

STUDIUL EFECTULUI HALL IN SEMICONDUCTORI

1. Scopul lucrării

Efectul Hall este unul dintre efectele galvanomagnetice importante pentru determinarea parametrilor ce caracterizează din punct de vedere electric materialele semiconductoare.

Lucrarea își propune determinarea experimentală a dependenței tensiunii Hall de inducția magnetică a câmpului aplicat, la temperatura camerei. Prin prelucrarea valorilor măsurate se calculează constanta Hall, mobilitatea Hall și concentrația purtătorilor de sarcină din proba semiconductoare.

2. Considerații teoretice

Efectele galvanomagnetice sunt fenomene secundare care iau naștere în conductori sau semiconductori când asupra lor acționează simultan câmpuri electrice și magnetice. Intensitatea fenomenelor este maximă când câmpul electric și cel magnetic sunt perpendiculare între ele.

Efectul Hall constă în apariția unui câmp electric suplimentar într-un conductor sau semiconductor prin care circulă un curent electric, plasat într-un câmp magnetic aplicat normal pe direcția curentului; liniile de forță ale acestui câmp electric sunt perpendiculare pe planul format de direcțiile câmpului magnetic și curentului electric. Purtătorii de sarcină din material sunt deviați de câmpul magnetic, aceasta fiind cauza apariției câmpului electric suplimentar, numit câmp Hall. A fost descoperit de E.H. Hall în 1879.

Dacă, de exemplu, densitatea de curent electric prin probă, j_x , este de-a lungul axei Ox și câmpul magnetic B_z este de-a lungul axei Oz, atunci câmpul Hall apare fie în direcția axei Oy (+Oy), fie în sens contrar acesteia (-Oy), depinzând de polaritatea purtătorilor de sarcină din material.

Să considerăm o probă semiconductoare în care există purtători de sarcină negativi (electroni) și pozitivi (goluri). Efectul Hall, în acest caz, implică nu numai concentrațiile de electroni și goluri, notate cu n și respectiv cu p , dar și mobilitățile electronilor și golurilor, μ_n și μ_p .

*Când un metal sau un semiconductor se află într-un câmp electric exterior, peste mișcarea dezordonată de agitație termică a purtătorilor de sarcină se suprapune mișcarea ordonată a lor, sub acțiunea câmpului aplicat. Astfel purtătorii de sarcină vor începe să se miște în ansamblu, lent, în direcția (purtători pozitivi) sau în direcția opusă (purtători negativi) câmpului, cu o *viteză medie de transport*, numită și viteză de drift. *Mobilitatea* este mărimea vitezei de drift raportată la unitatea de câmp electric: $\mu = |v|/E$; mobilitatea este definită ca pozitivă atât pentru electroni cât și pentru goluri, deși vitezele lor de drift sunt opuse ca semn.*

Dacă μ_n este mobilitatea și v_n - viteza de drift a electronilor, scriem modulul vitezei sub forma:

$$v_n = \mu_n E = \mu_n \frac{F}{e} \quad (1)$$

unde E este modulul intensității câmpului electric care determină mișcarea electronilor, iar F este modulul forței electrice care acționează asupra unui electron. O expresie similară se obține și pentru un gol:

$$v_p = \mu_p E = \mu_p \frac{F}{e} \quad (1')$$

Când cele două tipuri de purtători de sarcină sunt prezente în proba semiconductoare iar aceasta este introdusă într-un câmp magnetic, asupra purtătorilor acționează forța Lorentz, ($\vec{F} = e(\vec{v} \times \vec{B})$) după cum se observă în fig. 1.

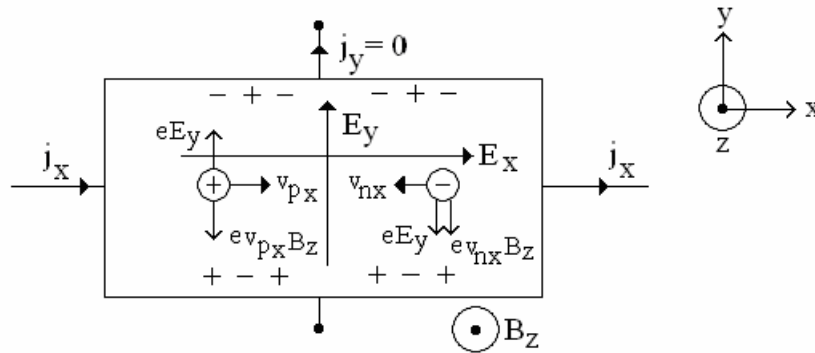


Fig.1.

Se observă că atât electronii cât și golurile sunt deviate de câmpul magnetic spre marginea de jos a probei. Mărimea forței Lorentz este diferită pentru electroni și goluri deoarece mobilitățile și deci vitezele de drift, sunt diferite. Dacă circuitul pe direcția Oy este deschis, la un moment dat se atinge echilibrul și curentul pe această direcție va fi nul. Să presupunem că mai multe goluri s-au acumulat la marginea inferioară a probei, astfel încât în probă există un câmp electric paralel cu axa Oy, E_y , orientat ca în figura 1. Acest câmp se numește *câmp Hall*. Densitatea de curent pe această direcție este nulă și putem scrie:

$$j_y = j_p + j_n = ev_{py} + en_{ny} = 0 \quad (2)$$

unde v_{ny} și v_{py} sunt vitezele de drift ale electronilor și respectiv golurilor în direcția câmpului E_y . Din ecuația (2) obținem:

$$pv_{py} = -nv_{ny} \quad (3)$$

Forțele care acționează asupra celor două tipuri de purtători de sarcină pe direcția Oy sunt:

$$F_{py} = eE_y - ev_{px}B_z \quad \text{și} \quad -F_{ny} = eE_y + ev_{nx}B_z \quad (4)$$

unde v_{px} și v_{nx} sunt vitezele golului și electronului de-a lungul lui Ox. Din ecuația (1) obținem expresiile acestor forțe: $F_{py} = \frac{ev_{py}}{\mu_p}$ și $-F_{ny} = \frac{ev_{ny}}{\mu_n}$, astfel încât ecuația (4) devine:

$$\frac{ev_{py}}{\mu_p} = eE_y - ev_{px}B_z \quad \text{respectiv} \quad \frac{ev_{ny}}{\mu_n} = eE_y + ev_{nx}B_z$$

și înlocuind în continuare din ecuația (1): $v_{px} = \mu_p E_x$ și $v_{nx} = \mu_n E_x$, obținem

$$\frac{v_{py}}{\mu_p} = E_y - \mu_p E_x B_z \quad \text{respectiv} \quad \frac{v_{ny}}{\mu_n} = E_y + \mu_n E_x B_z \quad (5)$$

Determinăm din ecuația (5) expresiile pentru v_{py} și v_{ny} și le introducem în relația (3).

Obținem:

$$p\mu_p E_y - p\mu_p^2 E_x B_z = -n\mu_n E_y - n\mu_n^2 E_x B_z$$

sau

$$E_y (p\mu_p + n\mu_n) = E_x B_z (p\mu_p^2 - n\mu_n^2) \quad (6)$$

Pentru determinarea lui E_x să calculăm densitatea de curent pe direcția Ox:

$$j_x = j_{px} + j_{nx} = epv_{px} + env_{nx} = eE_x (p\mu_p + n\mu_n) \quad (7)$$

Determinăm pe E_x din această relație și îl introducem în relația (6):

$$eE_y (p\mu_p + n\mu_n)^2 = j_x B_z (p\mu_p^2 - n\mu_n^2) \quad (8)$$

Constanta (sau coeficientul) Hall este un parametru care măsoară mărimea efectului; se definește prin relația:

$$R_H = \frac{E_y}{j_x B_z}$$

Obținem din relația (8) expresia constantei Hall pentru conducția bipolară într-un semiconductor:

$$R_H = \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{e(p\mu_p + n\mu_n)^2} \quad (9)$$

sau, notând cu $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ raportul mobilităților electronilor și golumilor, obținem:

$$R_H = \frac{p - nb^2}{e(p + nb)^2} \quad (10)$$

Relația obținută arată o constantă Hall care depinde de raportul mobilităților și de concentrațiile golumilor și electronilor. Constanta R_H va fi pozitivă sau negativă după cum $p > nb^2$ sau $p < nb^2$.

Dacă în proba semiconductoare este predominant doar un tip de purtători de sarcină, de exemplu golumile, atunci condiția (2) devine $j_y = epv_{py} = 0$ sau $v_{py} = 0$. Viteza de deviație după Oy poate fi nulă dacă forța $F_{py} = 0$; din relația (4) se observă că în acest caz forța Lorentz echilibrează forța câmpului electric de pe direcția Ox care generează curentul din probă. Particularizând relația (9) obținem expresia constantei Hall în acest caz:

$$R_H = \frac{1}{pe} \quad (11)$$

3. Metoda experimentală

Dimensiunile probei semiconductoare (p-Ge) și direcțiile de aplicare a câmpurilor electric și magnetic sunt arătate în fig. 2: $a = 10$ mm; $b = 1$ mm; $c = 20$ mm. Rezistența electrică a probei este $R = 35 \Omega$.

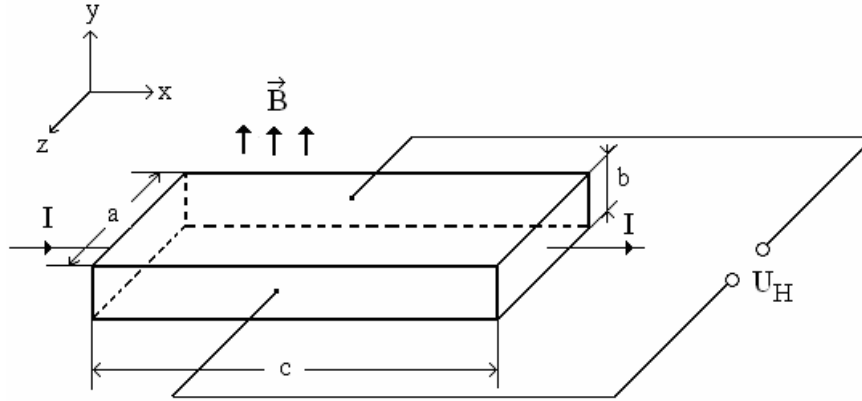


Fig.2.

Intensitatea câmpului electric Hall, conform fig. 2, este:

$$E_H = \frac{U_H}{a}$$

Acest câmp determină apariția forței electrice, $F_{el} = eE_H$, care acționează împreună cu forța Lorentz asupra electronilor. La echilibru: $eE_H = evB$. Ținând cont de expresia tensiunii Hall, de expresia vitezei de drift $v = \frac{j}{ne}$ și de relația (11), obținem relația pe care se bazează determinarea experimentală a constantei Hall:

$$U_H = aE_H = avB = a \frac{j}{ne} B = aR_H jB = R_H \frac{IB}{b} \quad (12)$$

Cunoscându-se valoarea constantei Hall, se determină concentrația electronilor din probă folosind relația (11) și mobilitatea Hall conform relației:

$$\mu = \sigma R_H \quad (13)$$

unde $\sigma = \frac{1}{\rho}$ (inversul rezistivității electrice) este conductivitatea electrică a probei care poate fi determinată dacă se cunoaște rezistența electrică a acesteia.



Fig.3.

Dispozitivul experimental (fig.3) conține un electromagnet între polii căruia este plasată proba semiconductoră. Inducția magnetică se măsoară cu un teslametru digital (prevăzut chiar cu o sondă Hall – care reprezintă una dintre aplicațiile efectului Hall); intensitatea curentului se măsoară cu un miliampermetru digital și se citește pe un display integrat în modulul Hall care susține proba; tensiunea Hall se măsoară cu un multimetru digital. Modulul se alimentează de la sursa de tensiune la 12 V curent alternativ.

Pentru a determina dependența tensiunii Hall de inducția magnetică fixați succesiv curentul prin probă la valorile de 10mA – 20mA - 30 mA. Variați apoi, pentru fiecare valoare a curentului, inducția magnetică de la –300 mT până la 300 mT din 50 în 50 mT. La valoarea zero trebuie să schimbați polaritatea curentului prin bobine. Notați într-un tabel valorile tensiunii Hall pentru fiecare valoare a inducției magnetice.

B (mT)	U_H (mV) $I = 10\text{mA}$	U_H (mV) $I = 20\text{mA}$	U_H (mV) $I = 30\text{mA}$
-300			
-250			
-200			
.			
.			
.			

4. Prelucrarea datelor experimentale

Etapele prelucrării datelor sunt următoarele:

- Reprezentați grafic $U_H = f(B)$, pentru fiecare valoare a curentului prin probă; conform relației (12), din panta dreptei obținute, calculați constanta Hall.
- Pe baza constantei Hall calculați concentrația gurilor din probă, conform relației (11); valoarea sarcinii elementare este $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C.
- calculați conductivitatea probei și mobilitatea gurilor, conform relației (13).

Întrebări

1. În ce constă efectul Hall?
2. Ce este constanta Hall și care este utilitatea ei? Scrieți relațiile cunoscute pentru constanta Hall, precizând mărimile fizice pe care le conțin.
3. Precizați unitățile de măsură în SI pentru mărimile fizice: densitate de curent, concentrația purtătorilor de sarcină, intensitatea câmpului electric, inducția magnetică, mobilitatea purtătorilor, constanta Hall, rezistivitate electrică, conductivitate electrică.