

EFFECTUL SEEBECK

1. Scopul lucrării

Etalonarea unui termocuplu, determinarea coeficientului Seebeck.

2. Teoria lucrării

Efectele termoelectrice, care apar în conductoarele străbătute de curent electric în prezența unui gradient de temperatură, sunt rezultatul interdependenței între curentul electric și curentul caloric. Există trei efecte termoelectrice: efectul Seebeck, efectul Thomson și efectul Peltier (pentru ultimele două vezi Anexa 1 - Tipuri de efecte termoelectrice).

Efectul Seebeck constă în apariția unei tensiuni termoelectrice (Seebeck) în conductoare de natură diferită, ale căror suduri se găsesc la temperaturi diferite. Tensiunea Seebeck depinde de natura conductoarelor și de gradientul de temperatură.

Fluxurile de căldură (\vec{J}_q) și de sarcină electrică (\vec{J}_e) ce pot apărea într-un sistem termodinamic sunt interdependente, fiecare fiind funcție liniară de forțele termodinamice (vezi Anexa 2- Principiile termodinamicii proceselor ireversibile) determinate de gradientii de temperatură (∇T) și de potențial electric ($\nabla V = -\vec{E}$) din sistem:

$$\vec{J}_q = L_{11}\nabla\left(\frac{1}{T}\right) + L_{12}\frac{\vec{E}}{T} \quad (1)$$

$$\vec{J}_e = L_{21}\nabla\left(\frac{1}{T}\right) + L_{22}\frac{\vec{E}}{T} \quad (2)$$

unde L_{ij} (cu $i, j = 1, 2$) sunt coeficienți fenomenologici și, conform principiului de reciprocitate Onsager, $L_{12} = L_{21}$. De asemenea, s-a admis existența forțelor termodinamice

$$\vec{X}_q = \nabla\left(\frac{1}{T}\right) \text{ și } \vec{X}_e = \frac{\vec{E}}{T} \quad (3)$$

Considerăm acum cazul unui sistem termodinamic alcătuit din două conductoare A și B, ale căror suduri se găsesc la temperaturile T_1 și T_2 , cu $T_1 < T_2$ (Fig. 1). Dacă fluxul de sarcină electrică este nul ($\vec{J}_e = 0$) ecuația (3) devine:

$$\vec{E} = \frac{L_{21}}{L_{22}T} \nabla T = \alpha_T \nabla T \quad (4)$$

unde $\alpha_T = \frac{L_{21}}{L_{22}T}$ este coeficientul termoelectric (Seebeck) absolut. Cum $\vec{E} = -\nabla V$, din ecuația (4) rezultă:

$$\nabla V = -\alpha_T \nabla T \quad (5)$$

și integrând această ecuație de-a lungul circuitului obținem tensiunea la borne (tensiunea Seebeck):

$$U_{AB} = \int_{T_1}^{T_2} (\alpha_{TA} - \alpha_{TB}) dT = (\alpha_{TA} - \alpha_{TB})(T_2 - T_1) = \alpha_{AB}(T_2 - T_1) \quad (6)$$

unde α_{TA} și α_{TB} sunt coeficienții termoelectrice absoluți ai celor două conductoare,

presupuși constanți, iar α_{AB} este **coeficientul Seebeck** ce depinde de natura conductoarelor (vezi Anexa 3 - Teoria cuantică a efectului Seebeck). Această tensiune poate fi măsurată cu un milivoltmetru V conectat ca în schema experimentală din figura 1.

În cazul metalelor simple, la temperatura camerei, coeficientului Seebeck absolut α_T este de câțiva $\mu\text{V/K}$, astfel încât la o diferență de temperatură între suduri $\Delta T = T_2 - T_1 = 100\text{K}$ se obține o tensiune termoelectrică de ordinul mV. De asemenea, în cazul metalelor, coeficientul Seebeck este slab dependent de temperatură și este puțin influențat de impurități, spre deosebire de cazul semiconductorilor care, în schimb, prezintă o sensibilitate termoelectrică mult mai mare.

Câteva valori ale coeficientului Seebeck pentru metale și semiconductori sunt indicate în tabelul 1 (vezi Anexa 4 - Tabele cu valori ale coeficientului Seebeck și ale tensiunii Seebeck).

Efectul Seebeck are aplicații la confecționarea termocuplelor, dispozitive care sunt folosite la măsurarea temperaturilor. Materialele din care sunt confecționate termocuplele se aleg în funcție de intervalul de temperatura, de precizia necesară, de cost, durata de viață etc. Aceste materiale sunt metale pure sau aliaje și dau denumirea termocuplului respectiv: platină rhodiu-platină, nichel crom-nichel, fier-constantan, cupru constantan, cromel-alumel, cromel-copel etc (vezi tabelul 2 din Anexa 4 - Tabele cu valori ale coeficientului Seebeck și ale tensiunii Seebeck).

Termocuplele realizate din semiconductori se utilizează numai în anumite domenii de temperatură și, de asemenea, pot fi folosite pentru construcția așa numitelor termoelemente, dispozitive care transformă energia termică în energie electrică prin efect Seebeck.

Dacă temperatura sudurii reci este menținută constantă (de obicei prin introducerea ei într-un amestec de apă cu gheață, astfel încât $T_1 = 273\text{K}$), tensiunea Seebeck va fi funcție numai de temperatura sudurii calde T_2 :

$$U_{AB} = U_{AB}(T_2) \quad (7)$$

Dacă în aceste condiții se măsoară experimental valorile tensiunii Seebeck U_{AB} la diferite temperaturi ale sudurii calde T_2 și se reprezintă grafic dependența într-un sistem coordonate $(U_{AB}, \Delta T)$, se obține o curbă numită **curba de etalonare** a termocuplului.

3. Dispozitivul experimental

Dispozitivul experimental (Fig. 2) este format dintr-un cuptor A a cărei temperatură poate fi variată și două termocuple, dintre care unul "etalon", de fier-constantan și altul necunoscut. Termocuplul etalon servește la determinarea temperaturii T_2 a cuptorului A, fiind legat la milivoltmetrul B care este gradat direct în $^{\circ}\text{C}$. Milivoltmetrul B indică diferența de temperatură ΔT dintre cuptor și sudura rece.

Termocuplul necunoscut, care urmează să fie etalonat, este conectat la milivoltmetrul C. Termocuplele sunt izolate și introduse în aceeași teacă de material ceramic pentru ca temperaturile sudurilor calde ale celor două termocuple să fie identice.

Trebuie menționat că, în această variantă, temperatura sudurii reci a fiecărui

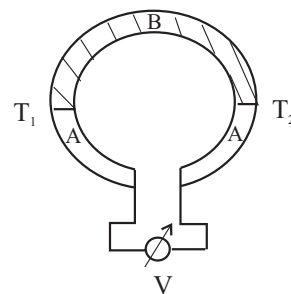


Fig. 1 - Schema experimentală pentru studiul efectului Seebeck

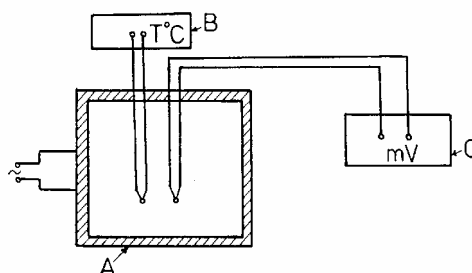


Fig. 2 - Dispozitivul experimental

termocuplu este egală cu temperatura camerei. Aceasta poate varia de la un experiment la altul sau chiar în timpul efectuării unui experiment, metoda nefiind așadar foarte precisă. O variantă îmbunătățită a acestu termocuplu folosește pentru sudura rece un amestec de apă cu gheață, a cărei temperatură de 0 °C rămâne constantă pe durata efectuării măsurărilor.

Cuptorul are inerție termică mare astfel încât, deși nu este alimentat printr-un reostat sau autotransformator ci direct de la rețea, creșterea temperaturii este foarte lentă.

4. Modul de lucru

Se alimentează cuptorul electric de la rețeaua de 220 V. Începând de la indicația de pe scara milivoltmetrului B corespunzătoare unei diferențe de temperatură dintre cuptor și mediul ambiant $\Delta t = 20^\circ\text{C}$, la fiecare variație a temperaturii cuptorului A cu $\Delta t = 5^\circ\text{C}$ se notează tensiunea termoelectrică U_{AB} de pe milivoltmetrul C, care este fixat pe o scară convenabilă (15 mV sau 30 mV).

În momentul în care diferența de temperatură atinge valoarea $\Delta t = 300^\circ\text{C}$ se întrerupe alimentarea cuptorului și se fac în continuare măsurări ale tensiunii termoelectrice la răcire, în aceeași mod ca la încălzire, până la atingerea valorii de $\Delta t = 100^\circ\text{C}$.

Datele obținute se trec într-un tabel de forma:

Δt (°C) ΔT (K)	La încălzire		La răcire	
	U_{AB} (div)	U_{AB} (mV)	U_{AB} (div)	U_{AB} (mV)
20				
30				
40				
.....				

5. Prelucarea datelor experimentale

Se vor trasa pe hârtie milimetrică, în același sistem de coordonate, graficele $U_{AB} = U_{AB}(\Delta T)$ corespunzătoare proceselor de încălzire și de răcire.

Se determină pantele m_1 și m_2 ale celor două drepte, acestea reprezentând valorile corespunzătoare ale coeficienților Seebeck, α_{AB1} și α_{AB2} .

Se calculează valoarea medie a coeficientului Seebeck:

$$\langle \alpha_{AB} \rangle = \frac{\alpha_{AB1} + \alpha_{AB2}}{2}.$$

6. Întrebări

1. Cum poate fi determinată temperatura reală a cuptorului având la dispoziție curba de etalonare trasată ?

2. În ce condiții este avantajoasă utilizarea semiconductorilor pentru construcția termocuplelor ?

3. Cum poate fi explicată sensibilitatea termoelectrică mult mai mare a semiconductorilor față de cea a metalelor ?

4. Evidențiați asemănările și diferențele dintre caracteristicile efectelor Seebeck și Peltier.

7. ANEXE

ANEXA 1 - Tipuri de efecte termoelectrice

Efectul Thomson: într-un conductor în care există un gradient de temperatură și este străbătut de un curent electric, se degajă sau se absoarbe căldură în funcție de sensul curentului electric. Căldura degajată sau absorbită în unitatea de timp (căldura Thomson) este proporțională cu intensitatea curentului I și cu gradientul de temperatură ∇T :

$$\frac{dQ}{dt} = \mu_T I |\nabla T| \quad (A1)$$

unde μ_T este coeficientul Thomson.

Efectul Peltier: sudura a două conductoare diferite A și B, de natură diferită, se încălzește sau se răcește în funcție de sensul curentului electric și de natura conductoarelor. Căldura degajată sau absorbită în unitatea de timp (căldura Peltier) este proporțională cu intensitatea curentului:

$$\frac{dQ}{dt} = \Pi_{AB} I \quad (A2)$$

unde Π_{AB} este coeficientul Peltier, care depinde de natura conductoarelor A și B.

ANEXA 2 - Principiile termodinamicii proceselor ireversibile

Principiile termodinamicii proceselor ireversibile sunt:

1. Principiul liniarității: fluxurile termodinamice (de căldură, masă, sarcină electrică) sunt funcții liniare de forțele termodinamice (gradienți de temperatură, concentrație, potențial):

$$\vec{J}_i = \sum_k L_{ik} \vec{X}_k \quad (A3)$$

unde L_{ik} se numesc coeficienți fenomenologici. Ecuțiile de tipul (1) se numesc **ecuații fenomenologice**.

2. Principiul de reciprocitate Onsager postulează simetria elementelor matricei L prin relația:

$$L_{ik} = L_{ki} \quad (A4)$$

Fenomenele simple care pot apărea în cazul conductoarelor străbătute/nestrăbătute de curent electric în prezența/absența unui gradient de temperatură sunt:

A. În prezența unui gradient de potențial electric și în absența unui gradient de temperatură se obține **conductibilitatea electrică pură**. Din ecuația (3) rezultă

$$\vec{J}_e = L_{22} \frac{\vec{E}}{T} = \sigma \vec{E} \quad (A5)$$

unde $\sigma = L_{22}/T$ reprezintă conductivitatea electrică. Regăsim astfel *legea lui Ohm*.

B. În prezența unui gradient de potențial și a unui gradient de temperatură, fluxul de sarcină electrică (densitatea de curent electric) este, ținând cont de ecuația (2),

$$\vec{J}_e = \sigma \left(\vec{E} - \frac{L_{21}}{L_{22}T} \nabla T \right) \quad (A6)$$

C. În absența unui curent electric ($\vec{J}_e = 0$), se obține conductibilitatea termică pură. Din ec. (2), impunând această condiție, rezultă

$$\frac{\vec{E}}{T} = -\frac{L_{21}}{L_{22}} \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \quad (\text{A7})$$

Substituind (A7) în ecuația (1) se obține, ținând cont și de condiția (A4).

$$\vec{J}_q = \left(L_{11} - \frac{L_{21}L_{12}}{L_{22}} \right) \nabla \left(\frac{1}{T} \right) = -\frac{L_{22}L_{11} - L_{12}^2}{L_{22}T^2} \nabla T = -k \nabla T \quad (\text{A8})$$

unde $k = \frac{L_{22}L_{11} - L_{12}^2}{L_{22}T^2}$ reprezintă conductivitatea termică. Ecuația (A8) reprezintă *legea lui Fourier*.

ANEXA 3 - Teoria cuantică a efectului Seebeck

Fizica statistică cuantică și teoria cuantică a solidului au arătat că electronii de valență dintr-un solid (în particular metal) pot fi asimilați unor particule ce se află într-o groapă de potențial, energia lor putând avea doar valori discrete foarte apropiate, nivelul de energie maximă la 0 K fiind nivelul Fermi.

Pentru ca electronii să fie scoși din metal în vid, acestora trebuie să li se comunice o energie de extracție W_e , cea mai mică valoare a acesteia corespunzând electronilor ce au energia în apropierea nivelului Fermi (Fig. A1).



Fig. A1

Dacă adâncimea gropii de potențial a metalului este W , atunci

$$W_e = W - E_F \quad (\text{A9})$$

Energia de extracție depinde de natura metalului, slab de temperatură și foarte puternic de starea suprafeței metalului.

Considerăm două metale diferite, A și B, care au valori diferite ale energiilor de extracție (și ale nivelelor Fermi). Când cele două metale sunt puse în contact, au loc procese tranzitorii, care constau într-un schimb reciproc de purtători, până la obținerea stării de echilibru.

Se poate arăta că starea de echilibru este atinsă când nivelele Fermi în zona jonctiunii se egalează.

Dacă $W_{eA} > W_{eB}$, ($E_{FA} < E_{FB}$), numărul de electroni care trec din B în A va fi mai mare decât numărul de electroni care trec din A în B; metalul B va sărăci în purtători (electroni), încarcându-se pozitiv (și nivelul său Fermi va coborî) iar metalul A se va îmbogăți în electroni, încarcându-se negativ (și nivelul său Fermi va urca). La egalizarea nivelelor Fermi, schimbul de electroni încetează, diferența de potențial care apare opunându-se trecerii în continuare a electronilor.

Dacă cele două metale au concentrații diferite de electroni, se poate arăta că diferențele de potențial de contact ce apar la sudurile celor două metale, aflate la temperaturile T_1 și T_2 , cu $T_1 < T_2$, vor fi

$$\Delta U_1 = \frac{W_{eB} - W_{eA}}{e} + \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} \quad (\text{A10})$$

$$\Delta U_2 = \frac{W_{eA} - W_{eB}}{e} + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_B}{n_A} \quad (\text{A11})$$

Tensiunea electromotoare în circuit (presupunând ca W_{eA}, W_{eB} și concentrațiile purtătorilor de sarcină din cele două metale n_A, n_B depind slab de temperatură) este:

$$U_{AB} = \Delta U_1 + \Delta U_2 = \frac{k}{e} (T_2 - T_1) \ln \frac{n_B}{n_A} \quad (\text{A12})$$

sau

$$U_{AB} = \alpha_{AB} (T_2 - T_1) \quad (\text{A13})$$

unde

$$\alpha_{AB} = \frac{k}{e} \ln \frac{n_B}{n_A} \quad (\text{A14})$$

este coeficientul Seebeck.

ANEXA 4 - Tabele cu valori ale coeficientului Seebeck și ale tensiunii Seebeck

Tabelul 1 indică câteva valori ale coeficientului Seebeck absolut la temperatura camerei (și la temperatura de 700°C pentru ultimele trei materiale) pentru metale și semiconductori. Valorile pozitive ale coeficientului Seebeck corespund materialelor cu purtători de sarcină negativă (electroni), iar valorile negative corespund materialelor cu purtători de sarcină pozitivă (goluri).

Tabelul 1

Materialul	Al	Cu	Ag	W	(Bi,Sb) ₂ Te ₃	Bi ₂ (Te,Se) ₃	ZnSb	InSb	Ge	TiO ₂
α_T ($\mu\text{V/K}$)	-0,2	3,98	3,68	5,0	195	-210	220	-130	-210	-200

Tabelul 2 indică câteva tipuri de termocuple mai des utilizate în practică și caracteristicile lor.

Tabelul 2

Termocuplul	Polaritatea	Temperatura limită de utilizare (°C)			Tensiunea Seebeck maximă (mV)
		minimă	maximă		
			continuu	intermitent	
Fier-Constantan	Fe(+) Const(-)	-200	600	760	42,9
Cupru-Constantan	Cu(+) Const(-)	-270	400	400	20,9
Cromel-Constantan	Cromel(+) Const(-)	-270	600	1000	76,4
Cromel-Alumel (NiCr-Ni)	Cromel(+) Alumel(-)	-270	1000	1370	54,8
PtRh(10%)- Pt	PtRh(10)(+) Pt(-)	0	1400	1760	18,6
PtRh(13%)- Pt	PtRh(13)(+) Pt(-)	0	1400	1760	21,0
PtRh(30%)-PtRh(6%)	PtRh(30)(+)PtRh(6)(-)	0	1700	1820	13,8