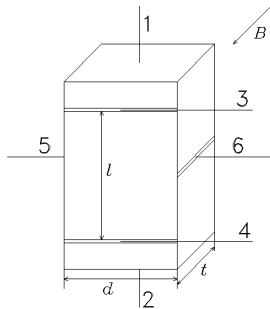


Úloha

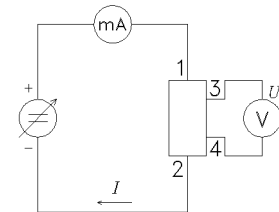
1. Zistíte závislosť prúdu vzorkou pri nulovej magnetickej indukcii.
2. Zistíte závislosť Hallovho napätia na magnetickej indukcii pri dvoch hodnotách konštantného prúdu vzorkou.
3. Výsledky merania spracujete graficky a vyhodnotíte mernú vodivosť a Hallovu konštantu vzorky.
4. Vypočítajte pohyblivosť a koncentráciu nosičov náboja.

Teória

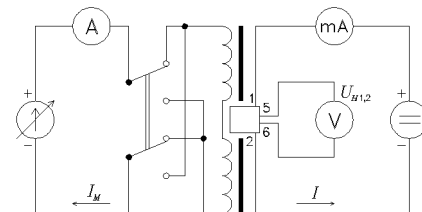
Hallov jav - vznik elektrického poľa kolmo na smer prúdu a magnetické pole - je dôsledok pôsobenia Lorentzovej sily na pohybujúce sa náboje. Pretože táto sila (a teda aj vzniknuté elektrické pole, ktoré ju kompenzuje) je úmerná rýchlosti pohybujúcich sa nábojov, jav je najlepšie pozorovateľný v polovodičoch, kde je nízka koncentrácia nosičov náboja, a tie teda majú vysokú rýchlosť.



Obr. 1: Zapojenie vzorky



Obr. 2: Meranie odporu



Obr. 3: Meranie Hallovho javu

Meranie vodivosti aj Hallovho napätia prebiehalo v štvorbodovom zapojení, čo eliminovalo prechodové odpory kov-polovodič. Použitý voltmeter musí mať vysoký vnútorný odpor.

Pre daný polovodič (germánium typu n) sú nosičmi náboja prakticky len elektróny a teda napätie medzi kontaktmi 5 a 6 z obrázka 1 je (podľa [1]):

$$U_H = E_y \cdot d = \langle v_e \rangle B \cdot d = \frac{I}{dt} \cdot \frac{1}{ne} B d = \frac{1}{ne} \cdot \frac{BI}{t} \quad (1)$$

Konštantný výraz sa označuje Hallova konštanta:

$$R_H = \frac{1}{ne} = \frac{U_H t}{BI} \quad (2)$$

kde n [m^{-3}] je koncentrácia elektrónov, $e = 1,60218 \cdot 10^{-19}$ C je náboj elektrónu, U_H [V] je Hallovo napätie, t [m] je hrúbka vzorky, B [T] je intenzita magnetického poľa, I [A] je prúd vzorkou. Meranie prebiehalo podľa obrázka 3. Keďže spojnice kontaktov na meranie Hallovho napätia nie je presne kolmá na smer prúdu, je potrebné odmerať toto napätie pri

oboch polaritách magnetického poľa a Hallovo napätie potom vypočítať ako polovicu z rozdielu nameraných napätí U_{H1} a U_{H2} .

$$U_H = \frac{U_{H1} - U_{H2}}{2} \quad (3)$$

Z Hallovej konštanty môžeme vypočítať koncentráciu nosičov náboja. Ak navyše odmerám mernú vodivosť vzorky σ (podľa obrázka 2)

$$\sigma = \frac{i}{E} = \frac{I}{U} \cdot \frac{l}{dt} = e n \mu_n = \frac{\mu_n}{R_H} \quad (4)$$

môžeme vypočítať pohyblivosť elektrónov μ_n .

Meranie

Vzorka: $l = (6,0 \pm 0,1)$ mm $d = (3,4 \pm 0,1)$ mm $t = (0,7 \pm 0,1)$ mm

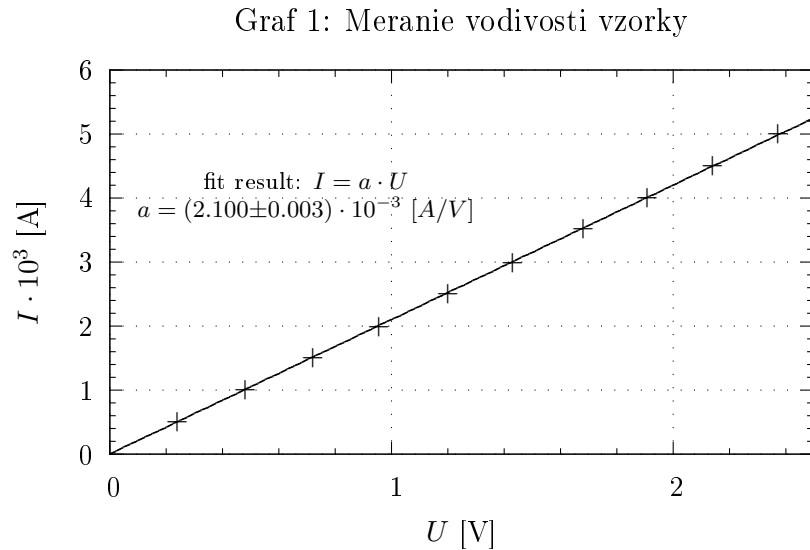
Ako miliampérmetr bol použitý digitálny prístroj Mastech MY-65 s presnosťou 0,5%. Voltmetrom bol digitálny prístroj Metex MXD-4660A s udávanou presnosťou 0,05% + 3 digit. Jeho vnútorný odpor bol 20 M Ω . Ručičkový ampérmetr zapojený pred elektromagnetom mal rozsah 6 A a triedu presnosti 0.5. Ním meraný prúd I_M bol úmerný magnetickému poľu podľa vzorca udávaného na elektromagnete:

$$B = 0,098 \cdot I_M \text{ [T, A]} \quad (5)$$

Meranie vodivosti pri nulovom magnetickom poli zhrňa tabuľka 1 a graf 1.

I	U
0,5008	0,2406
1,0015	0,4812
1,5047	0,7227
1,9910	0,9558
2,509	1,2014
2,992	1,4310
3,523	1,6817
4,008	1,9095
4,505	2,141
5,014	2,373

Tabuľka 1



Po zarátaní presnosti ampérmetra 0,5% (voltmeter mal oveľa lepšiu presnosť) k štatistickej chybe, dostanem mernú vodivosť:

$$\sigma = \frac{I}{U} \cdot \frac{l}{dt} = (2,100 \pm 0,011) \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(6,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}}{(3,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \cdot (0,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}} = (5,3 \pm 0,8) \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

Výsledky merania Hallovoho napätia podľa obrázka 3 sú v tabuľkách 2 a 3.

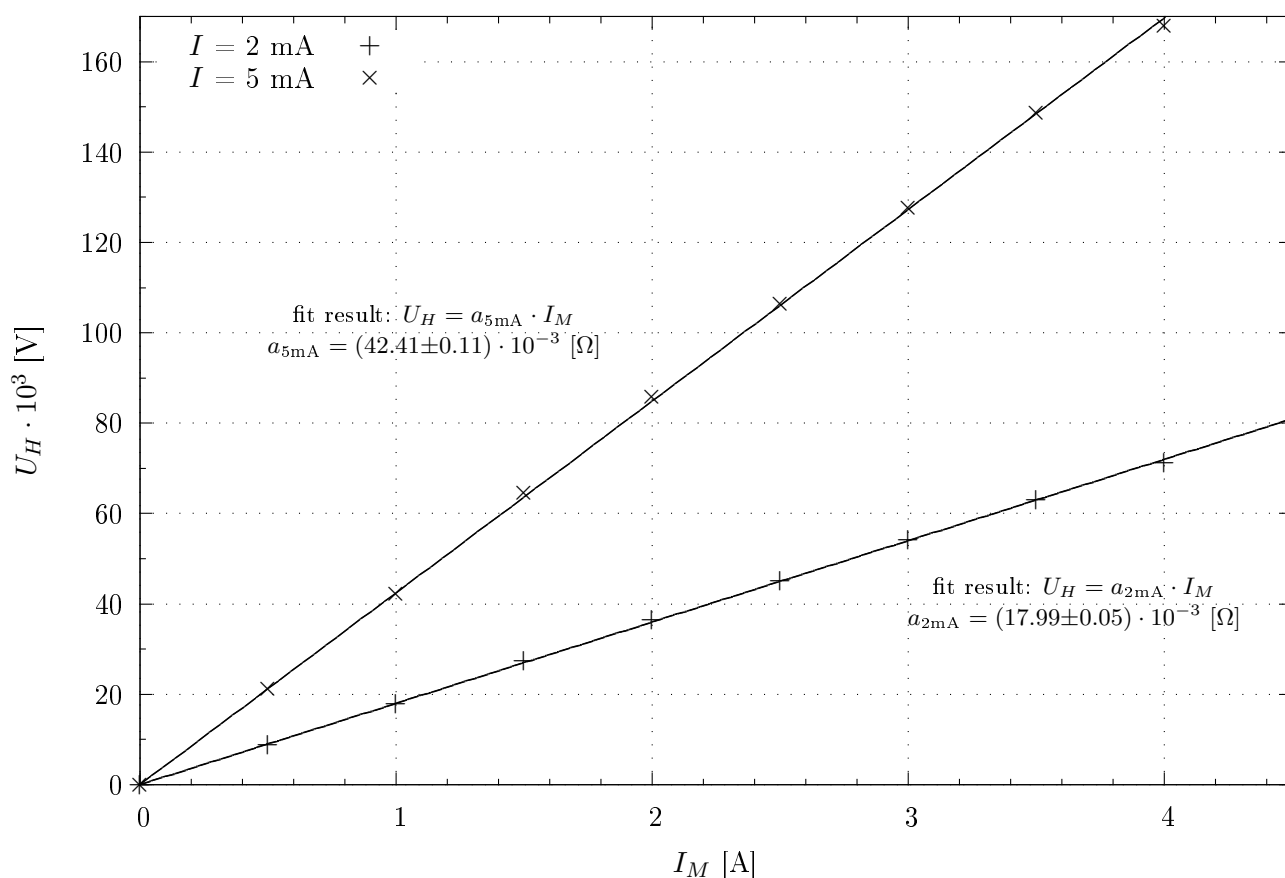
I_M [A]	U_{H1} [V]	U_{H2} [V]	U_H [V]
0,00	59,99	59,99	0,00
0,50	69,26	51,68	8,79
1,00	78,89	43,00	17,95
1,50	88,61	34,06	27,28
2,00	98,33	25,24	36,55
2,50	107,51	17,15	45,18
3,00	117,07	8,69	54,19
3,50	126,51	0,50	63,01
4,00	135,52	-7,12	71,32

Tabuľka 2: Meranie pri $I = 2$ mA

I_M [A]	U_{H1} [V]	U_{H2} [V]	U_H [V]
0,00	151,67	151,67	0,00
0,50	172,44	129,85	21,30
1,00	193,35	108,70	42,33
1,50	216,7	87,5	64,6
2,00	238,5	66,7	85,9
2,50	260,1	47,3	106,4
3,00	282,7	27,3	127,7
3,50	305,3	8,2	148,6
4,00	326,1	-9,8	168,0

Tabuľka 3: Meranie pri $I = 5$ mA

Graf 2: Hallovo napätie v závislosti na I_M a I



Pomer $\frac{U_H}{I_M}$ z grafu (po započítaní chyby ampérmetra 0,03 A pri priemerne 2 A) je $(18,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$ pre $I = 2$ mA a $(42,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-3}$ pre $I = 5$ mA. Podľa vzorca (odvodené z (2))

$$R_H = \frac{U_H}{B} \cdot \frac{t}{I} = \frac{U_H}{I_M} \cdot \frac{t}{0,098I}$$

je Hallova konštanta: $(64,3 \pm 9,2) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{C}^{-1}$ pre $I = 2$ mA a $(60,6 \pm 8,7) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{C}^{-1}$ pre $I = 5$ mA, priemerne teda $(62 \pm 9) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{C}^{-1}$.

Koncentrácia voľných elektrónov je podľa (2):

$$n = \frac{1}{R_H e} = \frac{1}{(62 \pm 9) \cdot 10^{-3} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}} = (1,01 \pm 0,15) \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \quad (6)$$

Pohyblivosť elektrónov vypočítam pomocou vzorcov (2) a (4), vzorec odvodím z východných údajov, čím eliminujem chybu t :

$$\mu_n = R_H \sigma = \frac{U_H t}{B I} \cdot \left(\frac{I}{U} \right)_{\text{graf 1}} \cdot \frac{l}{dt} = \frac{U_H}{I_M} \cdot \frac{l}{0,098 I d} \cdot (2,100 \pm 0,011) \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

Pohyblivosť je potom: $(0,3403 \pm 0,0129) \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ pre $I = 2 \text{ mA}$ a $(0,3207 \pm 0,0118) \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ pre $I = 5 \text{ mA}$, priemerne teda $(0,330 \pm 0,013) \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

Diskusia

Chyba meracích prístrojov (jednak systematická udávaná v špecifikácii, jednak štatistická z grafov) bola zanedbateľná vzhľadom k chybe rozmerov vzorky. Pre meranie Hallovhho napätia pri dvoch prúdoch vyšli o niečo rozdielne hodnoty, čo možno pripísať istej nelinearite Hallovhho napätia na prúde prechádzajúcom vzorkou. Do tohto rozdielu sa totiž nemohla zaradiť nelinearita iného druhu (napr. magnetickej indukcie na prúde cievkou alebo odporu vzorky na prúde), tá by sa totiž prejavila v grafoch. Nemožno však vylúčiť vplyv geometrie kontaktov.

Podľa [2] je elektrónová mobilita pre Ge typu n $3900 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (koncentrácia elektrónov 10^{14} cm^{-3} , teplota 300 K), čo zhruba odpovedá nameranej hodnote.

Záver

Namerané parametre vzorky germánia typu n sú:

$$\begin{aligned} \sigma &= (5,3 \pm 0,8) \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1} & R_H &= (62 \pm 9) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{C}^{-1} \\ n &= (1,01 \pm 0,15) \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} & \mu_n &= (0,330 \pm 0,013) \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

Literatúra

- [1] R. Bakule, J. Šternberk: Fyzikální praktikum II. SPN, Praha 1989
- [2] <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/Ge/electric.html>