

OGNIWO PELTIERA W ZASTOSOWANIACH PRAKTYCZNYCH

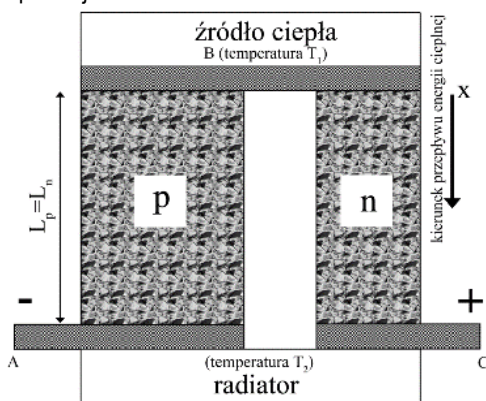
W artykule omówiono model matematyczny zjawisk fizycznych opisujących działanie elementu termoelektrycznego jakim jest ogniwo. W artykule przedstawiono praktyczne wykorzystanie ogniwa Peltiera w różnych gałęziach gospodarki takich jak: medycyna, transport czy elektronika. Wspomniany element termoelektryczny znajduje coraz większe zastosowanie w urządzeniach odpowiedzialnych za klimatyzowanie różnego rodzaju obiektów, czy też małych elementów. Może być zastosowany w pomiarach temperatury otoczenia czy urządzeń elektrycznych oraz posłużyć jako wymiennik ciepła. Możliwe to jest dzięki dwóm półprzewodnikom umieszczonym wewnątrz ogniwa, w których realizowany jest w tym samym czasie proces wymiany temperatury. Czyli zachodzi cykl przepompowania ciepła na zewnątrz, urządzenie zmniejsza temperaturę wewnątrz. Tryb ten realizowany jest z taką samą mocą, zatem temperatura wewnątrz ogniwa nie ulega zmianie. Kolejną zaletą modułu termoelektrycznego jest możliwość pochłaniania ciepła z otaczającego go środowiska. Uwzględniając powyższe informacje przypuszczać można, że w niedalekiej przyszłości ogniwo Peltiera znacząco poszerzy zakres wykorzystania w różnych gałęziach przemysłu, a kilka przykładów wykorzystania w praktyce zaprezentowano w niniejszym artykule.

WSTĘP

Zjawisko Peltiera polega na wymuszeniu przepływu energii cieplnej od złącza dwóch materiałów do otoczenia lub w przeciwnym kierunku pod wpływem przepływu przez złącze prądu elektrycznego. W wyniku pochłaniania energii w jednym złączu i wytwarzania energii w drugim pomiędzy złączami powstaje różnica temperatur. Zjawisko to można określić jako odwrotne do zjawiska Seebecka. Ponadto w modułach Peltiera występują zjawiska Joule'a oraz Thomsona, które polegają na wydzielaniu lub pochłanianiu ciepła podczas przepływu prądu elektrycznego w przewodniku, w którym występuje gradient temperatury. Ilość pochłoniętego lub wydzielonego ciepła zależy od różnicy temperatury, natężenia prądu i czasu jego przepływu. Wszystkie w/w zjawiska sprzężone są między sobą, a parametry je określające ilościowo powiązane są zależnościami określającą dobroć zastosowanego materiału: „Z” określanego jako (ang. *Figure of Merit*) i definiowaną jako:

$$Z = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\lambda} \left[\frac{1}{K} \right] \quad (1)$$

Zasada działania modułu Peltiera wyjaśniona została na przykładzie działania pojedynczego złącza p-n, którego schemat przedstawiono poniżej.



Rys. 1. Moduł Peltiera – pojedyncze złącze półprzewodnikowe

Samo zjawisko Peltiera polega na tym, że przy przepływie prądu elektrycznego przez złącza dwu materiałów obserwujemy wytwarzanie względnie pochłanianie ciepła, zwanego ciepłem Peltiera (rys. 1).

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). Zjawisko Peltiera zostało najpierw wykryte dla metali, ale efekt jest najsilniejszy dla półprzewodników. Dla półprzewodników łatwiej też jest podać mikroskopowe wytłumaczenie zjawiska. Rysunek 1 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 n, w którym spotykają się strumienie elektronów i dziur, następuje ich rekombinacja. Elektrony uzupełniają puste poziomy dziurowe, a uwolniona energia wydziela się w postaci ciepła. Odwrotny proces zachodzi w drugim złączu (p). Aby podtrzymać prąd elektronów i dziur następuje tam generacja par elektron-dziura kosztem dopływającego do złącza ciepła. Oczywisty jest powód zmiany kierunku strumienia ciepła przy zmianie kierunku prądu. [2]

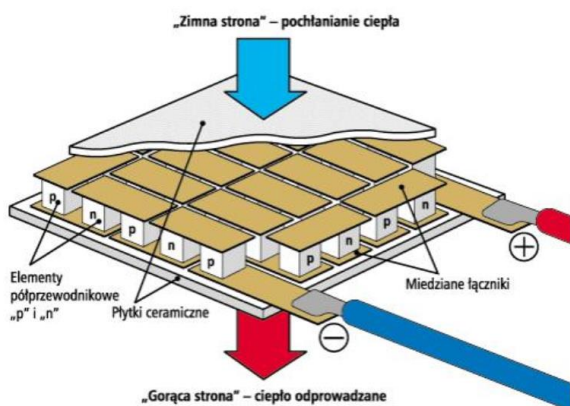
Pokazany na rysunku 1 układ ma własności prostujące: przy najmniej jedno ze złącz (konkretnie złącze B) spolaryzowane jest w kierunku zaporowym, zatem przez obwód popłynie co najwyżej znikomo mały prąd wsteczny. Prąd wsteczny jest rzeczywiście bardzo mały w półprzewodniku takim jak krzem, w którym szerokość przerwy energetycznej (1,1 eV) jest znacznie większa od 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 n i p mają różne temperatury może być generowany prąd. Aby prąd mógł popłynąć, w układzie dwu złącz powstanie musi napięcie termoelektryczne. [3]

1. BUDOWA OGNIWA PELTIERA

Moduł Peltiera (ogniwo Peltiera) (Rys. 2) składa się z dwóch płytek ceramicznych, tworzących dwie płaszczyzny, które zapewniają sztywność mechaniczną, są doskonałą izolacją elektryczną i dobrze przewodzą ciepło. Pomiedzy nimi znajdują się półprzewodniki (p i n)

w postaci „słupków” nazywanych gałęziami termoelementu, które połączone są ze sobą mostkami z miedzi. „Słupki” pod względem elektrycznym połączone są ze sobą szeregowo, a pod względem cieplnym równolegle. Taki moduł najczęściej zabezpieczany jest dodatkowo pastą uszczelniającą, niwelującą przedostawanie się wody do wnętrza układu.



Rys. 2. Budowa ogniwa Peltiera [2]

1.1. Zasada działania ogniwa Peltiera

Jeżeli obwód składa się z elementów o jednakowym typie przewodności, występujące w nich siły termoelektryczne posiadają przeciwne zwroty, natomiast przy różnych typach przewodności, siły te się sumują. Z uwagi na to termoelementy tworzy się z użyciem materiałów o różnych typach przewodnictwa: „p” i „n”. W strukturze półprzewodnika p brakuje elektronów aby w pełni „obsadzić” górny poziom energetyczny. Natomiast w półprzewodniku n występuje nadmiar elektronów. W momencie przepływu prądu (elektrony płyną od półprzewodnika typu p do n) elektrony stają się ładunkami nadmiarowymi, więc muszą zwiększyć swoją energię kosztem energii cieplnej z otoczenia. Ochłodzeniu ulega złącze, w którym elektrony przechodzą z przewodnika o niższym poziomie Fermiego do przewodnika o wyższym. Kiedy prąd płynie w odwrotnym kierunku elektrony spadają na niższy poziom energetyczny, co powoduje wydzielanie ciepła, wobec czego jedna ze stron modułu może działać jako chłodnica, a druga nagrzewnica. Po zmianie kierunku przepływu prądu na przeciwny, zjawisko ulega odwróceniu, a ilość odprowadzonego ciepła zależna jest od natężenia płynącego prądu.

2. ZASTOSOWANIA PRAKTYCZNE MODUŁÓW PELTIERA

Najczęściej spotykane praktyczne zastosowania modułów Peltiera pracujących w układach chłodzenia zawierają się w kilku obszarach ludzkiej działalności. Moduły nie wyparły tradycyjnych metod chłodzenia zastosowanych np. w lodówkach (sprężarki i czynnik chłodzący). Stanowią natomiast uzupełnienie w sprężeniu chłodniczym tam, gdzie istotne są takie czynniki jak: małe gabaryty, konieczność regulacji mocy chłodzącej, praca w przemyśle od pionu, brak elementów ruchomych, ograniczenie środków szkodliwych dla środowiska naturalnego (freon).

Moduły termoelektryczne znajdują szerokie zastosowanie w:

- Chłodzeniu nagrzewających się elementów elektronicznych, w tym m.in.
 - Procesorów i kart graficznych komputerów,
 - Chłodzeniu generatorów wysokiej mocy,
 - Chłodzeniu diod laserowych,
- Komorach do przechowywania win,
- Komorach klimatycznych,

- Przenośnych lodówkach i chłodziarkach,
- Przechowywaniu i transporcie tkanek oraz preparatów biologicznych,
- Termostatach do akwariów i terrariów,
- Innych procesach i urządzeniach wymagających precyzyjnej regulacji temperatury.

Zalety modułów Peltiera to:

- praca w szerokim zakresie mocy,
- duża elastyczność / sterowność pozwalająca w łatwy sposób na utrzymywanie stabilnej temperatury elementu chłodzonego,
- zasilanie niskim napięciem (możliwość zasilania nawet od 1V DC).

Najczęstsze zastosowania modułów Peltiera to:

- chłodziarki na statkach (odporność na przechył i wstrząsy),
- układy regulacji temperatury szczególnie do zastosowań naukowych i optoelektronicznych,
- chłodziarki do zastosowań medycznych (utrzymanie stałej temperatury),
- układy chłodzenia pojazdów (prototypowo - pojedyncze egzemplarze), a także jako układy wspomagające klimatyzację.

3. MODEL MATEMATYCZNY OPISUJĄCY EFEKT PELTIER'A

Zapis matematyczny odzwierciedlający zasadę działania elementu elektronicznego opierającego się na zjawisku Peltier'a zdefiniować można za pomocą współczynnika wydajności wydzielonej zmiany temperatury półprzewodnika (φ), który uzależniony jest od szybkości wydalanego ciepła (Q_c). Wskutek zajścia tego zjawiska uzyskano różnicę przyrostu temperatury na elemencie elektronicznym.

Współczynnik wydajności elementu półprzewodnikowego opierającego się na zjawisku Peltier'a opisano zależnością:

$$\varphi = \frac{Q_c}{P} Z = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\lambda} \left[\frac{1}{K} \right] \quad (2)$$

gdzie przez Q_c oznaczono szybkość przepływu ciepła ze strony zimnej, P moc elektryczna. Z zależności powyższej określić można „efekt chłodzenia” oraz „zjawisko cieplne”. Wielkości te zależne są od:

- Mocy ciepła znajdującej po każdej stronie półprzewodnika,
- Wartości prądu przepływającego przez element elektroniczny,
- Szybkości zmiany temperatury po każdej stronie półprzewodnika.

Straty ciepła w zjawisku Peltiera definiuje równanie:

$$Q_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T \quad (3)$$

gdzie $\alpha = \alpha_p + \alpha_n$, przy czym wielkości α_p oraz α_n są parametrami charakteryzującymi półprzewodniki odpowiednio typu p i n, I- prąd płynący w obwodzie, R – rezystancja elementu. Z kolei przez K oznaczono całkowitą przewodność cieplną w module chłodzenia. Stąd całkowitą moc P na wyjściu modułu opisano zależnością:

$$P = UI = \alpha I \Delta T + I^2 R = \frac{U(U - \alpha \Delta T)}{R} \quad (4)$$

gdzie przez ΔT zdefiniowano różnicę temperatury na poszczególnych biegunach elementu półprzewodnikowego (odpowiednio gorącym i zimnym), U – napięcie w obwodzie, wyrażone jako:

$$U = \alpha \Delta T + IR \quad (5)$$

Współczynnik wydajności energii cieplnej przez półprzewodnik w zależności od jego geometrii, wynosi:

$$\varphi = \frac{\left[mT_c - \frac{1}{2}m^2 - \left(\frac{\Delta T}{Z} \right) \right]}{(m\Delta T + m^2)} \quad (6)$$

gdzie przez parametr Z zdefiniowano geometrię półprzewodnika o określonej przepływności uzależnioną od składu materiału z którego go wykonano: Matematyczny zapis przedstawia się następująco:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\left[(\rho_n K_n)^{\frac{1}{2}} + (\rho_p K_p)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \quad (7)$$

gdzie $m = \frac{IR}{\alpha}$

Prąd, który służy do optymalizacji współczynnika wydajności uzyskuje się poprzez wyznaczenie pochodnej współczynnika przy założeniu, że $m=0$. Stąd:

$$I_{opt} = \frac{\alpha \Delta T}{R(\omega - 1)} \quad (8)$$

gdzie

$$\omega = (1 + ZT)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Wykorzystując powyższą zależność wyznaczono wartość maksymalną współczynnika wydajności półprzewodnika:

$$\varphi_{max} = \frac{T_c}{\Delta T} \left[\frac{\omega - \left(\frac{T_h}{T_c} \right)}{(\omega + 1)} \right] \quad (10)$$

Współczynnik wydajności można dowolnie dobierać, wykorzystując w tym celu napięcie w obwodzie elektrycznym modułu:

$$U_{opt} = \frac{\alpha \Delta T \omega}{(\omega - 1)} \quad (11)$$

Uwzględniając równanie (10), otrzymano zależność na moc na wyjściu modułu:

$$P_{opt} = \left(\frac{\omega}{R} \right) \left[\frac{\alpha \Delta T}{(\omega - 1)} \right]^2 \quad (12)$$

Z kolei prąd, który odpowiedzialny jest za regulację widzialnego ciepła wynosi:

$$I_{opt} = \frac{\alpha T_c}{R} \quad (13)$$

Tak więc, maksymalna szybkość widzialnego przez element półprzewodnikowy w zależności od płynącego prądu w obwodzie obliczana jest z równania:

$$Q_c = \left(\frac{\alpha T_c^2}{2R} \right) - K \Delta T \quad (14)$$

4. SYMULACJE

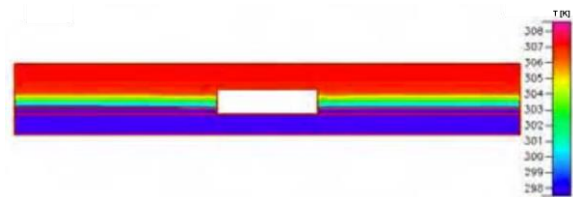
Pierwszym krokiem jaki wykonano nim przystąpiono do przeprowadzenia symulacji komputerowych było zdefiniowanie właściwości materiałowych elementów półprzewodnikowych typu n i p, przedstawionych w tabeli 1. Przeprowadzone symulacje odnoszą się będą do

oceny zmienności temperatury w ogniwie Peltiera w trakcie jego używalności (pracy). Stąd określono pole powierzchni przekroju półprzewodnika (S) i jego długość (L), która zawarta była w granicach $10 \mu\text{m}^2$ a $1 \mu\text{m}^2$. Badania przeprowadzone zostały dla kilku różnych materiałów takich jak: tellurek bizmutu Bi_2Te_3 , aluminium Al , strukturę krystaliczną Sb_2Te_3 , oraz węgiel krzemu SiC .

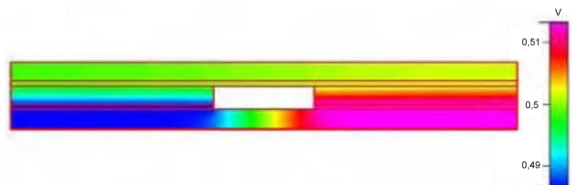
Wszystkie przeprowadzone symulacje były wykonane przy stałej wartości prądu elektrycznego przy obu stanach pracy ogniwa Peltiera (stan gorący i zimny). Na tak przyjęte warunki złożył się fakt, że przyjęte założenia przewidziane są przez producentów modułów. Szereg wykonanych symulacji przeprowadzono dla różnych zmian temperatur między końcem gorącym, a zimnym półprzewodnika i zwarte były w zakresie między 1 [K] do 10 [K]. Napięcie zasilające ogniwo Peltiera ustawiono na 38,5 [mV]. Jak można było zauważyć temperatura w segmencie półprzewodnika na końcu gorącym ukształtowała maksymalną wartość 40 [K] przy prądzie w module wynoszącym odpowiedni 0,1 [A].

Tab. 1 Własności materiałowe półprzewodników

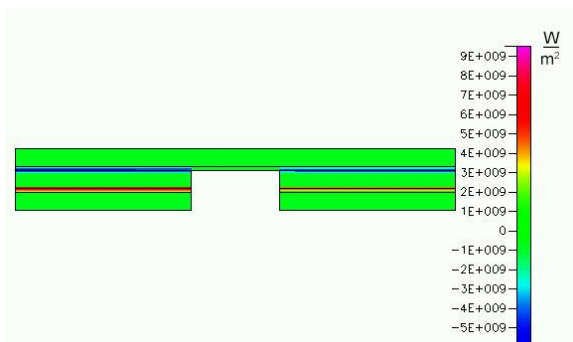
Własności materiału	Bi_2Te_3	Sb_2Te_3	Al	SiC
Gęstość materiału [kg/m ³]	7700	6500	2700	3210
Ciepło właściwe [J/kg·K]	155	210	900	750
Przewodność termiczna [W/m·K]	1	1	240	120
Rezystancja [Ωm]	1×10^{-5}	1×10^{-5}	5×10^{-9}	1×10^4
Współczynnik Seebecka [$\mu\text{V/K}$]	-230	180	3,5	-10



Rys. 3. Rozkład temperatury w ogniwie Peltiera

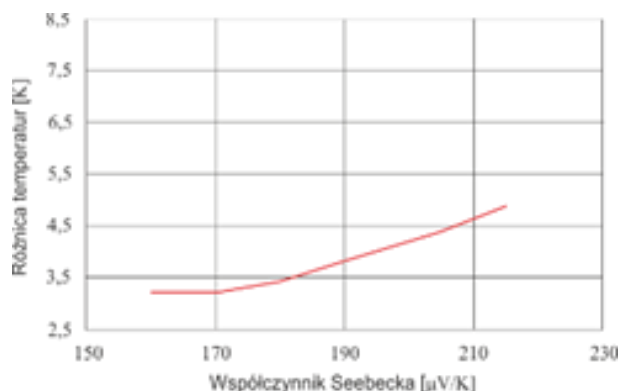


Rys. 4. Natężenie pola elektromagnetycznego w ogniwie Peltiera



Rys. 5. Przepływ strumienia ciepła w ogniwie Peltiera

W celu lepszego zaobserwowania efektu Peltiera przeprowadzono serię symulacji komputerowych dla różnych wartości współczynnika Seebecka, który zmieniany był w przedziale -140 do -250 [$\mu\text{V/K}$]. Na poniżej zaprezentowanych rysunkach przedstawiono zmiany temperatury dla różnych wartości współczynnika Seebecka. Jak można zauważyć przy wartości 180 [$\mu\text{V/K}$] zaobserwować można dopiero wzrost różnicy temperatur.



Rys. 6. Wpływ współczynnika Seebecka na różnice temperatur w ogniwie Peltiera

PODSUMOWANIE

Podsumowując, urządzenia chłodnicze wykorzystujące układy termoelektryczne w porównaniu do tradycyjnych urządzeń sprężarkowych wykazują przewagę pod kilkoma względami. Urządzenia sprężarkowe zawierają czynnik chłodzący, który jest szkodliwy dla środowiska. W urządzeniach termoelektrycznych nie występuje żadne chłodziwo. W dodatku praca urządzeń termoelektrycznych jest cicha, a w przypadku sprężarkowych generowany jest dość duży hałas spowodowany pracą silnika sprężarki.

Ponadto, silnik sprężarki włączając i wyłączając się powoduje skokową regulację temperatury, której wahania zawierają się w szerokim paśmie tolerancji. W urządzeniach termoelektrycznych występuje bardzo płynna regulacja, a także dzięki bardzo wąskiej tolerancji wahań temperatury – wysoka precyzja. Dzięki niewielkim rozmiarom modułów termoelektrycznych, możliwe jest uzyskanie urządzeń o 3 razy mniejszej masie i o 50% mniejszych rozmiarach. Niestety wydajność tych urządzeń osiąga wartości rzędu 30% wydajności urządzeń sprężarkowych, podczas gdy zapotrzebowanie mocy jest większe. Koszty eksploatacyjne obu typów urządzeń są zbliżone, podobnie jak koszty produkcyjne, jednak jedynie w przypadku masowej produkcji urządzeń termoelektrycznych.

BIBLIOGRAFIA

1. S. Kandasamy S., Kalantar-zadeh K., Rosengarten G., Włodarski W., „Modelling of a Thin Film Thermoelectric Micro-Peltier Module”

2. D. M. Rowe, “CRC Book on Thermoelectrics” CRC Press, 1995.
3. J. Esarte, G. Min, D. M. Rowe, “Modelling Heat Exchangers for Thermoelectric Generators” Journal of Power Sources, 93, 2001.
4. Goldsmid J., „Introduction to Thermoelectricity”, Springer, 2009
5. Lee S., “Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells”, Wiley, 2010
6. Nolas, Sharp & Goldsmid, „Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments”, Springer, 2001
7. Rowe D. M. “Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano”, CRC Press, 2005
8. Steinberg D., „Cooling Techniques For Electronic Equipment”, Wiley, 1991

Practical usage of Peltier module

This article presents the practical usage of a Peltier module in the various industries such as medicine, transportation and electronics. This thermoelectric element could be more and more found in the devices which are responsible for the air conditioning of all kinds of objects or small items. It can be used to measure the ambient temperature, electrical equipment and it can also be used as a heat exchanger. This is possible due to two semiconductors which are embedded in the cell where the temperature process exchange takes place at the same time. In short, the cycle of heat pumping out of the device lowers the temperature inside. This mode is executed with the same power so the temperature inside the cell does not change. Another advantage of the thermoelectric module is the ability to absorb the heat from the surrounding environment. Taking the above into account it can be expected that in the near future Peltier modules may significantly broaden the scope of the usage in the various industries and only a few practical examples are presented in this article.

Autorzy:

dr hab. inż. **Roman Pniewski, prof. nadzw.** – Uniwersytet Technologiczno – Humanistyczny w Radomiu. Wydział Transportu i Elektrotechniki.

dr inż. **Rafał Kowalik** – Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Wydział Lotnictwa, Katedra Awioniki i Systemów Sterowania

mgr inż. **Emil Sadowski** – Uniwersytet Technologiczno – Humanistyczny w Radomiu. Wydział Transportu i Elektrotechniki.