

UNIVERSITATEA POLITEHNICA BUCUREȘTI
Facultatea de Inginerie Electrică

Florin CIUPRINA

Petru V. NOȚINGHER

MATERIALE ELECTROTEHNICE

FIȘE DE LABORATOR

Cuprins

| | |
|--|-----------|
| 1. Rezistivitatea de volum și de suprafață a materialelor electroizolante solide | 3 |
| 2. Rigiditatea dielectrică a materialelor electroizolante | 9 |
| 3. Permitivitatea relativă și factorul de pierderi dielectrice ale materialelor electroizolante solide | 17 |
| 4. Parametri electrici ai materialelor semiconductoare | 25 |
| 5. Proprietățile materialelor magnetic moi | 33 |
| 6. Proprietățile feritelor magnetic moi | 39 |
| 7. Proprietățile materialelor magnetic dure | 45 |
| 8. Studiul fenomenului de histerezis dielectric | 51 |
| Bibliografie | 57 |

1. Rezistivitatea de volum și de suprafață a materialelor electroizolante solide

1. Scopul lucrării

Scopul general al acestei lucrări este de a determina mărimile care exprimă rezistența pe care un material o opune trecerii curentului prin volumul sau pe la suprafața sa, respectiv rezistivitatea de volum ρ_v și rezistivitatea de suprafață ρ_s . Măsurătorile și calculele efectuate permit determinarea valorilor acestor mărimi pentru materialele izolante uzuale.

2. Noțiuni teoretice

- *Rezistența de volum* R_v [Ω] este raportul dintre tensiunea continuă aplicată între doi electrozi care sunt în contact cu fețele opuse ale unui eșantion și curentul dintre cei doi electrozi, din care se exclude curentul de suprafața.
- *Rezistivitatea de volum* ρ_v [Ωm] este raportul dintre intensitatea câmpului electric continuu și densitatea de curent care parcurge materialul izolant. Această mărime exprimă dificultatea pe care o întâmpină curentul electric la trecerea sa prin material.
- *Rezistența de suprafață* R_s [Ω] este raportul dintre tensiunea continuă aplicată între doi electrozi fixați pe suprafața unui eșantion și curentul dintre cei doi electrozi.
- *Rezistivitatea de suprafață* ρ_s [Ω] este raportul dintre intensitatea câmpului electric continuu și densitatea liniară de curent care parcurge stratul superficial al unui material izolant. Rezistivitatea de suprafață este numeric egală cu rezistența de suprafață dintre cei doi electrozi care formează laturile opuse ale unui pătrat de anumite dimensiuni.
- Atunci când se măsoară rezistențele, valorile indicate de aparate nu trebuie notate imediat după aplicarea tensiunii, ci după o perioadă de timp bine precizată Δt . Motivul este acela că, imediat după aplicarea tensiunii, curentul prin material (numit

curent de absorbție) descrește asimptotic către valoarea de regim staționar (figura 1).

În practică, durata de aplicare a tensiunii este prin convenție un minut.

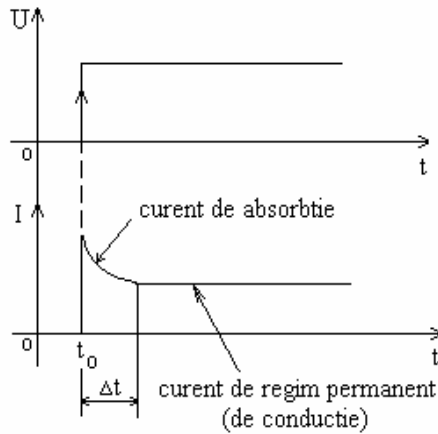


Figura 1. Curent de absorbție și curent de conducție într-un izolator.

3. Chestiuni de studiat

- 2.1. Determinați valorile mărimilor ρ_v și ρ_s pentru diferite materiale izolante solide;
- 2.2. Comparați rezultatele obținute și explicați diferențele dintre ele.

4. Determinări experimentale

Figura 2 prezintă montajul utilizat pentru efectuarea determinărilor experimentale.

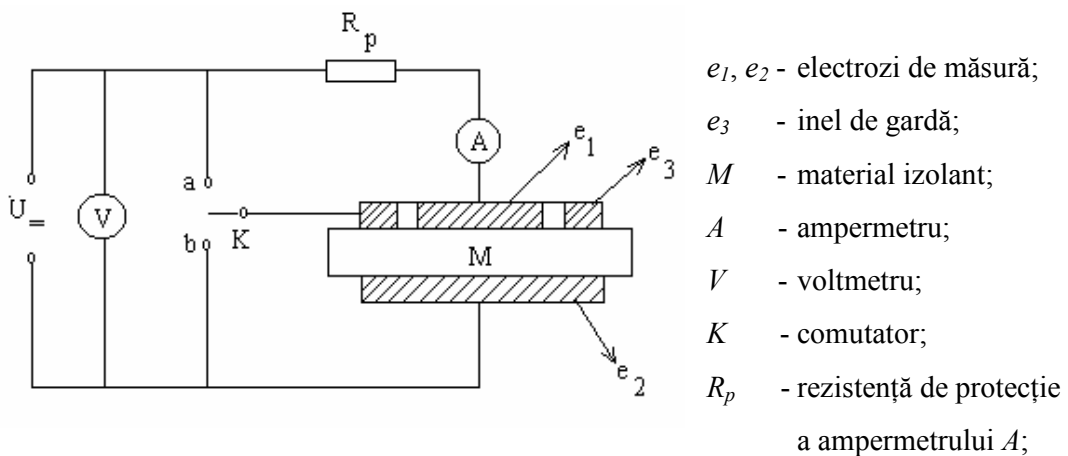


Figura 2. Schema de montaj folosita

Pentru a determina rezistivitatea de volum se închide comutatorul K pe poziția a . Se aplică tensiunea de încercare $U = 500$ V și, după un minut, se măsoară intensitatea curentului I_v care circulă prin volumul materialului, între electrozii e_1 și e_2 . În acest caz, e_3 este un inel de gardă care interceptează curenții de fugă pe suprafața materialului dirijându-i în afara circuitului de măsură. După măsurarea curentului I_v se întrerupe tensiunea și se trece comutatorul K pe poziția b în vederea determinării rezistivității de suprafață. Apoi, se aplică aceeași tensiune $U = 500$ V și (după un minut) se măsoară curentul I_t care este suma dintre curentul care circulă prin volumul materialului, între electrozii e_1 și e_2 și curentul care circulă pe la suprafața materialului, între electrozii e_1 și e_3 .

Rezistivitatea de volum se calculează cu relația

$$\rho_v = R_v \frac{S}{d},$$

unde $R_v = \frac{U}{I_v} - R_p$, reprezintă rezistența volumică, $S = \pi D_1^2 / 4$ - suprafața electrodului e_1 și d - grosimea eșantionului de măsură.

Rezistivitatea de suprafață se calculează cu relația

$$\rho_s = R_s \frac{P}{g},$$

unde $R_s = \frac{R_v R_t}{R_v - R_t}$ reprezintă rezistența de suprafață; $R_t = \frac{U}{I_t} - R_p$;

$$P = \pi D_m ; D_m = \frac{1}{2}(D_1 + D_3) \text{ (figura 3);}$$

$$g = \frac{1}{2}(D_3 - D_1).$$

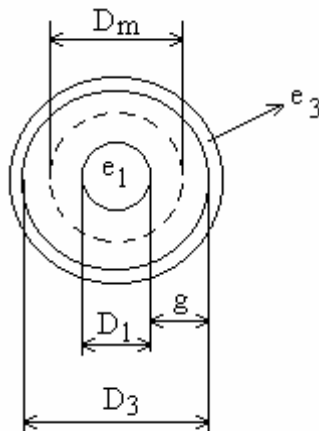


Figura 3. Notațiile dimensiunilor electrozilor

MATERIALE ELECTROTEHNICE

Notați rezultatele obținute în tabelul următor:

| Material izolant | d [mm] | U [V] | I_v [A] | R_v [Ω] | ρ_v [Ωm] | I_t [A] | R_t [Ω] | ρ_s [Ω] |
|------------------|----------|---------|-----------|--------------------|-------------------------------|-----------|--------------------|-----------------------|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

5. Verificarea rezultatelor

Tabelul 1 prezintă valorile rezistivității de volum ρ_v pentru câteva materiale izolante.

Tabelul 1. Valorile rezistivității ρ_v la 20°C și umiditate relativă 0%

| Material izolant | ρ_v [Ωm] |
|--|-------------------------------|
| Material stratificat pe bază de țesătură de sticlă | $10^{11} - 10^{12}$ |
| Material stratificat pe bază de celuloză | $10^8 - 10^9$ |
| PCV plastifiat | $10^9 - 10^{12}$ |
| PCV neplastifiat | $10^{11} - 10^{13}$ |
| Carton electrotehnic | $10^{11} - 10^{12}$ |
| Material stratificat pe bază de țesătură textilă | $10^9 - 10^{10}$ |
| Izolație mixtă | $10^{11} - 10^{12}$ |
| Azbest | $10^3 - 10^{11}$ |
| Micanită | $10^{11} - 10^{12}$ |
| Poliamidă (Nylon) | $10^{10} - 10^{11}$ |

5. Întrebări

- Care sunt valorile tipice ale rezistivității de volum pentru materialele izolante?
- De ce este necesar ca montajul să conțină un inel de gardă?
- Care este influența umidității și temperaturii asupra valorilor rezistivităților de volum și de suprafață?
- Întreține sau nu intensitatea câmpului electric aplicat materialului valorile rezistivităților de volum și de suprafață?

2. Rigiditatea dielectrică a materialelor electroizolante

1. Scopul lucrării

Scopul general al acestei lucrări este de a determina valorile rigidității dielectrice a materialelor electroizolante și de a pune în evidență fenomenul de conturnare și de străpungere a izolatoarelor.

2. Noțiuni teoretice

- *Străpungerea unui izolator*: pierderea bruscă a proprietății izolante a unui material supus unui câmp electric.
- *Rigiditatea dielectrică E_{str}* este valoarea maximă a intensității câmpului electric la care poate fi supus un izolator, fără apariția unei străpungeri.

Rigiditatea dielectrică a unui material poate varia cu mai multe ordine de mărime în funcție de utilizarea sa. În condiții de utilizare identice, nu rar se poate întâlni cazul când E_{str} poate varia de la simplu la dublu. Puritya, modul de fabricare, forma eșantionului și mediul înconjurător sunt numai câteva exemple ale cauzelor ce pot influența puternic E_{str} . Aceasta explică marile diferențe dintre valorile lui E_{str} determinate teoretic și cele determinate experimental. Pentru a determina rigiditatea dielectrică experimentală, încercările se derulează după proceduri bine definite pentru a garanta reprezentativitatea rezultatelor obținute. Aceste încercări pot fi împărțite în două clase:

- *Încercări asupra eșantionului*, în care se testează izolatorul însuși. Trebuie specificate forma eșantionului și a electrozilor precum și condițiile de mediu și forma de variație în timp a câmpului aplicat: câmp în trepte, câmp sinusoidal cu valoarea efectivă a intensității marită continuu, impulsuri de aceeași polaritate sau de polarități alternante etc. Aceste încercări se efectuează în laborator și ele servesc la controlul materiilor prime și la dezvoltarea lor tehnologică.

- *Încercări asupra instalației.* Aceste încercări se efectuează pentru a verifica faptul că în nici un punct al instalației izolația nu prezintă defecte sau nu este solicitată astfel încât să se producă o străpungere în timpul funcționării normale. Aceste încercări se rezumă la supunerea instalației, pentru un timp determinat, la o tensiune nominală U_0 multiplicată cu un factor superior lui 1. În mod curent se utilizează factorii 1,25 sau 2,5. Dacă izolația este sensibilă la descărcări parțiale, nivelul acestor descărcări va fi verificat, de exemplu la $1,25 U_0$.

Mecanismele responsabile de străpungerea izolatoarelor ne permit de a împărți străpunerile în două categorii: străpungeri *electrice* și străpungeri *termice*.

- *Străpungerea electrică* se definește ca străpungerea în declanșarea căreia efectul Joule, asociat unui curent ce precede descărcarea propriu-zisă, nu joacă nici un rol.
- *Străpungerea termică.* Pierderile dielectrice prin conducție și prin polarizare determină o degajare de căldură în izolatoare. Atât timp cât căldura astfel produsă este superioară celei pe care izolatorul o poate evacua, temperatura crește și, la un moment dat, se produce o străpungere numită *străpungere termică*.

3. Chestiuni de studiat

- 3.1. Determinarea rigidității dielectrice a unui eșantion din carton electrotehnic.
- 3.2. Determinarea rigidității dielectrice a unui eșantion din ulei mineral de transformator.
- 3.3. Studiarea fenomenului de conturare.

4. Determinări experimentale

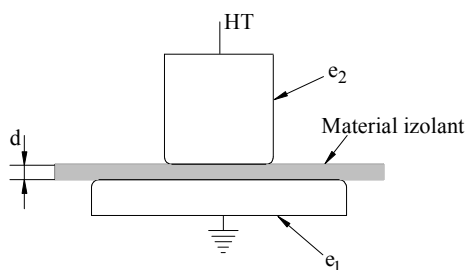


Figura 1. Sistemul de electrozi utilizat pentru străpungerea izolatoarelor solizi sub formă de plăci

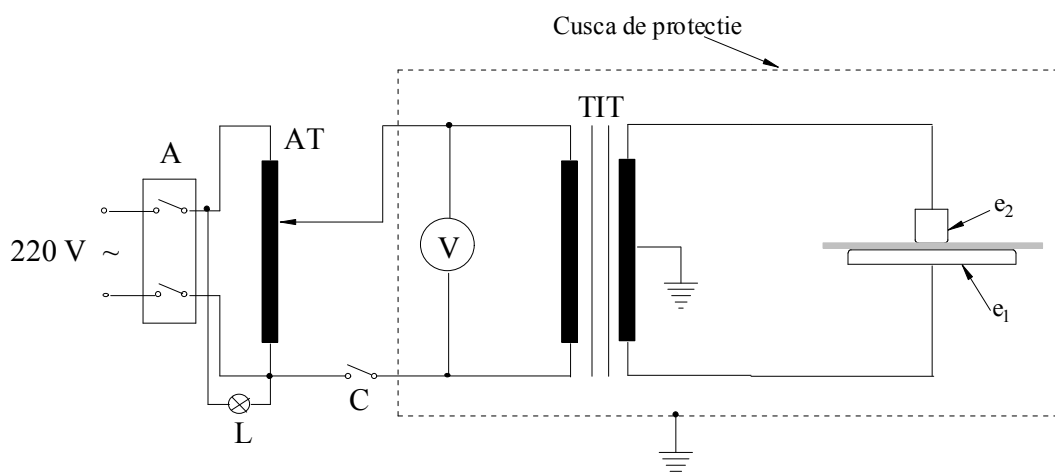
În figura 1 se prezintă sistemul de electrozi (e_1 – electrod plan, e_2 – electrod cilindric) utilizați pentru încercările pe eșantioane plane din izolatoare solizi.

Pentru încercările în câmp uniform, rigiditatea dielectrică se calculează cu relația următoare:

$$E_{str} = \frac{U_{str}}{d}, \quad (1)$$

unde U_{str} este tensiunea de străpungere, iar d este grosimea eșantionului.

Schema montajului utilizat este prezentată în figura 2.



- | | | | |
|-----|----------------------------|----|-------------------------|
| A | - întrerupător automat; | AT | - autotransformator; |
| THT | - transformator ridicător; | L | - lampa de semnalizare; |
| C | - contact de protecție; | V | - voltmetru. |

Figura 2. Schema montajului utilizat

Montajul conține un transformator ridicător de tensiune TIT care asigură o valoare maximă $U_{s,max} = U_{sn} = 60$ kV la bornele secundarului, pentru tensiunea nominală la bornele primarului $U_{pn} = 220$ V (la o frecvență de 50 Hz). Cu ajutorul unui voltmetru (V) se măsoară valorile tensiunii la bornele înfășurării primare U_{pi} și apoi, cunoscând raportul de transformare $k = U_{sn}/U_{pn} = 60000/220$ se determină tensiunea de străpungere a eșantionului, $U_{str,i} = kU_{pi}$.

Reglajul tensiunii aplicate între electrozi se face cu un autotransformator (AT) conectat la o sursă de tensiune sinusoidală $U = 220 \text{ V}$.

4.1. Determinarea rigidității dielectrice a cartonului electrotehnic

Determinarea rigidității dielectrice se face în conformitate cu standardele internaționale.

Eșantioanele din carton neîndoite au formă pătrată, de dimensiuni $300 \times 300 \text{ mm}$. Pentru încercările pe carton îndoit se utilizează același tip de eșantion iar îndoirea se face la 100 mm de marginea eșantionului (figura 3).

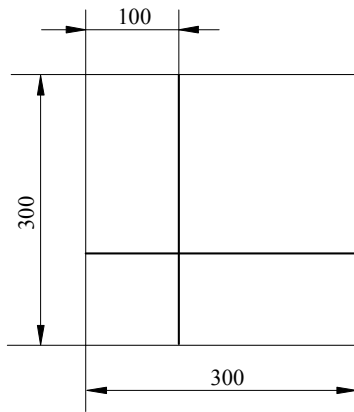


Figura 3. Eșantion din carton îndoit

După introducerea eșantionului între electrozii e_1 și e_2 (figura 2), se crește tensiunea electrică între electrozi cu o viteză constantă, astfel încât străpungerea se produce într-un interval de $10 - 20 \text{ s}$. Se efectuează $n \geq 5$ încercări succesive și se determină valorile U_{ci} (la care se produce străpungerea). Tensiunea medie de străpungere \bar{U}_{str} se calculează ca fiind media valorilor obținute în cele n încercări:

$$\bar{U}_{str} = \frac{\sum_{i=1}^n U_{str,i}}{n},$$

unde $U_{str,i}$ este valoarea tensiunii de străpungere la încercarea numărul i .

Se calculează, de asemenea, abaterea medie cu relația:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n |U_{str,i} - \bar{U}_{str}|}{n \cdot \bar{U}_{str}} \cdot 100.$$

4.2. *Determinarea rigidității dielectrice a uleiului mineral*

În vederea determinării rigidității dielectrice a uleiului mineral se utilizează un vas de porțelan cu doi electrozi din cupru în formă de calotă sferică (figura 4). Nivelul uleiului din vas trebuie să depășească nivelul electrozilor cu cel puțin 10 mm. Raza de curbură a electrozilor este $R = 25$ mm iar distanța dintre electrozi este $d = 2,5$ mm. Încercarea se face crescând tensiunea de la zero până când are loc străpungerea uleiului, cu o viteză constantă de maxim 2 kV/secundă.

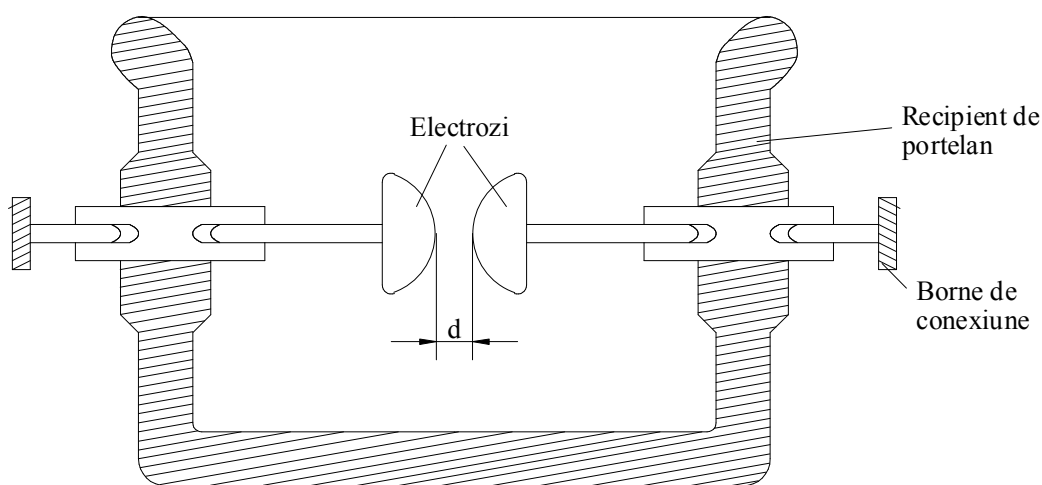


Figura 4. Vas pentru determinarea rigidității dielectrice a uleiului mineral

4.3. *Studierea fenomenului de conturnare*

Conturnarea este fenomenul de apariție a unei descărcări electrice (arc electric) între doi electrozi metalici în stratul gazos ce înconjoară suprafața izolatorului ce separă electrozii.

Pentru studiarea fenomenului de conturnare, între electrozii din figura 1 se introduce o placă de sticlă și se crește tensiunea de la zero până când se realizează conturnarea.

Notați rezultatele obținute în tabelul următor:

| Material izolant | d [mm] | U_{pi} [V] | $U_{str,i}$ [kV] | \bar{U}_{str} [kV] | \bar{E}_{str} [kV/mm] |
|---------------------|-------------|-----------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

5. Verificarea rezultatelor

În tabelul 1 se prezintă valorile aproximative ale rigidității dielectrice pentru materialele studiate. Figura 5 prezintă variația tensiunii de străpungere U_{str} în funcție de concentrația de apă din ulei, în timp ce figura 6 prezintă variația tensiunii U_c în funcție de temperatură.

Tabelul 1. Valorile rigidității dielectrice pentru materialele studiate
(la 50 Hz și 20 °C).

| Material izolant | Rigiditatea dielectrică E_{str} [kV/mm] |
|-------------------------------|---|
| Carton electrotehnic | 9 - 12 |
| Sticlă | 10 - 40 |
| Ulei mineral de transformator | >15 |

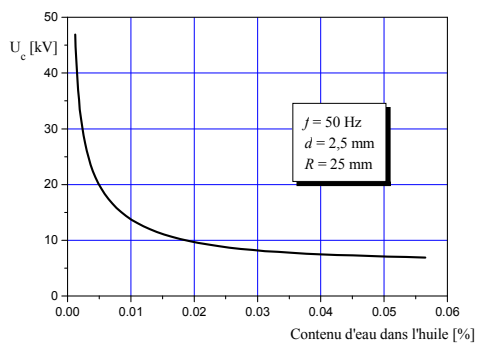


Figura 5. Variația tensiunii de străpunere în funcție de conținutul de apă din ulei

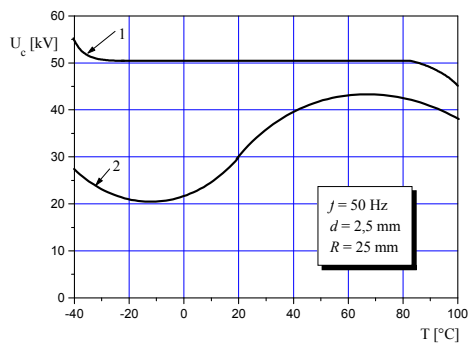


Figura 6. Variația tensiunii de străpunere în funcție de temperatură:
1 – ulei deshidratat; 2 – ulei nedeshidratat.

6. Întrebări

- Care sunt cauzele diferențelor dintre valorile determinate în laborator și cele prezentate în tabelul 1 ?
- De ce rigiditatea dielectrică a cartonului în regiunea îndoită este mai mică decât cea din regiunea neîndoită?
- Încercați să explicați alura curbelor prezentate în figurile 5 și 6 .

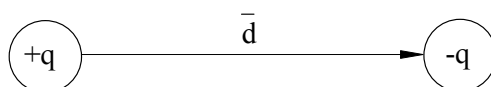
3. Permitivitatea relativă și factorul de pierderi dielectrice ale materialelor izolante solide

1. Scopul lucrării

Scopul general al acestei lucrări este de a studia mărimile fizice ce caracterizează fenomenul de polarizare electrică. Măsurătorile și calculele permit fixarea valorilor permitivității relative și a factorului de pierderi pentru câțiva dielectrice uzuali.

2. Noțiuni teoretice

- *Dipol electric*: un sistem de două sarcini punctuale $+q$ et $-q$ situate la o distanță \vec{d} .



- *Moment electric dipolar* \vec{p} :

$$\vec{p} = q\vec{d} \quad [\text{Cm}]. \quad (1)$$

- *Polarizație electrică*: mărime vectorială egală cu suma vectorială a momentelor electrice dipolare \vec{p}_i conținute în volumul infinit mic ΔV :

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_i (\vec{p}_i)_{\Delta V}}{\Delta V} \quad [\text{C/m}^2]. \quad (2)$$

- *Polarizație temporară*: polarizația indusă de intensitatea câmpului electric \vec{E} și care se anulează în absența sa. Legea polarizației temporare se scrie:

$$\vec{P}_t = \epsilon_0 \chi_e \vec{E}, \quad (3)$$

unde ϵ_0 este permitivitatea vidului ($\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m) și χ_e este susceptivitatea electrică.

- *Dielectric*: material a cărui proprietate electromagnetică fundamentală este de a se polariza sub acțiunea unui câmp electric.
- *Material polar*: material format din molecule care prezintă un moment electric spontan.

- *Material nepolar*: material format din molecule care nu prezintă un moment electric spontan.
- *Mecanisme de polarizare*:
 - * *polarizare electronică*: deplasarea relativă a norului electronic al unui atom în raport cu nucleul, sub efectul câmpului electric;
 - * *polarizare ionică*: deplasarea în sens contrar a ionilor de semn opus sub efectul unui câmp electric;
 - * *polarizare de orientare*: rotirea momentelor dipolare spontane ale particulelor constitutive sub efectul unui câmp electric.

Observație. Materialele neomogene pot prezenta în plus o polarizație suplimentară numită *polarizație de neomogenitate*.

- *Permitivitate relativă* ϵ_r : $\epsilon_r = 1 + \chi_e$ (4)

Utilizând ϵ_r , expresia lui \bar{P}_t devine:

$$\bar{P}_t = \epsilon_0(\epsilon_r - 1)\bar{E} \quad (5)$$

Din relația (5) se poate observa că ϵ_r exprimă ușurința cu care un material se poate polariza sub acțiunea unui câmp electric. Deci, un material care nu se polarizează are $\epsilon_r = 1$, în timp ce un material care se polarizează are $\epsilon_r > 1$. Cu cât ϵ_r este mai mare, cu atât polarizația materialului este mai mare.

În cazul câmpurilor electrice armonice, susceptivitatea electrică și permitivitatea relativă sunt mărimi complexe:

$$\underline{\epsilon}_r = 1 + \underline{\chi}_e = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (6)$$

unde ϵ'_r are aceeași semnificație fizică ca ϵ_r în câmp continuu, în timp ce ϵ''_r caracterizează pierderile dielectrice datorate polarizației electrice a materialului.

Valorile lui ϵ'_r depind de structura fizico-chimică a materialelor, de starea lor de agregare, de caracteristicile mediului ambiant, de câmpul electric etc. Astfel, valorile lui ϵ'_r pentru materiale polare sunt mai mari decât cele pentru materiale nepolare, gazele au $\epsilon'_r \approx 1$, iar materialele care prezintă o polarizație permanentă au ϵ'_r de ordinul sutelor (Tabelul 1).

Tabelul 1. Valori ale lui ε'_r pentru diferite materiale

| Materiale | | ε'_r | |
|-----------|-----------------|------------------|------------|
| Gaze | | ≈ 1 | |
| Lichide | nepolare | 1,5 ÷ 2,5 | |
| | polare | 2,5 ÷ 6 | |
| | puternic polare | zeci | |
| Solide | moleculare | nepolare | 2 ÷ 3 |
| | | polare | 3 ÷ 16 |
| | ionice | | 5 ÷ 13 |
| | semiconductori | | 8 ÷ 16 |
| | feroelectrice | | sute – mii |

- *Factor de pierderi dielectrice*

Utilizarea unui izolant în electrotehnică implică plasarea izolantului între două conductoare, ceea ce corespunde realizării unui condensator. Ar fi ideal ca izolatorul să asigure izolarea electrică perfectă a celor două conductoare unul față de celălalt, ceea ce ar corespunde realizării unui condensator ideal în care puterea disipată este nulă.

La aplicarea unei tensiuni sinusoidale condensatorului ideal, defazajul dintre curent și tensiune ar fi $\varphi = \frac{\pi}{2}$ (figura 1.a). În realitate, curentul care circulă în condensator are o componentă I_a în fază cu tensiunea \underline{U} (figura 1.b.), ceea ce corespunde unei disipări de putere în izolator. Această putere, în general nerecuperabilă, reprezintă *pierderile dielectrice*.

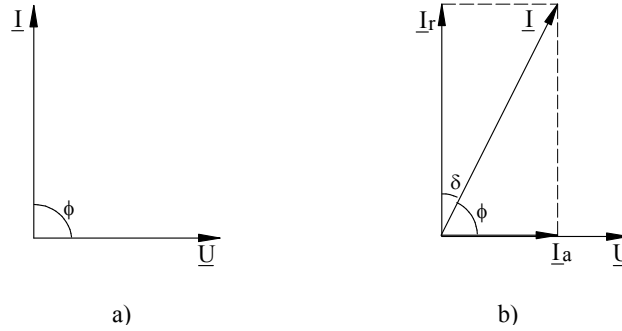


Figura 1. Defazaj curent – tensiune:
a) condensator ideal; b) condensator real.

Pierderile dielectrice se datorează fenomenelor de conducție electrică (efect Joule) și de polarizare electrică. Deci, pentru un condensator real, defazajul dintre curentul I și tensiunea U este $\varphi < \frac{\pi}{2}$. Complementul lui φ , notat cu δ ($\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi$), se numește unghi de pierderi dielectrice. Mărima $\text{tg } \delta$ se numește *factor de pierderi dielectrice* și caracterizează pierderile dielectrice dintr-un material izolant.

Factorul de pierderi are expresia:

$$\text{tg } \delta = \text{tg } \delta_h + \text{tg } \delta_c = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon_r' \omega} = \frac{P}{|Q|} = \frac{|I_a|}{|I_r|} \quad (7)$$

unde:

$$\text{tg } \delta_h = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad = \text{factor de pierderi prin histerezis dielectric (prin polarizare);}$$

$$\text{tg } \delta_c = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon_r' \omega} \quad = \text{factor de pierderi prin conducție electrică într-un izolator de conductivitate } \sigma, \text{ supus unui câmp electric de pulsație } \omega;$$

$$Q = -\omega C U^2 \quad = \text{puterea reactivă corespunzătoare condensatorului de capacitate } C \text{ supus unei tensiuni de valoare efectivă } U;$$

$$P = \omega C U^2 \text{tg } \delta \quad = \text{puterea reactivă disipată în izolant.}$$

Valorile factorului de pierderi $\text{tg } \delta$ (între 10^{-5} și 0,5), depind de structura fizico-chimică a materialelor, de caracteristicile mediului ambiant, de câmpul electric etc. În general, $\text{tg } \delta$ are valori mult mai mici pentru materialele nepolare care au o

conductivitate σ mica (polietilenă, polipropilenă, cuarț etc.), decât pentru materialele polare care au σ mare (PCV, poliamide etc.) (Tabelul 2).

3. Chestiuni de studiat

- 3.1. Determinați ε'_r și $\text{tg } \delta$ pentru câteva materiale izolante solide în formă de plăci.
- 3.2. Calculați $\text{tg } \delta_c$, $\text{tg } \delta_h$ și ε''_r pentru o polietilenă de conductivitate electrică cunoscută ($\sigma = 5 \cdot 10^{-17}$ S/m).

4. Determinări experimentale

Figura 2 prezintă montajul utilizat pentru efectuarea măsurătorilor experimentale.

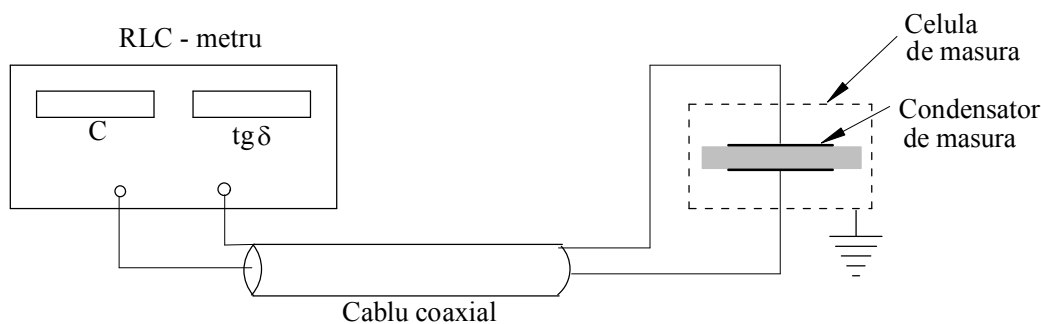


Figura 2. Schema de montaj utilizată pentru determinarea marimilor ε'_r și $\text{tg } \delta$.

Pentru a determina ε'_r a unui izolator trebuie măsurată capacitatea condensatorului care are ca dielectric izolatorul studiat.

Aparatul de măsură utilizat este un RLC-metru care indică pentru un condensator conectat la bornele sale capacitatea C_x și factorul de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$, la una din frecvențele 100 Hz sau 1 kHz.

Conexiunea între RLC-metru și condensatorul de măsură se face cu ajutorul unui cablu coaxial de capacitate cunoscută (C_c). În același timp cu capacitatea reală (C_r) a condensatorului care are ca dielectric izolatorul studiat, se masoară de asemenea capacitatea parazită a celulei de măsură $C_p = 43$ pF. Deci, la bornele RLC-metrului sunt trei condensatoare conectate în paralel: C_c , C_r and C_p (figura 3). Evident, C_x este capacitatea echivalentă acestor trei capacități: $C_x = C_c + C_r + C_p$.

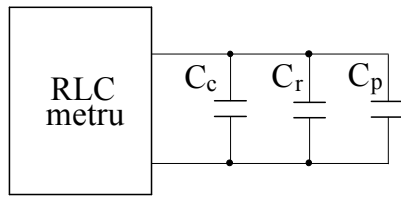


Figura 3. Schema echivalentă

Cu C_x măsurată, se calculează C_r :

$$C_r = C_x - C_c - C_p. \quad (8)$$

Cum C_r este capacitatea unui condensator plan,

$$C_r = \epsilon_0 \epsilon'_r \frac{A}{d}, \quad (9)$$

rezultă că: $\epsilon'_r = \frac{C_r}{C_0}, \quad (10)$

unde $C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d}$ reprezintă capacitatea condensatorului cu aer, având configurația geometrică identică cu cea a condensatorului care are ca dielectric materialul studiat, A – suprafața electrodului (de diametru $D = 10$ cm) și d – grosimea materialului studiat.

Notați rezultatele obținute în tabelul următor:

| Material izolant | Grosime d [mm] | Frecvența f [Hz] | C_x pF | C_r pF | C_o pF | ϵ'_r | $\text{tg } \delta$ | Obs. |
|------------------|------------------|--------------------|----------|----------|----------|---------------|---------------------|------|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

5. Verificarea rezultatelor

Tabelul 2 prezintă valorile experimentale ale mărimilor ϵ'_r și $\text{tg } \delta$ pentru câteva materiale izolante. În figurile 4 – 7 sunt prezentate variațiile mărimilor studiate în funcție de temperatură și de frecvența câmpului electric.

Tabelul 2. Valorile ϵ'_r și $\text{tg } \delta$ pentru câțiva izolatori uzuali

| Material izolant | ϵ'_r | $\text{tg } \delta$ |
|--|---------------|-----------------------|
| Carton electrotehnic | 3-5 | 10^{-2} |
| Micanită | 4-6 | 10^{-2} - 10^{-3} |
| Material stratificat pe bază de țesătura textil | 6 | 10^{-1} - 10^{-2} |
| Material stratificat pe bază de țesătură de sticlă | 4-6 | 10^{-1} - 10^{-2} |
| PCV plastifiat | 3-7 | 10^{-2} |
| Azbest | 6-20 | 10^{-1} |
| Rășină epoxidică | 4 | 10^{-3} |
| Material stratificat pe baza de celuloză | 6-7 | 10^{-1} - 10^{-2} |
| Polietilenă | 2-2,3 | 10^{-3} - 10^{-4} |
| Sticlă | 4-16 | 10^{-3} - 10^{-4} |

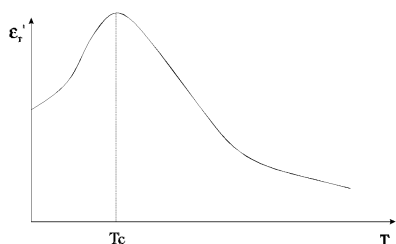


Figura 4. Variația lui ϵ'_r în funcție de temperatura.

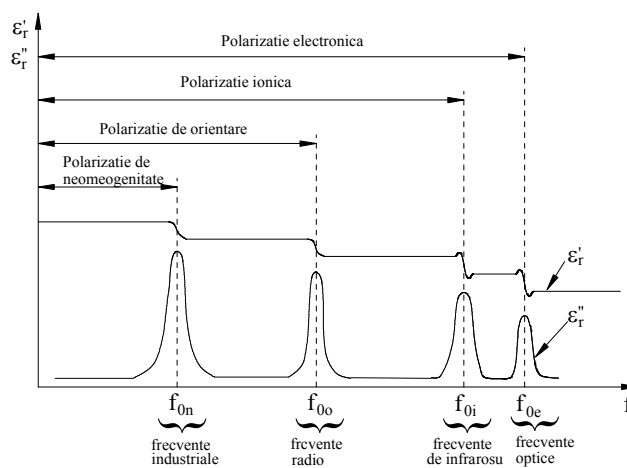


Figura 5. Variația lui ϵ'_r și ϵ''_r în funcție de frecvența câmpului electric.

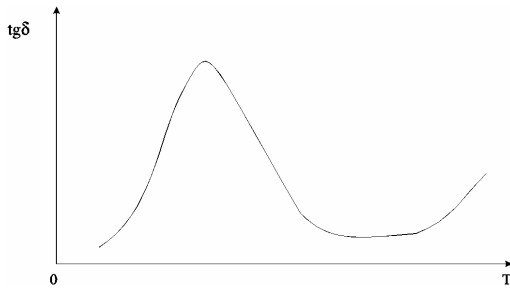


Figura 6. Variația factorului de pierderi $\text{tg } \delta$ în funcție de temperatură.

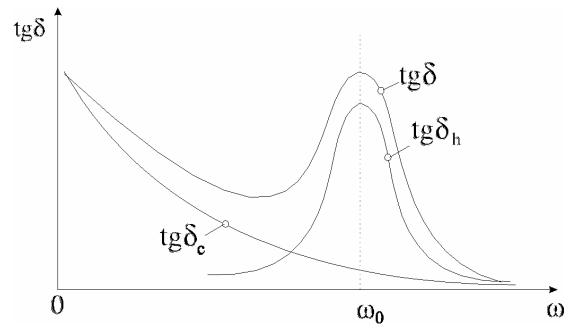


Figura 7. Variația factorului de pierderi $\text{tg } \delta$ în funcție de frecvență.

6. Întrebări

- Care este cauza diferențelor dintre valorile proprietăților dielectrice determinate în laborator și cele prezentate în tabelul 2?
- Care din materialele studiate pot fi utilizate în sistemele de izolație care funcționează la frecvențe înalte?
- De ce este necesară cunoașterea frecvențelor proprii (f_{ok}) ale materialelor?
- De ce materialele polare au valorile ϵ'_r și $\text{tg } \delta$ mai mari decât materialele nepolare?
- Care este valoarea lui ϵ'_r a unui material izolant supus unui câmp electric de frecvențe optice?

4. Parametri electrici ai materialelor semiconductoare

1. Scopul lucrării

Scopul general al acestei lucrări este de a determina tipul de conducție electrică în monocristale semiconductoare, variația conductivității lor electrice în funcție de temperatură și de concentrația de impurități și lărgimea benzii interzise Fermi.

2. Noțiuni teoretice

- *Semiconductori*: materiale care prezintă o conductivitate electrică σ în domeniul $10^{-6} - 10^5 \text{ Sm}^{-1}$, reprezentând, din acest punct de vedere, o categorie intermediară între conductori ($\sigma > 10^5 \text{ Sm}^{-1}$) și izolatori ($\sigma < 10^{-6} \text{ Sm}^{-1}$). Benzile de energie permise ale semiconductorilor sunt fie complet ocupate, fie complet goale (neocupate). La $T = 0 \text{ K}$, ultima bandă permisă situată sub *banda interzisă Fermi* (banda interzisă care conține nivelul Fermi w_F), numită *bandă de valență*, este complet ocupată, în timp ce prima bandă permisă situat deasupra benzii interzise Fermi, numită *bandă de conducție*, este goală (fără electroni). Banda interzisă Fermi are lărgimea mai mică de 2 eV.
- *Semiconductor intrinsec*: semiconductor pur, fără impurități (nedopat). Purtătorii de sarcină sunt obținuți exclusiv datorită tranzițiilor electronilor din banda de valență (bv) în banda de conducție (bc) (figura 1a) datorită energiei de agitație termică. Fiecare electron care efectuează o tranziție din bv în bc lasă un nivel vacant (neocupat) în bv . Acestui nivel vacant i se atribuie o particulă fictivă de sarcină pozitivă q_0 , numită *gol*. Deci electronii din bc și golurile din bv sunt purtătorii de sarcină într-un semiconductor intrinsec.
- *Semiconductor extrinsec*: se obține prin dopaj, adică prin adăugarea unui număr foarte mic de atomi de dopaj într-un semiconductor intrinsec.
 - *Semiconductor extrinsec de tip n*: atomii de dopaj au numărul de electroni de valență mai mare decât a atomului de bază (>4 pentru Si și Ge care au 4 electroni de valență). Atomii de fosfor, arseniu sau antimoniu au cinci electroni de valență, și ei sunt în mod curent folosiți ca dopanți în semiconductorii de tip n .

Acești atomi se numesc *donori* pentru că ei furnizează electroni în banda de conducție. Acești electroni reprezintă purtătorii de sarcină majoritari, pentru conducția extrinsecă de tip *n*.

- *Semiconductor extrinsec de tip p*: atomii de dopaj au numărul de electroni de valență mai mic decât a atomului de bază (<4 pentru Si și Ge). Atomii de bor, aluminiu, indiu sau galiu, au trei electroni de valență, și ei sunt în mod curent utilizați ca dopanți în semiconductorii de tip *p*. Acești atomi de dopaj poartă numele de *acceptori*, pentru că ei acceptă electroni în banda de valență, creând niveluri vacante (goluri) în aceasta din urmă. Golurile reprezintă purtătorii de sarcină majoritari, pentru conducția extrinsecă de tip *p*.

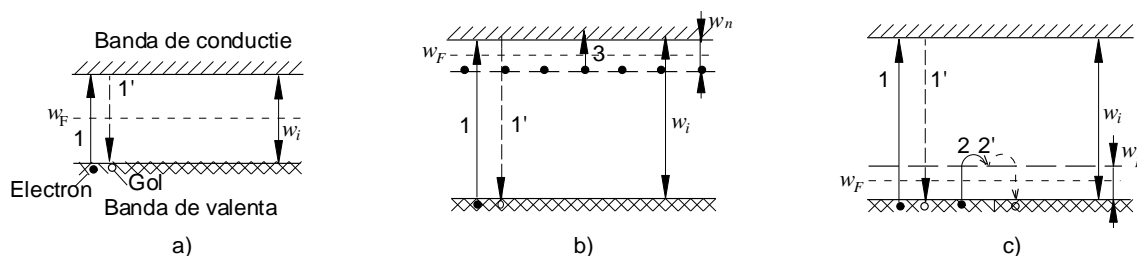


Figura 1. Tranziția electronilor și golurilor în semiconductorii intrinseci (a) și extrinseci (b – tip *n*, c – tip *p*)

3. Chestiuni de studiat

- 3.1. Determinați tipul de conducție electrică în monocristale de Si și Ge;
- 3.2. Determinați rezistivitatea electrică a semiconductorilor și concentrația de impurități.
- 3.3. Pentru un semiconductor de Ge, determinați lărgimea w_i a benzii interzise Fermi și variația rezistivității în funcție de temperatură.

4. Determinări experimentale

4.1. Tipul de conducție extrinsecă

Dispozitivul utilizat (figura 2) conține două sonde metalice, una la temperatura ambiantă (1), cealaltă încălzită la 200...400°C (2), și un microampermetru (4).

Metoda de determinare a tipului de conducție extrinsecă utilizează efectul

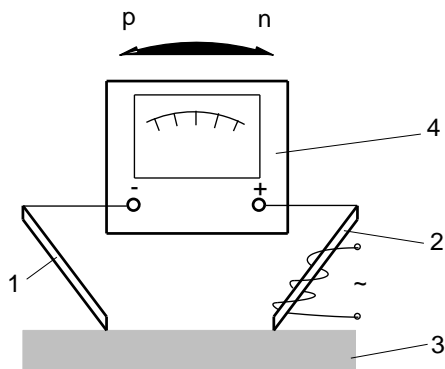


Figura 2. Dispozitiv utilizat pentru determinarea tipului de conducție extrinsecă: 1- sonda rece, 2- sonda caldă, 3- semiconductor, 4- microampermetru.

Seebeck, care constă în apariția unei tensiuni electromotoare între cele două sonde puse în contact cu suprafața cristalului (figura 2). În acest caz, dacă semiconductorul este de tip n , atunci un flux de electroni se va deplasa prin material, orientat de la electrodul cald către electrodul rece, ceea ce va determina apariția unui curent electric orientat de la borna (-) către borna (+) a ampermetrului. Pentru un

semiconductor de tip p , curentul datorat deplasării golurilor de la electrodul cald la electrodul rece, va fi orientat de la borna (+) la borna (-).

4.2. Rezistivitatea electrică

Pentru determinarea rezistivității unui monocristal semiconductor se utilizează metoda celor patru sonde (figura 3). Sondele, aliniate și distanțate la $s = 1,6 \text{ mm}$, sunt puse în contact cu suprafața semiconductorului. Se injectează curentul $I = 1 \dots 10 \text{ mA}$ cu ajutorul unui generator de curent conectat între sondele S_1 și S_4 și se măsoară tensiunea U între sondele S_2 și S_3 .

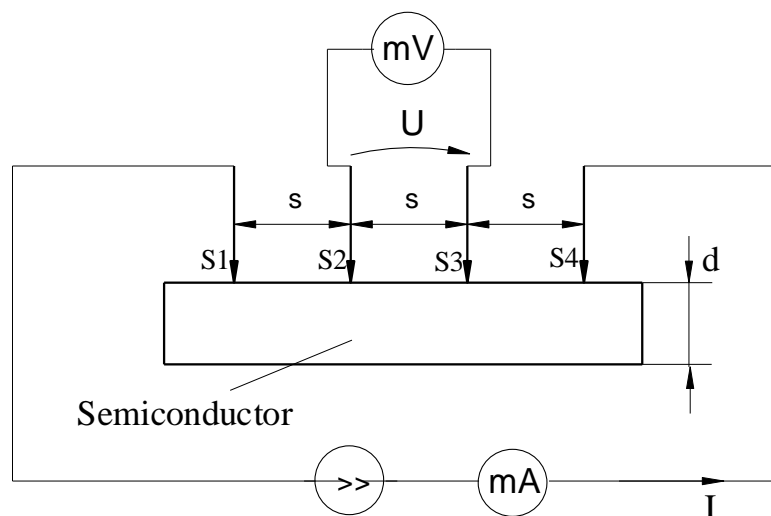


Figura 3. Prezentarea schematică a metodei celor patru sonde

Dacă grosimea eșantionului d și distanța dintre o sondă și marginea eșantionului sunt mai mari decât $3s$, atunci rezistivitatea se determină cu relația:

$$\rho = \frac{U}{I} 2\pi s. \tag{1}$$

Pentru determinarea rezistivității plachetelor semiconductoare omogene care au grosimi d mult mai mici ($200 - 400 \mu\text{m}$), cu $d \ll s$, se utilizează relația:

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{U}{I} \cdot d. \tag{2}$$

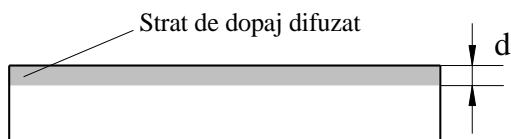


Figure 4. Plachetă semiconductoare cu strat de dopaj difuzat

În cazul straturilor de dopaj difuzate (figura 4), relația (2) – unde d reprezintă, în acest caz, grosimea stratului de dopaj – determină rezistivitatea medie. Rezistivitatea

stratului difuzat fiind cu 3 - 4 ordine de mărime mai mică decât rezistivitatea semiconductorului de bază, curentul circulă, practic, numai prin acest strat.

Concentrația de impurități se determină utilizând graficul prezentat în figura 5.

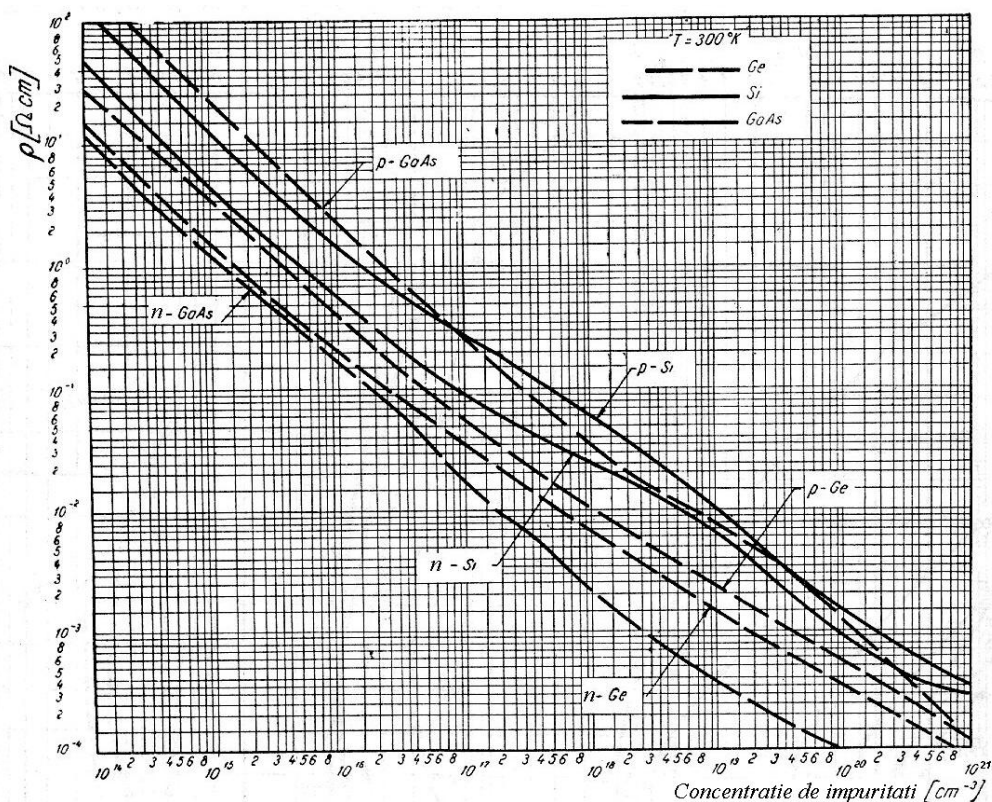


Figure 5. Variația $\rho = f$ (concentrația de impurități) pentru diferiți semiconductori extrinseci.

Notați rezultatele obținute în tabelul următor:

| Nr. eșant. | Semiconductor | Tip de conducție | U [mV] | I [mA] | ρ [Ωm] | Concentrația de impurități [m^{-3}] |
|------------|---------------|------------------|-------------|-------------|--------------------------------|--|
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

4.3. Variația rezistivității cu temperatura și determinarea lărgimii w_i a benzii interzise Fermi

Pentru o plachetă de Ge se va determina caracteristica $\rho(T)$ în domeniul $20\div 180^\circ\text{C}$. Pentru determinarea rezistivității, placheta de Ge și cele patru sonde sunt introduse în ulei silionic care va fi încălzit cu ajutorul unei rezistențe de încălzire.

Cu ajutorul a două valori ale rezistivității ρ' și ρ'' care corespund la două temperaturi T' și T'' (între 120°C și 180°C), se determină lărgimea benzii interzise Fermi w_i utilizând relația:

$$w_i = 2k \frac{(\ln \rho' - \ln \rho'')T'T''}{T'' - T'} \quad (3)$$

unde k reprezintă constanta lui Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K) și T – temperatura (exprimată în Kelvin). Pentru a exprima w_i în electron-Volti [eV] se utilizează relația: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J.

Notați rezultatele obținute în tabelul următor:

| T [K] | U [mV] | I [mA] | ρ [Ωm] |
|------------|-------------|-------------|--------------------------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

5. Verificarea rezultatelor

În figura 6 se prezintă curba de variație a rezistivității unui semiconductor extrinsec în funcție de temperatură. În această figură, T_s este temperatura la care toate nivelurile adiționale sunt ionizate și T_i este temperatura la care numărul de tranziții ale electronilor din banda de valență în banda de conducție devin neneglijabile. Pentru

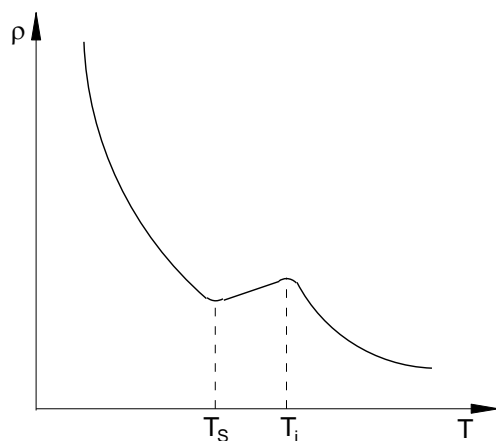


Figura 6. Variația $\rho = f(T)$ pentru un semiconductor extrinsec.

$T < T_s$, conducția extrinsecă este preponderentă, corespunzand elementelor de dopaj. In intervalul (T_s, T_i) toate nivelurile adiționale sunt ionizate și conducția intrinsecă este încă neglijabila în raport cu cea extrinsecă. Pentru $T > T_i$ conducția intrinsecă devine importantă și rezistivitatea are o descreștere exponențială.

Tabelul 1. Valorile rezistivității intrinseci ρ_i și a lărgimii benzii interzise Fermi w_i pentru siliciu și germaniu (determinată la $T = 300$ K)

| Material semiconductor | ρ_i [Ωm] | w_i [eV] |
|------------------------|----------------------------------|---------------|
| Siliciu | $(2,5-3) \cdot 10^3$ | 1,1 |
| Germaniu | 0,47 | 0,756 |

6. Întrebări

- Definiți un semiconductor intrinsec și un semiconductor extrinsec?
- Cum variază rezistivitatea unui semiconductor cu concentrația de elemente de dopaj?
- Explicați variația rezistivității unui semiconductor extrinsec cu temperatura.
- Cum se determină lărgimea benzii interzise Fermi folosind dependența $\rho(T)$ pentru un semiconductor intrinsec?

5. Proprietățile materialelor magnetic moi

1. Scopul lucrării

Scopul general al lucrării este de a determina experimental curba de primă magnetizare $B(H)$, curba $M(H)$, curba $\mu_r(H)$, inducția de saturație B_s , magnetizația de saturație M_s și valoarea maximă a permeabilității relative statice $\mu_{r\max}$ a materialelor magnetic moi în câmp continuu (caracteristici statice de magnetizare).

2. Noțiuni teoretice

- Mărimile ce caracterizează complet câmpul magnetic într-un corp sunt inducția magnetică \vec{B} [T] și intensitatea câmpului magnetic \vec{H} [A/m].
- Starea de magnetizare a unui corp este caracterizată în fiecare punct al corpului de *vectorul magnetizație* care reprezintă suma vectorială a momentelor magnetice \vec{m}_i (asociate particulelor magnetic polare) conținute în volumul infinit mic ΔV :

$$\vec{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_i (\vec{m}_i)_{\Delta V}}{\Delta V} \quad [\text{A/m}].$$

- Legătura dintre \vec{B} , \vec{H} și \vec{M} este exprimată de legea legăturii în câmp magnetic: $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$, unde $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m este permeabilitatea vidului.
- Magnetizația poate fi temporară (\vec{M}_t) sau permanentă (\vec{M}_p): $\vec{M} = \vec{M}_t + \vec{M}_p$.
- *Magnetizația temporară* este magnetizația indusă de intensitatea câmpului magnetic \vec{H} și care se anulează în absența sa. Legea magnetizației temporare se scrie:

$$\vec{M}_t = \chi_m \vec{H},$$

unde χ_m este susceptivitatea magnetică.

- *Magnetizația permanentă* este magnetizația care există chiar și în absența câmpului magnetic aplicat materialului.

- Curba $M(H)$ observată într-un câmp crescător prezintă un palier de saturație, pe care magnetizația rămâne constantă la o valoare $M = M_s$, pentru $H > H_s$, unde H_s este intensitatea câmpului magnetic de saturație (figura 1.b).
- Dependența $B(H)$ observată într-un câmp crescător într-un corp care nu a mai fost niciodată magnetizat se numește *curba de primă magnetizare*. Această curbă prezintă un palier de saturație, pe care inducția rămâne practic constantă la o valoare $B = B_s$, pentru $H > H_s$, unde H_s este intensitatea câmpului magnetic de saturație (figura 1.a). Într-un câmp descrescător, după magnetizare, dependența $B(H)$ se depărtează de curba de primă magnetizare, datorită caracterului ireversibil al magnetizării.
- *Permeabilitatea magnetică relativă statică* (μ_r): este definită de relația $\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}$.

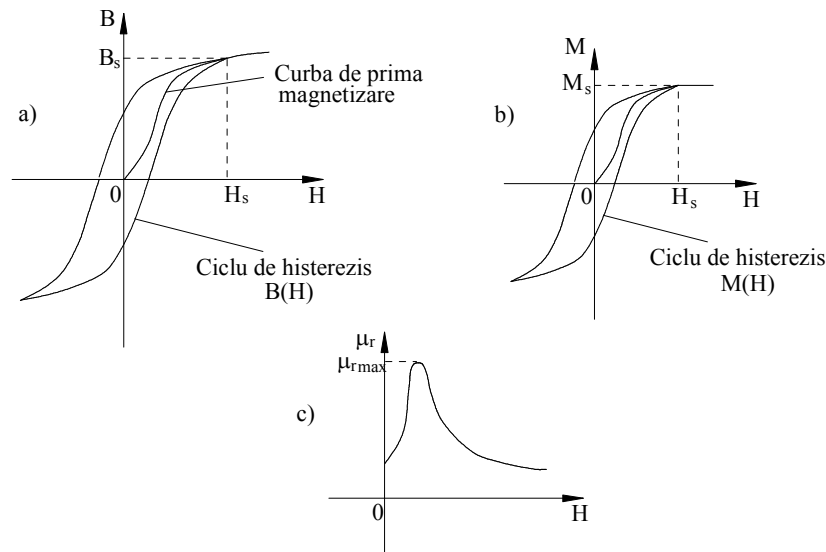


Figura 1. (a) Curba de primă magnetizare și ciclul de histerezis $B(H)$; (b) ciclul de histerezis $M(H)$; (c) dependența $\mu_r(H)$

- Într-un câmp magnetic alternativ, dependența $B(H)$ ia forma unui *ciclu de histerezis* (figura 1.a).
- Se numește *inducție remanentă* B_r , inducția care există în corp după ce câmpul magnetic H a scăzut la zero. Se numește *câmp coercitiv* H_c câmpul magnetic necesar pentru anularea inducției remanente. Inducția remanentă și câmpul coercitiv sunt proprietăți specifice materialului considerat. Ele figurează pe ciclul de histerezis de saturație.

- Se numesc *materiale magnetic moi* materialele care au câmpul coercitiv mic ($10^{-2} \div 10^2$ A/m). Materialele magnetic moi au valorile B_s și $\mu_{r_{\max}}$ ridicate (tabelul 1), și aria suprafeței ciclului lor de histerezis este mică.

3. Chestiuni de studiat

- 3.1. Determinați curba de primă magnetizare $B(H)$, curba $M(H)$, curba $\mu_r(H)$ pentru un material magnetic moale (aliaj fier siliciu, oțel și fontă) sub forma de bară.
- 3.2. Determinați inducția de saturație B_s , magnetizația de saturație M_s și valoarea maximă a permeabilității magnetice relative statice $\mu_{r_{\max}}$ pentru materialul studiat.

4. Determinări experimentale

Magnetizarea în câmp continuu a materialelor magnetic moi (sub forma de bare de secțiune patrată de 1 cm^2 și de lungime $l_{AB} = 20 \text{ cm}$) se realizează cu permeametrul Iliovici, a cărui schemă este prezentată în figura 2.

Pentru a determina curba de primă magnetizare trebuie mai întâi ca materialul să fie demagnetizat, lucru care se face în felul următor:

- Se introduce bara de studiu (marcată AB în figura 2) în permeamtru și se aplică un câmp magnetic puternic ($H = 200 \div 300 \text{ A/cm}$), prin creșterea curentului de magnetizare de la 0 la 2,5 A.
- Se reduce încet curentul până când el devine nul, rotind în același timp comutatorul inversor K cu aproximativ

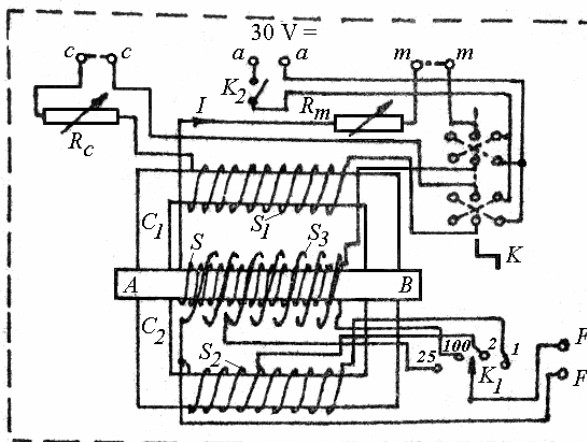


Figura 2. Schema permeametrului Iliovici

două rotații pe secundă. Astfel, se realizează magnetizări alternative caracterizate prin cicluri de histerezis (și, în consecință, prin inducții remanente) din ce în ce mai mici, până la demagnetizarea completă a barei.

- c) Se stabilesc valori crescătoare ale curentului I (Tabelul 1) și se masoară valorile inducției magnetice B .

Tabelul 1.

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|------|------|-----|------|-----|------|-----|-----|---|-----|---|-----|
| I [A] | 0,025 | 0,05 | 0,07 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,7 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
|-------|-------|------|------|-----|------|-----|------|-----|-----|---|-----|---|-----|

- c.1) Pentru fiecare valoare a curentului se efectueaza "compensarea" (anularea câmpului magnetic pe latura C_2) ceea ce permite calculul intensității câmpului magnetic cu ajutorul relației:

$$H = \frac{N_a}{l_{AB}} I, \quad (1)$$

unde N_a reprezintă numărul de spire ale bobinei de magnetizare. În condițiile

constructive ale permeametruului Iliovici utilizat, avem $\frac{N_a}{l_{AB}} = \frac{10^5}{4\pi}$ iar relația (1)

devine:

$$H = \frac{10^5}{4\pi} I \quad [\text{A/m}], \quad (2)$$

unde intensitatea curentului I este introdusă în Amperi.

- c.2) Pentru compensarea circuitului, se trece comutatorul K_I (figure 2) pe poziția 1 (sau 2) și apoi se rotește comutatorul K cu 180° . Dacă deviația fluxmetrului nu este nulă ($\alpha \neq 0$), compensarea nu este încă realizată și trebuie reglat curentul de compensare (prin intermediul lui R_c) până ce se obține $\alpha = 0$ (pentru o rotație cu 180° a comutatorului K).

- c.3) Pentru determinarea inducției B , se trece comutatorul K_I pe poziția $N = 25$ spire. Apoi, se rotește comutatorul K cu 180° și se notează deviația α a fluxmetrului. Se calculează inducția utilizând relația:

$$B = \frac{k_F}{2NA} \alpha, \quad (3)$$

unde A este aria suprafeței barei iar k_F este constanta fluxmetrului.

Pentru $A = 1 \text{ cm}^2$, $k_F = 10^{-4} \text{ Wb/div}$, și în cazul unei bobine de măsură care are $N = 25$ spire, se obține:

$$B = 0,02\alpha \quad [\text{T}]. \quad (4)$$

Notați rezultatele obținute în tabelul următor:

| Material magnetic | I [A] | H [A/m] | α [div] | B [T] | μ_r |
|-------------------|---------|-----------|----------------|---------|---------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Determinați B_s și $\mu_{r\max}$ utilizând curbele $B(H)$ și $\mu_r(H)$ obținute (vezi Figura 1).

5. Verificarea rezultatelor

Tabelul 2 prezintă valorile aproximative ale lui $\mu_{r\max}$, B_s și H_c pentru câteva materiale magnetice moi.

Tabelul 2. Valori aproximative ale mărimilor studiate

| Material magnetic | $\mu_{r \max}$ | B_s [T] | H_c [A/m] |
|--|----------------|-----------|-------------|
| Oțel | 2000 | 1,4 - 2 | < 2 000 |
| Aliaj Fe-Si | 8000 | 1,9 - 2 | 48 |
| Fontă lamelara | 700 | 1,2 | 240 |
| Permalloy (21,5% Fe, 78,5% Ni) | 100000 | 1 | 4 |
| Dynamax (32,7% Fe, 65% Ni, 2% Mo, 0,3% Mn) | 1530000 | 1,26 | 0,4 |

6. Întrebări

- Care este cauza diferențelor între valorile proprietăților magnetice determinate în laborator și cele prezentate în tabelul 2 ?
- Se pot utiliza materialele magnetice moi ca magneți permanenți?
- Ce se poate face pentru a obține în laborator o valoare mai precisă pentru $\mu_{r \max}$?
- Cum influențează prezența impurităților proprietățile materialelor magnetice moi?

6. Proprietățile feritelor magnetic moi

1. Scopul lucrării

Scopul general al acestei lucrări este de a determina principalele caracteristici ale feritelor magnetic moi: inducția de saturație B_s , temperatura Curie θ și dependența inducției de saturație B_s și a rezistivității electrice în funcție de temperatură ($\rho(T)$ și $B_s(T)$).

2. Noțiuni teoretice

- *Ferite magnetic moi*: materiale ferimagnetice moi realizate prin sinterizarea (la temperaturi înalte și la presiuni înalte) oxidului de fier (Fe_2O_3) cu oxizi de metale bivalente (Mn, Ni, Zn, Mg, Cu, Li etc.). În comparație cu materialele feromagnetice, feritele prezintă câteva avantaje:

- rezistivitate electrică ridicată, $\rho \in (0,1 \div 10^7) \Omega\text{m}$, ceea ce implică pierderi magnetice datorate curenților turbionari (Foucault) reduse;
- o rezistență mare la umiditatea din aer, ceea ce permite utilizarea lor în medii umede.

Totuși, feritele au câteva dezavantaje în comparație cu materialele feromagnetice:

- inducția de saturație este redusă ($B_s < 0,6 \text{ T}$);
- permeabilitate magnetică inițială mică;
- temperatura Curie joasă ($60 \dots 450^\circ\text{C}$).

Trebuie remarcat, de asemenea, că, din punct de vedere mecanic, feritele sunt dure (fiind fabricate numai prin rectificare cu pietre abrazive) și casante, având o rezistență redusă la șocuri.

- *Pierderi magnetice*: putere, în general nerecuperabilă, care se disipă într-un material magnetic plasat într-un câmp magnetic variabil în timp. Într-un câmp magnetic armonic există două componente ale pierderilor magnetice:

- Pierderi prin histerezis magnetic P_h :

$$P_h = f \eta B_{\max}^n V, \quad (1)$$

unde η este coeficientul lui Steinmetz, f – frecvența câmpului magnetic, B_{max} – amplitudinea inducției magnetice B , n – exponentul lui Steinmetz și V – volumul corpului magnetic. Valorile lui η și n depind de natura materialului. În practică, se consideră adesea $n \approx 2$.

➤ Pierderi prin curenți turbionari (Foucault) P_F :

$$P_F = \frac{\pi^2}{6\rho} \Delta^2 f^2 B_{max}^2 V, \quad (2)$$

unde ρ este rezistivitatea electrică și Δ - grosimea eșantionului.

- *Temperatura Curie*: temperatura peste care materialul magnetic (feromagnetic sau ferimagnetic) devine paramagnetic.

Având o rezistivitate ridicată (de semiconductori) față de materialele feromagnetice (care sunt conductoare), feritele au pierderi prin curenți turbionari foarte reduse. Această proprietate face ca feritele să fie recomandate a fi utilizate în domeniile frecvențelor înalte (10^3 - 10^9 Hz) : radiouri, televizoare, telecomunicații, comutații etc.

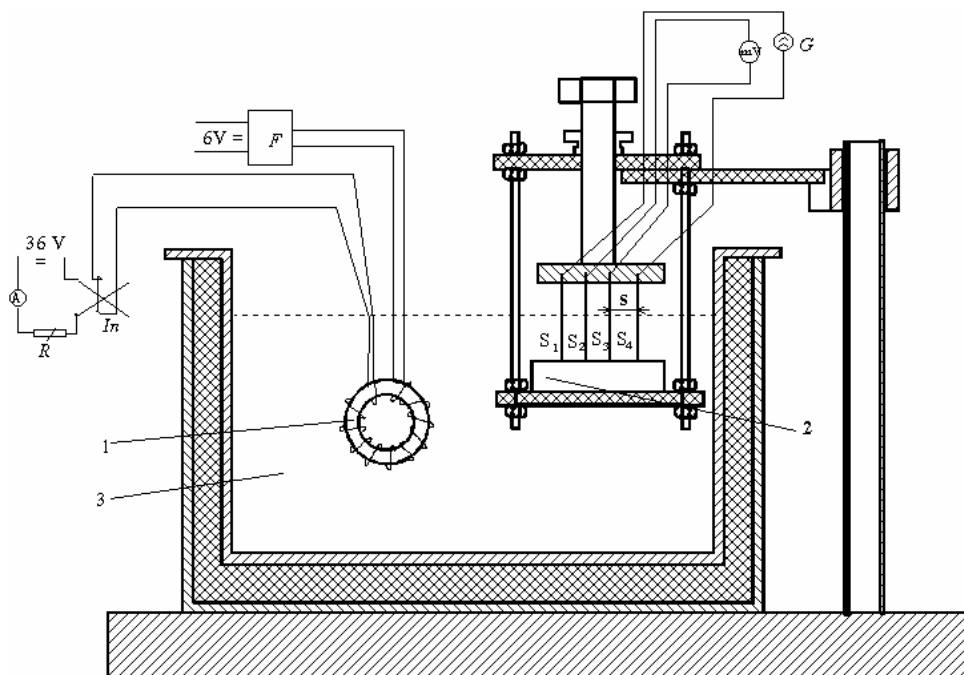
3. Chestiuni de studiat

- 3.1. Determinați inducția de saturație B_s , variația inducției de saturație în funcție de temperatură $B_s(T)$ și temperatura Curie θ pentru un tor de ferită MnZn.
- 3.2. Determinați dependența rezistivității electrice în funcție de temperatură pentru o ferită MnZn.

4. Determinări experimentale

Pentru a determina principalele caracteristici ale feritelor magnetice moi se utilizează montajul prezentat în figura 2. În incinta 3 există două ferite:

- O ferită de forma unui tor, pentru care se determină inducția de saturație B_s și variația lui B_s cu temperatura;
- o ferită sub forma literei "E" pentru care se determină variația rezistivității cu temperatura.



1 – tor de ferită;

2 – ferita “E”;

3 – incinta termostată;

F - fluxmetru;

A - ampermetru c.c. (0...2) A;

In - inversor;

G - generator de c.c. (2,5...10) mA;

mV - milivoltmetru de c.c. (0...1)V.

Figura 2. Schema de montaj utilizată.

Pentru a magnetiza torul până la saturație se crește câmpul magnetic H (prin creșterea curentului de magnetizare) până când inducția B rămâne practic constantă.

Variația fluxului magnetic în tor este realizată cu ajutorul inversorului In . Determinarea inducției B se face măsurând cu fluxmetrul variația de flux magnetic $\Delta\Phi$ datorată variației curentului de magnetizare de la $+I_m$ la $-I_m$:

$$\Delta\Phi = 2 N B S, \quad (3)$$

unde N este numărul de spire ale bobinei de măsură, B – inducția magnetică și S – aria secțiunii transversale ale torului de ferită.

Pe de o parte avem că:

$$\Delta\Phi = k_f \alpha, \quad (4)$$

unde k_f este constanta fluxmetrului și α este deviația măsurată la fluxmetru atunci când curentul de magnetizare variază între $+I_m$ și $-I_m$.

Ținând cont de relațiile (3) și (4) rezultă că:

$$B = \frac{k_F}{2 N S} \alpha = k_B \alpha . \quad (5)$$

Pentru a determina rezistivitatea feritelor se utilizează metoda celor patru sonde. Cele patru sonde în contact cu ferita de studiat sunt din wolfram și ele sunt paralele și echidistante, situate la o distanță $s = 1,6 \text{ mm}$.

Generatorul de curent G injectează un curent constant între sondele exterioare (S_1 și S_4). Ca urmare a trecerii curentului, între sondele interioare (S_2 și S_3) apare o tensiune U . Ținând cont că atât grosimea feritei cât și distanța dintre oricare sonda și marginea feritei sunt mai mari decât $3 s$, se calculează rezistivitatea electrică cu relația:

$$\rho = \frac{U}{I} 2\pi s . \quad (6)$$

Notați rezultatele obținute în tabelul următor:

| T [°C] | U [mV] | I [mA] | ρ [$\Omega \text{ m}$] | α [div.] | B_s [T] |
|----------|----------|----------|-------------------------------|-----------------|-----------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Temperatura Curie rezultă la intersecția curbei $B(T)$ cu axa OT (Figura 3).

5. Verificarea rezultatelor

Tabelul 1 prezintă valorile aproximative ale mărimilor B_s , ρ , și θ pentru câteva ferite magnetic moi, în timp ce figurile 3 și 4 reprezintă variațiile tipice ale lui B_s și ρ cu temperatura pentru aceste materiale.

Tabelul 1. Valori aproximative ale mărimilor B_s , ρ , et θ .

| Tip de ferită | B_s [T] | ρ [Ωm] | θ [$^{\circ}\text{C}$] |
|---------------|--------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Mn Zn | 0,25-0,5 | 0,1- 1 | 120-180 |
| Ni Zn | 0,2-0,4 | $10 - 10^6$ | 60-400 |
| Li Zn | 0,1-0,3 | $10-10^6$ | 200-500 |
| Mg Zn | 0,1-0,2 | 10^6-10^7 | 300-600 |
| Mg Mn | 0,1-0,2 | 10^6-10^7 | 300-600 |

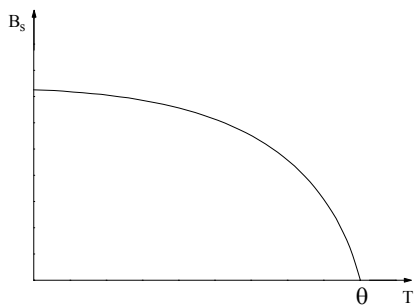


Figura 3. Variația inducției de saturație B_s în funcție de temperatura T , pentru o ferită moale.

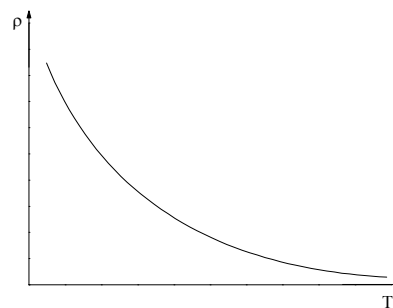


Figura 4. Variația rezistivității electrice ρ în funcție de temperatura T , pentru o ferită moale.

6. Întrebări

- Există diferențe între valorile mărimilor B_s , ρ , și θ determinate în laborator și cele prezentate în tabelul 1? În cazul unui răspuns afirmativ, cum explicați acest lucru?
- Ce puteți spune despre comportarea feritelor din punct de vedere al pierderilor magnetice?
- De ce este necesară cunoașterea temperaturii Curie θ și a caracteristicilor $B_s(T)$ și $\rho_s(T)$?

7. Proprietățile materialelor magnetic dure

1. Scopul lucrării

Scopul acestei lucrări este de a determina inducția remanentă B_r , câmpul coercitiv H_c , indicele de calitate $(BH)_{max}$ și curba de demagnetizare a magnetilor permanenți. Măsurătorile și calculele permit fixarea valorilor mărimilor fizice ce caracterizează magnetii permanenți.

2. Noțiuni teoretice

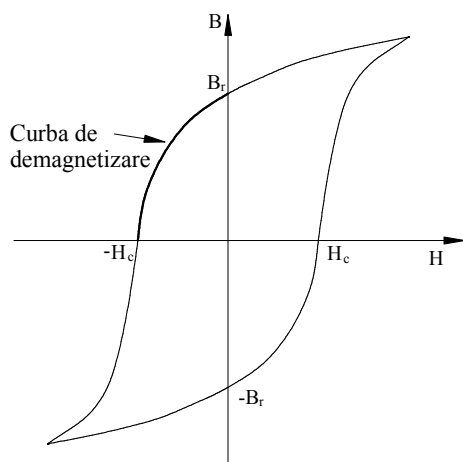


Figura 1. Ciclu de histerezis tipic al unui

- *Materiale magnetic dure* (magneți) : materiale care păstrează starea de magnetizare după anularea câmpului magnetizant. Ele au cicluri de histerezis mari (figura 1) și valori ridicate ale inducției remanente B_r , ale câmpului coercitiv H_c și indicelui de calitate $(BH)_{max}$.
- *Inducția remanentă B_r* : valoarea inducției magnetice care rămâne în eșantion pentru un câmp magnetic nul, după o magnetizare a magnetului până la saturație
- *Câmp coercitiv H_c* : intensitatea câmpului magnetic necesar pentru anularea inducției remanente B_r .
- *Indice de calitate $(BH)_{max}$* : valoarea maximă a densității volumice a energiei disipate în magnet. Indicele de calitate corespunde unui câmp H_L și unei inducții B_L care determină *punctul optim de funcționare al magnetului* (H_L, B_L). Acest punct poate fi determinat (cu aproximație) așa cum este arătat în figura 3.

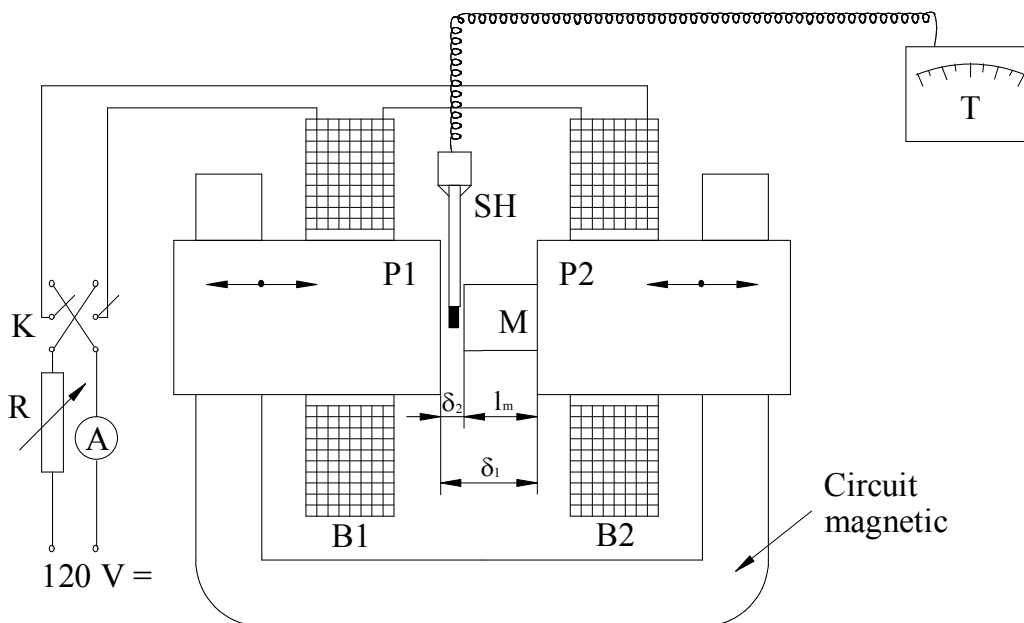
- *Curba de demagnetizare*: parte a ciclului de histerezis de saturație, situată între punctul $(0, B_r)$ și punctul $(-H_c, 0)$ (figura 1).

3. Chestiuni de studiat

- 3.1. Determinarea curbei de demagnetizare a unui magnet.
- 3.2. Determinarea inducției remanente B_r și a câmpului coercitiv H_c .
- 3.3. Determinarea indicelui de calitate $(BH)_{max}$ și a punctului optim de funcționare al unui magnet.

4. Determinări experimentale

Montajul utilizat pentru determinarea principalelor proprietăți ale magnetilor este prezentat în figura 2:



- | | | | |
|--------|-------------------|--------|----------------------|
| M | - magnet studiat; | SH | - sonda Hall ; |
| R | - reostat; | T | - teslametru; |
| K | - inversor; | A | - ampermetru; |
| P1, P2 | - poli magnetici; | B1, B2 | - bobine inductoare. |

Figura 2. Schema montajului utilizat.

Intensitatea câmpului magnetic H_m se determină cu relația:

$$H_m = \frac{\delta_2}{\mu_0 l_m} \left(B_{\delta_1} \frac{\delta_1}{\delta_2} - B_{\delta_2} \right), \quad (1)$$

unde B_{δ_1} este inducția în întrefierul de grosime δ_1 , B_{δ_2} – inducția în întrefierul de grosime δ_2 , $l_m = \delta_1 - \delta_2$ iar μ_0 - permeabilitatea magnetică absolută a vidului ($\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ H/m).

Pentru determinarea inducției magnetice a magnetului B_m se introduce sonda Hall în întrefierul δ_2 și se măsoară B_{δ_2} . Ținând cont de legea fluxului magnetic aplicată unei suprafețe S care trece prin magnet și prin întrefierul δ_2 (figura 2), rezultă că $B_m = B_{\delta_2}$.

Pentru a determina inducția remanentă trebuie mai întâi magnetizat magnetul până la saturație. Apoi se anulează câmpul magnetic și se obține inducția remanentă.

Saturația magnetului poate fi obținută fie prin creșterea continuă a curentului de magnetizare până când inducția magnetului nu mai crește, fie printr-o magnetizare în șocuri scurte de curent. A doua metodă, utilizată în cadrul acestei lucrări de laborator, constă în aplicarea unor șocuri de curent din ce în ce mai puternice, măsurând după fiecare șoc inducția corespunzătoare câmpului magnetic nul în magnet. Aceasta se repetă până când inducția măsurată nu mai crește. Ultima valoare măsurată reprezintă inducția remanentă.

O dată inducția remanentă determinată se pune inversorul K pe poziția de demagnetizare și reostatele circuitului de magnetizare pe poziția de rezistență maximă. Apoi se crește curentul I și se determină punctele (B_m, H_m) situate pe curba de demagnetizare.

Utilizând curba de demagnetizare se determină valorile mărimilor $(BH)_{max}$, H_L și B_L (figura 3).

Notați rezultatele în tabelul următor:

| Magnet | $B_m = B_{\delta}$ [T] | B_{δ} [T] | H_m [A/m] | $ B_m H_m $ [kJ/m ³] |
|--------|---------------------------|---------------------|----------------|---|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

5. Verificarea rezultatelor

Figura 3 prezinta curba tipica de demagnetizare si curba tipica $BH = f(H)$.

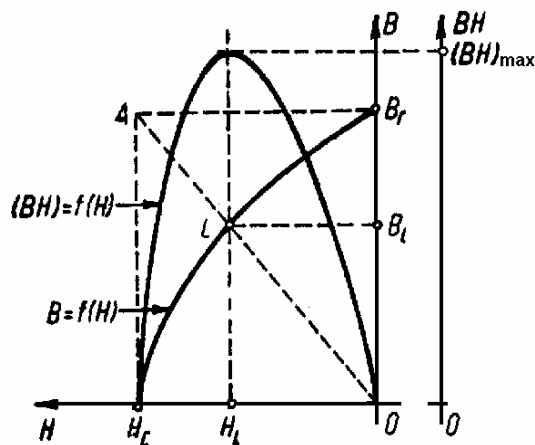


Figura 3. Curba tipica de demagnetizare și variația tipică $BH = f(H)$

În tabelul 1 sunt prezentate valorile mărimilor studiate pentru câțiva magneți utilizați în electrotehnică.

Tabelul 1. Valorile mărimilor B_r , H_c și $(BH)_{max}$

| Magnet | B_r [T] | H_c [kA/m] | $(BH)_{max}$ [kJ/m ³] |
|---|--------------|-----------------|--------------------------------------|
| Oțel martensitic | >0,8 | >4 | >1 |
| Oțeluri slab aliate | >1 | >5,6 | >2,2 |
| Magneți metalici AlNi | 0,5-1,25 | 20-90 | 5,5-24 |
| Magneți metalici AlNiCo | 0,6-1,4 | 20-90 | 6-40 |
| Ferite de Ba izotrope | >0,2 | >116 | >5,6 |
| Ferite de Ba anizotrope | >0,35 | >131 | >22,3 |
| Ferite de Ba plastoferite | >0,135 | >91 | >3 |
| Ferite de Sr izotrope | >0,21 | >90 | >6,7 |
| Ferite de Sr anizotrope | >0,36 | >223 | >23,9 |
| Magnet SmCo ₅ | 0,95 | 1800 | 180 |
| Magnet Sm ₂ Co ₁₇ | 1,07 | 1200 | 225 |
| Magnet Nd ₂ Fe ₁₄ B | 1,20 | 800 | 270 |
| Magnet Nd Fe B (a doua generație) | 1,30 | 1100 | 320 |

6. Întrebări

- Care sunt diferențele dintre magneți și materialele magnetice moi?
- Există diferențe între valorile mărimilor B_r , H_c și $(BH)_{max}$ determinate în laborator și cele prezentate în tabelul 1? În caz afirmativ, încercați să explicați care este cauza acestor diferențe.
- De ce este necesară cunoașterea curbei de demagnetizare și a valorilor B_r , H_c și $(BH)_{max}$?

8. Studiul fenomenului de histerezis dielectric

1. Scopul lucrării

Scopul general al acestei lucrări este de a pune în evidență fenomenul de histerezis dielectric și de a determina mărimile care îl caracterizează. De asemenea, se analizează diferența dintre dielectricii liniari și materialele feroelectrice. Măsurătorile și calculele efectuate permit fixarea valorilor pierderilor prin histerezis dielectric și ale permitivității relative pentru dielectrici liniari și pentru feroelectrici.

2. Noțiuni teoretice

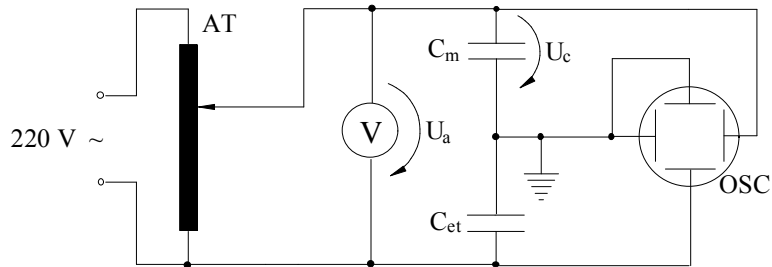
- *Histerezis dielectric*: întârzierea polarizației \bar{P} (și a inducției electrice \bar{D}) în raport cu intensitatea câmpului electric \bar{E} . Această întârziere este datorată timpului necesar ca dipolii asociați particulelor constitutive ale dielectricului să se orienteze sub acțiunea câmpului electric.
- *Material feroelectric*: material dielectric în care momentele dipolare sunt cuplate. Acest fenomen de cuplaj poartă numele de *feroelectricitate*. Prefixul fero a fost ales datorită numeroaselor analogii între aceste materiale și materialele feromagnetice. Materialele feroelectrice sunt caracterizate de o permitivitate relativă extrem de ridicată, de ordinul 10^3 și chiar 10^4 . Toate proprietățile lor electrice sunt foarte sensibile la temperatură. Comportamentul feroelectric dispare pentru valori ale temperaturii mai mari decât o anumită valoare numită temperatură Curie feroelectrică.

3. Chestiuni de studiat

- 3.1. Punerea în evidență a histerezisului dielectric și măsurarea defazajului δ_n între \bar{D} și \bar{E} pentru dielectrici liniari.
- 3.2. Vizualizarea ciclului $D(E)$ pentru dielectrici liniari și pentru materiale feroelectrice.

3.3. Determinarea pierderilor prin histerezis dielectric pentru materialele dielectrice studiate.

4. Determinări experimentale



AT - autotransformator; C_m - condensator de măsură;
 OSC - osciloscop; C_{et} - condensator etalon;
 V - voltmetru.

Figura 1. Schema de montaj utilizată.

Figura 1 prezintă montajul utilizat pentru efectuarea de măsurători experimentale. Pentru condensatorul de masură C_m , care este un condensator plan având ca dielectric materialul de studiat, sunt valabile următoarele relații:

$$E = U / d \quad (1)$$

și

$$D = Q / S, \quad (2)$$

unde E este intensitatea câmpului electric din dielectricul condensatorului C_m , U – tensiunea la bornele condensatorului C_m , D – inducția electrică, Q – sarcina condensatorului C_m , d – grosimea dielectricului și S – aria suprafeței unei armături.

În consecință, dependența $Q(U)$ va respecta aceeași lege ca $D(E)$ dar la o altă scară. Pentru a vizualiza ciclul de histerezis dielectric este suficient să se aplice o tensiune U_x proporțională cu U între plăcile verticale ale osciloscopului și o tensiune U_y proporțională cu $Q = \int idt$ (unde i este curentul din dielectricul condensatorului) între plăcile orizontale ale osciloscopului.

Condensatorul etalon de capacitate C_{et} și condensatorul de măsură de capacitate C_m , fiind conectate în serie, armăturile lor au aceeași sarcină Q . Prin urmare, tensiunea

U_{et} la bornele condensatorului C_{et} , aplicată de asemenea plăcilor verticale ale osciloscopului, este:

$$U_{et} = \frac{1}{C_{et}} \int idt = \frac{Q}{C_{et}} = U_y. \quad (3)$$

Această tensiune este proporțională cu Q și, deci, cu D .

Se alege $C_{et} \gg C_m$ astfel încât tensiunea la bornele condensatorului etalon să fie neglijabilă în raport cu tensiunea la bornele condensatorului de măsură. În acest caz se poate admite că tensiunea la bornele condensatorului de măsură U este aproape egală cu tensiunea sursei U_a .

Pentru a pune în evidență histerezisul dielectric, se vizualizează la osciloscop variațiile $U_x(t) = U(t)$ și $U_y(t) = U_{et}(t)$. Deoarece U_y este proporțional cu D și U_x este proporțional cu E , întârzierea (defazajul) lui U_y față de U_x reprezintă întârzierea lui D în raport cu E . Se masoară la osciloscop defazajul δ_h între D și E .

Apoi, se trece osciloscopul în mod XY și se vizualizează ciclul $U_y(U_x)$ care reprezintă ciclul $D(E)$ la o altă scară. Se notează valorile maxime U_{xm} și U_{ym} (în diviziuni).

Cu ajutorul mărimilor măsurate, se calculează valorile părților reale ε' și imaginare ε'' ale permitivității complexe $\underline{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon''$, factorul de pierderi $\text{tg } \delta_h$ și pierderile prin histerezis dielectric P_h , utilizând relațiile următoare:

$$E_m = \frac{U_m}{d} = \frac{U_{xm}}{d} \quad (4)$$

$$D_m = \frac{Q_m}{S} = \frac{C_{et} U_{ym}}{S} \quad (5)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_0 \varepsilon'_r = \frac{D_m}{E_m} \cos \delta_h \quad (6)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon_0 \varepsilon''_r = \frac{D_m}{E_m} \sin \delta_h \quad (7)$$

$$P_h = \omega \varepsilon'' E^2 S d \quad (8)$$

unde U_m , Q_m , E_m , D_m sunt valorile maxime ale mărimilor armonice (de pulsație ω) U , Q , E și D .

Notați rezultatele obținute în tabelul următor:

| Material dielectric | Grosime d [mm] | Frecvența f [Hz] | $\operatorname{tg} \delta_h$ | X_m [div] | E_m [V/m] | Y_m [div] | D_m [C/m ²] | ϵ'_r | ϵ''_r | P_h [W] |
|---------------------|------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------|---------------|----------------|--------------|
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

5. Verificarea rezultatelor

În figura 2 este prezentată elipsa $D(E)$ pentru un dielectric liniar, în timp ce în figura 3 se prezintă ciclul de histerezis $D(E)$ pentru un material ferroelectric.

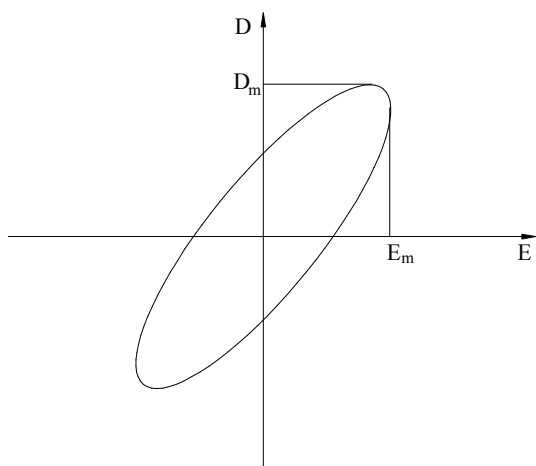


Figura 2. Elipsa $D(E)$ pentru un dielectric liniar.

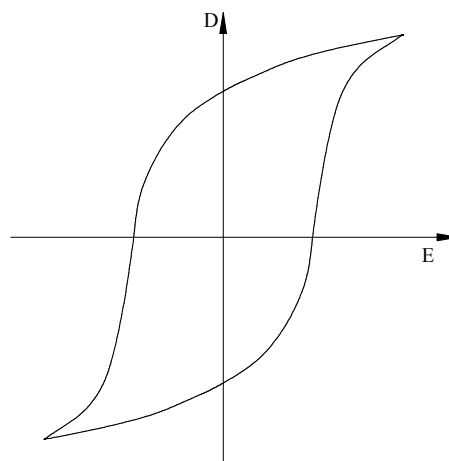


Figura 3. Ciclul de histerezis ferroelectric.

6. Întrebări

- Care este explicația neliniarității foarte pronunțate ale materialelor feroelectrice?
- De ce materialele feroelectrice au valori ale mărimilor ε_r' și $\text{tg } \delta$ superioare celor corespunzătoare materialelor dielectrice?

Bibliografie

1. A. Ifrim, P. Notingher, *Materiale electrotehnice*, Ed. Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1992.
2. A. Ifrim, V. Fireteanu, P. Notingher, D. Stanciu, *Indrumar de laborator de materiale electrotehnice*, Litografia IPB, 1985.
3. P. Notingher, I. Radu, *Materiale electrotehnice – Aplicatii*, Litografia IPB, 1992.
4. P. Robert, *Matériaux de l'électrotechnique*, Presses polytechniques romandes, Lausanne, 1989.
5. P. Brissonneau, *Magnétisme et matériaux magnétiques pour l'électrotechnique*, Ed. Hermès, Paris, 1997.
6. E. Burzo, *Magneti permanenti*, Editura Academiei, Bucuresti, 1986.
7. A. Nicula, F. Puskas, *Dielectrici si feroelectrici*, Ed. Scrisul Romanesc, Craiova, 1982.
8. M. Dragomirescu, P. Svasta, O. Dragomirescu, *Materiale si componente electronice – Indrumar de laborator*, Litografia IPB, 1973.
9. F. Ciuprina, P. Notingher, *Science des matériaux de l'électrotechnique – Travaux pratiques et exercices*, UPB, 2001