

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN BUCUREȘTI
DEPARTAMENTUL DE FIZICĂ**

**LABORATORUL DE FIZICĂ ATOMICĂ
SI FIZICA CORPULUI SOLID**

BN - 031 B

TERMISTORUL

TERMISTORUL

1. Scopul lucrării

a. Verificarea legii dependenței rezistenței electrice cu temperatura la materialele semiconductoare.

b. Determinarea lărgimii benzii interzise ΔE .

2. Teoria lucrării

Structura corectă a diagramei energetice a unui corp solid depinde de natura atomilor și de distanța dintre atomi. Largimea benzilor de energie permisă și interzisă constituie proprietăți caracteristice pentru fiecare tip de cristal în parte.

Electronii corpului solid vor ocupa la temperatura de 0K nivelele energetice cele mai coborate. Prin completarea benzilor de energie cu electroni pot ocupa parțial sau complet o ultima bandă energetică. Semiconductorii sunt materiale care posedă o bandă de valență, complet ocupată, separată de banda de conducție, complet liberă, printr-o bandă de energie interzisă ΔE . O astfel de structură a benzilor energetice se întâlnește atât la semiconductori cât și la izolatori; deosebirea constă în faptul că pentru izolatori $\Delta E = 4 \div 11 \text{ eV}$, în timp ce la semiconductori intervalul energetic este mult mai mic.

Semiconductorii pot proveni dintr-un singur element chimic (Si, Ge, Se Te), sau sunt compuși formați din elemente ale coloanei a III-a și a V-a a sistemului periodic ($A_{III}B_V$) sau formați din elemente ale coloanei a II-a și a VI-a a sistemului periodic ($A_{II}B_{VI}$).

La 0K se spune că sunt ocupate toate stările cu energie minimă și deci umplând stările cu electroni se va ajunge la o ultimă stare ocupată, adică la un ultim nivel energetic ocupat cu electroni numit nivel Fermi. Pentru materiale semiconductoare intrinseci sau slab dopate, la temperaturi până la câteva sute de grade Celsius, energia Fermi se află în banda interzisă.

Sub acțiunea temperaturii, datorită energiei termice pe care o primesc unii electroni pot trece din ultima bandă ocupată, banda de valență în banda de conducție. Atunci în semiconductor vor exista concentrații egale de electroni și goluri: $n = p = n_i$. Concentrația electronilor egală cu a golurilor poartă numele de concentrație intrinsecă și este notată cu n_i . Concentrația intrinsecă la un semiconductor poate fi calculată dacă se cunoaște distribuția electronilor de conducție cu energia.

Din teoria benzilor de energie în materialele semiconductoare rezultă expresiile celor două concentrații de sarcini electrice:

$$n = 2(2\pi m_e kT)^{3/2} \cdot h^{-3} \cdot \exp[-(E_c - E_F)/kT] \quad (1)$$

$$p = 2(2\pi m_g kT)^{3/2} \cdot h^{-3} \cdot \exp[-(E_F - E_v)/kT] \quad (2)$$

unde:

- m_e este masa efectivă a electronilor;
- m_g este masa efectivă a golurilor;
- k este constanta Boltzman;
- T este temperatura semiconductorului;
- h este constanta Planck;
- E_c este energia corespunzătoare minimului benzii de conducție;
- E_v este energia corespunzătoare plafonului benzii de valență,

- E_F este energia nivelului Fermi aflat, în cazul semiconducătorilor intrinseci, la jumătatea "distanței" dintre E_c și E_v .

Rezistivitatea este:

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_n + p\mu_p)} = \text{const.} \exp\left[\frac{\Delta E}{2KT}\right] \quad (3)$$

unde: μ_n și μ_p sunt mobilitățile.

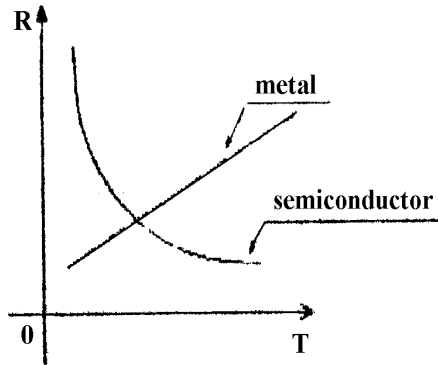


Fig. 1

Rezistența unei probe semiconductoare va fi:

$$R = C \exp(+\Delta E / 2kT) \quad (4)$$

unde $\Delta E = E_c - E_v$ și poartă numele de lărgimea benzii (zonei) interzise și dependența ei de temperatură e reprezentată în fig. 1.

Logaritmând expresia (4) se obține:

$$\ln R = C + \frac{\Delta E}{2kT} \quad (5)$$

3. Dispozitivul experimental

Termistorul este un element semiconductor de circuit care utilizează dependența rezistenței electrice a unui semiconductor intrinsec de temperatura. Dispozitivul este realizat din materiale semiconductoare la care rezistivitatea scade repede cu temperatura, precum amestecuri de oxizi metalici (oxid de mangan, oxid de cupru, oxid de zinc, etc) care sunt măcinați și apoi presați împreună cu un liant organic, iar apoi sinterizați.

Dispozitivul experimental este prezentat în figura 2 și cuprinde un cuptor electric (1) pentru încălzirea termistorului, un ohmmetru (2), care servește la măsurarea rezistenței termistorului și un transformator (3) pentru alimentarea ohmetrului. Cuptorul are inerție termică mare astfel încât, deși nu este alimentat printr-un reostat ci direct de la rețea, creșterea temperaturii este foarte lentă. Acest fapt înlătură necesitatea unui termostat, permițându-ne să presupunem că fiecare măsurare de rezistență se face într-un regim staționar. Pe capacul cuptorului sunt fixate termometrul (4) pentru indicarea temperaturii și termistorul (5) cu cele 2 borne care sunt legate prin conductori izolați la ohmetru.

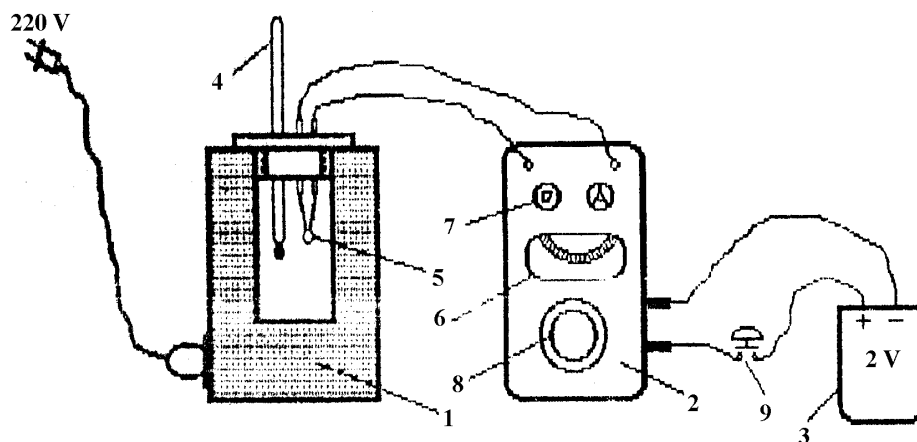


Fig. 2

Ohmetrul este construit după schema punții Wheastone. El cuprinde un galvanometru (6) ca instrument de zero, un comutator (7) (rotativ sau cu fișă) care schimbă intervalele de valori indicând de fiecare dată factorul multiplicator, și o rezistență variabilă (8) cu cursor gradat și prevăzut cu indicator. Un întrerupător (9) intercalat în circuitul acumulatorului permite ca alimentarea ohmetrului să se facă doar în timpul citirilor. La unele ohmetre întrerupătorul intră în construcția lor sub forma unui buton .

4. Modul de lucru

- Se verifică legăturile de la termistor la ohmetru și la transformator.
- Sub îndrumarea cadrului didactic se face prima măsurare a rezistenței termistorului.
- Cursorul rezistenței variabile se pune pe poziția minimă iar comutatorul factorului multiplicator pe poziția maximă. Se apasă scurt pe buton (întrerupător) și se observă sensul deviației acului galvanometrului. Se trece la factorul multiplicator inferior observând din nou sensul deviației acului. Operațiunea se repetă până când sensul deviației acului se schimbă. Din acest moment se apasă permanent pe buton și rotind cursorul, se aduce acul galvanometrului la zero, după care se ridică degetul de pe buton. Rezistența termistorului este egală cu valoarea indicată la cursor înmulțită cu factorul multiplicator. În acest moment se citește și temperatura.
- Valorile se trec într-un tabel de forma:

| t [°C] | R [Ω] | T [K] | $1/T$ [K ⁻¹] | $\ln R$ |
|----------|------------------|---------|--------------------------|---------|
| | | | | |

Se pornește încălzirea cuptorului punându-l la priza de 380 V curent alternativ. Pe măsură ce temperatura crește se fac noi măsurători ale rezistenței, nemaifiind necesare încercările cu diferiți factori multiplicatori. Temperatura se citește imediat după aducerea acului la zero. Intervalul de temperatură dintre două citiri se alege astfel încât de la temperatura inițială (care eventual este mai mare decât temperatura camerei) și până la temperatura finală (care nu trebuie să depășească 100°C) să se facă un număr de aproximativ 10 citiri. Este preferabil ca intervalele de temperatură dintre citirile succesive să fie egale, însă rezultatele experienței nu vor fi viciate dacă din neatenție a fost depășită vreuna dintre temperaturile propuse. Important este ca citirea temperaturii să se facă practic concomitent cu determinarea rezistenței. La terminarea măsurătorilor se scoate cuptorul din priză.

5. Prelucrarea rezultatelor experimentale

Folosind datele din tabel se trasează un grafic $R = f(t)$.

Pentru calcularea lărgimii benzii interzise se reprezintă grafic $\ln R = f\left(\frac{1}{T}\right)$. Printre punctele experimentale se trasează dreapta de interpolare. Se deduce panta m a acestei drepte. Conform relației (5) $m \equiv \frac{\Delta E}{2k}$.

Se va calcula ΔE exprimată în electroni volți. ($k = 8,6 \cdot 10^{-5}$ eV / K)

6. Întrebări

1. Ce este un termistor?
2. De ce un termistor este mult mai sensibil la variația temperaturii decât un metal?
3. Care este starea de umplere a nivelelor din banda de conducție, respectiv valență, la un semiconductor la $T = 0$ K și $T \neq 0$ K?
4. Cum variază rezistența termistorului cu temperatura?

ANEXĂ

Conform distribuției Fermi-Dirac, probabilitatea ca o stare electronică de energie W să fie ocupată de un electron la echilibru termic este dată de expresia:

$$f_{F-D} = \frac{1}{e^{KT} + 1} \quad (A1)$$

Se observă că o stare având energia nivelului Fermi are o probabilitate de ocupare egală cu $1/2$, indiferent de valoarea temperaturii. Pentru energii care depășesc nivelul Fermi funcția f_{F-D} poate fi aproximată cu o exponențială:

$$\frac{1}{e^{KT} + 1} \cong e^{-\frac{E-E_F}{KT}}; \text{ pentru } \frac{E-E_F}{KT} \gg 1 \quad (A2)$$

Intrucât nivelele energetice ale electronilor se găsesc la distanțe relativ mari de nivelul Fermi, satisfac cu siguranță relația (A2). Din teoria benzilor de energie în materialele semiconductoare rezultă expresiile celor două concentrații de sarcini electrice:

$$n = 2(2\pi m_e kT)^{3/2} \cdot h^{-3} \cdot \exp[-(E_c - E_F)/kT] \quad (A3)$$

$$p = 2(2\pi m_g kT)^{3/2} \cdot h^{-3} \cdot \exp[-(E_F - E_v)/kT] \quad (A4)$$

unde: m_e este masa efectivă a electronilor; m_g este masa efectivă a golurilor; k este constanta Boltzman; T este temperatura semiconductorului; h este constanta Planck; E_c este energia corespunzătoare minimului benzii de conducție; E_v este energia corespunzătoare plafonului benzii de valență, E_F este energia nivelului Fermi aflat, în cazul semiconductorilor intrinseci, la jumătatea "distanței" dintre E_c și E_v .

Din expresiile (1) și (2) rezultă:

$$n \cdot p = AT^{3/2} \exp[-(E_c - E_v)/kT] \quad (A5)$$

Ținând seama că:

$$n = p = n_i \quad (A6)$$

se deduce concentrația purtătorilor în semiconductorii intrinseci n_i :

$$n_i = BT^{3/2} \exp[-(E_c - E_v)/2kT] \quad (A7)$$

Marimea $\Delta E = E_c - E_v$ reprezintă mărimea benzii interzise. Conducția purtătorilor de sarcină mobili este cu atât mai mare cu cât banda interzisă este mai îngustă. Termenul exponențial este decisiv deoarece crește mult mai repede cu temperatura decât termenul $T^{3/2}$.

Conductibilitatea electrică a unui semiconductor este:

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p) \quad (A8)$$

Mobilitățile μ_n și μ_p fiind practic independente de temperatură rezultă rezistivitatea:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \text{const.} \exp\left[\frac{\Delta E}{2KT}\right] \quad (A9)$$

Deci variația rezistenței unui semiconductor cu temperatura va fi dată de relația

$$R = \text{const.} \exp\left[\frac{\Delta E}{2KT}\right] \quad (A10)$$