

Curs 7

7.1 Conducția electrică în metale

Teoria clasică a conducției electrice în metale a fost elaborată în 1900 de Drude, iar mai apoi a fost perfecționată de Lorentz în anul 1910. La baza acestei teorii stă ipoteza existenței *electronilor liberi* în interiorul metalelor. Prin electroni liberi se înțeleg electronii care nu sunt legați de nici un atom al rețelei cristaline și care se pot deplasa în interiorul acestuia pe distanțe relativ mari. Conform acestei teorii, în absența câmpului electric, electronii se mișcă haotic în toate direcțiile, datorită energiei lor termice. Când se aplică un câmp electric electronii liberi sunt supuși unei forțe $\vec{F} = q\vec{E}$ care le imprimă o mișcare direcționată cu o accelerația

$$a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m} \quad (7.1)$$

Dacă rețeaua cristalină ar fi rigidă și perfectă, electronii s-ar mișca accelerat printre ionii acesteia. Acest lucru nu este posibil deoarece, în realitate, *a.* ionii rețelei cristaline nu sunt rigizi ci execută mișcări de vibrație în jurul pozițiilor lor de echilibru și *b.* în metale există imperfecțiuni ale rețelei și impurități. Astfel, în mișcarea lor, electronii suferă ciocniri cu ionii rețelei cristaline și cu defectele din rețea. Se admite ca o ipoteză simplificatoare că la fiecare ciocnire electronul pierde energia acumulată între două ciocniri succesive. Astfel, dacă timpul dintre două ciocniri este τ , viteza înainte de ciocnire este

$$v = a\tau = \frac{qE}{m}\tau \quad (7.2)$$

în ipoteza că viteza inițială este zero. Electronul parcurge drumul dintre două ciocniri succesive cu o viteză medie (fig.7.1)

$$v_m = \frac{v_{\max}}{2} = \frac{qE}{2m}\tau = \mu E \quad (7.3)$$

numită **viteza de transport** (**viteza de deplasare ordonată** sau **viteza de drift**). Aici, coeficientul de proporționalitate μ este **mobilitatea electronului**

$$\mu = \frac{q\tau}{2m} \quad (7.4)$$

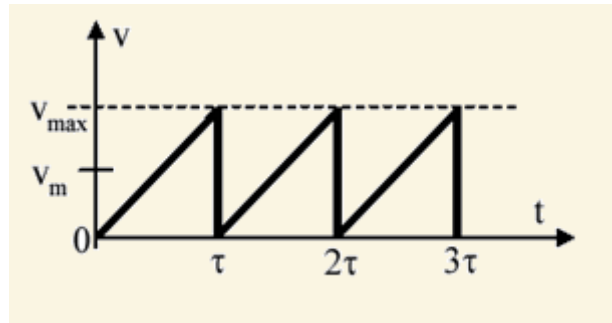


Fig.7.1 Variația vitezei electronului în raport cu timpul în procesul conducției electrice din metale.

Timpul mediu între două ciocniri este

$$\tau = \frac{\lambda}{v_T} \quad (7.5)$$

adică raportul dintre drumul liber mediu λ și viteza termică a electronului v_T . Viteza termică a electronilor poate fi estimată pornind de la formula obținută în cazul gazelor ideale:

$$v_T = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} \quad (7.6)$$

unde $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ este constanta lui Boltzmann, iar T este temperatura absolută a metalului. Atunci:

$$j = nqv_m = \frac{nq^2}{2m} \tau \cdot E = \frac{nq^2}{2m} \frac{\lambda}{v_T} \cdot E = \sigma \cdot E \quad (7.7)$$

sau sub forma vectorială

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (7.8)$$

unde

$$\sigma = \frac{nq^2}{2m} \frac{\lambda}{v_T} \quad (7.9)$$

reprezintă **conductivitatea conductorului**. Conductivitatea electrică este

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (7.10)$$

adică este inversul rezistivității electrice și este o constantă de material. Relația (7.8) poartă numele de **legea lui Ohm** și reprezintă forma locală

a legii lui Ohm macroscopice, $I = \frac{U}{R}$. Ea este valabilă nu numai pentru metale dar și pentru semiconductori. Dacă în cazul metalelor variația lui σ în funcție de temperatură este foarte mică; în cel al semiconducturilor această dependență este puternică datorită variației concentrației purtătorilor de sarcină cu temperatura.

În cele ce urmează vom arăta că relația (7.8) este într-adevăr legată de legea lui Ohm (macroscopică). Pentru aceasta considerăm un conductor omogen cu secțiunea S și lungimea l prin care circulă curentul de intensitate

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S} = \int_S \sigma \cdot \vec{E} d\vec{S} = \int_S \sigma \cdot E dS \quad (7.11)$$

Dacă la capetele conductorului este menținută o tensiune U , câmpul electric în interiorul conductorului va fi $E = \frac{U}{l}$ (conform relației (5.12), iar relația (7.11) devine

$$\begin{aligned} I &= \sigma \frac{U}{l} S \\ U &= \frac{l}{\sigma \cdot S} I \end{aligned} \quad (7.12)$$

Cunoscând că **rezistență electrică** a conductorului este

$$R = \frac{l}{\sigma \cdot S} = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (7.13)$$

relația (7.12) ia forma legii lui Ohm macroscopice, ceea ce era de demonstrat. Să menționăm faptul că **rezistență** electrică se măsoară în *ohmi* (Ω), unde $1 \Omega = [R]_{SI} = 1[V]/1[A]$, iar **rezistivitatea electrică** se măsoară în *ohm-metru* (Ωm).

Mărimea inversă rezistenței electrice este **conductanța**, G . Unitatea de măsură pentru conductanță este *Siemens-ul* [S] unde $1S = 1\Omega^{-1}$.

Rezistența electrică este o caracteristică generală a conductoarelor. Dacă un element de circuit are rezistența constantă, $R = U/I = \text{ct.}$, vorbim de **element de circuit liniar**. Dacă, în schimb, $R = R(U, I \text{ etc.})$, **elementul de circuit este neliniar**. În cazul elementelor neliniare, pentru un punct de pe caracteristica volt-amperică $U=U(I)$ se definesc **rezistența statică** ($R = u/i = \text{tg } \alpha$) și **rezistența dinamică** ($R_d = du/di = \text{tg } \beta$) (fig.8.3).

Rezistența statică este totdeauna pozitivă, în timp ce rezistența dinamică poate fi pozitivă, negativă sau nulă. Rezistorii cu caracteristici neliniare se folosesc în circuite de stabilizare a tensiunii și curentului, respectiv în amplificatoare și oscilatoare.

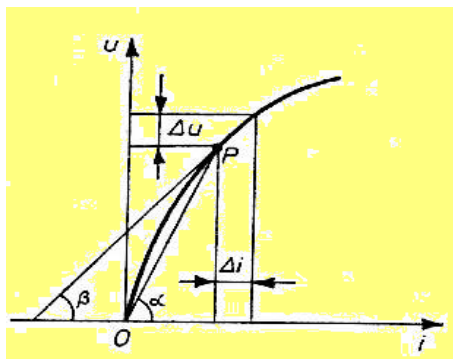


Fig.8.3 Rezistor neliniar.

Rezistența electrică se poate măsura *direct* (cu ohmmetrul), respectiv *indirect* (prin metoda volt-ampermetrică, cu punți de rezistențe etc.).

Menționăm faptul că rezistența, respectiv rezistivitatea unui conductor, sunt dependente de temperatură, solicitări mecanice, radiații, câmp magnetic, etc. Pentru metale, rezistivitatea ρ depinde de temperatură după legea

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha T) \quad (7.14)$$

unde ρ_0 este rezistivitatea la $T = 0^\circ \text{C}$, iar α este coeficientul de variație cu temperatura al rezistivității. Pentru metale $\alpha > 0$, iar pentru semiconductori $\alpha < 0$.

Elementul de circuit caracterizat prin rezistența R se numește **rezistor**, depinde de material (ρ) și de caracteristicile dimensionale (l , S) ale conductorului (vezi (7.13)) și se simbolizează conform figurii 7.2

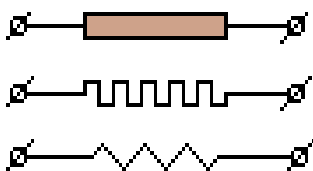


Fig.7.2 Simboluri utilizate pentru rezistența electrică.

Într-un conductor perfect, câmpul electric este zero și peste tot există același potențial. În conductoarele reale potențialul variază în interiorul acestuia. Totuși, se presupune că firul de cupru, folosit deseori în circuite, este aproape un conductor perfect și schimbările de potențial de-a lungul lui vor fi neglijate.

7.2 Tensiunea electromotoare

Fie circuitul electric din figura 7.3, alcătuit dintr-o sursă de curent (generator) G și o rezistență R . Pentru menținerea curentului electric în circuit este necesar ca purtătorii de sarcină să fie acționați de forțe care să le asigure deplasarea.

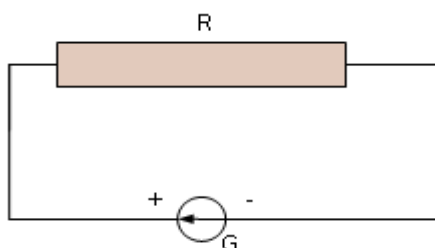


Fig.7.3 Schema unui circuit electric.

Sarcinile electrice transferă în mod continuu și ireversibil energia lor nodurilor rețelei cristaline prin efect Joule. Rezultă că sarcinilor trebuie să li se asigure o energie egală cu cea disipată în același interval de timp. Aceasta înseamnă că pentru deplasarea sarcinilor electrice asupra lor trebuie să acționeze forțele de natură electrostatică. Acestea sunt produse de sursa de t.e.m. din circuit care au simbolurile din figura 7.4. Ca exemple de surse de tensiune electromotoare sunt pilele electrice și acumulatele care transformă energia liberă prin diverse reacții chimice în energie electrică sau generatoarele convenționale care induc un câmp electric neconservativ prin varierea unui câmp magnetic.

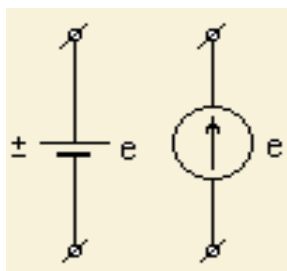


Fig.7.4 Simbolizarea surselor electrice.

Lucrul mecanic efectuat de sursa asupra sarcinii electrice de probă q este

$$L = \oint \vec{F} d\vec{l} = \oint q \vec{E} d\vec{l} = q \oint \vec{E} d\vec{l} \quad (7.15)$$

Prin definiție, **tensiunea electromotoare a unei surse (tem)** este lucrul mecanic efectuat de sursa de curent asupra unității de sarcină electrică de probă pentru a produce deplasarea acesteia de-a lungul întregului circuitului, adică

$$\varepsilon = \frac{L}{q} = \oint \vec{E} d\vec{l} \quad (7.16)$$

relație numită **legea circuitului electric**.

Ne reamintim că în capitolul anterior am definit **căderea de tensiune (diferența de potențial)** între 2 puncte prin relația

$$U_{12} = \frac{L_{12}}{q} = (V_1 - V_2) \quad (7.17)$$

Conform relației (7.17), relația (7.16) poate fi scrisă

$$\varepsilon = \frac{L}{q} = U + u = IR + Ir \quad (7.18)$$

Aici am notat cu ε **tensiunea electromotoare**, cu U **căderea de tensiune pe circuitul exterior** și cu u **căderea de tensiune în interiorul sursei**. Tensiunea electromotoare care acționează într-un circuit, t.e.m., este egală cu lucrul mecanic necesar pentru a deplasa unitatea de sarcină de-a lungul întregului circuit. Unitatea de măsură a tensiunii electromotoare, în SI, este voltul (V).

7.3 Transformarea energiei în procesul de conducție

Legea locală a transformării energiei în conductoare (într-un punct i) este

$$P_i = \vec{E} \vec{j} \quad (7.19)$$

comportă o explicație microscopică simplă. Asupra celor n particule conductoare din unitatea de volum, încărcate fiecare cu sarcina q , va

acționa forța electrică $\vec{F}_e = q\vec{E}$ determinând o densitate de curent $\vec{j} = nq\vec{v}$. Puterea cheltuită pentru deplasarea cu viteza \vec{v} a particulelor în unitatea de volum va fi

$$P_i = nF_e\vec{v} = nq\vec{E}\vec{v} = \vec{E} \cdot \vec{j} \quad (7.20)$$

și dacă se ține seama de legea conducției electrice se obține

$$P_i = (\rho\vec{j} - \vec{E}_i)\vec{j} = \rho j^2 - \vec{E}_i\vec{j} \quad (7.21)$$

în care primul termen reprezintă transformarea energiei în căldură prin *efect electrocaloric* sau *Joule-Lentz*, $P_R = \rho j^2 > 0$, iar ultimul termen se referă la energia primită sau cedată de sursă, $P_G = \vec{E}_i\vec{j}$. În cazul surselor care cedează energie, $P_G > 0$, iar cele care primesc energie, $P_G < 0$, situație similară încărcării acumulatorilor.

Pentru conductoare filiforme puterea disipată va fi

$$P = \int_V P_i dV = \int_V (\vec{j} \cdot \vec{E}) S d\vec{l} = \int_1^2 (\vec{S} \cdot \vec{j})(\vec{E} d\vec{l}) = UI = I^2 R \quad (7.22)$$

7.4 Acumulatorile electrice

O sursă de curent continuu constă din doi electrozi diferiți, de metal sau grafit, cufundați într-o soluție de electrolit și se numește *acumulator electric* sau *pilă electrică*. La suprafața de separație dintre electrod și electrolit apare un câmp electric imprimat, determinat de diferența dintre presiunea osmotică a ionilor din soluție și presiunea de dizolvare electrolitică a electrodului. În cazul *pilelor electrice*, reacțiile chimice prin care are loc transformarea energiei în energie electrică nu sunt reversibile, la schimbarea sensului curentului electric prin electrolit. Electrocul negativ este din zinc, iar prin funcționare trece în soluție. Ionii de hidrogen din soluție se depun pe electrodul pozitiv de cupru sau de cărbune, care nu ia parte la reacție, provocând fenomenul de polarizare prin schimbarea tensiunii de electrod. Pentru a preîntâmpina acest fenomen, se adaugă un depolarizant în jurul electrodului pozitiv.

Acumulatorile sunt caracterizate prin reacții chimice reversibile la schimbarea sensului curentului electric prin electrolit. Ele permit transformarea energiei chimice în energie electrică, dar și transformarea inversă în scopul stocării temporare de energie. În funcție de electrolit, acumulatorile pot fi acide, sau alcaline.

Acumulatorul este caracterizat prin capacitatea sa. Aceasta este dată de cantitatea de electricitate pe care o poate livra într-un regim dat, de regulă la descărcarea în 20 ore. Curentul de încărcare al acumulatorului influențează sensibil durata lui de viață. Se admite un curent de încărcare a acumulatorului de intensitate $I = 0,1 \cdot C [A]$ (unde C = capacitatea acumulatorului măsurată în $[Ah]$) pentru un interval de timp de 10 ore.

La acumulatori se definește *a.randamentul energetic*, ($\eta_w = 0.65 \div 0.83$) ca fiind raportul dintre energia cedată pe durata descărcării și cea primită la încărcarea acumulatorului, respectiv *b.randamentul cantității de electricitate*, ($\eta_E = 0.8 \div 0.9$), ce reprezintă raportul dintre sarcina electrică obținută la descărcare și cea furnizată acumulatorului la încărcare.

Acumulatorul acid conține un electrodul pozitiv acoperit cu bioxid de plumb, unul negativ din plumb pur și soluția apoasă electrolitică cu acid sulfuric. Pe durata descărcării se consumă acid sulfuric și se produce apă, deci concentrația electrolitului scade. La încărcare au loc reacțiile inverse. Concentrația electrolitului variază cu starea de încărcare a acumulatorului. Tensiunea maximă admisă pe acumulatori este, de regulă, cuprinsă între 13,8 și 14,4 V. În general se consideră că fiecare element al acumulatorului cu plumb dă o tensiune de $2V \pm 10\%$.

Acumulatorul alcalin poate fi de tip Fe-Ni, Cd-Ni, etc. și conține un electrolit bazic format dintr-o soluție de hidrat de potasiu. Deoarece la încărcare/descărcare, nichelul trece din starea bi în trivalentă sau invers (prin cedare/primire de electroni), concentrația electrolitului nu se modifică pe durată încărcării sau descărcării acumulatorului. Acumulatorii alcalini au o capacitate mai mică și o rezistență internă mai mare, fapt ce conduce la randamente mai scăzute decât al celor acide, ($\eta_w = 0.5 \div 0.6$, $\eta_E = 0.7 \div 0.8$). Ele sunt mai robuste, mai puțin pretențioase în exploatare și nu emană vapori toxici de acid sulfuric.

7.5 Circuite și rețele electrice.

Circuitul electric este un sistem de medii prin care poate trece curentul electric. *Rețeaua electrică* este constituită dintr-un ansamblu de circuite electrice conectate între ele într-un mod oarecare. Elementele unui circuit de curent continuu sunt *rezistoarele* și *sursele* de energie electrică. Elementele unei rețele electrice sunt *laturile*, *nodurile*, *ochiurile* (*bucle*, *contur*) (fig.7.5).

Într-o rețea, rezistoarele pot fi grupate serie sau paralel (Fig.7.6 a și b), în care caz, simplificarea calculelor circulațiilor de curenți și căderilor

de tensiune se poate realiza prin determinarea rezistențelor echivalente R ale grupelor, conform relațiilor

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i \quad (7.23)$$

pentru gruparea serie

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad (7.24)$$

pentru grupe paralel.

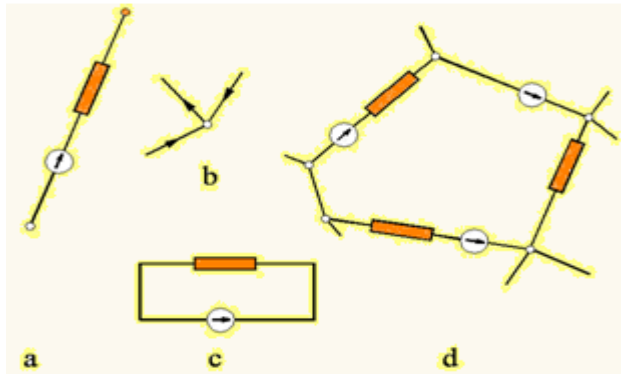


Fig.7.5 Elementele unei rețele electrice: a-latură, b-nod, c-circuit, d-ochi.

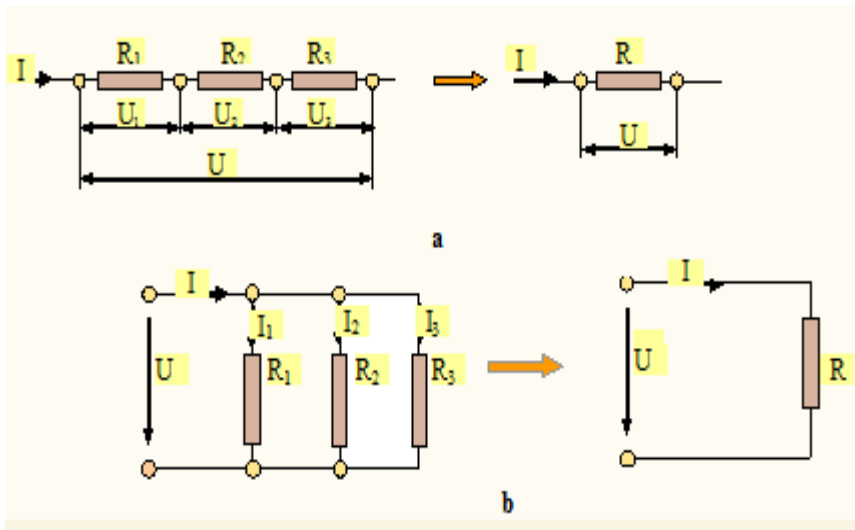


Fig.7.6 Gruparea rezistoarelor a.serie; b.paralel.

Analiza circuitelor de curent continuu se face cu ajutorul legilor lui Kirchhoff

$$\sum_{ni=1}^n I_i = 0 \quad (7.25)$$

$$\sum_{i=1}^m E_i = \sum_{j=1}^n U_j \quad (7.26)$$

Acestea reprezintă expresii ale legii conservării sarcinii electrice, respectiv a energiei electrice, pentru circuitele și rețelele electrice. Astfel, legea I-a lui Kirchhoff se referă la conservarea sarcinii electrice la un nod de circuit. Ea arată că suma curenților la un nod este nulă sau cu alte cuvinte că suma curenților ce intră într-un nod este egală cu suma curenților care ies din nod. Legea a II-a lui Kirchhoff se referă la conservarea energiei electrice pe un ochi de circuit. Ea ne arată că suma tensiunilor electromotoare pe un ochi de rețea este egală cu suma căderilor de tensiune pe acel ochi de rețea.

La analiza rețelelor de curent continuu se pune problema determinării curenților, rezistențelor și tensiunilor electromotoare din rețea cunoscând un număr dintre acestea. În primul rând trebuie să se estimeze numărul de necunoscute, iar apoi trebuie generate un număr de ecuații egal cu cel al necunoscutelor. Generarea ecuațiilor se realizează cu ajutorul ecuațiilor lui Kirchhoff. Fie un circuit cu n noduri și m ochiuri de circuit. Pentru a avea un sistem de ecuații independente, pe baza legii I-a lui Kirchhoff se pot scrie cel mult $n-1$ ecuații. Restul de ecuații necesare se va scrie folosind legea a II-a lui Kirchhoff, dar numărul lor nu poate depăși numărul ochiurilor rețelei, m .

Pentru a se asigura o modalitate omogenă de scriere a ecuațiilor trebuie stabilit un număr de *convenții arbitrare* care trebuie apoi respectate pentru fiecare ecuație în parte. Astfel, se alege a. un sens de parcurs arbitrar pentru ochiurile circuitului și b. un sens arbitrar pentru curenții și tensiunile electromotoare de pe circuit. În alegerea sensurilor curenților la un nod se are în vedere și fenomenul fizic urmărit, astfel ca la fiecare nod va trebui să existe cel puțin un curent ce iese din nod, dacă toți ceilalți intră în nod. Intensităților li se poate atribui semnul + dacă ele intră în nod și semnul - dacă ies din nod. Pentru scrierea ecuațiilor pe ochiurile circuitului se atribuie semnul + căderilor de tensiune și curenților al căror sens coincide cu sensul de parcurs pe acel ochi și semnul - celor ce sunt de sens contrar sensului de parcurs. Tensiunilor electromotoare li se atribuie semnul + sau - după cum sensul lor este identic sau opus sensului de parcurs pe circuitul considerat. Rezolvarea ecuațiilor conduce la obținerea valorilor curenților, tensiunilor, tensiunilor electromotoare și rezistențelor circuitului. Valorile

obținute pot avea sensul + sau – după cum ele au sau nu au sensul presupus inițial. Valorile pentru rezistențele electrice trebuie să fie pozitive.

7.6 Supraconductibilitatea

7.6.1 Fenomenul de supraconductibilitate

Supraconductibilitatea este un fenomen în care rezistența electrică a unui material conductor devine nulă atunci când temperatura sa este mai mică decât o anumită valoare specifică materialului, numită **temperatura critică**. Figura 7.7 prezintă variația conductibilității electrice cu temperatura pentru un conductor normal, respectiv pentru un supraconductor.

Fenomenul a fost observat pentru prima dată de olandezul H. Kamerlingh Onnes în 1911. Studiind dependența de temperatură a mercurului, el a observat că sub o anumită temperatură, apropiată de temperatura heliului lichid (4,2 K), rezistivitatea electrică scade brusc la zero. Pentru aceasta descoperire, H.K. Onnes a fost distins cu Premiul Nobel pentru Fizică în 1913. În deceniile următoare, supraconductibilitatea fost descoperită la mai multe alte materiale. În 1913, s-a descoperit că plumbul supraconduce la 7K, iar în 1941 a fost găsită nitru de niobiu ca fiind supraconductoare la 16K.

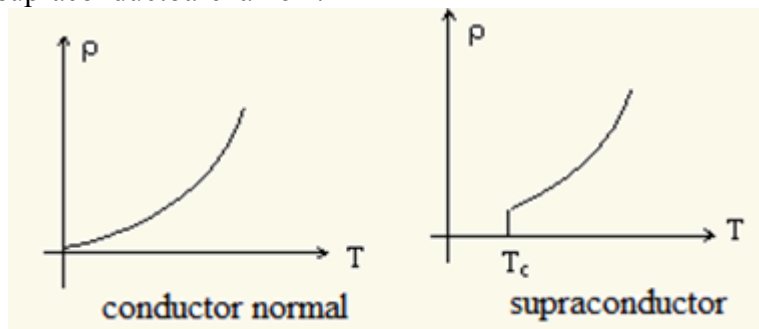


Fig.7.7 Variația conductibilității electrice cu temperatura pentru un conductor normal și pentru un supraconductor.

Pe baza acestui comportament, dacă într-un inel de material supraconductor se stabilește un curent electric, acesta se poate menține la infinit fără aplicarea niciunei tensiuni externe cu condiția ca temperatura să fie este menținută și să nu intervină câmpuri magnetice puternice.

S-a observat de asemenea că, dacă se aplică unui supraconductor un câmp magnetic, fenomenul de supraconductibilitate dispare la o anumită intensitate a câmpului, numită **intensitate (de câmp) critică**. Aceasta depinde de materialul supraconductorului și de temperatură.

Dacă densitatea de curent din supraconductor, depășește o anumită valoare numită ***densitate de curent critică***, supraconductibilitatea dispare.

Un alt fenomen observat la supraconductori îl constituie expulzarea de către aceștia a câmpului magnetic, fenomen numit ***efectul Meissner***.

Teoria microscopică a supraconductibilității a fost elaborată în 1957 de Bardeen, Cooper, și Schrieffer și poartă numele de teoria BCS. Pentru acest lucru, autorii au primit Premiul Nobel pentru Fizică în 1972.

Teoria BCS a explicat curentul supraconductor ca fiind un superfluid de ***perechi Cooper***. Perechile Cooper sunt perechi de electroni cu spinii opuși care interacționează prin schimbul de fononi. Perechile Cooper sunt particule de tip boson. Figura 7.8 prezintă deplasarea unei perechi Cooper în rețeaua de ioni pozitivi.

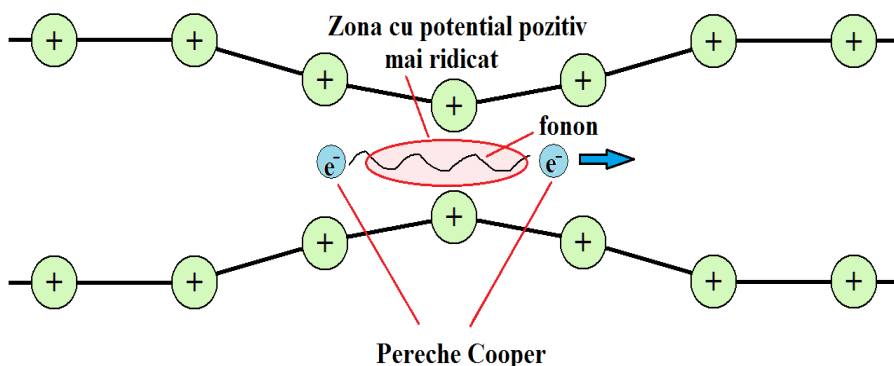


Fig.7.8 Deplasarea unei perechi Cooper în rețeaua de ioni pozitivi.

În 1962 B. Josephson a făcut importante predicții teoretice conform cărora un supracurent poate trece între două piese de supraconductor separate de un strat subțire de izolator. Predicția sa a fost confirmată mai târziu și i-a adus o parte din Premiul Nobel pentru Fizică din anul 1973. Acest efect tunel este cunoscut astăzi ca ***efectul Josephson*** și a fost aplicat la dispozitive electronice precum SQUID, dispozitiv capabil să detecteze cele mai slabe câmpuri magnetice.

În 1986, Bednorz și Mueller au descoperit supraconductibilitatea într-un material ceramic, perovskitul cuprat cu lantan, cu o temperatură critică de 35K (Premiul Nobel pentru Fizică, 1987). Descoperirea Bednorz și Mueller a fost una cu totul remarcabilă deoarece, în mod normal, materialele ceramice sunt izolatoare și nu conduc electricitatea, fapt pentru care cercetătorii nu le-au considerat potențiali supraconductori.

Apoi, o echipa de cercetători de la Universitatea Alabama-Huntsville a reușit să crească temperatura critică la 92K prin înlocuirea lantanului cu

ytriul și obținerea supraconductorul YBCO, primul supraconductor cu temperatura critică mai ridicată decât aceea a azotului lichid. În prezent, cea mai înaltă temperatură critică aparține cupratului de mercur cu thaliu, care conține Hg, Th, Ba, Ca, Cu și O.

Supraconductibilitatea apare deci într-o mare varietate de materiale: elemente simple (Sn, Al), aliaje metalice diferite, unii semiconductori puternic dopați, anumiți compuși ceramici. Supraconductorii ceramici sunt supraconductori de înaltă temperatură și sunt reprezentați în esență de câțiva cuprați. Ca o ciudațenie, să remarcăm faptul că supraconductibilitatea nu apare în metalele nobile (Au, Ag) sau în metalele feromagnetice (Fe, deși de fierul poate fi transformat într-un supraconductor prin supunerea acestuia la presiuni foarte mari).

Supraconductorii convenționali au, de obicei, temperaturi critice de 1-20 K. Mercurul solid, de exemplu, are o temperatură critică de 4.2K. Din 2001, cea mai mare temperatură critică găsită pentru un supraconductor convențional este aceea de 39K a borurii de magneziu (MgB_2). Supraconductorii ceramici (cuprați) pot avea temperaturi critice mult mai mari: $YBa_2Cu_3O_7$, unul dintre primii supraconductori cuprați descoperiți, are o temperatură critică de 92K, iar cuprații pe bază de mercur au temperaturi critice mai mari de 130K. Temperaturile critice pentru câteva substanțe uzuale sunt prezentate în tabelul 7.1.

Tabel 7.1 Temperaturi critice ale câtorva materiale supraconductoare.

Material	Element / Aliaj	Temperatura critica (°C)
Aluminiu	Element	-271,8
Cadmium	Element	-272,44
Plumb	Element	-265,8
Mercur	Element	-268,84
Niobiu	Element	-264,3
Toriu	Element	-271,63
Staniu	Element	-269,28
Titaniu	Element	-272,61
Uraniu	Element	-272
Zinc	Element	-272,09
Niobiu / Staniu	Element / Aliaj	-254,9

Ideal, pentru scopuri practice, un supraconductor ar trebui să funcționeze la temperatura camerei, sau cel puțin la o temperatură suficient de „ridică” încât să poată fi menținut în stare supraconductoare cu echipamente de răcire relativ ieftine.

7.6.2 Proprietățile elementare ale supraconductorilor

a.Rezistența electrică zero

Într-un conductor obișnuit, curentul electric constă dintr-un fluid de electroni care se deplasează printr-o rețea de ioni grei. Electronii se ciocnesc cu ionii din rețea, iar după fiecare coliziune electronii cedează rețelei o parte din energia transportată. În rețeaua de ioni energia este transformată în căldură (aceasta constituind, în esență, energia termică de vibrație a ionilor rețelei.) Ca rezultat, energia transportată de curent este disipată. Acesta proces produce *rezistența electrică* a conductorului.

Situația este diferită într-un supraconductor. Aici fluidul electronic nu este format din electroni individuali, ci din perechi de electroni cuplați, cunoscute sub numele de *perechi Cooper*. Această asociere a electronilor este cauzată de o forță de atracție între electronii produsă prin schimbul de fononi. Spectrul de energie al fluidului de perechi Cooper poate fi excitat dacă i se furnizează o anumită cantitate minimă de energie, ΔE . Prin urmare, dacă ΔE este mai mare decât energia termică din rețea (dată de kT , unde k = constanta lui Boltzmann și T = temperatura), fluidul nu va fi difuzat de rețea. Fluidul de perechi Cooper este astfel un superfluid, adică el poate curge fără disiparea energiei. Experimentele au demonstrat că, curenții generați în inelele superconductoare persistă ani de zile fără vreo degradare măsurabilă.

b.Efectul Meissner

Când un supraconductor este plasat într-un câmp magnetic slab, \vec{H} , câmpul este expulzat din materialul supraconductor (Fig.7.6), fenomen numit efectul Meissner. Acest efect a fost descoperit în 1933 de W.Meissner și R.Oschenfeld.

După cum se știe, un magnet care este deplasat pe lângă un conductor induce curent electric în acel conductor. Acest este principiul după care funcționează un generator electric. Într-un supraconductor însă, curentul indus imită câmpul magnetic care ar fi pătruns în mod normal în materialul supraconductor cauzând respingerea magnetului. Efectul Meissner poate fi atât de puternic încât produce levitația magnetului deasupra materialului supraconductor (fig.7.7).

De fapt câmpul magnetic pătrunde în supraconductor pe o distanță extrem de scurtă λ , numită *adâncimea de penetrare*, după care scade rapid la zero. Pentru majoritatea supraconductorilor, adâncimea de penetrare este

de ordinul 10^3 \AA . Efectul Meissner este considerat uneori cu “diamagnetismul perfect”. Totuși, el este diferit de diamagnetismul perfect deoarece un supraconductor expulzează toate câmpurile magnetice, nu numai pe cele variabile.

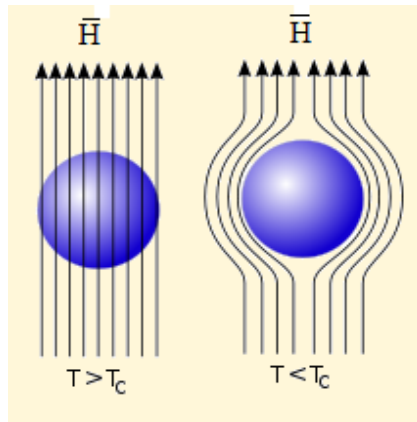


Fig.7.6 Expulzarea câmpului magnetic din materialul supraconductor.

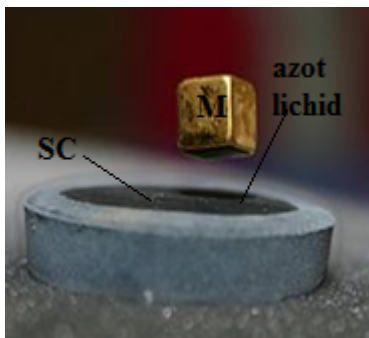


Fig.7.7 Magneți în levitație deasupra unor supraconductori răciți în azot lichid (M = magnet, SC = supraconductor).

Efectul Meissner dispare (indiferent de temperatură) atunci când câmpul magnetic aplicat depășește o anumită valoare critică. De fapt, prezența oricărui câmp magnetic în preajma supraconductoarelor tinde să scadă temperatura critică a acestora. Acest lucru este un inconvenient din punct de vedere practic, din moment ce curentul electric prin orice conductor produce un câmp magnetic.

Supraconductorii pot fi împărțiți în două clase după cum se produce această defecțiune (fig.7.8). În supraconductorii de tip I supraconductibilitatea dispare brusc atunci când puterea câmpului magnetic aplicat crește peste o valoare critică, H_c . În funcție de geometria probei, se poate obține o *stare intermediară* constând din zone de material

normale care transportă un câmp magnetic amestecat cu zone de material supraconductor care nu conțin niciun câmp. În supraconductorii de tip II, creșterea câmpului aplicat peste o valoare critică H_{c1} conduce la o stare mixtă, în care o cantitate tot mai mare de flux magnetic penetrează materialul, dar nu mai rămâne nicio rezistență la trecerea curentului electric atât timp cât curentul nu este prea mare. La un al doilea nivel de câmp critic H_{c2} , supraconductibilitatea dispare. Starea mixtă este de fapt cauzată de vârtejuri în superfluidul electronic, numite “fluxoni”, deoarece fluxul transportat de către aceste vârtejuri este cuantificat. Supraconductorii cei mai puri elementari (cu excepția niobiului) sunt de tip I, în timp ce aproape toți supraconductorii impuri și compuși sunt de tip II.

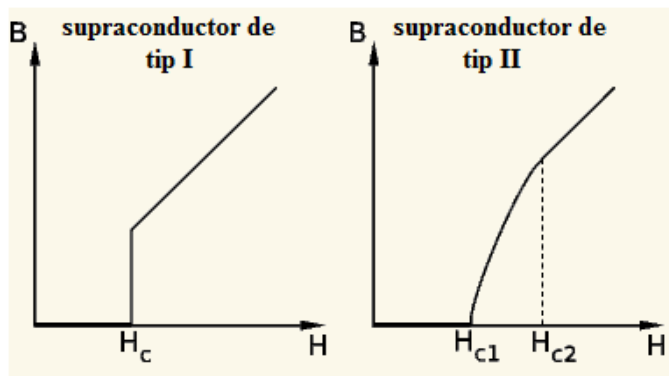


Fig.7.8 Variația câmpului magnetic intern (B) cu câmpul magnetic exterior (H) aplicat pentru supraconductorii de tip I și de tip II

c.Efectul Josephson

Efectul Josephson se manifestă prin apariția unui curent electric, prin efectul tunel, printr-o joncțiune Josephson. Joncțiune Josephson este formată din doi supraconductori separați de un strat subțire izolator (fig.7.9). Acest efect a fost prezis de fizicianul britanic B.D.Josephson în 1962 și demonstrat experimental un an mai târziu de Anderson și Rowell. Descoperirea a adus lui Josephson Premiul Nobel pentru fizică în 1973.

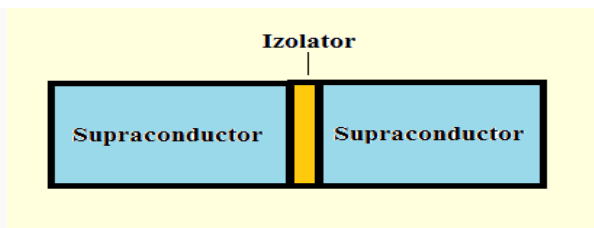


Fig.7.9 O joncțiune Josephson.

Curentul electric în supraconductori nu este rezultatul deplasării ordonate a electronilor ca în cazul conducției electrice normale, ci este rezultatul deplasării perechilor Cooper de electroni. Când cei doi supraconductori sunt separați printr-un strat subțire de material izolator sau metal nesupraconductor (cu grosime de ordinul câtorva nanometri), perechile Cooper pot traversa bariera printr-un cuantic numit efectul tunel. Chiar dacă perechile Cooper nu pot exista într-un izolator sau un metal nesupraconductor, când stratul ce separă cei doi supraconductori este suficient de subțire, ei îl pot traversa. Ecuațiile de bază care descriu dinamica efectului Josephson sunt:

$$U(t) = \frac{\hbar}{2e} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (7.27)$$

și

$$I(t) = I_c \sin(\phi(t)) \quad (7.28)$$

unde $U(t)$ și sunt tensiunea și curentul unei joncțiuni Josephson, $\Phi(t)$ este diferența de fază dintre funcțiile de undă ale celor doi supraconductori ce formează joncțiunea, e este sarcina electronului, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ unde h este constanta lui Planck, iar I_c este *curentul critical* joncțiunii. Curentul critic I_c este un parametru experimental important al dispozitivului care depinde atât de temperatură cât și de câmpul magnetic aplicat. Constanta fizică $\frac{\hbar}{2e}$ reprezintă o *cuantă de flux magnetic*, iar inversul ei este constanta lui Josephson.

Se pot distinge două tipuri de efecte Josephson:

a.Efectul Josephson în curent continuu (în engleză *D.C. Josephson effect*). Curentul continuu trece prin joncțiunea Josephson prin efect tunel fără a se realiza o cădere de tensiune pe joncțiune.

b.Efectul Josephson în curent alternativ (în engleză *A.C. Josephson effect*). Prin aplicarea unei tensiuni de curent alternativ pe joncțiunea Josephson aceasta emite un fascicul de fotoni cu respectarea relației de conservare a energiei sub forma

$$h\nu = 2eU \quad (7.29)$$

care constituie o dovadă a faptului că în supraconductori conducția electrică se realizează prin perechi Cooper și nu prin electroni.

Efectul Josephson a permis realizarea unor dispozitive de detectare a câmpurilor magnetice de valori foarte mici de ordinul fT (*femto*Tesla, 10^{-15} T), numite SQUID sau dispozitive supraconductoare cu interferență cuantică (în engleză *superconducting quantum interference device*) folosite în principal în medicină pentru detectarea câmpurilor magnetice extrem de slabe generate de activitatea electrică a unor organe din corpul uman.

7.3.3 Aplicații ale fenomenului de supraconductibilitate

1. Magneți supraconductori - magneții de direcționare a fasciculelor în acceleratoare de particule, magneții pentru trenurile MAGLEV

2. Bobine realizate din materiale supraconductoare, care pot genera câmpuri magnetice cu valori de 6-14 T la temperatura He lichid. În criostate performante, utilizând supraconductori de temperatură joasă se pot atinge valori de peste 20 Tesla.

3. Transport de energie - cablurile de transmisie a energiei electrice

4. Biomagnetism: aparatură de rezonanță magnetică (computer tomograf) - sub influența câmpului magnetic foarte mare, moleculele de hidrogen sunt excitate și eliberează energia primită, aceasta fiind prelucrată ulterior într-o imagine.

5. Domeniul informaticii: se speculează apariția unor microprocesoare cu o frecvență de 4000 de ori mai mare decât o au procesoarele actuale.

6. Magnetometrele sensibile bazate pe SQUID

7. Filtrele de microunde (de exemplu, pentru stațiile de bază din telefonia mobilă)

8. Circuitele digitale (de exemplu, bazate pe logica RSFQ).

Viitoare aplicații industriale și comerciale promițătoare includ transformatoare pentru stocare de putere, motoare electrice, precum și dispozitive de levitație magnetică.