie iloczynu UI , dla jakiego obciążenia generowana moc była największa.

3. Pomiar sprawności silnika cieplnego.

a) Wylać ochłodzoną wodę i rozpocząć pomiar przy użyciu nowej wrzącej wody, dla obwodu obciążonego optymalną liczbą żarówek.

b) Mierzyć w równych odstępach czasu (np. co 2 minuty): temperaturę, napięcie i natężenie prądu, do osiągnięcia temperatury około 50°C. Mieszać wodę w czasie pomiaru.

c) Oszacować objętość nalanej wody ze zmierzonej głębokości i średnicy naczynia.

Opracowanie wyników

1. Wykonać wspólny wykres zależności od czasu: temperatury T oraz mocy elektrycznej UI .

2. Dla 2 skończonych zakresów temperatury, np. od 95° do 85° i od 65° do 55° obliczyć wartość uzyskanej energii elektrycznej. Wartość całki obliczyć metodą trapezów.

3. Obliczyć wartości średniej sprawności dla obydwu zakresów temperatur.

4. Porównać ze sprawnością silnika Carnota.

B. Chłodziarka i pompa cieplna.

1. Zestawić układ elektryczny wg schematu z rysunku 5. Działanie układu jako chłodziarki względnie pompy cieplnej zależy od kierunku przepływu prądu przez element Peltiera.

2. Nastawić na zasilaczu zadaną przez prowadzącego wartość prądu (1,5 ÷ 3 A).

3. Pomiar zależności od czasu: temperatury, napięcia i natężenia prowadzi jak w pkt A. Dla chłodziarki aż do uzyskania najniższej temperatury (względnie 0°C), dla pompy cieplnej do osiągnięcia temperatury około 40°.

Opracowanie wyników

Analogicznie jak dla silnika cieplnego: wykres i obliczenie średniej wydajności chłodzenia i grzania dla jednego przedziału temperatury o szerokości około 10° . Porównać wydajności chłodzenia i grzania: która z nich jest większa i dlaczego?