

# SEEBECKOV EFEKT

Termoelektrični efekt, Seebeckov koeficijent, Peltierov koeficijent, Thomsonov koeficijent, Thomsonova jednadžba

## UVOD

Ako su dva spoja dva različita materijala na različitim temperaturama, između njih se javlja razlika električnog potencijala, a sam efekt se zove termoelektrični efekt. Taj napon (često se zove i termonapon) je obično proporcionalan razlici temperatura dva spoja, a koeficijent proporcionalnosti se naziva Seebeckov koeficijent i karakteristika je danog para materijala. Učinkovitost takve pretvorbe toplinske energije u električnu je mala.

## TEORIJSKI DIO

Termoelektrični efekt koji se manifestira kao električna struja u zatvorenoj petlji sastavljenoj od dva različita materijala čija se spojišta nalaze na različitim temperaturama ( $T_1$  i  $T_2$ ) naziva se Seebeckovim efektom. Na krajevima takve otvorene petlje javlja se razlika potencijala, koja se često naziva i termoelektromotornom silom (TEMF). Do nje dolazi uslijed termodifuzije nosioca naboja. Naime, uz postojanje temperaturnog gradijenta unutar petlje, nosioci naboja u toplijem dijelu imaju veće brzine od onih u hladnijem dijelu, te dolazi do difuzije: struja je jača u smjeru od toplijeg ka hladnijem spojištu. U kristalima srednja brzina elektrona iščezava, pa usmjerenog gibanja nema, ako nema neke vanjske razlike potencijala. Termodifuzija uzrokuje gomilanje naboja na krajevima svakog materijala, pa se u uzorku javlja električno polje koje je usmjereno tako da u ravnotežnom stanju zaustavlja daljnju difuziju nosioca naboja, a što rezultira TEMF. Seebeck je pokazao da je TEMF za male temperaturne razlike proporcionalan toj razlici:

$$\Delta U_0 = \alpha \Delta T = \alpha (T_{toplo} - T_{hladno}) \quad U_0 = \int \alpha dT, \quad (1)$$

gdje je  $\alpha$  relativni diferencijalni Seebeckov koeficijent (RDSC). On ovisi o kombinaciji materijala u termočlanku, i o temperaturi.

Ako su oba spojišta na istoj temperaturi, skokovi potencijala na spojištima (Za pretpostaviti je da skokovi potencijala postoje jer su Fermijeve energije u različitim materijalima različite. Gustoća nosioca naboja u različitim materijalima je različita.) su jednakog iznosa a suprotnog smjera, pa je ukupna inducirana elektromotorna sila u takvoj petlji jednaka nuli. Uvođenjem temperaturne razlike među spojištima ruši se simetrija u skokovima potencijala na spojištima; skok potencijala je veći na toplijem spojištu, pa postoji konačna efektivna inducirana elektromotorna sila, tzv. termoelektromotorna sila.

U zatvorenoj petlji koja se sastoji od samo jedne vrste materijala Seebeckov efekt se ne može odrediti, budući da nema resultantne struje, i termoelektrični napon iščezava. To je posljedica konzervativnosti, tj. činjenice da se električno polje može izraziti gradijentom neke skalarne funkcije:

$$\vec{E} = -\nabla U. \quad (2)$$

Tražimo li gradijent od TEMF, rezultat je:

$$\nabla U = \alpha_1(T) \nabla T = -\vec{E}_T, \quad (3)$$

gdje je  $\vec{E}_T$  električno polje izazvano tim TEMF. Stoga, TEMF iščezava duž zatvorene petlje načinjene od samo jednog materijala:

$$U = -\oint \vec{E}_T \cdot d\vec{s} = 0. \quad (4)$$

U slučaju da je petlja sastavljena od dva materijala, TEMF se može pisati kao:

$$U = -\int_1 \vec{E}_T \cdot d\vec{s} - \int_2 \vec{E}_T \cdot d\vec{s}. \quad (5)$$

Uvrštavanjem (3) u (5) dobiva se:

$$U = \int_1 \alpha_1(T) \nabla T \cdot d\vec{s} + \int_2 \alpha_2(T) \nabla T \cdot d\vec{s} = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_1(T) dT + \int_{T_2}^{T_1} \alpha_2(T) dT = \int_{T_1}^{T_2} (\alpha_1 - \alpha_2) dT = \int_{T_1}^{T_2} \alpha dT, \quad (6)$$

gdje je  $\alpha$  iz posljednje jednakosti ista veličina kao u (1). Iz (6) se vidi da je TEMF konačna za  $\alpha_1 \neq \alpha_2$ . No, Seebeckovog efekta opet neće biti ako nema temperaturne razlike među spojištima. Iz (6) je također vidljivo da TEMF ovisi samo o razlici temperatura spojišta, ne i o temperaturnoj distribuciji duž petlje.

U zatvorenoj petlji od dva materijala Seebeckov koeficijent nema apsolutnu vrijednost za pojedini od dva materijala, nego je njegov iznos karakteriziran svakim parom materijala posebno; naravno, ako je termonapon  $V_0$  proporcionalan razlici temperatura  $\Delta T$  toplog i hladnog spojišta,

$$V_0 = \alpha \Delta T, \quad (1)$$

što općenito ne mora biti ispunjeno. U teorijskim razmatranjima<sup>1</sup> može se dobiti izraz za apsolutnu vrijednost Seebeckovog koeficijenta  $\alpha$  nekog materijala u obliku Pisarenkove formule:

$$\alpha = -\frac{k}{e} \left[ -\frac{\xi}{kT} + \frac{1}{kT} \frac{\int_0^\infty E^{5/2} f' dE}{\int_0^\infty E^{3/2} f' dE} \right], \quad (2)$$

pri čemu je  $k$  Boltzmannova,  $T$  temperatura,  $e$  naboj elektrona,  $\xi$  veličina kojom se određuje položaj Fermijevog nivoa,  $\tau$  vrijeme relaksacije,  $E$  energija i  $f'$  derivacija funkcije raspodjele po energiji. U slučaju nedegeneriranih poluvodiča, kod kojih se Fermijev nivo nalazi barem  $kT$  ispod dna vodljive vrpce, kao funkcija raspodjele se može uporabiti Boltzmannova raspodjela  $f \sim \exp(-E/kT)$ , eksponentna ovisnost vremena relaksacije  $\tau \sim E^r$ ,  $\xi = E_F - E_C$ .  $E_F$  je položaj Fermijevog nivoa, a  $E_C$  položaj dna vodljive vrpce. Te dvije energije u n-tipu poluvodiča su povezane izrazom (3):

$$E_F = E_C - kT \ln \frac{N_C}{n}, \quad (3)$$

pri čemu je  $n$  koncentracija elektrona, a  $N_C$  efektivna gustoća stanja u zoni vodljivosti. Kada se sve navedeno uvrsti u Pisarenkovu formulu (2) i provede integracija, dobiva se:

$$\alpha = -\frac{k}{e} \left( r + \frac{5}{2} + \ln \frac{N_C}{n} \right). \quad (4)$$

Za p-tip poluvodiča vrijedi analogan izraz:

$$\alpha = \frac{k}{e} \left( r + \frac{5}{2} + \ln \frac{N_V}{p} \right) \quad (5)$$

$N_C$  i  $N_V$  su proporcionalni  $T^{3/2}$ , a  $n$  i  $p$  rastu eksponencijalno s temperaturom u temperaturnom području u kojem su se obavljala mjerenja (sobna temperatura), tako da se u tom području  $\alpha$  smanjuje s temperaturom.

## 2. EKSPERIMENTALNI POSTAV

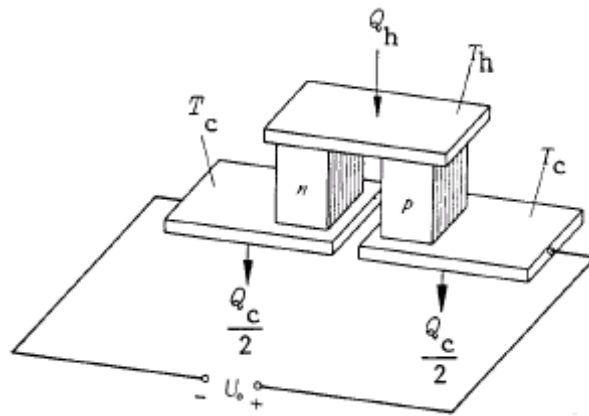
Eksperimentalni postav za mjerenje Seebeckovog koeficijenta prikazan je na slici 1.



**Slika 1:** Eksperimentalni postav za mjerenje termonapona i struje kratkog spoja u ovisnosti o temperaturi.

Na slici 2 je shematski prikaz spoja dva poluvodiča s označenim temperaturama toplog spoja ( $T_h$ ) i hladnog spoja ( $T_c$ ). Temperatura toplog spoja se kontrolira termostatom (slika 1), a hladnog protokom vode iz slavine. Da bi se odredio Seebeckov koeficijent, napon između dva poluvodiča (tj. između serijskog spoja od 142 para poluvodiča) se mjeri direktno voltmetrom kao i struja kratkog spoja ampermetrom (slika 2). Napon se mjeri za razliku temperatura od 10 do 40°C. Da bi se odredio unutrašnji otpor poluvodičke petlje (poluvodičkog termogeneratora) mjeri se struja i napon za različite vrijednosti serijski spojenog vanjskog omskog otpora (potenciometar desno na slici 1).

Konačno, određuje se i učinkovitost pretvorbe toplinske u električnu energiju. Najprije se na vanjskom otporu postavi vrijednost otpora koja je približno jednaka unutrašnjem otporu termogeneratora. Zatim se prestane cirkulirati voda (hladna i topla) i počne se pratiti smanjivanje razlike temperature u ovisnosti o vremenu uz istodobno mjerenje struje i napona na vanjskom otporu. Nagib krivulje  $dT - t$  pomnožen s toplinskim kapacitetom vode daje uloženu snagu, a umnožak struje i napona dobivenu snagu. Njihov omjer daje učinkovitost.



*Slika 2:* Shematski prikaz poluvodičkog Seebeckovog elementa.

### Literatura

<sup>1</sup>Ogorelec, Z.; Praktikum iz fizike čvrstog stanja, I dio; Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovnomatemički fakultet; Zagreb, 1985.

<sup>2</sup>PHYWE; Laboratory experiments; Semiconductor thermogenerator, LEP 4.1.07