STUDIUL CONDUCTIBILITĂŢII ELECTRICE A METALELOR

1. Scopul lucrării

Scopul lucrării este de a studia coductibilitatea electrică a metalelor şi a factorilor care intervin la nivel atomic. Sunt definite mărimi ca: densitatea de curent, viteza de transport a electronilor, mobilitatea acestora, etc. Se definesc de asemenea şi se determină conductibilitatea şi rezistivitatea electrică precum şi coeficientul termic mediu al rezistivităţii metalelor.

2. Consideraţii teoretice

Curentul electric reprezentând o mişcare dirijată a unor particule încărcate electric, este forma de manifestare a efectului acţiunii unui câmp electric asupra unor astfel de sarcini electrice care se gasesc libere în diverse materiale. Astfel, mişcarea ordonată a purtătorilor de sarcină se suprapune peste mişcarea haotică de agitaţie termică care există implicit în corpurile aflate la temperaturi mai mari de 0 K.

În solide, curenţii electrici sunt datoraţi electronilor şi nu ionilor, astfel conducţia metalelor şi semiconductorilor este o conducţie electronică. La metale purtătorii de sarcină, care participă la procesul de conducţie, sunt electronii din banda de valenţă parţial ocupată. Sub acţiunea unei diferenţe de potenţial dU aplicată între două secţiuni infinit apropiate ale unui conductor valoarea modulului câmpului electric creat este dată de:

$$E = \frac{dU}{d\ell}. \tag{1}$$

Densitatea curentului electric datorat câmpului E poate fi definită ca sarcina dQ care traversează secţiunea dS în timpul dt:

$$j = \frac{dQ}{dS \cdot dt}. \tag{2}$$

Considerând că numărul electronilor din unitatea de volum, dV, (concentraţia purtătorilor de sarcină) este n, sarcina dQ care va traversa secţiunea transversală dS în timpul dt va fi:

$$dQ = n \cdot e \cdot dV = n \cdot e \cdot dS \cdot v_d \cdot dt. \tag{3}$$

Înlocuind relaţia (3) în relaţia (2) se obţine forma vectorială a *densităţii de curent*

$$\vec{j} = n \cdot e \cdot \vec{v}_d. \tag{4}$$

În această relaţie, $\vec{v}_d$ reprezintă viteza de transport dirijat a purtătorilor de sarcină (sau *viteza de drift*). Aceasta se consideră ca fiind o viteză medie între două ciocniri ale electronilor cu nucleele atomilor din nodurile reţelei cristaline care, datorită energiei termice, execută mişcări de vibraţie în jurul poziţiei de

echilibru. Viteza de drift este mult mai mică decât viteza agitaţiei termice. Viteza v_d poate fi calculată funcţie de câmpul electric E, de viteza medie $\langle v \rangle$ a electronilor de conducţie datorită agitaţiei termice. Electronii de conducţie participând la agitaţia termică, se ciocnesc mereu de miezurile ionilor, adică ei interacţionează cu reţeaua, suferind dese schimbări bruşte de viteză. Putem descrie ciocnirile electron–reţea prin durata medie a timpului τ între două ciocniri ($\tau = \langle \ell \rangle / \langle v \rangle$, $\langle \ell \rangle$ fiind drumul liber mediu).

Din legea lui Newton acceleraţia imprimată electronului este:

$$\vec{a} = \frac{e \cdot \vec{E}}{m}, \tag{5}$$

iar viteza de transport

$$\vec{v}_d = \vec{a} \cdot \tau = \frac{e \cdot \vec{E}}{m} \cdot \tau = \frac{e \cdot \vec{E}}{m} \cdot \frac{< \ell >}{< v >}. \tag{6}$$

Mărimea fizică numeric egală cu viteza câştigată într-un câmp de 1 V/m:

$$\mu = \frac{v_d}{E} = \frac{e \cdot \tau}{m}, \tag{7}$$

este numită *mobilitatea purtătorilor de sarcină electrică*.

Utilizând expresia vitezei de transport din relația (4), expresia densităţii curentului electric devine:

$$\vec{j} = n \cdot e \cdot \vec{v}_d = n \cdot e \cdot \frac{e \cdot \tau}{m} \cdot \vec{E} = n \cdot e \cdot \mu \cdot \vec{E} = \sigma \cdot \vec{E}. \tag{8}$$

Expresia $\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$ reprezintă *forma locală (vectorială) a legii lui Ohm*, iar mărimea $\sigma = n \cdot e \cdot \frac{e \cdot \tau}{m} = n \cdot e \cdot \mu$, care este o caracteristică de material, reprezintă *conductibilitatea electrică* a solidului considerat.

Aplicând o tensiune U la bornele unui conductor calibrat, de secţiune constantă S şi lungime ℓ, va rezulta un curent:

$$I = jS = \sigma SE = \sigma S \frac{U}{\ell} = \frac{U}{\rho \frac{\ell}{S}} = \frac{U}{R}, \tag{9}$$

care reprezintă legea lui Ohm pentru o porţiune de circuit. Aceasta furnizează relaţia între rezistivitatea electrică şi mobilitatea purtatorilor de sarcină:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{ne\mu}. \tag{10}$$

Expresia $\sigma = ne\mu$ ne arată că, conductibilitatea electrică a solidelor este determinată în esenţă de concentraţia purtătorilor de sarcină care pot participa la procesul de conducţie şi de împrăştierea pe care aceştia o suferă în mişcarea lor prin solid, adică de mobilitatea lor μ. În cazul metalelor, unde concentraţia purtătorilor rămâne practic constantă, creşterea temperaturii duce la creşterea rezistivităţii electrice prin scăderea mobilităţii purtătorilor de sarcină electrică, ca rezultat al creşterii împrăştierii electronilor de către vibraţiile reţelei cristaline (care în mecanica cuantică se considera a fi cvasi-particule numite fononi).

Rezistivitatea unui metal conţinând atomi de impuritate are forma:

$$\rho = \rho_L - \rho_i \,, \tag{11}$$

unde ρ_L este contribuţia mişcării termice, iar ρ_i este rezistivitatea cauzată de împrăştierea undelor asociate electronilor pe atomi de impuritate, care perturbă periodicitatea reţelei. La zero absolut rezistenţa extrapolată, numită rezistenţă reziduală, este egală cu ρ_i pentru metalele şi aliajele care nu trec în stare de supraconductibilitate. Aceasta este independentă de temperatură, are valori de 10^5-10^6 ori mai mari ca rezistivitatea la temperatura camerei (considerată la 20 ^oC), şi care depinde de puritatea metalului. În limita temperaturilor înalte pentru metalele simple rezistivitatea ρ_L este proporţionala cu temperatura T. Proporţionalitatea cu T la temperaturi mari rezultă din faptul că probabilitatea împrăştierii electronului este proporţională cu numărul de fononi.

În domeniul temperaturilor înalte:

$$\Delta\rho = \alpha\rho_0\Delta T \text{ sau } \rho = \rho_0(1+\alpha\Delta T) = \rho_0(1+\alpha\Delta t), \tag{12}$$

unde se defineşte un coeficient termic mediu al rezistivităţii:

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0}\cdot\frac{\Delta\rho}{\Delta T} = \frac{1}{\rho_0}\cdot\frac{\rho-\rho_0}{T-T_0}\,, \tag{13}$$

unde T_0 = 273,16 K.

3. Aplicaţii

Cunoaşterea valorii conductibilităţii (sau ale rezistivităţii) electrice a materialelor, ca o caracteristică de material are un caracter mai mult decât aplicativ, are un caracter fundamental. Acest lucru nu este restrâns la un domeniu ci, apare în mod uzual pentru tot ce înseamnă circuite electrice, termoelectrice, transportul energiei electrice, etc. Pentru a întelege dimensiunea în care curentul electric (şi deci modul în care el este utilizat) este implicată în viaţa societăţii umane, ne putem imagina această societate în absenţa curentului electric, deci fără dispozitivele bazate pe acesta (radio, televiziune, calculatoare, telefoane, etc). În particular, putem aminti faptul că o bună cunoaştere a comportării clasice sau cuantice a curentului electric produs în materiale inovatoare, a dus şi duce încă la miniaturizarea dispozitivelor folosite în viaţa cotidiană şi la apariţia supraconductibilităţii (adică materiale cu rezistenţa electrică zero).

4. Metodica experimentală

4.1 Montajul experimental

Instalaţia experimentală prezentată în figura 1 constă dintr-o termorezistenta de Platina, introdusa într-un vas Berzelius in care se mai afla si un bec auto de 12 V si 50 W care va fi conectat la o sursa de curent. Platina este bobinata pe unsuport de mica si are diametrul ϕ=0.05 mm si o lungime l=1.85m. Se urmăreşte modificarea rezistenţei electrice a Platinei odată cu creşterea temperaturii acesteia.

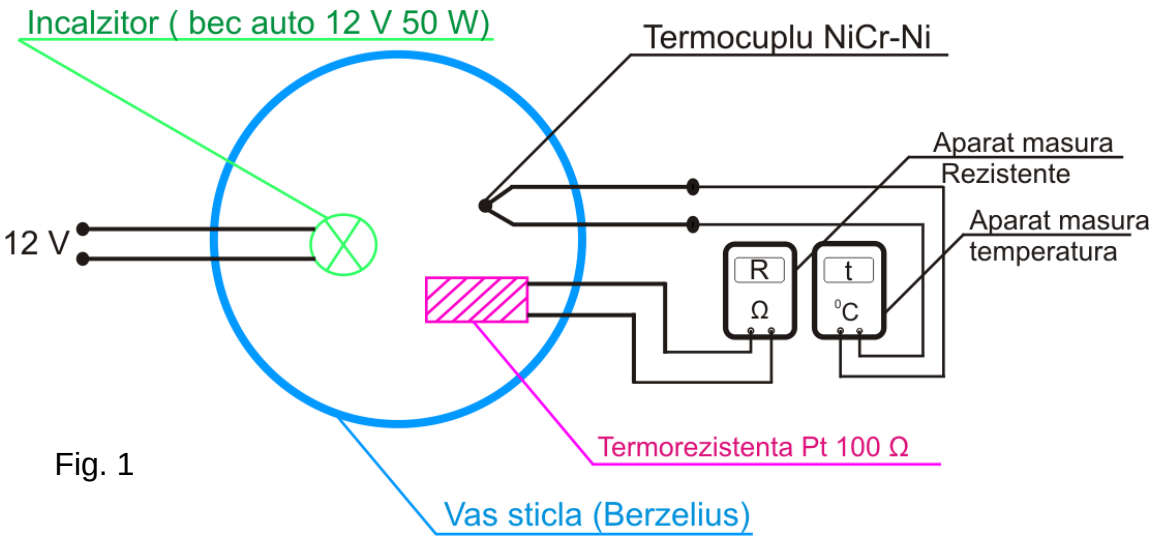

Fig. 1

4.2. Modul de lucru

Se urmează următoarele etape:

1. Se notează rezistenţa Platinei la temperatura camerei.
2. Se alimentează becul auto folosit pentru incalzirea incintei.
3. Se măsoară rezistenţa Platinei din 10 în 10 grade până la o valoare maximă a temperaturii de 100 ^{0}C. Valorile obţinute se trec în tabelul 1.

4.3. Prelucrarea datelor experimentale

1. Se calculează rezistivitatea electrică cu formula:

$$\rho = R\frac{S}{l}. \tag{14}$$

2. Se calculează conductibilitatea electrică ca inversul rezistivităţii:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \tag{15}$$

3. Se calculează mobilitatea electronilor cu ajutorul formulei:

$$\mu = \frac{\sigma}{n \cdot e}, \tag{16}$$

unde n este concentraţia electronilor de conducţie, pentru Pt $n \approx 6{,}63 \times 10^{28}$ electroni/m^3, iar e este sarcina electronului $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

4. Se trasează grafic dependenţa $\rho = \rho(t)$. Se extrapolează la zero pentru a calcula rezistivitatea la zero grade Celsius.
5. Din panta graficului se determină coeficient termic mediu al rezistivităţii platinei.
6. Se calculează timpul mediu între două ciocniri la temperatura camerei:

$$\tau = \frac{\mu \cdot m}{e}, \tag{17}$$

unde $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg este masa electronului.

7. Rezultatele obţinute se trec în tabelul 1.

Tabelul 1

t [^oC]	
R [Ω]	
ρ [Ωm]	
σ [Ωm]$^{-1}$	
μ [m^2/Vs]	