

Capitolul 3. Materiale conductoare și supraconductoare

3.1. Definiții și clasificări

Materialele conductoare se caracterizează prin valori mari ale conductivității.

Materialele conductoare cu conductibilitate electronică au valori ale conductivității: $\sigma > 10^5 \text{ S/m}$. Conducția electrică rezultă prin deplasarea dirijată a electronilor din banda de conducție, sub influența câmpului electric exterior. Astfel de materiale sunt metalele și grafitul.

Materialele conductoare cu conductivitate ionică, sunt electroliții sau soluțiile de acizi, săruri sau hidrați. Conducția electrică este realizată prin deplasarea dirijată a ionilor pozitivi și negativi sub influența câmpului electric exterior, rezultând un proces electrochimic cu schimbarea compoziției electrolitului și separarea de electrozi a componentelor. Conductivitatea acestor materiale este mai redusă decât a celor cu conductibilitate electronică.

După starea de agregare, materialele conductoare se clasifică în: conductoare solide (metalele), conductoare lichide (mercur, electroliți) și conductoare gazoase (gaze supuse la tensiuni superioare tensiunii de străpungere, sau plasma care prezintă atât conductibilitate ionică, cât și electronică).

3.2. Modelul conducției electrice în materialele conductoare solide. Starea de conductibilitate

Materialele conductoare posedă electroni în banda de conducție, la temperatura absolută electronii fiind distribuiți pe nivele energetice conform statisticii Fermi-Dirac (vezi anexa 3.3). La temperatura absolută, nivelul maxim de energie E_c , al electronilor, este egal cu nivelul Fermi, care se află în interiorul benzii de conducție. În fig.3.1a este reprezentat spectrul energetic al materialelor care posedă electroni de conducție. La materialele conductoare lățimea benzii interzise ΔE_g este extrem de redusă.

Mișcarea dirijată a purtătorilor de sarcină sub influența câmpului electric sau electromagnetic este caracterizată prin densitatea de curent \bar{J} , care reprezintă cantitatea de sarcină dq , care trece prin unitatea de secțiune transversală A a conductorului în unitatea de timp:

$$\bar{J} = \frac{1}{A} \frac{dq}{dt} = \sigma E, \quad (3.1)$$

unde E este intensitatea câmpului electric aplicat.

Modelul clasic al conducției presupune existența unui gaz electronic, electronii de valență devenind electroni de conducție pe seama energiei câmpului electric sau electromagnetic aplicat. Astfel, un atom furnizează unul sau doi electroni de valență, pentru conducție atomul devenind un ion pozitiv – localizat în rețeaua cristalină prin legături cu atomii vecini (vezi anexa 5 – legătura metalică). Concentrația „ n ”, mare a electronilor de conducție, și gradul ridicat de ocupare a nivelelor energetice din banda de conducție plasează nivelul Fermi în interiorul benzii de conducție, iar $E_c = E_F$, la temperatura absolută.

Sub influența câmpului electric exterior, electronul are o mișcare accelerată, fiind supus unei forțe:

$$\bar{F} = q\bar{E} = -eE = \bar{a}m_n, \quad (3.2)$$

unde e este sarcina electronului, \bar{a} este accelerația electronului, iar m_n este masa electronului.

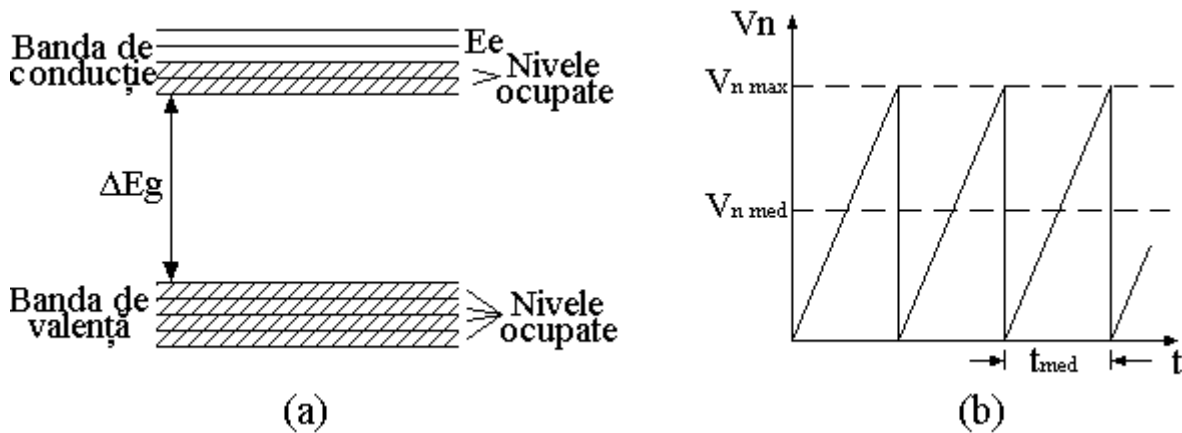


fig. 3.1 Spectrul energetic al materialelor cu conductibilitate electronică (a) și diagrama variației vitezei electronului de conducție în mișcare dirijată (b).

Presupunem că în momentul ciocnirii cu un atom, electronul cedează întreaga energie cinetică dobândită pe seama câmpului electric, cu eliberarea unui electron de conducție, care se va deplasa accelerat spre un atom vecin. Vitezele maximă și medie (de drift) ale electronului au expresiile:

$$\bar{V}_{n \max} = \bar{a} t_{med} = \frac{-e\bar{E}}{m_n} t_{med}, \quad (3.3)$$

$$\bar{V}_n = \bar{V}_{n \text{ med}} = \frac{\bar{V}_{n \max}}{2} = \frac{-e}{2m_n} t_{med} \bar{E} = -\mu_n \bar{E}, \quad (3.4)$$

unde t_{med} este timpul mediu între două ciocniri succesive, iar $\mu_n = \frac{-e t_{med}}{2m_n}$ reprezintă mobilitatea electronului.

Utilizând relația (3.4), relația (3.1) devine:

$$J = \frac{1}{A} \frac{enAdl}{dt} = \frac{1}{A} (-enA) = -enV_n = en\mu_n E, \quad (3.5)$$

unde: n este concentrația electronilor în unitatea de volum ($n \cong 10^{22} \text{cm}^{-3}$), iar dl este elementul de linie, în ipoteza că conductorul este filiform.

Din relațiile (3.1) și (3.5) rezultă:

$$\sigma = en\mu_n. \quad (3.6)$$

Pentru undele electromagnetice cuanta particulei este numită foton, iar pentru undele elastice este denumită fonon. Fotonii și fononii se supun statisticii Bose – Einstein, fiind denumiți și bozoni. Din punct de vedere al mecanicii cuantice, mecanismul transferului de energie la un conductor parcurs de curent, care se încălzește și poate fi considerat un gaz de fononi, este un proces care implică interacțiunea dintre electroni și fononi.

Încălzirea conductorului prin putere disipată care se transformă în căldură, este consecința procesului de interacțiune, în care sunt creați mai mulți fononi decât sunt distruși. Rezistivitatea ρ a materialului este rezultatul acestor interacțiuni electron-fonon.

3.3. Funcțiile materialelor conductoare

3.3.1. Funcția de conducție a curentului electric

Pentru îndeplinirea funcției de conducție, este necesar ca materialul să posedă rezistivitate scăzută, rezistență mecanică și la coroziune și să existe posibilitatea de prelucrare prin laminare, trefilare, lipire sau sudare. Materialele utilizate frecvent sunt Cu, Al, Ag, Au și aliaje Cu-Zn (alama) sau Cu-Be, care prezintă elasticitate și rigiditate mecanică.

3.3.2. Funcția de limitare a curentului electric

Pentru îndeplinirea acestei funcții, este necesar ca materialul (utilizat la fabricarea rezistoarelor bobinate de putere) să prezinte rezistivitate ridicată, maleabilitate și ductilitate, astfel încât să poată fi obținute prin trefilare diametre reduse, invarianță a proprietăților și dimensiunilor într-un domeniu larg de temperaturi și potențial electrochimic cât mai apropiat de cel al cuprului din care sunt confecționate terminalele rezistoarelor, astfel încât tensiunea termoelectromotoare de zgomot să fie redusă. Sunt utilizate aliaje Cu-Ni (constantan), Cu-Ni-Mn (manganina), Cu-Ni-Zn (nichelina), sau Ni-Cr-Al-Co (Kantal).

3.3.3. Funcția de contactare comutare

Materialele utilizate pentru realizarea contactoarelor și comutatoarelor sunt aliaje cu argint, oxidul de argint având conductibilitatea electrică apropiată de cea a argintului. Pentru a rezista la un număr mare de acționări, se impune ca aliajele să posedă duritate mecanică și temperaturi de topire ridicate, pentru a nu fi deteriorate de arcul electric format la întreruperea contactului. Se utilizează aliajele argintului cu wolfram, molibden sau cupru.

3.4. Starea de supraconductibilitate

Starea de supraconductibilitate este o stare ordonată a electronilor de conducție, care constă în formarea unor perechi slab legate de electroni, denumite perechi Cooper. Natura și originea ordonării a fost explicată de Bardeen, Cooper și Schrieffer. Teoria BCS, care prezintă un nivel intrinsec avansat, a devenit o bază importantă pentru dezvoltări ulterioare. Mai multe efecte au furnizat dovezi impresionante pentru descrierea stării fundamentale supraconductoare în baza teoriei BCS, printre care cuantificarea fluxului magnetic printr-un inel supraconductor.

Teoria BCS a supraconductibilității [Kit]

O interacțiune atractivă între electroni (interacțiunea netă este mai puțin repulsivă pentru starea supraconductoare decât pentru starea normală – conductoare), poate conduce la o stare fundamentală a întregului sistem electronic, care este separată de stările excitate printr-un interval de energie interzis (fig.3.2).

În stare supraconductoare, spectrul energetic are o singură stare fundamentală separată de stările excitate printr-un interval de energie interzis $\Delta E \cong 10^{-4} E_F$; $E_F = n \times eV$. Procesul are loc astfel: un electron interacționează cu rețeaua și o deformează, cedând energie și emițând un foton. Dacă frecvența fotonului (și energia lui) este mult mai mare decât frecvența proprie, de

rezonanță, a ionilor din nodurile rețelei, fotonul este absorbit de alt electron. Se produce un schimb rapid de energie între cei doi electroni, pentru că al doilea electron „vede” rețeaua deformată și se adaptează pentru a „profita” de deformare și a-și micșora energia. În modul acesta, cel de-al doilea electron interacționează cu primul electron prin intermediul deformației rețelei. Dacă micșorarea energiei corespunde unei interacțiuni atractive între cei doi electroni, superioară repulsiei electrostatice, se formează o pereche Cooper de electroni, care este de tip boson. Interacțiunea este dinamică, iar frecvența fononului trebuie să fie mult mai mare decât frecvența de rezonanță a ionilor din nodurile rețelei, pentru ca energia să nu fie absorbită de ionul din rețea.

Electronii supraconductori, grupați în perechi Cooper, au vectori de undă egali și de sens contrar, iar spinii sunt opuși. Energia potențială, de atracție a stării BCS, acționează astfel încât micșorează energia totală a stării BCS față de starea Fermi. Stările uniparticulă sau unielelectronice (ale stării normale conductoare) sunt caracterizate prin vectori de undă și spini orientați în două sensuri diferite: $k_1\uparrow; k_2\downarrow; k_3\uparrow \dots$, unde indicii vectorului k sunt valori particulare ale vectorului de undă, conform unui cod sau convenții arbitrare.

Stările uniparticulă sunt ocupate în perechi, formând stări multiparticulă: dacă o stare cu vectorul de undă $k\uparrow$ este ocupată, atunci și starea $-k\downarrow$ este ocupată, iar dacă prima stare este vacantă și a doua stare este vacantă.

Modelul teoretic al supraconductibilității, cu bosoni ($k\uparrow, -k\downarrow$), nu trebuie înțeles într-un sens prea strict, întrucât interacțiunea dintre electroni este dinamică, iar în volumul ocupat de o singură pereche Cooper, există aproximativ 10^6 electroni. Teoria BCS se aplică cel mai bine unui gaz de bosoni cu un număr foarte mare de bosoni pe același orbital. Principiul de excludere al lui Pauli, care stabilește că doi electroni nu pot avea aceleași valori pentru cele patru numere cuantice: azimutal, magnetic, principal și de spin, nu se aplică bosonilor, rezultând proprietatea fundamentală a stării BCS: se pot găsi în aceeași stare oricât de mulți electroni supraconductori pe nivele energetice inferioare benzii interzise. Această stare se caracterizează printr-un grad de ordine mai ridicat și o valoare mai mare a entropiei, comparativ cu starea normală de conducție.

Probabilitatea de împrăștiere a electronilor în rețeaua cristalină este foarte redusă, iar electronii circulă prin rețea fără ciocniri. Legătura de tip boson între cei doi electroni din perechea Cooper, este foarte slabă și poate fi ușor distrusă prin agitație termică. Pentru $T \leq T_{SC}$, o parte din electronii supraconductori escaladează banda interzisă ΔE_i , trecând în zona electronilor normali de conducție, iar pentru $T > T_{SC}$, toți electronii sunt situați în tona „n”, fiind distribuiți pe defectele din rețea (fig. 3.2b).

În starea supraconductoare (fig. 3.2b), repartiția electronilor este modificată în raport cu repartiția electronilor corespunzătoare stării conductoare (fig. 3.2a), în sensul că în vecinătatea nivelului Fermi E_F se formează o bandă interzisă de lățime $\Delta E_i \cong 4kT_{SC}$, unde k este constanta lui Boltzmann, iar T_{SC} este temperatura la care este obținută starea supraconductoare. La temperaturi superioare, dar apropiate de T_{SC} , în regiunea „n” se găsesc electroni normali de conducție, iar în regiunea „s” se găsesc electroni supraconductori grupați în perechi Cooper având energii inferioare electronilor normali.

Fenomenul central al supraconductibilității este efectul Meissner: pentru temperaturi $T < T_{SC}$ fluxul magnetic este expulzat din supraconductor, iar în interiorul supraconductorului inducția magnetică este nulă: $B=0$ ($\chi_m=1$; $\mu'_r=0$), iar câmpul electric E și densitatea de curent sunt diferite de zero într-un strat

superficial $\delta=10^{-7} \div 10^{-8}$ [m], numit adâncime de pătrundere. Din acest motiv, unele materiale supraconductoare, cum sunt Al, Zn, Sn, Pb etc., sunt depuse sub formă de pelicule subțiri pe materiale conductoare (Cu).

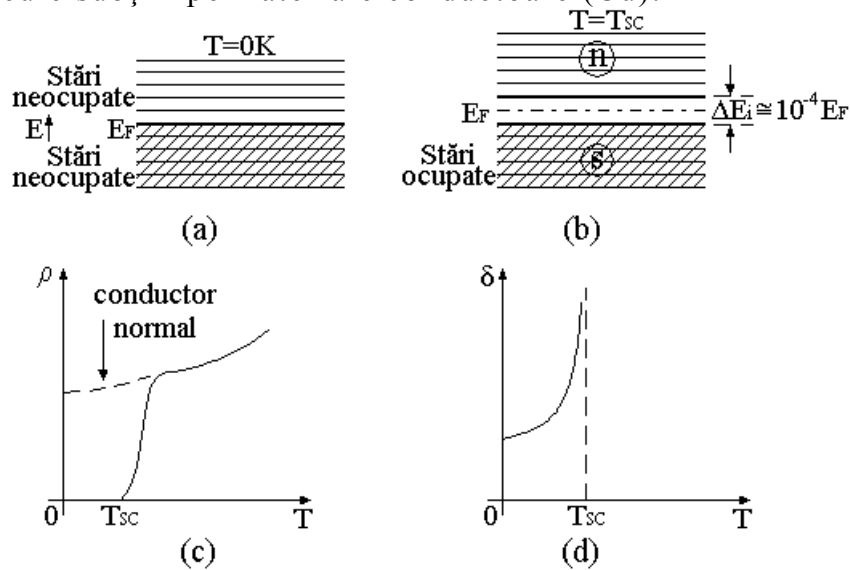


fig. 3.2 Spectrul energetic al benzii de conducție pentru un material conductor (a) și supraconductor (b). Dependențele de temperatură ale rezistivității (c) și ale adâncimii de pătrundere (d) pentru un material supraconductor.

Dependențele de temperatură ale rezistivității și adâncimii de pătrundere sunt reprezentate în fig.3.2c și fig.3.2d.

Câmpul magnetic exterior produce disocierea instantanee a perechilor Cooper, iar starea de supraconductibilitate este distrusă. Din teoria BCS rezultă că interacțiunea dintre electroni este atractivă pentru $T \leq T_{SC}$, iar pentru $T > T_{SC}$ starea fundamentală nu mai este atractivă, revenindu-se la starea normală.

În baza teoriei BCS, se demonstrează că fluxul magnetic total, ce trece printr-un inel supraconductor, poate lua numai valori cuantificate, cuanta fiind denumită fluxon: $h/2e$, unde „e” este sarcina electronului, iar „h” este constanta lui Planck.

Acest rezultat este verificat experimental și confirmă existența perechilor de electroni în structura stării supraconductoare.

Efectul Josephson [Kit]

Un strat izolator între două materiale conductoare constituie o barieră pentru fluxul electronilor de conducție, între cele două materiale conductoare. Dacă stratul izolator sau bariera este suficient de îngustă (cu grosime: $\delta \leq 10 \div 20 \text{ \AA}$), există probabilitatea ca un electron să treacă bariera izolatoare prin efect tunel (sau prin tunelare – fig. 3.3a). Dependența tensiune-curent este liniară (ohmică).

Tunelarea uniparticulă este complet diferită de tunelarea multiparticulă (în perechi de electroni), care apare în starea supraconductoare a unei joncțiuni Josephson.

Efectul Josephson în curent continuu: un curent curge prin joncțiunea Josephson în absența oricărui câmp electric sau magnetic.

Efectul Josephson în curent alternativ: o tensiune continuă aplicată joncțiunii Josephson produce oscilații de radiofrecvență ale curentului în lungul joncțiunii, iar o tensiune de radiofrecvență aplicată împreună cu o tensiune continuă, produce un curent continuu prin joncțiune. Curentul continuu curge

chiar la o tensiune aplicată nulă, până se atinge valoarea curentului critic I_{cr} . Pentru tensiuni superioare tensiunii critice: $U > U_{cr}$, joncțiunea Josephson are o rezistență finită, iar curentul are o componentă oscilatorie cu pulsația $\omega = 2eU/h$, care depinde numai de tensiunea aplicată.

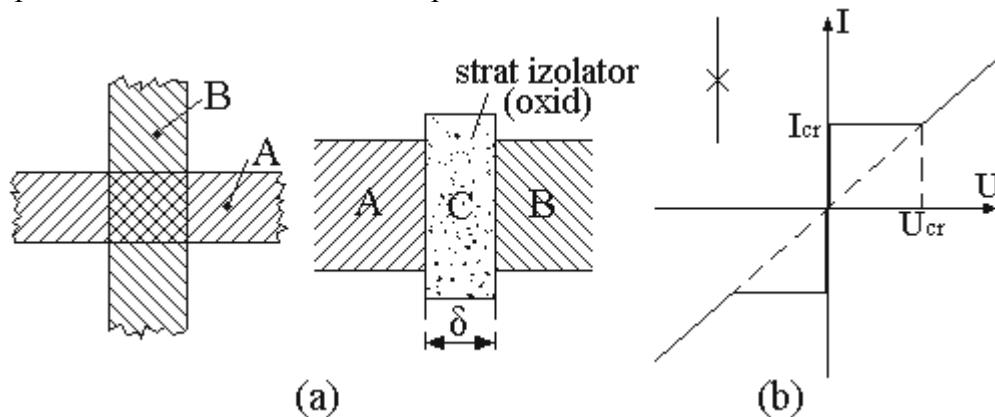


fig. 3.3 Ansamblu care permite tunelarea uniparticulă sau multiparticulă (a) și caracteristica tensiune-curent a unei joncțiuni Josephson (b) în stare supraconductoare

Realizarea joncțiunilor Josephson din niobiu (Nb), sau nitrit de niobiu (NbN), ca materiale supraconductoare, și a oxidului de aluminiu în locul siliciului amorf, ca barieră, a permis micșorarea dimensiunilor joncțiunii la valori submicronice ($0,25\mu\text{m}$) și realizarea unor divizoare simple de frecvență care operează în logică RSFQ (Rapid Single Flux Quantum) cu o frecvență de 770 GHz [Bro]. Logica RSFQ se bazează pe deplasarea unui fluxon spre interiorul sau exteriorul unui inel supraconductor, care conține o singură joncțiune Josephson (și un șunt rezistiv exterior pentru eliminarea comportării histeretice a joncțiunii). Deplasarea fluxonului induce un impuls foarte scurt de-a lungul joncțiunii. Dacă joncțiunea Josephson are suprafața de $1\mu\text{m}^2$, impulsul cu amplitudinea de 2mV, are durata de 1ps, iar curentul prin inelul supraconductor este de $100\mu\text{A}$ [Bro]. Impulsurile devin mai scurte și mai mari prin micșorarea dimensiunilor joncțiunii Josephson. Temperatura de funcționare a inelului supraconductor este $T_{SC} = 5\text{K}$, iar joncțiunea nu suferă degradări prin cicluri multiple de răcire.

Efectul Josephson în curent alternativ este utilizat ca standard pentru definirea voltului. Frecvența fluxonilor sau a biților asociați fluxonilor de ieșire este corelată cu tensiunea continuă aplicată joncțiunii, astfel încât pentru fiecare μV corespund 483,5Mb/s. Pentru acuratețea acestei tehnici de evaluare, metoda s-a adoptat la nivel mondial în anul 1990, pentru definirea de etalon al voltului. Tehnologia de fabricare a joncțiunilor Josephson pentru logica RSFQ a fost adaptată pentru realizarea de dispozitive cu tunelare magnetică, utilizate pentru realizarea de memorii și senzori magnetici, care măsoară câmpuri magnetice biologice. Pentru a crește temperatura de funcționare a joncțiunilor Josephson la $T_{SC} = 9 \div 10\text{K}$, s-a utilizat nitritul de niobiu, ca supraconductor, și oxidul de magneziu, ca barieră.

3.5. Întrebări

1. Analizați modelul teoretic al conducției electrice în materialele conductoare solide și relațiile care se pot scrie cu ajutorul lui.
2. Explicați cu ajutorul mecanicii cuantice încălzirea unui conductor parcurs de un curent electric.

3. Analizați starea de conductibilitate pe baza nivelelor energetice și a probabilității de ocupare a lor, potrivit statisticii Fermi-Dirac.
4. Enunțați și exemplificați principalele funcții ale materialelor conductoare.
5. Explicați succint teoria BCS a supraconductibilității:
6. Comparați pe baza nivelelor energetice și a stărilor fundamentale ale sistemelor energetice, conducția respectiv supraconducția electrică;
7. Explicați formarea perechilor Cooper în materialele supraconductoare:
8. Precizați în ce constă efectul Meissner, ca fenomen central al supraconductibilității.
9. Explicați semnificația adâncimii de pătrundere pentru un material supraconductor și caracterizați materialul supraconductor din punctul de vedere al susceptibilității și permeabilității magnetice.
10. Enumerați efectele care au furnizat dovezi importante pentru descrierea, în baza teoriei BCS, a stării fundamentale supraconductoare.
11. În ce constă efectul Josephson în curent continuu și curent alternativ, reprezentați și comentați diagrama tensiune-curent pentru o joncțiune Josephson.
12. În ce constă și pe ce se bazează logica RSFQ.
13. Enunțați principiul pe care se bazează utilizarea RSFQ în circuitele numerice și care sunt condițiile în care acestea pot funcționa;
14. În ce constă tunelarea uniparticulă și multiparticulă.
15. Pe ce bază s-a stabilit standardul pentru definirea unității de tensiune electrică.

3.6. Anexe

Anexa 3.6.1. - Statistica Fermi-Dirac

Modelul de ocupare a benzilor permise rezultă din statistica Fermi-Dirac, conform căreia probabilitatea de repartiție $f_0(E)$ a particulelor denumite fermioni, care se supun acestei statistici (cu spin semiîntreg, cum sunt electronii, protonii, etc.) în absența unor forțe de interacțiune exterioare, are expresia :

$$f_0(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} \quad (\text{A.3.1})$$

unde : E este energia unei stări cuantice, E_F este nivelul Fermi (de ordinul neV), definit ca nivelul pentru care probabilitatea pentru ocupare de către un electron la o temperatură $T > 0\text{K}$, este 0,5, iar K este constanta lui Boltzman. Nivelul Fermi este o mărime de calcul. Relația (A.3.1) este reprezentată grafic în figura A.3

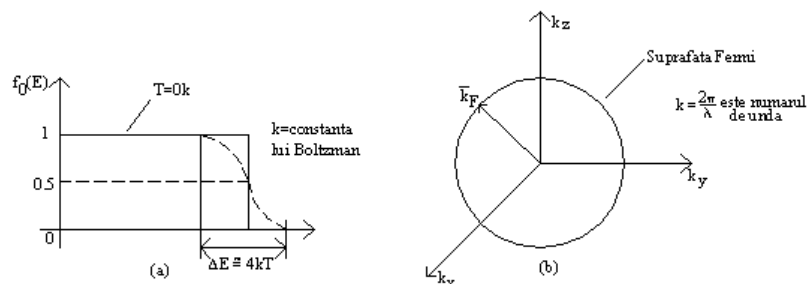


fig.A.3 Probabilitatea de ocupare a unui nivel energetic în funcție de energia nivelului, conform statisticii Fermi-Dirac (a) și reprezentarea spațială a stării fundamentale a unui gaz Fermi în absența unei forțe exterioare sau de interacțiune (b)

Lăţimea benzii interzisă are expresia :

$$\Delta W_i = \Delta W_F \cong 4kT$$

La temperatura absolută: T=0K, lăţimea benzii interzise se anulează iar nivelul maxim de energie este nivelul Fermi.

Dualitatea undă – particulă stabileşte că unda are proprietăţi de particulă, cu energie $E=h\nu=\hbar\omega$, iar particula poate fi descrisă ca o undă de materie cu pulsaţia $\omega=E/\hbar$ şi vector de undă $k=p/\hbar$.

În absenţa unei forte exterioare sau de interacţiune, toate stările unei particule de gaz Fermi cu $k < k_F$ sunt ocupate şi toate stările cu $k > k_F$ sunt vacante. O stare excitată poate fi obţinută prin îndepărtarea unui electron dintr-un punct interior suprafeţei Fermi şi plasarea lui în exteriorul suprafeţei.

Pentru undele electromagnetice, cuanta particulei este denumită foton, iar pentru undele elastice–fonon. Fotonii şi fononii se supun statisticii Bose-Einstein, se numesc bosoni si se caracterizează prin funcţii de undă simetrice, care nu îşi schimbă semnul atunci când stările particulelor se schimbă între ele. Expresia unei unde plane este :

$$E(z, t) = E_0 e^{-j(\omega t - kz)} \quad (\text{A.3.3})$$

Unde : E_0 este amplitudinea undei.

Anexa 3.6.2. - Noţiuni de mecanică cuantică

Experimentul Compton şi fotoelectric au demonstrat că unda are proprietăţi de particulă cu energie : $E = hf = h \frac{\omega}{2\pi} = \hbar\omega$ şi impuls $\bar{p} = \hbar\bar{k}$ unde \bar{k} este vector

(număr) de undă : $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}$ (c fiind viteza luminii), iar h este constanta lui Planck.

Principiul de incertitudine al lui Heisenberg stabileşte relaţia între nedeterminarea în impuls Δp şi nedeterminarea în poziţie Δx a unei particule : $\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar/2$, deci impulsul \bar{p} (sau vectorul \bar{k}) şi poziţia particulei nu se pot determina simultan.

Din punct de vedere determinist, potrivit căruia starea unei particule este complet determinată atunci când se cunoaşte poziţia iniţială, viteza particulei precum şi forţa care se exercită asupra ei, trebuie abandonat. În teoria cuantica, mărimea $\hbar/2$ corespunde măsurării simultane a coordonatelor şi impulsului particulei.

Luis de Broglie stabileşte dualitatea undă-particulă în sensul ca o particulă de energie E si impuls \bar{p} poate fi descrisă ca o undă de materie cu pulsaţia $\omega=E/\hbar$ şi vector de undă $\bar{k} = \bar{p}/\hbar$, punându-se astfel bazele teoriei cuantice.

Cuantele de energie $\hbar f$ se numesc fotoni pentru undele electromagnetice şi fotoni pentru undele elastice. Pentru a completa natura corpusculară a luminii s-a asociat unui foton (fonon) impulsul $\bar{p} = \hbar\bar{k}$.

Statistica Fermi-Dirac se aplică electronilor de conducţie din materialele conductoare şi semiconductoare, care au spin semiîntreg şi care se numesc fermioni.

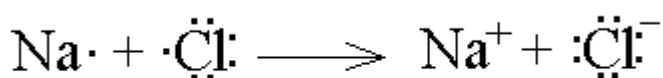
Diferenţa dintre statisticile Bose-Einstein şi Fermi-Dirac constă în proprietatea de simetrie a funcţiei de undă. Statistica Fermi-Dirac presupune funcţii de undă antisimetrice, care îşi schimbă semnul atunci când stările particulelor se schimbă între ele. În cadrul acestei statistici este valabil

principiul de excluziune al lui Pauli, care stabilește că doi sau mai mulți electroni nu pot ocupa aceeași stare cuantica, adică nu pot avea aceleași patru numere cuantice : azimutal, magnetic, principal și de spin.

Anexa 3.6.3. - Legături chimice

Legăturile chimice se pot clasifica în trei tipuri: electrovalența, covalentă și legătura metalică.

Electrovalența sau legătura ionică constă în atracția electrostatică pe care o exercită ionii încărcăți cu sarcini electrice opuse. Ionii au libertate de mișcare în limitele impuse de forțele de atracție. Astfel electrovalența nu este o legătură propriu-zisă, sau o legătură slabă. Atomii de un tip cedează ușor electroni, iar atomii de alt tip acceptă electroni suplimentari. Prin transfer de electroni se formează electrovalența:



Covalența este o legătură puternică. Atomii legați prin legături covalente ocupă poziții reciproce fixe care nu se pot modifica decât modificând substanța din punct de vedere chimic. Natura fizică a legăturii se bazează pe forțe mecanic-cuantice iar gradul de complexitate este mai ridicat decât a electrovalenței. O legătură covalentă ia naștere prin punerea în comun sau participarea a doi electroni – câte unul de la fiecare dintre atomii care se combină – formând o moleculă:



Legătura coordinativă este o legătură dintre electroni neparticipanți – care nu fac parte din covalentă, care pot forma legături formate din doi electroni cu atomi, molecule sau ioni, care acceptă în stratul de valență una sau mai multe perechi de electroni. Legătura coordinativă este o legătură covalentă în care ambii electroni provin de la aceeași moleculă donoare.

Legătura metalică

Natura fizică a legăturii metalice este diferită de cea a legăturilor precedente, fiind o legătură slabă. Între atomi se stabilesc legături în care intervin doi electroni. Legăturile nu sunt fixe ci se desfac și se refac neîncetat. Numărul de electroni este prea mic pentru a forma covalente și din acest motiv electronii de valență se repartizează egal, statistic între toți electronii, fiind totodată și foarte mobili.

Între unele molecule în starea solidă, lichidă și în gaze comprimate, există forțe de atracție mult mai slabe decât legăturile chimice, numite forțe Van der Waals. Legătura Van der Waals este – în principal, o legătură electrostatică între molecule care au momente electrice nenule.