

# STUDIUL CONDUCTIBILITĂȚII ELECTRICE A METALELOR

## 1. Scopul lucrării

Scopul lucrării este de a studia conductibilitatea electrică a metalelor și 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 și se determină conductibilitatea și rezistivitatea electrică precum și coeficientul termic mediu al rezistivității metalelor.

## 2. Considerații teoretice

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

În solide, curenții electrici sunt datorati electronilor și nu ionilor, astfel conducția metalelor și semiconductorilor este o conducție electronică. La metale purtătorii de sarcină, care participă la procesul de conducție, sunt electronii din banda de valență parțial ocupată. Sub acțiunea unei diferențe de potențial  $dU$  aplicată între două secțiuni infinite apropiate ale unui conductor valoarea modulului câmpului electric creat este dată de:

$$E = \frac{dU}{dl} . \quad (1)$$

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

$$j = \frac{dQ}{dS \cdot dt} . \quad (2)$$

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

$$dQ = n \cdot e \cdot dV = n \cdot e \cdot dS \cdot v_d \cdot dt . \quad (3)$$

Înlocuind relația (3) în relația (2) se obține forma vectorială a *densității de curent*

$$\vec{j} = n \cdot e \cdot \vec{v}_d . \quad (4)$$

În această relație,  $\vec{v}_d$  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 nucleeele atomilor din nodurile rețelei cristaline care, datorită energiei termice, execută mișcări de vibrație în jurul poziției de

echilibru. Viteza de drift este mult mai mică decât viteza agitației termice. Viteza  $v_d$  poate fi calculată funcție de câmpul electric  $E$ , de viteza medie  $\langle v \rangle$  a electronilor de conducție datorită agitației termice. Electronii de conducție participând la agitația termică, se ciocnesc mereu de miezurile ionilor, adică ei interacționează cu rețeaua, suferind dese schimbări bruște de viteză. Putem descrie ciocnirile electron-rețea prin durată medie a timpului  $\tau$  între două ciocniri ( $\tau = \langle l \rangle / \langle v \rangle$ ,  $\langle l \rangle$  fiind drumul liber mediu).

Din legea lui Newton accelerația imprimată electronului este:

$$\vec{a} = \frac{e \cdot \vec{E}}{m}, \quad (5)$$

iar viteza de transport

$$\vec{v}_d = \vec{a} \cdot \tau = \frac{e \cdot \vec{E}}{m} \cdot \tau = \frac{e \cdot \vec{E}}{m} \cdot \frac{\langle l \rangle}{\langle v \rangle}. \quad (6)$$

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

$$\mu = \frac{v_d}{E} = \frac{e \cdot \tau}{m}, \quad (7)$$

este numită *mobilitatea purtătorilor de sarcină electrică*.

Utilizând expresia vitezei de transport din ec. (4), expresia densității curentului electric devine:

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

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 secțiune constantă  $S$  și lungime  $l$ , va rezulta un curent:

$$I = jS = \sigma SE = \sigma S \frac{U}{l} = \frac{U}{\frac{l}{\sigma S}} = \frac{U}{R}, \quad (9)$$

care reprezintă legea lui Ohm pentru o porțiune de circuit. Aceasta furnizează relația între rezistivitatea electrică și mobilitatea purtătorilor de sarcină:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{ne\mu}. \quad (10)$$

Expresia  $\sigma = ne\mu$  ne arată că, conductibilitatea electrică a solidelor este determinată în esență de concentrația purtătorilor de sarcină care pot participa la procesul de conducție și de împrăștierea pe care aceștia o suferă în mișcarea lor prin solid, adică de mobilitatea lor  $\mu$ . În cazul metalelor, unde concentrația purtătorilor rămâne practic constantă, creșterea temperaturii duce la creșterea rezistivității electrice prin scăderea mobilității purtătorilor de sarcină electrică, ca rezultat al creșterii împrăștierii electronilor de către vibrațiile rețelei cristaline (care în mecanica cuantică se considera a fi cvasi-particule numite fononi).

Rezistivitatea unui metal conținând atomi de impuritate are forma:

$$\rho = \rho_L + \rho_I, \quad (11)$$

unde  $\rho_L$  este contribuția mișcării termice, iar  $\rho_I$  este rezistivitatea cauzată de împrăștierea undelor asociate electronilor pe atomi de impuritate, care perturbă periodicitatea rețelei. La zero absolut rezistența extrapolată, numită rezistență reziduală, este egală cu  $\rho_I$  pentru metalele și 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  $20^\circ\text{C}$ ), și care depinde de puritatea metalului. În limita temperaturilor înalte pentru metalele simple rezistivitatea  $\rho_L$  este proporțională cu temperatura  $T$ . Proporționalitatea cu  $T$  la temperaturi mari rezultă din faptul că probabilitatea împrăștierii electronului este proporțională cu numărul de fononi.

În domeniul temperaturilor înalte:

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

unde se definește un coeficient termic mediu al rezistivității:

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

unde  $T_0 = 273,16 \text{ K}$ .

### 3. Aplicații

Cunoașterea valorii conductibilității (sau ale rezistivității) 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 înțelege dimensiunea în care curentul electric (și deci modul în care el este utilizat) este implicată în viața societății umane, ne putem imagina această societate în absența curentului electric, deci fără dispozitivele bazate pe acesta (radio, televiziune, calculatoare, telefoane, etc). În particular, putem aminti faptul că o bună cunoaștere a comportării clasice sau cuantice a curentului electric produs în materiale inovatoare, a dus și duce încă la miniaturizarea dispozitivelor folosite în viața cotidiană și la apariția supraconductibilității (adică materiale cu rezistența electrică zero).

#### 4. Metodica experimentală

##### 4.1 Montajul experimental

Instalația experimentală (prezentată în figura alăturată) constă dintr-un fir de cupru de lungime  $L = 916$  m și diametru  $\varnothing = 0.12$  mm bobinat, introdus într-un

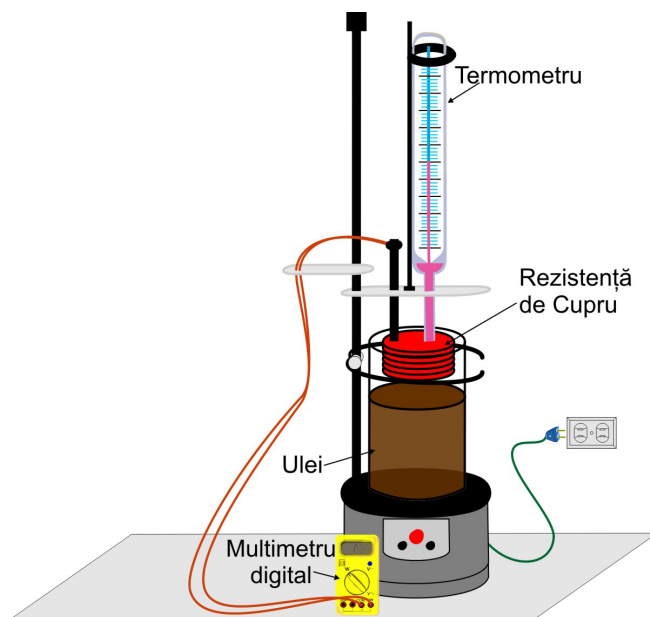


Figure 1

vas termorezistent așezat pe o plită dotată cu un agitator magnetic. Se urmărește modificarea rezistenței electrice a firului odată cu creșterea temperaturii acestuia. Pentru a fi încălzit în mod omogen, bobina care conține firul din cupru este scufundată în ulei. Rezistența firului de cupru se măsoară cu ajutorul unui multimetricu, iar temperatura cu un termometru cu mercur (sau fluid) a cărui rezervor se găsește în apropierea bobinei. *Atenție*, dacă aparatul de măsură este digital atunci pentru a nu induce în circuitul de măsură fluctuații nedorite, agitatorul magnetic poate să lipsească.

##### 4.2. Modul de lucru

Se urmează următoarele etape:

1. Se notează rezistența firului la temperatura camerei.
2. Se alimentează plita electrică.
3. Pentru încălzirea plitei, comutatorul din dreapta se trece pe poziția „on” care se observă prin aprinderea becului roșu. Reșoul va încălzi uleiul care, încălzește la rândul lui firul de cupru.
4. Se măsoară rezistența firului de cupru din 5 în 5 grade până la o valoare maximă a temperaturii de  $55 - 60^{\circ} \text{C}$ , limitată pentru a nu încălzi prea tare uleiul, deoarece acesta se poate degrada. Valorile se trec în tabelul1.

##### 4.3. Prelucrarea datelor experimentale

1. Se calculează rezistivitatea electrică cu formula:

$$\rho = R \frac{S}{l}. \quad (14)$$

2. Se calculează conductibilitatea electrică ca inversul rezistivității:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (15)$$

3. Se calculează mobilitatea electronilor cu ajutorul formulei:

$$\mu = \frac{\sigma}{n \cdot e}, \quad (16)$$

unde  $n = 8.4 \times 10^{28}$  electroni/m<sup>3</sup> pentru Cu și  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C.

4. Se trasează pe același grafic dependența  $\rho = \rho(t)$  și  $\mu = \mu(t)$ . Se extrapolează la zero pentru a calcula rezistivitatea și conductibilitatea la zero grade Celsius  $\rho_0 = \rho(0)$  și  $\sigma_0 = \sigma(0)$ .

5. Se calculează timpul mediu de ciocnire,  $\tau$  la zero grade Celsius:

$$\tau = \frac{\sigma(0) \cdot m}{n \cdot e^2} = \mu(0) \frac{m}{e}, \quad (17)$$

unde  $m = 9.1 \times 10^{-31}$  kg este masa electronului.

6. Se calculează coeficientul termic mediu al rezistivității cuprului,  $\alpha$ .

7. Se completează tabelul 1.

Tabelul 1

t [ °C ]	
R [ kΩ ]	
$\rho$ [ Ωm ]	
$\sigma$ [ Ωm ] <sup>-1</sup>	
$\mu$ [ m <sup>2</sup> /Vs ]	