



Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Mikroelektronikai és Technológia Intézet

Szenzor laboratórium, Mikro- és nanotechnika

Laboratóriumi gyakorlatok

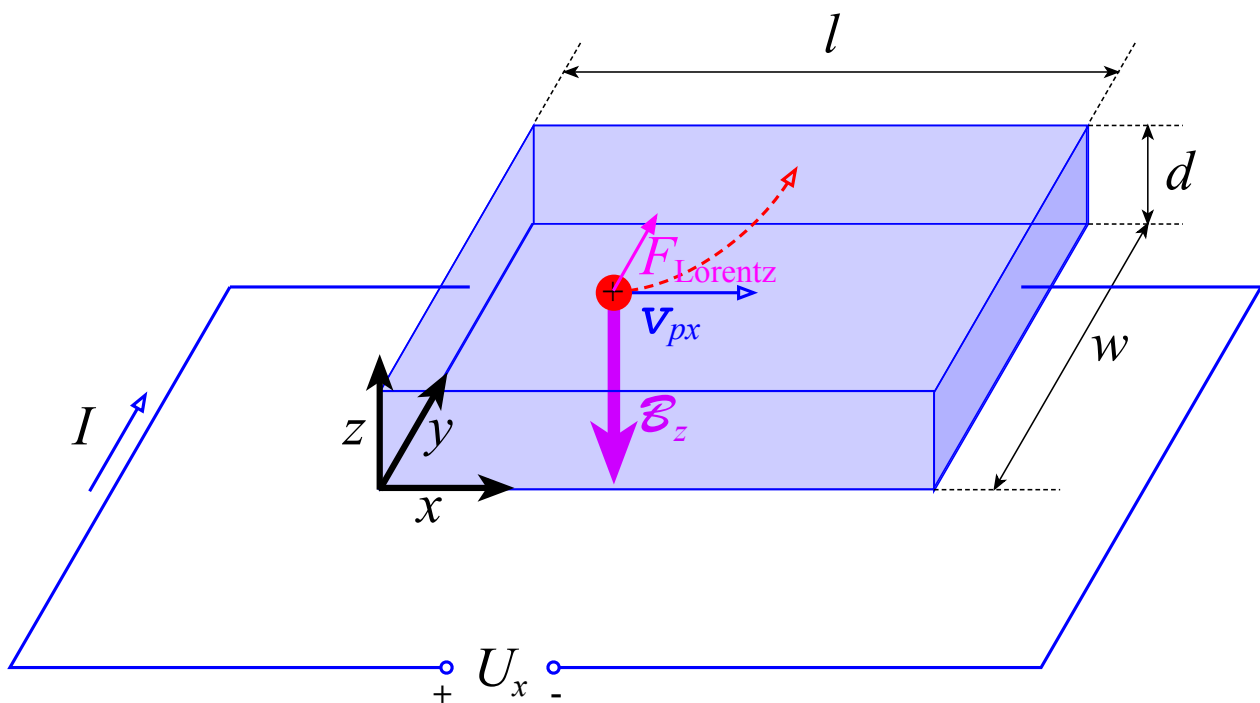
Mérési útmutató

Hall-szondák alkalmazásai

Kiadás dátuma: 2018. 02. 25.

A Hall-jelenség

A félvezetők mágneses tér hatására való viselkedését, az ún. Hall-effektust, 1879-ben fedezte fel E. F. Hall. — E jelenségen alapulnak a Hall-szenzorok is. — A félvezető anyagok tanulmányozása során kiderült, hogy a félvezetőben áramló töltéshordozókra ugyanúgy hat a mágneses tér, mint a szabad térben vagy a fémekben áramlókra. Ha a mágneses térben elhelyezett félvezető lemezen áram folyik át, az áram és a mágneses tér iránya által kijelölt síkra merőlegesen feszültség (Hall-feszültség) keletkezik.

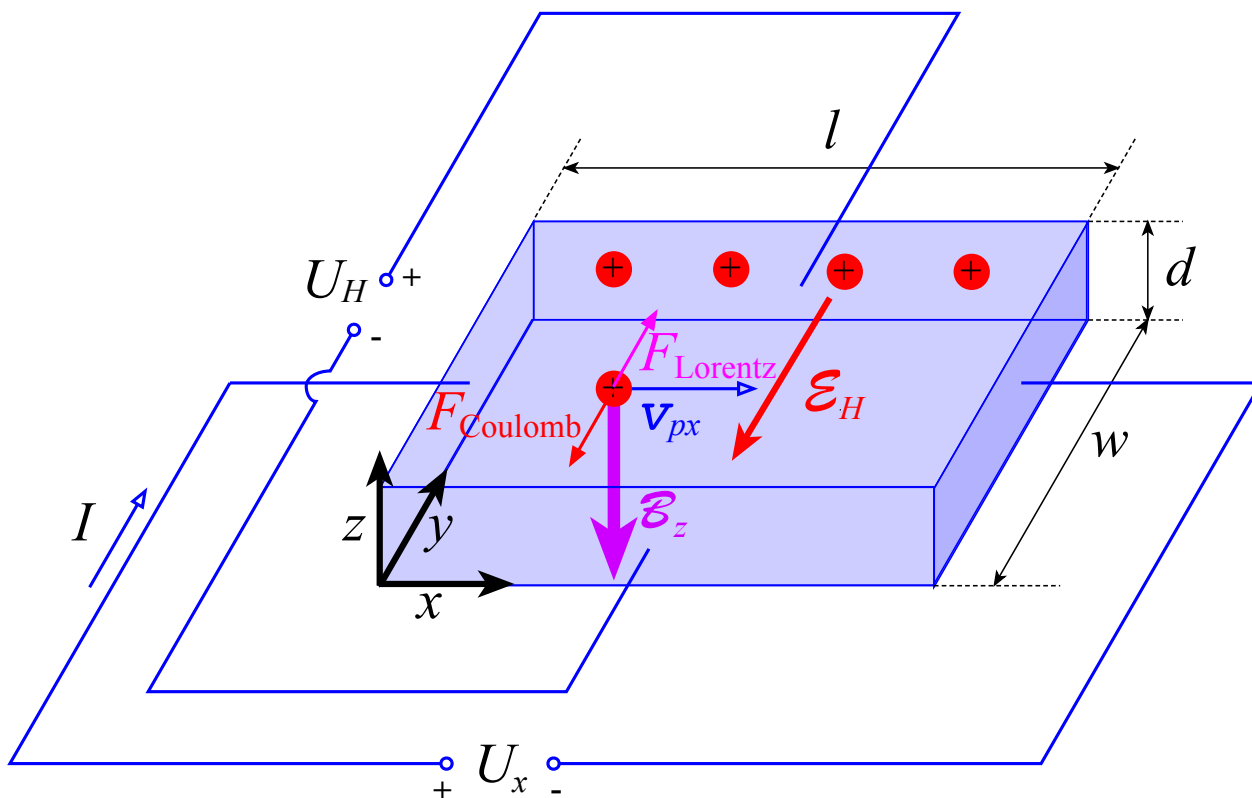


1. ábra: Mágneses tér hatása a mozgó, töltött részecskére

A mágneses térben mozgó, töltött részecskére a töltésével (q), sebességével (\mathbf{v}) és a mágneses indukcióval (\mathbf{B}) arányos Lorentz-erő hat,

$$\overline{\mathbf{F}}_{Lorentz} = q \cdot \overline{\mathbf{v}} \times \overline{\mathbf{B}}$$

Ez az erő a töltött részecskét az áramfolyás és a mágneses indukció irányára merőlegesen eltéríteni igyekszik. Mivel a vizsgált anyagdarab véges méretű, az eltérített részecskék a határfelületén felhalmozódnak, mindaddig, amíg az általuk létrehozott elektromos tér ellent nem tart a Lorentz-erőnek.



2. ábra: Hall-feszültség kialakulása, állandósult állapot

A töltött részecske (adott esetben a pozitív töltésű lyuk) sebessége:

$$v_{px} = \frac{U_x}{l} \cdot \mu_p$$

ahol μ_p [m²/Vs] a lyukak mozgékonyága .

A mintára kapcsolt feszültség kifejezhető az átfolyó áram és a minta ellenállásának segítségével:

ahol ρ az anyag fajlagos ellenállása és p a lyukak koncentrációja.

Mindezeket felhasználva és a Lorentz-erőt skaláris formában felírva:

$$F_{Lorentz} = q \cdot \mathcal{B}_z \cdot v_{px} = \mathcal{B} \cdot I \cdot \frac{1}{w \cdot d \cdot p}$$

Ezzel az erővel tart egyensúlyt a töltésfelhalmozódásból következő Coulomb-erő:

$$U_H = \frac{F_{Coulomb}}{p \cdot q} = \frac{U_H}{I} \cdot \frac{q}{w} \cdot \frac{I}{d} = R_H \cdot \mathcal{B}_z \cdot \frac{I}{d}$$

A két erő egyensúlyából következik, hogy a Hall-feszültség kifejezhető, mint:

ahol bevezettük a Hall-állandó fogalmát:

$$R_H = \frac{1}{p \cdot q}$$

3/13

Érdemes megjegyezni, hogy n-típusú félvezetők esetén a Hall-feszültség és a Hall-állandó is negatív értékű a fenti mérési elrendezést alkalmazva, valamint ekkor a Hall-állandó kifejezése:

ahol n az elektronok koncentrációja.

$$R_H = -\frac{1}{n \cdot q}$$

Félvezető anyagjellemzők meghatározása

A jelenleg forgalomban lévő félvezető eszközök és integrált áramkörök döntő többsége szilíciumból, kisebb hányada vegyületfélvezetőkből készül (pl. GaAs, InSb, GaAsP, stb.), az utóbbiakat főként optoelektronikai és mikrohullámú célokra alkalmazzák. A félvezetőkre jellemző kétféle áramvezetési mechanizmus lehetővé teszi a pn-átmenet kialakítását, és ezáltal diódák, tranzisztorok és egyéb félvezető eszközök megvalósítását. A félvezető n-típusú, ha szabad elektron többlettel, míg p-típusú, ha szabad lyuk többlettel rendelkezik.

Ismeretlen összetételű félvezető esetében mérésekkel kell meghatározni az anyag típusát, az adalékolás mértékét (a szabad töltéshordozók koncentrációját) és a töltéshordozók mozgékonyágát.

Szobahőmérsékleten és annak környezetében az általában alkalmazott adalékatomok egy-egy szabad töltéshordozót (elektront vagy lyukat) adnak le. Amennyiben tehát meghatározzuk a töltéshordozó-koncentrációt, megkapjuk a bevitt donor- vagy akceptorkoncentrációt is (feltéve, hogy nem kompenzált félvezetővel van dolgunk, ebben az esetben csupán a p és n típusú adalékok különbségét látjuk és csökkent nagyságú mozgékonyágot tapasztalunk).

Az 1. pontban ismertetett számítások alapján a Hall-állandó az $U_H(B_z)$ függvény meredekségéből a

$$\left(\frac{U_H}{\mathcal{E}_z} \right) \cdot \frac{d}{I} = R_H$$

minta geometriai méreteit és a húzóáramot ismerve meghatározható:

és rajta keresztül a töltéshordozó-koncentráció is meghatározható:

ahol q az elemi töltés ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ As).

$$p \text{ (vagy } n) = \frac{1}{|R_H| \cdot q}$$

Hasonlóképpen a Hall-feszültség polaritása megadja a többségi töltéshordozó típusát (lyuk vagy elektron).

A Hall-állandó ismeretében a vizsgált anyag(minta) fajlagos ellenállásából (ρ) meghatározható a

$$\mu_{p(n)} = \frac{|R_H|}{\rho}$$

többségi töltéshordozók mozgékonyága is:

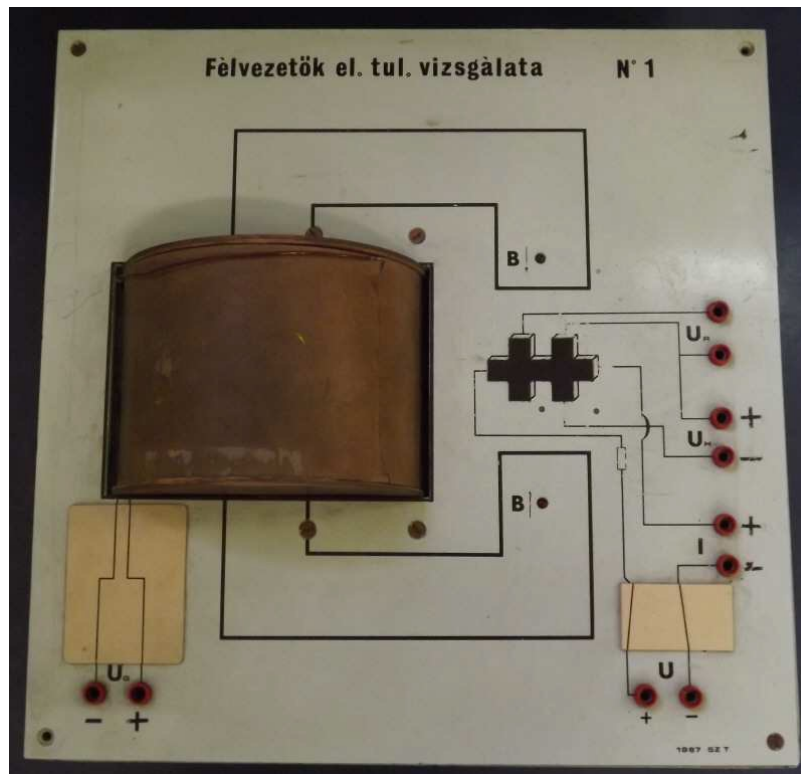
Érdemes megjegyezni, hogy a mozgékonyág függ a félvezető anyagától, a hőmérséklettől, az adalékkoncentrációtól és a töltéshordozók fajtájától. Pontosabb számításokhoz nomogramok és táblázatok állnak rendelkezésre. Átlagosan adalékolt félvezetőkre szobahőmérsékleten elfogadhatók az 1. táblázat adatai.

Germánium	elektronmozgékonyág: $\mu_n = 3600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
	lyukmozgékonyág: $\mu_p = 1800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Szilícium	elektronmozgékonyág: $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
	lyukmozgékonyág: $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
GaAs	elektronmozgékonyág: $\mu_n = 8500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
	lyukmozgékonyág: $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
InSb	elektronmozgékonyág: $\mu_n = 80000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
	lyukmozgékonyág: $\mu_p = 450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
CdSe	elektronmozgékonyág: $\mu_n = 600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
	lyukmozgékonyág: nincs adat.

1. táblázat: Különböző anyagok jellemző mozgékonyágai

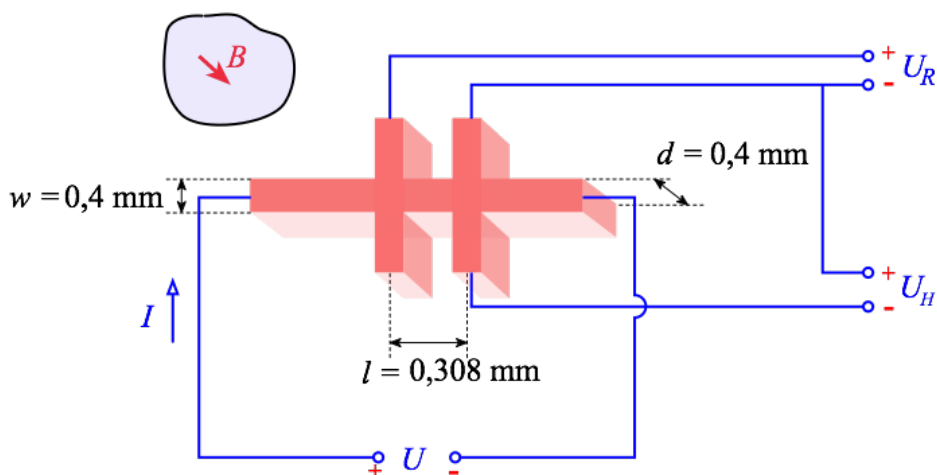
Félvezető anyagjellemzők mérése

Az anyagjellemzők méréséhez a 3. ábrán bemutatott mérőpanelt használjuk:



3. ábra: Az anyagjellemzők mérése szolgáló panel

A baloldali U_G bemenetre adjuk az elektromágnes táplálását; a jobboldali U bemenetre a Hall-szenzor táplálását; az I mérőpontokra az árammérőt kötjük; az U_R kimeneten az ellenállásméréshez szükséges feszültséget, az U_H kimeneten a Hall-feszültséget mérjük. Az elektromágnes légrésébe fixen beépítve található egy félvezető Hall-minta. A minta alakja, méretei és feszültségjellemzői a 4. ábrán láthatók. A méretek: $d = w = 0,4 \text{ mm}$, $l = 0,308 \text{ mm}$. A számításokhoz ezeket az adatokat használjuk.



4. ábra: Hall-szenzor bekötése és méretei

A., Fajlagos ellenállás meghatározása

Határozzuk meg a minta fajlagos ellenállását és vezetőképességét úgy, hogy legalább ötféle I húzóárammal elvégezzük a mérést. Az I húzóáram értéke 1 ... 6 mA tartományba essék. Ekkor a gerjesztőáram nincs bekapcsolva, a tápegység (FOK-GYEM TR9175/A) potenciométerével szabályozzuk az U tápfeszültséget úgy, hogy a kívánt I húzóáram értéket biztosítsa. Az ellenállást a kapott $U_R(I)$ görbére illesztett egyenes meredekségéből állapítjuk meg (lineáris regresszió!).

B., A Hall-feszültség hiszterézisének felvétele, az anyagparaméterek meghatározása

Állítsunk be 3 mA húzóáramot! Mérjük meg a Hall-feszültséget a gerjesztő áram függvényében a gerjesztő áramot csökkentve +1,6 A-tól -1,6 A-ig, majd növelve ismét +1,6 A-ig. A gerjesztőáramot " U_G " hüvelypár közé kapcsoljuk, a tápegység (FOK-GYEM TR9175/A) potenciométerével szabályozzuk. A tápegységen lévő kijelzőről leolvashatjuk a mágneses teret előállító gerjesztőáram nagyságát. Amennyiben egy kissé "túlszaladtunk" a megkívánt áramértéken, azt ne próbáljuk korrigálni, mert ezzel letérünk a fel- vagy lemágnesezési görbéről. A voltmérőt ekkor az " U_H " hüvelypárra kapcsoljuk a Hall-feszültség leolvasásához.

Minden negyedszakaszon (0 ... 1,6 A abszolút áramérték között) 6 ... 8 pontot vegyünk fel, ott, ahol meredeken nő az indukció (kis áramértékeknél – lásd 5. ábra), sűrűbben, ahol lapos a mágnesezési görbe, ritkábban. Ábrázoljuk a kapott Hall-feszültség értékeket mind a gerjesztőáram, mind az indukció függvényében. (Az adott gerjesztőáramhoz tartozó indukció értékeket a mágnesezési görbéről — 5. ábra — olvassuk le! Figyeljünk arra, hogy a görbe felső vagy alsó szakaszán járunk-e.)

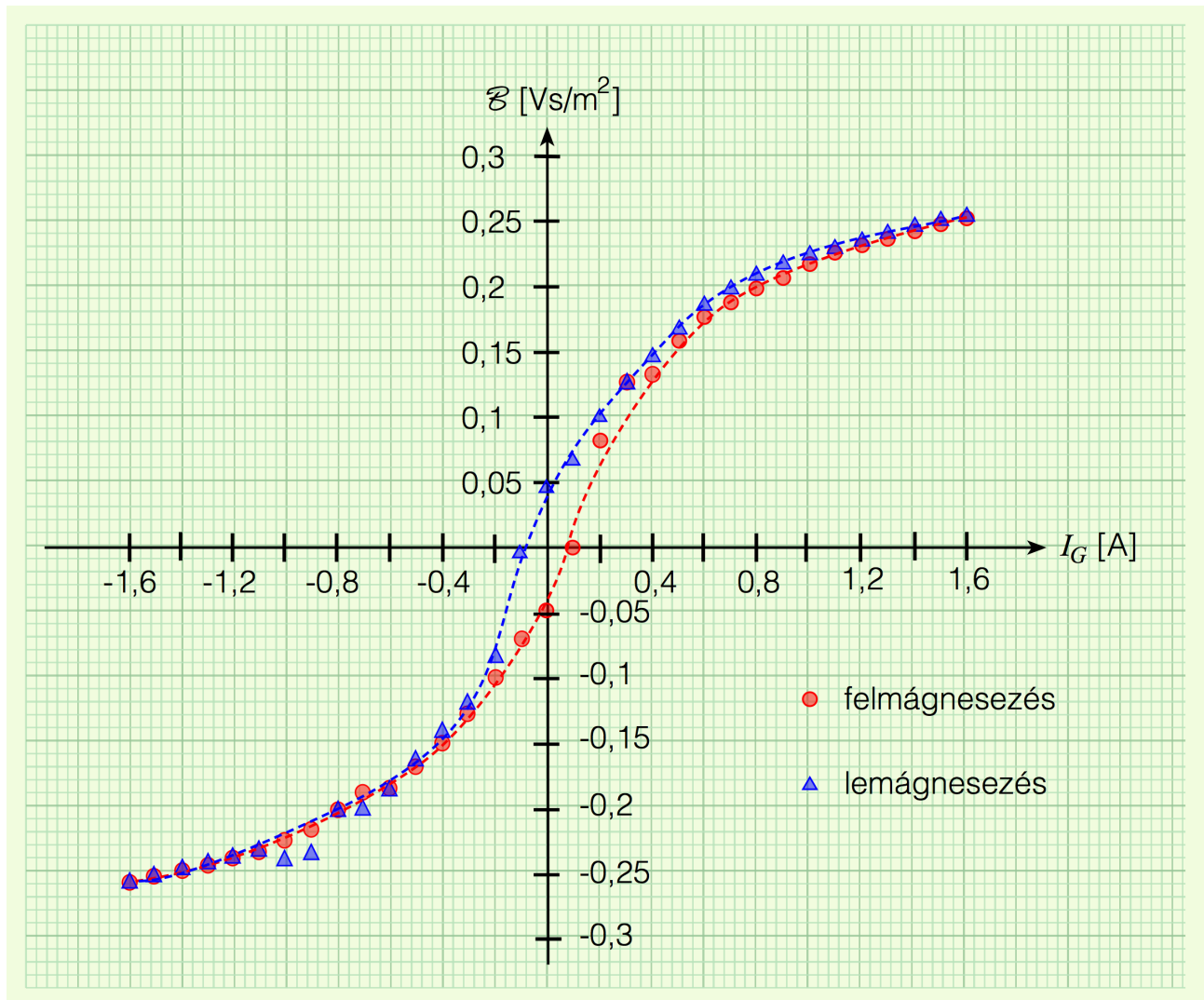
A Hall-feszültség előjeléből állapítsuk meg a minta típusát.

Számítsuk ki a Hall-állandót a $U_H(\mathbf{B})$ pontsorra illesztett egyenes paramétereiből (lineáris regresszió!).

A Hall-állandó segítségével állapítsuk meg a többségi töltéshordozók koncentrációját.

Felhasználva a fajlagos ellenállás mérés eredményét, határozzuk meg a többségi töltéshordozók mozgékonyágát.

A kiszámított eredmények alapján döntsük el, hogy germánium vagy szilícium minta mérését végeztük-e?



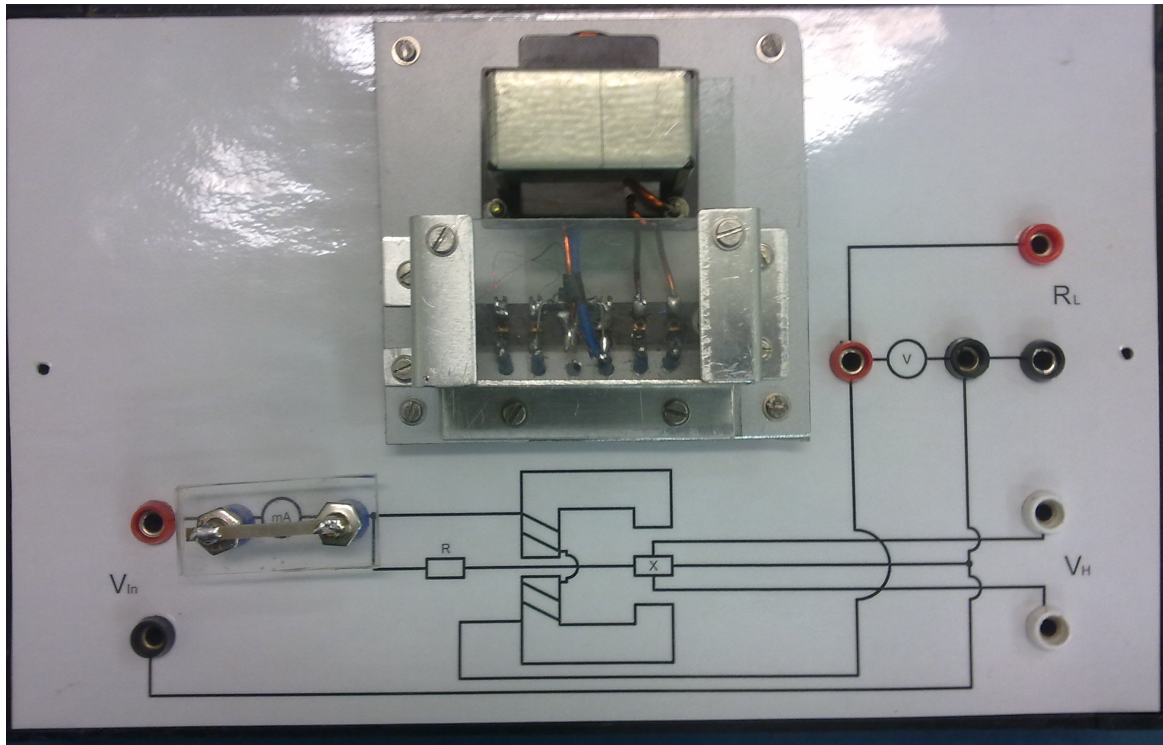
5. ábra: Az alkalmazott tekercs mágnesezési görbéje: $\mathbf{B}(I_G)$ nomogram

C., A Hall-feszültség húzóáram függésének vizsgálata

Mérjük meg a Hall-feszültséget hat különböző húzóáramnál az 1...6 mA tartományban. A gerjesztőáram legyen 0.8 A. Ügyeljünk az indukció érték megfelelő beállítására és helyes leolvasására! Ábrázoljuk a Hall-feszültséget a húzóáram függvényében!

3. Villamos teljesítménymérés Hall-szenzorral

Az 6. ábra mutatja a Hall-szenzorral történő teljesítménymérés mérési elrendezését és kapcsolását.



6. ábra: Hall-szenzorral történő teljesítménymérés, mérési elrendezés és kapcsolás

Mint azt az 1. részben láttuk, a Hall-feszültség kifejezhető:

$$U_H = k \cdot I_{\text{húzó}} \cdot \mathcal{B}$$

formában,

ahol: U_H : a Hall-feszültség (kimeneti feszültség);

k : a szenzorra jellemző állandó;

$I_{\text{húzó}}$: a Hall-cella húzóárama;

\mathcal{B} : a mágneses indukció.

A kapcsolásban szereplő R ellenállás a Hall-áramot korlátozza; egyúttal a szenzor érzékenysége állítható vele bizonyos határok között. Mivel a szenzor hőmérsékletfüggése jelentős, ezért a gyakorlatban kompenzáló áramkörök használata szükséges a pontos mérések elérése érdekében (a Hall-áram értéke befolyásolja az önfűtés mértékét is).

A szenzort a terheléssel soros induktivitás („egytekerceses transzformátor”) légrésébe helyeztük, így a mágneses erővonalak jelentős része a szenzoron keresztül záródik. Az induktitásnak kis menetszámúnak kell lennie (és kis impedanciájúnak váltakozó áram szempontjából), így nem lesz

túl nagy a tekercs által gerjesztett mágneses indukció (nem viszi telítésbe a vasmagot), azonban ilyenkor nagyobb érzékenységre van szükség

A villamos teljesítmény képlete szerint:

$$P_{\text{terhelés}} = U_{\text{terhelés}} I_{\text{terhelés}} \cong U_{\text{táp}} I_{\text{terhelés}}$$

A Hall-áram a tápfeszültséggel egyenesen arányos (az induktivitás ellenállása hanyagolható), vagyis

$$I_{\text{húzó}} = \frac{U_{\text{táp}}}{(R + R_{\text{szenzor}})}$$

A mágneses tér, amibe a szenzort helyezük, egyenesen aránylik a tekercsen átfolyó árammal:

$$\mathcal{B} = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r \frac{NI_{\text{terhelés}}}{l_m}$$

ahol $\mu = \mu_0 \mu_r$: a mágneses permeabilitás (állandó, vasmag jellemző); valamint

H : mágneses térerősség;

N : tekercs menetszáma;

I : induktivitás árama ($I_{\text{terhelés}}$);

l_m : a közepes mágneses úthossz.

Az előbb felsorakoztatott összefüggések alapján kijelenthető, hogy a 6. ábrán szereplő kapcsolás

$$U_H = k \frac{U_{\text{táp}}}{(R + R_{\text{szenzor}})} \mu_0 \mu_r \frac{NI_{\text{terhelés}}}{l_m} \cong \frac{k \mu_0 \mu_r N}{(R + R_{\text{szenzor}}) l_m} U_{\text{terhelés}} I_{\text{terhelés}}$$

szerint a Hall-szenzor kimeneti feszültsége (U_H) arányos a terhelés villamos teljesítményével.

Megállapítható továbbá az is, hogy a szenzor kimeneti feszültsége nem függ a frekvenciától: ezért alkalmazzák ezt az elrendezést akár GHz-es tartományokig teljesítménymérésre (pl.: mikrohullámú adóberendezések).

A gyakorlatban azonban a linearitást jelentősen rontja egyrészt az R ellenállás szórása, a szenzor hőmérsékletfüggése, valamint a tekercs vasmagjának mágnesezési görbéje; mivel a $\mathbf{B-H}$ görbe pusztán az origó közelében lineáris.

A mérést egyenáramú körön végezzük; a hálózati feszültség letranszformálása a mérés során nem célravezető, mivel az állandóan ingadozik, ezért a Hall-feszültség is akár több mV-ot is változhat folyamatosan.

FIGYELEM: A mérőkör táplálását a FOK-GYEM TR-9158 típusú tápegységgel végezze! A mérési összeállításban rendelkezésre álló TR-9158 típusú tápegység feszültségbeállítása és az általa mért áram pontosnak tekinthető.

D. Húzóáram mérése és az ofszet hibafeszültség meghatározása:

Mérje meg a Hall-szenzor húzóáramát 4 V-os léptékekben 0 ... 40 V-ig terhelés nélküli állapotban ($R_{\text{terhelés}} = \infty$, ekkor csak a szenzor vesz fel áramot), majd ábrázolja.

Ideális esetben, ha nincs terhelés, a szenzor kimeneti feszültsége 0. A valóságban ilyenkor is néhány mV kimeneti feszültséget szolgáltat a szenzor.

Mérje meg és ábrázolja a kimeneti ofszet hibafeszültséget 0 ... 40 V tápfeszültség és $R_{\text{terhelés}} = \infty$ mellett 4 V-os léptékekben.

E., Terhelési karakterisztikák felvétele:

Vegye fel a „Hall-feszültség – terhelő áram (és tápfeszültség)” karakterisztikát, ha $R_{\text{terhelés}}$ értéke 7 Ω , 15 Ω , 30 Ω !

Terhelő ellenállásnak a mérési összeállításhoz biztosított tolóellenállást alkalmazza!

A megkívánt ellenállásérték beállítását független ellenállásméréssel ellenőrizze, majd a beállított tolóellenállást kösse be a mérődoboz R_L kapcsaira

Határozza meg és ábrázolja a „Hall-feszültség – teljesítmény” karakterisztikát (az előző mérési eredményekből kisserkeszthető)!

4. Műszerek és kellékek

Digitális multiméter, 2db (Hameg HM8012)

Stabilizált tápegység (FOK-GYEM TR9175/A)

Stabilizált tápegység (FOK-GYEM TR9158)

Tolóellenállás

Anyagparaméter-mérő, Hall-szondás összeállítás

Teljesítménymérő összeállítás

5. Ellenőrző kérdések

1. Ismertesse röviden a Hall-effektust!
2. Mi az oka a Hall-feszültség megjelenésének?
3. Milyen anyagi paramétereket foglal magába a Hall-állandó?
4. Melyik anyagparamétert kell a Hall-állandón kívül meghatározni, hogy a mozgékonytságot ki tudjuk számítani?
5. Mit jelent a lineáris regresszió?
6. Rajzolja fel a koncentráció és mozgékonytságmérés folyamatábráját!
7. Ismertesse a Hall-szenzorral történő teljesítménymérés elvét!
8. Rajzolja fel a lágyvas mágnesezési, $B(I_G)$ görbéjét!
9. Milyen hatások okoznak hibát a Hall-szenzoros mérési eljárásokban?
10. Rajzolja fel a Hall-szenzoros teljesítménymérés folyamatábráját!
11. Rajzoljon fel egy Hall-generátor meghajtására alkalmas, diszkrét elemekből felépített áramkört!
12. Rajzoljon fel egy Hall-generátor szimmetrikus kimeneteit egy aszimmetrikus bemenetű eszközhöz (pl. A/D konverter) illesztő áramkört!
13. Hogyan kompenzálná egy Hall-generátor hőfokfüggését?

6. Mérési jegyzőkönyv

A mérési jegyzőkönyvet e-mailben kell benyújtani a mérést követő két héten belül (ha az oktató szóban másképp nem kéri).

A jegyzőkönyvnek tartalmaznia kell:

- A mérést végzők nevét, a mérés helyét, idejét, tárgyát.
- Nyilatkozatot arról, hogy a mérést a nevezett személyek saját maguk végezték és az eredményeket maguk értékelték ki.
- A műszerek jegyzékét.
- Mérési feladatonként külön-külön a mért adatokat, az azokból kiértékelt adatokat, és a karakterisztikák grafikus megjelenítését.
- Mérési feladatonként külön-külön az eredmények értékelését.

KERÜLJÉK a jegyzőkönyvek másolását! Azonos vagy nagyon hasonló jegyzőkönyvek NEM FOGADHATÓK EL!

A jegyzőkönyvek meg kell, hogy feleljenek az intézeti honlapon megadott általános követelményeknek.

A mérési eredményeket ne pendrive-on, illetve egyéb adathordozón vigyék haza a mérés befejeztével, hanem e-mailben küldjék el maguknak!