

STUDIUL EFECTULUI HALL ÎN SEMICONDUCTORI

Efectul Hall este unul dintre efectele importante în determinarea parametrilor ce caracterizează electric materialele semiconductoare.

1. Scopul lucrării

- Determinarea *concentrației purtătorilor de sarcină* (n sau p) într-o probă din semiconductori extrinseci**;
- Determinarea *mobilității Hall* a purtătorilor de sarcină în semiconductorul respectiv.

2. Teoria lucrării

Efectul Hall este un efect galvanomagnetic** observat pentru prima dată de E. H. Hall în 1880. Acest efect constă în apariția unui câmp electric transversal (denumit **câmp electric Hall** \vec{E}_H) și a unei diferențe de potențial într-un metal sau semiconductor parcurse de un curent electric, atunci când ele sunt introduse într-un câmp magnetic, perpendicular pe direcția curentului.

Să considerăm cazul unei probe semiconductoare paralelipipedice de dimensiuni a, b, c (fig.1). Câmpul electric Hall apare atunci când proba semiconductoare este plasată într-un câmp de inducție magnetică \vec{B} și într-un câmp electric exterior de intensitate $\vec{E} \perp \vec{B}$. Vectorii \vec{E} , \vec{B} , și \vec{E}_H formează un triedru drept (fig. 1), adică

$$\vec{E} = \vec{E}(E, 0, 0); \vec{B} = \vec{B}(0, B, 0); \vec{E}_H = \vec{E}_H(0, 0, E_H) \quad (1)$$

Sub acțiunea câmpului electric extern $\vec{E} = \vec{E}(E, 0, 0)$ prin proba semiconductoare trece un curent electric de intensitate I . Prin aplicarea pe proba respectivă a câmpului magnetic de inducție $\vec{B} = \vec{B}(0, B, 0)$ între fețele laterale ale probei, pe direcție normală pe \vec{E} și \vec{B} (fig. 1), apare o diferență de potențial

$$U_H = V_A - V_B \quad (2)$$

numită **tensiune Hall**.

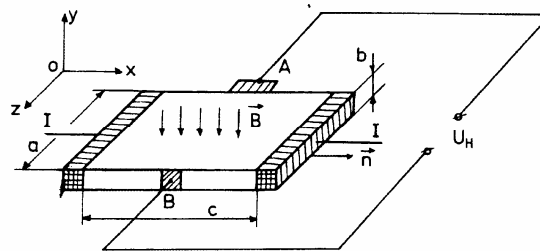


Fig. 1.

Tensiunea Hall este determinată de devierea purtătorilor de sarcină electrică ce formează curentul prin probă, sub acțiunea *forței Lorenz*:

$$\vec{F}_L = e(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3)$$

- **Semiconductorii extrinseci** sunt semiconductorii cu impurități în care conducția electrică se face fie prin electroni (semiconductori cu impurități donoare) numiți **semiconductori de tip n**, fie prin goluri (semiconductori cu impurități acceptoare) numiți **semiconductori de tip p**.

** **Efectele galvanometrice** sunt fenomene fizice care apar în substanțe în urma interacției dintre inducția magnetică B aplicată din exterior și sarcinile electrice în mișcare prin substanța considerată.

unde \bar{v} este viteza medie de mișcare prin probă a purtătorilor de sarcină electrică (sau **viteză de drift**) sub acțiunea câmpului \bar{E} , iar e este sarcina electrică elementară

$$e \cong 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Intensitatea câmpului electric Hall (\bar{E}_H) este

$$E_H = \frac{U_H}{a} . \quad (4)$$

Câmpul Hall determină apariția forței electrice \bar{F}_{el}

$$\bar{F}_{el} = e\bar{E}_H \quad (5)$$

Forța totală ce acționează asupra purtătorilor de sarcină este

$$\bar{F}_l = \bar{F}_{el} + \bar{F}_L \quad (6)$$

La echilibru

$$\bar{F}_{el} = -\bar{F}_L \quad (7)$$

Tinând seama de relațiile (3) și (5), rezultă

$$E_H e = -evB \sin(\bar{v}, \bar{B}) \quad (8)$$

dar

$$\sin(\bar{v}, \bar{B}) = \sin \frac{\pi}{2} = 1 \text{ (fig. 1)} \quad (9)$$

deci

$$E_H e = -evB \quad (10)$$

Densitatea curentului electric (\bar{j}) prin probă sub acțiunea câmpului electric $\bar{E} = \bar{E}(E, 0, 0)$ este

$$\bar{j} = ne\bar{v} \quad (11)$$

unde n este concentrația purtătorilor de sarcină electrică din probă.

Relația dintre densitatea curentului electric (\bar{j}) și intensitatea I a curentului electric este

$$\bar{j} = \frac{I}{S} \bar{n} \quad (12)$$

unde \bar{n} este versorul direcției normale la suprafața transversală a probei pe direcția curentului electric (fig. 1), S este aria acestei secțiuni transversale, $S = ab$.

Din relațiile (10) și (11) se obține **modulul vitezei de drift**

$$v = \frac{I}{neS} = \frac{|\bar{j}|}{ne} \quad (13)$$

Se înlocuiește relația (13) în relația (10) și se obține

$$E_H = -\frac{|\bar{j}|}{ne} B \quad (14)$$

de unde

$$E_H = -\frac{1}{ne} |\bar{j}\bar{B}| \quad (15)$$

Se notează

$$R_H = -\frac{1}{ne} \quad (16)$$

Marimea R_H poartă numele de **constantă Hall**; fizic, ea are dimensiunea:

$$[R_H]_{SI} = [n]_{SI}^{-1} \cdot [e]_{SI}^{-1} = \text{cm}^3 \text{C}^{-1} \quad (17)$$

Tinând seama de tensiunea Hall din relația (4) și de relațiile (15) și (16) se obține

$$U_H = R_H |\vec{j} \parallel \vec{B}| a = R_H j B a \quad (18)$$

Din această relație constatăm că, *tensiunea Hall este cu atât mai mare cu cât inducția magnetică (B) și densitatea curentului electric prin probă (j) sunt mai mari.*

Pentru ca electrozii de curent ai probei să nu scurtcircuiteze tensiunea Hall, distanța a dintre electrozii Hall **A** și **B** trebuie să fie față de lungimea c a probei în raportul

$$\frac{a}{c} = \frac{1}{4} \quad (19)$$

Din relația (18) rezultă

$$R_H = \frac{U_H}{j B a} \quad (20)$$

Identificând relațiile (16) și (20) se obține **concentrația purtătorilor de sarcină electrică din probă**

$$n = \frac{j B a}{e U_H} \quad (21)$$

Mobilitatea Hall (μ_H) este viteza medie (v_H) a purtătorilor de sarcină electrică orientați în câmpul Hall pe unitatea de câmp Hall (\vec{E}_H)

$$\mu_H = \frac{\vec{v}_H}{\vec{E}_H} \quad (22)$$

având dimensiunile

$$[\mu_H]_{SI} = \frac{[v_H]_{SI}}{[E_H]_{SI}} = \frac{\text{m}^2}{\text{sV}} = \text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{V}^{-1} \quad (23)$$

Pentru a determina mobilitatea Hall se scrie **densitatea de curent** în câmpul Hall

$$\vec{j}_H = n e \vec{v}_H = n e \mu_H \vec{E}_H \quad (24)$$

Se obține

$$\mu_H = \frac{|\vec{j}_H|}{n e |\vec{E}_H|} \quad (25)$$

dar $|\vec{j}_H| = \frac{I_H}{S}$ unde I_H este *intensitatea curentului electric după direcția câmpului Hall* (direcția Oz din fig. 1) și S' este *aria secțiunii transversale pe această direcție.*

$$S' = c b \quad (27)$$

I_H se poate scrie

$$I_H = \frac{U_H}{r} \quad (28)$$

r fiind rezistența probei după direcția Oz, deci

$$r = \rho \frac{a}{c b} = \rho \frac{a}{S'} \quad (29)$$

Ținând seama de relațiile (28) și (29) se obține

$$j_H = \frac{U_H}{r S'} = \frac{U_H}{\rho a} = \frac{1}{\rho} E_H = \sigma E_H \quad (30)$$

unde σ este *conductivitatea electrică* a probei.

Se introduce relația (30) în (25) și se obține *mobilitatea Hall*

$$\mu_H = \frac{\sigma E_H}{neE_H} = \sigma R_H \quad (31)$$

3. Dispozitivul experimental

Se folosește dispozitivul experimental din figura 2 format din:

- un electromagnet confecționat din oțel cu slabă remanență magnetică, ceea ce permite o mai bună concentrare a liniilor de câmp;
- o casetă conținând proba p semiconductoare ce se studiază.

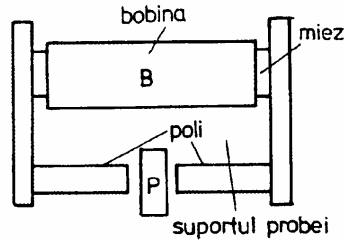
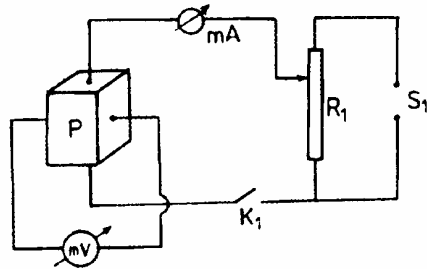


Fig. 2.

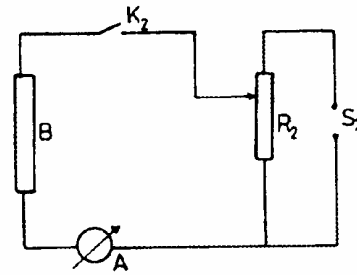
În figura 3 este dată schema electrică a circuitelor de măsurare. În fig. 3a este dată schema pentru măsurarea intensității curentului electric prin probă pentru diverse valori ale tensiunii electrice continue aplicată pe probă și a tensiunii Hall. În fig. 3b este dată schema circuitului de alimentare a electromagnetului. Fig. 3a cuprinde:

- circuitul de alimentare a probei format din:

- proba **P**
- un miliampermetru **mA**, ce permite măsurarea curentului i prin probă
- sursa **S₁**
- potențiometrul **R₁**
- întrerupătorul **K₁**



a



b

Fig. 3.

- circuitul de măsurare a tensiunii Hall cuprinde un **mV** pentru măsurarea U_H . O măsurare mai precisă a U_H se face folosind metoda de măsurare *prin compensare*.

Figura 3b cuprinde:

- bobina **B** a electromagnetului
- ampermetrul **A** pentru măsurarea curentului I prin electromagnet
- potențiometrul **R₂**
- sursa de alimentare a electromagnetului **S₂**

- întrerupătorul K

4. Modul de lucru

Se conectează sursele S_1 și S_2 prin închiderea întrerupătorului K_1 și K_2 . Cu ajutorul potențimetrului R_1 se stabilește un curent i prin probă, care se menține constant. Valorile curentului i , pentru care se efectuează măsurătorile, sunt indicate la masa de lucru. Cu ajutorul potențimetrului R_2 se variază curentul I prin bobina electromagnetului din 0,2 A până la valoarea maximă de 3A.

Pentru fiecare valoare I se citește U_H cu ajutorul milivoltmetrului **mV** (trebuie remarcat că poate fi utilizată și măsurarea curentului determinat de U_H prin probă, cu ajutorul unui galvanometru; indicată la masa de lucru, se calculează U_H).

Se repetă măsurătorile pentru diferite valori ale curentului i prin probă.

Valorile numerice se trec în următorul tabel:

Curbă etalonare - Efectul Hall, BN 120

i (mA)	I_B (A) B (T)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
5	U_H (mV)	0.047	0.070	0.097	0.120	0.135	0.155	0.170	0.176	0.181	0.187
10											
15											
20											
25											

$a = 4$ mm; $b = 4$ mm; $c = 12$ mm; $r = 30 \Omega$

Dimensiunile a, b, c ale probei sunt date la masa de lucru.

Densitatea j a curentului prin probă se obține conform relației (26), secțiunea S a probei fiind $S = ab$ (fig. 1). Valorile inducției magnetice B a câmpului magnetic, corespunzătoare diferitelor valori ale curentului I prin bobină sunt date în tabel.

Se trasează curba de etalonare a electromagnetului $B = f(I)$. Valorile lui B pentru diferite valori ale curentului prin bobină se citesc de pe curba de etalonare.

Atenție! Întrucât la trecerea curentului electric atât prin probă cât și prin bobină acestea se pot degrada, este necesar ca întrerupătoarele K_1 și K_2 să fie închise numai atât cât durează citirile.

5. Prelucrarea datelor experimentale

1. Cu ajutorul datelor din tabel se reprezintă grafic, pe hârtie milimetrică, dependența $U_H = f(B)$ pentru $j = \text{constant}$. Se obține o familie de drepte, pentru diversele valori ale j . Din relația (18) panta, în valoare absolută, a acestor drepte este:

$$m_k = aR_H j_k \quad k = 1, 2, \dots, N$$

Din grafice se obțin pantele m_1, m_2, \dots, m_N și se calculează valorile constantelor Hall corespunzătoare:

$$R_H^{(1)} = \frac{m_1}{aj_1} \quad R_H^{(2)} = \frac{m_2}{aj_2}, \dots, R_H^{(k)} = \frac{m_k}{aj_k} \dots$$

Se calculează *constanta Hall medie*: $\langle R_H \rangle = \frac{\sum_{k=1}^N R_H^{(k)}}{N}$ iar valoarea *constantei Hall* se va exprima sub forma $R_H = \langle R_H \rangle \pm \sigma_{R_H}$ unde σ_{R_H} reprezintă *dispersia* valorilor constantei Hall în jurul *valorii medii* $\langle R_H \rangle$ care se calculează cu ajutorul relației:

$$\sigma_{R_H} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N [R_H^{(k)} - \langle R_H \rangle]^2}{N(N-1)}}.$$

2. Cunoscându-se valoarea constantei Hall, se determină *concentrația medie a purtătorilor de sarcină electrică din probă* folosind relația (16): $\langle n \rangle = \frac{1}{\langle R_H \rangle e}$ unde $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, iar $[n]_{\text{SI}} = \text{m}^{-3}$. Ținând seama de relația (31) se determină *mobilitatea Hall* μ_H :

$$\mu_H = \sigma R_H, \quad [\mu_H] = \frac{\text{m}^2}{\text{V s}}.$$

Aici $\sigma = \frac{1}{\rho}$ este *conductivitatea probei* (a nu se confunda cu σ_{R_H}) iar ρ *rezistivitatea probei*

dată de relația $\rho = \frac{r c b}{a}$.

În prelucrarea datelor experimentale toate mărimile fizice se vor exprima în unități S.I.

Referatul pe care studentul îl va alcătui după efectuarea acestei lucrări va conține și răspunsurile la următoarele

Întrebări:

1. În ce constă efectul Hall?
2. Ce este constanta Hall?
3. Ce este mobilitatea Hall?