

Capitolul 4

Masurari de temperatura, flux de caldura si evaporare

4.1 Mărimile de masurat

4.1.1 Unitatile marimilor termice

În sistemul internațional (SI) temperatura termodinamică sau temperatura absolută este exprimată în grade Kelvin (K) iar temperatura este exprimată în grade Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Temperatura Celsius este definită de:

$$0^{\circ}\text{C} = 273,15\text{K} \quad (4.1)$$

și intervalul de temperatură sau diferența exprimată în grade Kelvin sau grade Celsius este identică: 0°C sunt cu 0,01 grade Kelvin sub punctul triplu al apei. Coeficientul de temperatură este exprimat în K^{-1} .

În SI, unitatea de căldură (Q) este joule (J). În practica medicală este utilizată pe larg unitatea tolerată – caloria. Transformarea sa în joule depinde de definiție; astfel caloria de 15°C este căldura necesară pentru a încălzi 1 g de apă de la $14,5^{\circ}\text{C}$ la $15,5^{\circ}\text{C}$ la o presiune de 1 atmosferă ($=101\,325\text{ Pa}$), adică:

$$1\text{ cal}_{15} = 4,1855\text{ J} \quad (4.2)$$

iar o calorie IT (International Table calorie, cal_{IT}) este:

$$1\text{ cal}_{\text{IT}} = 4,1868\text{ J} \quad (4.3)$$

Unitățile altor mărimi care sunt legate de căldură:

- fluxul de căldură Q_f , care reprezintă căldura transmisă prin unitatea de arie în unitatea de timp,

$$[Q_f] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

- conductibilitatea termică κ reprezintă fluxul de căldură de-a lungul unei bare având un gradient de temperatură dT/dx ($Q_f = \kappa dT/dx$)

$$[\kappa] = \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

- capacitatea calorică este egală cu cantitatea de căldură care produce o variație a temperaturii corpului de 1 K ($\Delta Q = C\Delta T$)

$$[C] = \frac{J}{K}$$

Cantitatea de vapori de apă dintr-un gaz poate fi exprimată în diferite moduri, prin: umiditatea absolută, presiunea vaporilor de apă, umiditatea relativă, punctul de rouă.

- umiditatea absolută este concentrația vaporilor de apă exprimată în g/cm^3
- presiunea vaporilor de apă este exprimată în Pa
- umiditatea relativă UR, defintă ca:

$$UR = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O(sat)}} \cdot 100\%$$

unde p_{H_2O} este presiunea vaporilor de apă și $p_{H_2O(sat)}$ este presiunea vaporilor saturanți la temperatura gazului.

- punctul de rouă este temperatura la care umiditatea relativă devine 100% la răcirea gazului.

Atunci când gazul este răcit sub punctul de rouă poate apare condensarea vaporilor de apă. Viteza de evaporare a vaporilor de apă din corp este exprimată în g/m^2h (h-oră) sau în mg/cm^2h .

4.1.2 Norme pentru domeniile de masura

Pentru diagnostic clinic și monitorizarea pacienților, temperatura este măsurată în diferite locuri ale corpului. Pentru corpurile umane și pentru animalele homeotermice (cu sânge cald), temperatura părții centrale a corpului este stabilizată prin funcția de termoreglare fiziologică. Temperatura în țesuturile profunde din partea centrală a corpului este numită temperatură din interior sau temperatura din interiorul profund al corpului. Termenul “temperatura corpului” este adesea folosită pentru a indica temperatura din interiorul corpului, chiar dacă temperatura corpului nu este uniformă și variază de la poziție la poziție.

Temperatura din interior se situează totdeauna în domeniul 35-40°C. Majoritatea variațiilor de temperatură fiziologice și patologice apar în acest domeniu, cu temperatura cea mai scăzută dimineața devreme sau pe vreme rece și cu temperatura cea mai ridicată într-o maladie cu febră sau un exercițiu fizic greu. În cazul hipotermiei sau hipertermiei terapeutice sau accidentale, este necesar un domeniu mai larg de temperatură.

Pentru măsurarea temperaturii din interior este necesară o rezoluție de 0,1°C și se acceptă o precizie absolută de 0,1°C.

În studiile fiziologice, diagnosticile clinice și monitorizarea pacienților este măsurată și temperatura pielii. Temperatura pielii este luată în considerare pentru evaluarea schimbului de căldură între corp și mediul ambiant. La urmărirea clinică a unui pacient, temperatura pielii este măsurată pentru monitorizarea circulației periferice. În acest scop se măsoară temperatura degetului mare de la picior.

Temperatura pielii poate varia cel puțin între temperatura mediului ambiant și temperatura corpului. Temperatura pielii transpirate scade sub temperatura mediului ambiant și în cele din urmă ajunge la punctul de rouă. Temperatura pielii poate varia într-un domeniu mai larg atunci când pielea este răcită sau încălzită din exterior. Un termometru pentru măsurarea temperaturii pielii trebuie să aibă domeniul de măsură de la 0°C la 50°C, deși, în unele cazuri, ar trebui să aibă o rezoluție mai mare pe anumite domenii limitate de temperatură.

Anomaliile distribuției temperaturii pielii sunt observate la circulație, vascularizare și producere de căldură anormale în țesuturile interioare. O metodă acceptată pentru descoperirea acestor anomalii o constituie termografia. Termografia trebuie să acopere măsurarea întregului domeniu de temperatură a pielii cu rezoluție suficientă pentru a detecta anomaliile termice de origine fiziologică sau patologică.

Uneori sunt necesare măsurări ale temperaturii în țesuturi.

Măsurarea fluxului de căldură este necesară pentru evaluarea disipării de căldură de pe suprafața corpului în exterior.

4.2 Traductori de temperatura

Se utilizează diferite tipuri de senzori de temperatură, care sunt utilizați ca atare sau introduși în probe de suprafață, catetere sau ace care intră în contact sau chiar sunt introduse în partea de interes a corpului. Pentru a alege un senzor adecvat termometriei medicale, este important să comparăm senzori de temperatură care funcționează conform unor principii diferite. Există de asemenea alternative în alegerea traductorilor.

4.2.1 Termistori

Un termistor este un senzor de temperatură rezistiv, obținut prin sinterizarea oxizilor unor metale, ca: magneziu, cobalt, nichel, fier sau cupru. Rezistența termistorului are un coeficient de temperatură negativ, cu valoarea de $-0,04\text{K}^{-1}$. Conducția electrică în termistori are loc prin saltul purtătorilor (hopping) de la poziția unui atom la altul (ale căror energii sunt localizate în banda de energie interzisă a materialului respectiv). În expresia conductibilității $\sigma = nq\mu$, unde n este concentrația

de purtători, q - sarcina iar μ – mobilitatea, într-un termistor $n=\text{const}$ și responsabilă de variația cu temperatura este mobilitatea care este activată termic:

$$\mu \propto \exp - \frac{E_a}{kT} \quad (4.4)$$

unde E_a este înălțimea barierei de potențial dintre două poziții localizate ale atomilor vecini. Ca urmare, dependența rezistivității în funcție de temperatură se exprimă astfel:

$$\rho = \rho_\infty \exp \frac{E_a}{kT} \quad (4.5)$$

unde ρ_∞ este rezistivitatea pentru $T \rightarrow \infty$.

Coeficientul termic α al rezistivității, definit prin:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (4.6)$$

devine în acest caz:

$$\alpha = - \frac{E_a}{kT^2} = - \frac{B}{T^2} \quad (4.7)$$

unde $B=E_a/k$. Valoarea energiei de activare E_a la termistori este în jur de 0,3 eV, (între 0,15 și 0,51 eV), și pentru $B=4000$, coeficientul de temperatură α este:

$$\alpha = - \frac{4000}{T^2} \quad (4.8)$$

iar la temperatura de 37°C, $\alpha = -0,0416 \text{ K}^{-1} = -4,16 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Având în vedere că pentru rezistențe metalice coeficientul lor termic este cu un ordin de mărime mai mare (de exemplu pentru o rezistență din fir de platină $\alpha_{pt} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ iar pentru o rezistență din fir de cupru $\alpha_{cu} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$), rezultă că la aceeași temperatură sensibilitatea relativă a unui termistor este de 10 ori mai mare decât a unei rezistențe metalice. ($S_t = (dR/R)(dT/T) = \alpha T$). Ca urmare,

folosirea unui termistor este adecvată pentru utilizarea la măsurări de temperatură fiziologice, caz în care este necesară o rezoluție mai mare într-un domeniu limitat de temperatură.

Termistorii comerciali au rezistențe care variază între 6 și 60 k Ω la 0°C și de la 15 la 150 Ω la 37°C. Majoritatea termistorilor comerciali sunt destul de stabili pentru uzul clinic. Modificarea rezistenței lor este de 0,1 m Ω într-o sută de zile, dacă nu sunt afectați de ciclurile termice, în timp ce șocurile și deformările mecanice pot provoca abateri importante ale dependenței rezistivității de temperatură, deci o importanță ireproductibilitate.

Pentru uzul medical au fost realizate diferite tipuri de sonde cu termistori:

a) termistorul perlă, o sferă de 0,3 mm diametru, încapsulată în sticlă și conectată la fire conductoare (Fig. 4.1a)

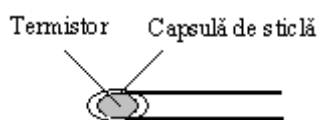


Fig. 4.1a

b) sondă de tip cateter, în care termistorul este legat la un cablu izolator flexibil; zona de conexiuni este complet izolată (Fig. 4.1b)

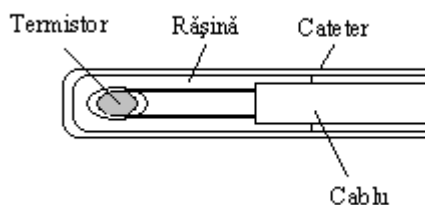


Fig.4.1b

c) sondă de tip ac, în care termistoul este introdus într-un ac hipodermic (Fig.4.1c)



Fig. 4.1c

Timpul de răspuns al unei sonde cu termistor depinde de forma, și dimensiunea sa precum și de tipul materialului în care este introdusă și a

mediului înconjurător. Sondele subțiri de tip cateter sau ac au timp de răspuns de 0,1 s sau mai puțin în apă și de 3 s sau mai mult în aer.

Caracteristica unui termistor, adică dependența rezistivității funcție de temperatură, este neliniară (ecuația (4.5)). Pentru a obține un răspuns linear în raport cu temperatura a rezistenței R_T a unui termistor au fost propuse mai multe tehnici. Într-un domeniu îngust de temperatură, linearizarea poate fi realizată prin adăugarea unui rezistor de rezistență R în circuite electrice ca cele din figura 4.2:

a) atunci când este folosită o sursă de tensiune constantă, se adaugă un rezistor de rezistență R_1 , în serie (Fig. 4.2a)

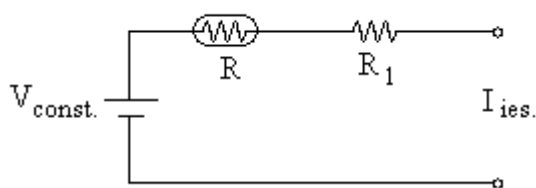


Fig.4.2a

b) atunci când este folosită o sursă de curent constant, se plasează în circuit un rezistor de rezistență R_1 , în paralel (Fig. 4.2b)

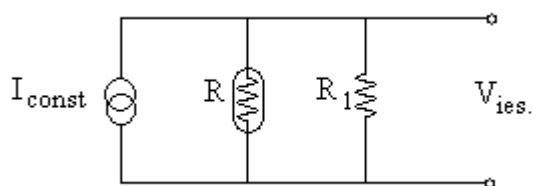


Fig.4.2b

Pentru a diminua eroarea măsurării în domeniul de temperatură respectiv, rezistența R_1 a rezistorului ce trebuie plasată în circuit ca în Fig. 4.2.a sau în Fig. 4.2b, este astfel proiectată încât:

$$R_1 = R \frac{B - 2T}{B + 2T} \quad (4.9)$$

unde B are semnificația dată de relația (4.7), T este temperatura medie a domeniului de măsură iar R este rezistența termistorului la T .

Pentru circuitul din Fig. 4.2a, se poate găsi imediat dependența liniară a curentului I de temperatură. Astfel, dacă sursa de tensiune furnizează circuitului tensiunea V_a , atunci:

$$I = \frac{V_a}{R_T + R \frac{B-2T}{B+2T}} = \frac{V_a}{2RB} (B+2T) = \frac{V_a}{2R} + \frac{V_a}{RB} T \quad (4.10)$$

Pentru circuitul din Fig. 4.2b, sursa de curent constantă debitează curentul I_c iar dependența tensiunii de ieșire V_{ies} este proporțională cu temperatura măsurată, după cum urmează:

$$V_{ies} = \frac{R_T R_1 I_c}{R_T + R_1} = \frac{R^2 \left(\frac{B-2T}{B+2T} \right) I_c}{R + R \left(\frac{B-2T}{B+2T} \right)} = \frac{R I_c (B-2T)}{2B} = \frac{R I_c}{2} - \frac{R I_c}{B} T \quad (4.11)$$

În ecuațiile (4.10) și (4.11) am înlocuit rezistența termistorului R_T cu R , valoarea sa de la temperatura medie, ceea ce înseamnă că din ecuațiile respective obținem numai valorile curentului pentru temperatura T medie a domeniului investigat. Se poate calcula valoarea curentului I din ecuația (4.10) pentru diferite temperaturi din intervalul de temperatură (290-310) K, cu valoarea R_T corespunzătoare astfel (pentru $B = 3000$ K):

$$I = \frac{V_a}{R_T + R_1} = \frac{V_a}{R_\infty \exp \frac{3000}{T} + R_\infty \left(\frac{3000-600}{3000+600} \right) \exp \frac{3000}{300}} = \frac{V_a}{R_\infty \exp \frac{3000}{T} + \frac{2}{3} \exp 10} \quad (4.12)$$

În tabelul 4.1 sunt date valorile curentului $I/(V_a/R_\infty)$, unde am notat valoarea constantă $V_a/R_\infty = A$, calculate pentru 5 valori ale lui T , iar în figura 4.3 este prezentată “o curbă de etalonare” pentru dependența curentului normat în funcție de temperatură pentru domeniul de măsură de la 290 la 310 K.

Tabel 4.1

Nr.crt.	T (K)	I/A
1.	290	$2,185 \cdot 10^{-5}$
2.	295	$2,453 \cdot 10^{-5}$
3.	300	$2,718 \cdot 10^{-5}$
4.	305	$2,997 \cdot 10^{-5}$
5.	310	$3,265 \cdot 10^{-5}$

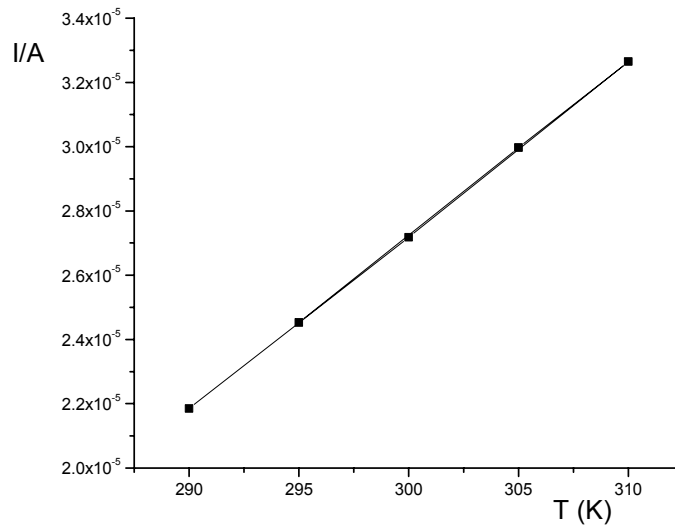


Fig. 4.3

Abaterea de la liniaritate în acest domeniu este de 0,03K. Dacă este permisă o eroare de 0,1 K, atunci poate fi acoperit un domeniu cuprins între 285 și 315 K.

4.2.2 Termocuple

Termocuplul este un traductor termoelectric generator. Un circuit format din 2 metale diferite A și B, ca în figura 4.4, produce o tensiune electromotoare care depinde de diferența de temperatură între cele două joncțiuni. Fenomenul acesta este cunoscut ca efectul Seebeck.

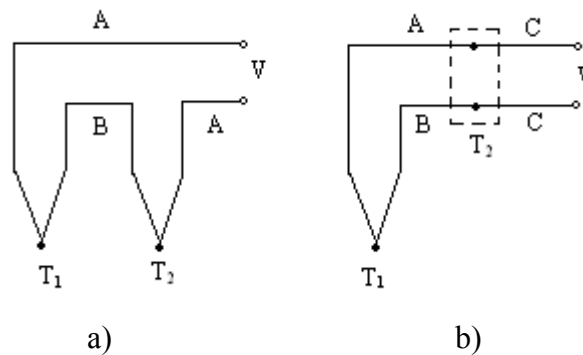


Fig. 4.4

În circuitul din figura 4.4a, dacă temperatura T_2 a joncțiunii, considerate de referință, este menținută constantă, atunci tensiunea electromotoare V care se stabilește, variază numai în funcție de temperatura T_1 a celei de a doua joncțiuni, care este joncțiunea de măsură. În circuitul din figura 4.4b există o singură joncțiune a metalelor A și B și ele sunt legate cu un al treilea metal, C. Atât timp cât cele două noi joncțiuni sunt menținute la aceeași temperatură, circuitul din figura 4.4b produce aceeași tensiune electromotoare ca și cel din figura 4.4a, indiferent de tipul celui de-al treilea metal.

Dependența tensiunii electromotoare de temperatură nu este liniară, chiar dacă temperatura joncțiunii de referință este menținută constantă. În domeniul de temperatură investigat în termometria medicală domeniul $20-40^\circ\text{C}$, abaterea de la liniaritate este redusă. Sensibilitatea absolută S_{te}

$$S_{te} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (4.13)$$

a celor mai folosite termocuple, este:

- termocuplu Cromel-Alumel: $S_t = 25 \text{ mV/K}$
- termocuplu Cupru-Constantan: $S_t = 41 \text{ mV/K}$
- termocuplu Platin-PlatinRhodiu: $S_t = 61 \text{ mV/K}$

Pentru a obține o măsurare precisă cu un termocuplu, temperatura joncțiunii de referință trebuie să fie suficient de stabilă. Ca temperatură de referință precisă, se poate considera temperatura punctului triplu al apei care este de $0,01 \pm 0,0005^\circ\text{C}$. Temperatura de 0°C poate fi realizată cu o precizie de $0,05^\circ\text{C}$, dacă se folosește un vas cu apă pură (distilată) și gheață, obținută tot din apă distilată.

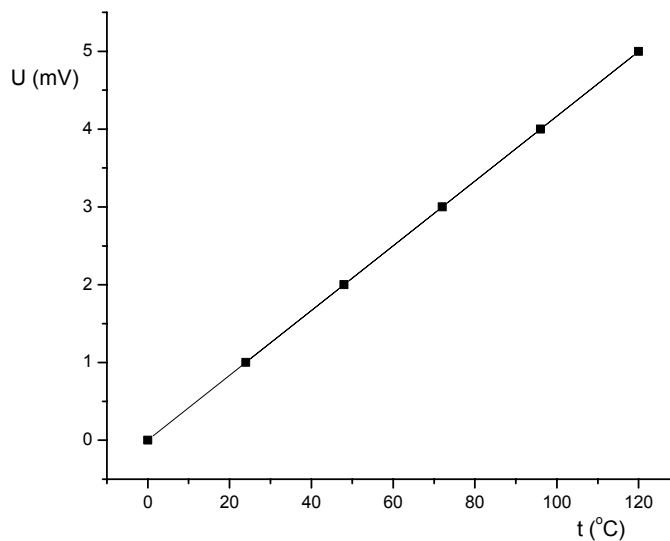


Fig. 4.5

În Fig. 4.5 este prezentată “curba de etalonare” pentru termocuplul cromel-alumel, din care reiese că la 1 mV corespunde 24°C . Ca urmare temperatura se calculează astfel: $t(^{\circ}\text{C}) = (24^{\circ}\text{C}/\text{mV}) \times V(\text{mV})$.

Atunci când nu este nevoie de o precizie foarte bună, se poate renunța la vasul aflat la temperatură constantă pentru joncțiunea de referință și se poate apela la metodele de compensare ale temperaturii joncțiunii de referință. Una dintre cele mai convenabile metode este aceea în care este folosit circuitul din figura 4.4b, astfel încât temperatura la terminalele de intrare la care este conectat termocuplul să fie folosită ca temperatură de referință. În acest caz, temperatura joncțiunii de măsură este evaluată din temperatura joncțiunii de referință plus diferența de temperatură între joncțiuni, estimată prin intermediul tensiunii electromotoare.

Pentru măsurarea locală a temperaturii se folosesc diferite sonde cu termocuple cum sunt: ace, izolatori sau catetere. Sunt comercializate termocuple din fire foarte subțiri care au diametrul de $10\ \mu\text{m}$.

4.2.3 Diode cu joncțiuni p-n și tranzistori

Tensiunea de-a lungul unei joncțiuni p-n polarizată direct prezintă o excelentă dependență lineară de temperatură; astfel, orice diodă sau un tranzistor cu o joncțiune p-n poate fi un traductor de temperatură.

Caracteristica curent-tensiune pentru o joncțiune p-n polarizată direct este dată de:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{kT} - 1\right) \quad (4.14)$$

unde I_0 este curentul de saturație, q – sarcina electronului, V - căderea de tensiune, k - constanta Boltzmann, T – temperatura în K. Dacă I este menținut constant, atunci și mărimea qV/kT este constantă și se poate modifica numai la variația temperaturii T . Astfel:

$$V = \frac{kT}{q} \left(\ln \frac{I}{I_0} + 1 \right) \quad (4.15)$$

În continuare stabilim sensibilitatea absolută S_{n-p} a unei joncțiuni ideale și formula de calcul a tensiunii unei diode în funcție de temperatură:

$$S_{n-p} = \frac{dV}{dT} \quad (4.16)$$

În acest scop trebuie explicitată expresia curentului de saturație I_0 sub forma:

$$I_0 = CT^m \exp\left(\frac{-qV_0}{kT}\right) \quad (4.17)$$

unde V_0 este diferența de potențial corespunzătoare energiei benzii interzise a semiconductorului respectiv (pentru Ge – 0,67 eV iar pentru Si – 1,12 eV), m – o constantă ce depinde de natura materialului semiconductor (având valoarea de aproximativ 3 pentru Si) iar C o constantă ce depinde de geometria diodei, independentă de temperatură.

Dacă joncțiunea p-n într-o diodă sau într-un tranzistor este străbătută de diferiți curenți, I_1 și I_2 , atunci tensiunile V_1 și V_2 , stabilite sub acțiunea acestor curenți, este, conform (4.14):

$$V_1 - V_2 = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln \frac{I_1}{I_2} \quad (4.18)$$

Astfel, diferența tensiunilor, corespunzătoare diferiților curenți care sunt menținuți într-un raport constant, este strict proporțională cu temperatura absolută.

Așa cum rezultă din relația (4.14), dacă se menține constantă una dintre mărimile electrice – curentul sau tensiunea – celaltă mărime va depinde de temperatură. În practică este preferată menținerea constantă a curentului. Expresia acestuia (4.14) în care folosim (4.17) devine:

$$I = CT^m \left[\exp \frac{q(V - V_0)}{kT} - \exp \left(\frac{-qV_0}{kT} \right) \right] \quad (4.19)$$

Al doilea termen din paranteză poate fi neglijat fiind cu multe ordine de mărime mai mic decât primul termen, astfel încât (4.19) capătă următoarea formă:

$$I = CT^m \exp \frac{q(V - V_0)}{kT} \quad (4.20)$$

Din (4.20) rezultă expresia tensiunii V :

$$V - V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{I}{CT^m} \quad (4.21)$$

sau

$$V = V_0 + \frac{kT}{q} \ln I - \frac{kT}{q} m \ln T - \frac{kT}{q} \ln C \quad (4.22)$$

Dacă se cunoaște valoarea tensiunii V_1 pentru o temperatură T_1 ,

$$V_1 = V_0 + \frac{kT_1}{q} \ln I - \frac{kT_1}{q} m \ln T_1 - \frac{kT_1}{q} \ln C \quad (4.23)$$

atunci se poate obține diferența între tensiunile V și V_1 :

$$\begin{aligned} V - V_1 &= V_1 \frac{T}{T_1} + V_0 \left(1 - \frac{T}{T_1} \right) + \frac{mkT}{q} \ln \frac{T_1}{T} = \\ &= V_0 + (V_1 - V_0) \frac{T}{T_1} + \frac{mkT}{q} \ln \frac{T_1}{T} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Ecuția (4.22) indică prezența unei neliniarități, arătând totodată și existența condiției inverse, ca la $T=T_1$ să existe $V=V_1$ și diodele să aibă același m . Sensibilitatea diodelor folosite la măsurarea temperaturii se poate exprima astfel:

$$\frac{dV}{dT} = (V_1 - V_0) \frac{1}{T_1} + \frac{mk}{q} \ln \frac{T_1}{T} - \frac{mk}{q} \frac{T_1}{T} \quad (4.25)$$

Ecuția (4.25) coroborată cu (4.24) ne conduce la sensibilitatea S_{n-p} a joncțiunii:

$$S_{n-p} = \frac{dV}{dT} = (V - V_0) \frac{1}{T} - \frac{mk}{q} \frac{T_1}{T} \quad (4.26)$$

care corespunde unui sistem neliniar. Să determinăm mărimea T_1 , din condiția ca la $T=300K$, $V=V(300K)$ din ecuația (4.25):

$$-\frac{mk}{q} \frac{T_1}{300K} = \frac{dV}{dT} - [V(300K) - V_0] \frac{1}{300K}$$

de unde:

$$-\frac{mk}{q} T_1 = 300K \frac{dV}{dT} - [V(300K) - V_0] \quad (4.27)$$

Ca urmare, din (4.26) împreună cu (4.27) rezultă căderea de tensiune pentru dioda polarizată direct:

$$V = V(300K) + \frac{dV}{dT} (T - 300K) \quad (4.28)$$

Această relație permite determinarea temperaturii în limitele câtorva grade Celsius în intervalul $(-50^{\circ}C \div 150^{\circ}C)$.

4.3 Masurări de flux de căldură

Fluxul de căldură poate fi măsurat direct cu un traductor de flux de căldură, în care fluxul de căldură poate produce o tensiune electromotoare.

4.3.1 Traductori pentru flux de căldură

Un traductor de flux de căldură convențional este format dintr-o plăcuță subțire de conductibilitate κ și grosime d , astfel încât fluxul de căldură Q_f , care reprezintă căldura care străbate unitatea de suprafață în unitatea de timp, este dat de:

$$Q_f = \kappa \frac{\Delta T}{d} \quad (4.29)$$

Ca urmare, fluxul de căldură Q_f poate fi determinat din măsurarea diferenței de temperatură dintre cele două fețe ale plăcuței.

Atunci când traductorul de flux de căldură este plasat pe suprafața unui obiect, se modifică în anumită măsură distribuția naturală a fluxului de căldură. Pentru a reduce acest efect, grosimea plăcuței trebuie să fie cât mai subțire posibil iar materialul din care este alcătuită trebuie să aibă

o conductivitate termică mare. În acest fel pot fi măsurate diferențe de temperatură foarte mici.

Unii traductorii de flux de căldură sunt alcătuiți din termocuple cu ajutorul cărora este măsurată diferența de temperatură. În figura 4.6 a este prezentat un traductor de flux de căldură în care o placă metalică din anumit material este plasată între alte două plăci metalice din alt material. La o astfel de construcție simplă, sensibilitatea este scăzută. De exemplu, pentru o plăcuță de constantan de 5 mm grosime, acoperită de straturi de cupru pe ambele fețe, sensibilitatea este de $0,083 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$. Se poate obține o sensibilitate mai mare dacă se folosește o combinație de metale care dau o tensiune electromotoare mai mare. De exemplu, pentru o plăcuță de aliaj argint-telur, acoperită pe cele două fețe cu cupru, sensibilitatea este de $6,9 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$.

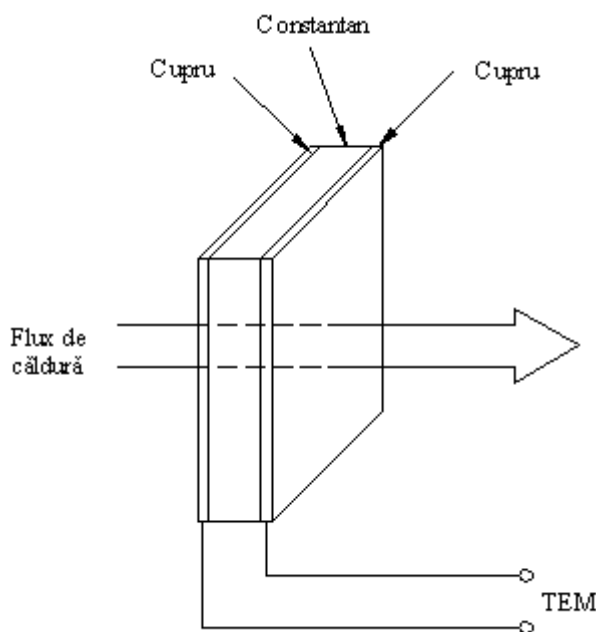


Fig. 4.6 a

O sensibilitate mai mare se poate obține prin folosirea unei termopile, realizată prin conectarea în serie a mai multor termocuple. În figura 4.6 b este prezentat un astfel de exemplu. Sârma termocuplurilor este înfășurată spiralic pe un suport de rezistență termică adecvată, astfel încât fiecare jumătate de tură este din fir de constantan iar cealaltă jumătate din fir de cupru.

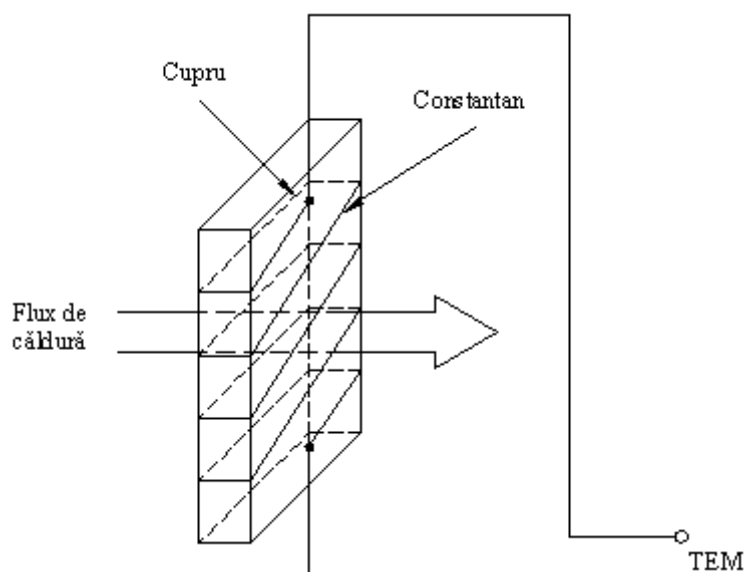


Fig. 4.6 b

Pentru a utiliza traductori de flux termic foarte subțiri, este folosit un *traductor generator* realizat pe baza efectului termomagnetic transversal – efectul Nernst. Principiul de funcționare este prezentat în figura 4.7.

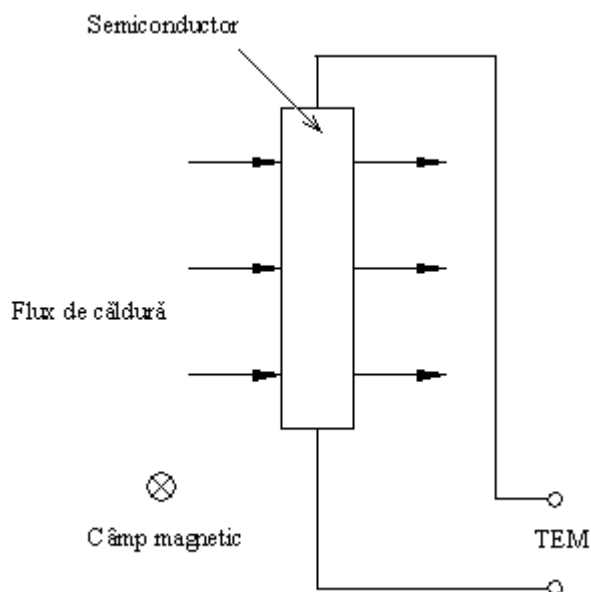


Fig. 4.7

În prezența unui gradient de temperatură, într-o probă pe care sunt aplicate un câmp electric și un câmp magnetic, pe direcții perpendiculare între ele, apare un câmp electric perpendicular pe planul celorlalte două câmpuri aplicate.

$$V_N = A_N B_z \nabla_x T \quad (4.30)$$

unde A_N este o constantă.

Pentru traductori se folosesc semiconductori de tipul InSb-NiSb și Gd_3As_2 -NiAs. Avantajul folosirii efectului Nernst este faptul că tensiunea electromotoare de la ieșire este proporțională cu gradientul de temperatură și nu cu diferența de temperatură. Pentru un flux de căldură dat, gradientul de temperatură este independent de grosime, astfel încât rezistența termică poate fi redusă, fără a micșora sensibilitatea. Totuși, folosirea unui câmp magnetic extern este un mare dezavantaj în majoritatea aplicațiilor.