



Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Mikroelektronikai és Technológia Intézet

Mikro- és nanotechnika
Tárgykód: KMENT14TNC
Laboratóriumi gyakorlatok

Mérési útmutató

A méréseket és az útmutatót
összeállították:
Hegy Ákos
Horváth Márk
Horváth Zsolt József
Mészáros András
Mihalik Gáspár
Nagy Péter
Pődör Bálint
Tóth József
Törőcsik Márton

1. Nyomásérzékelők vizsgálata

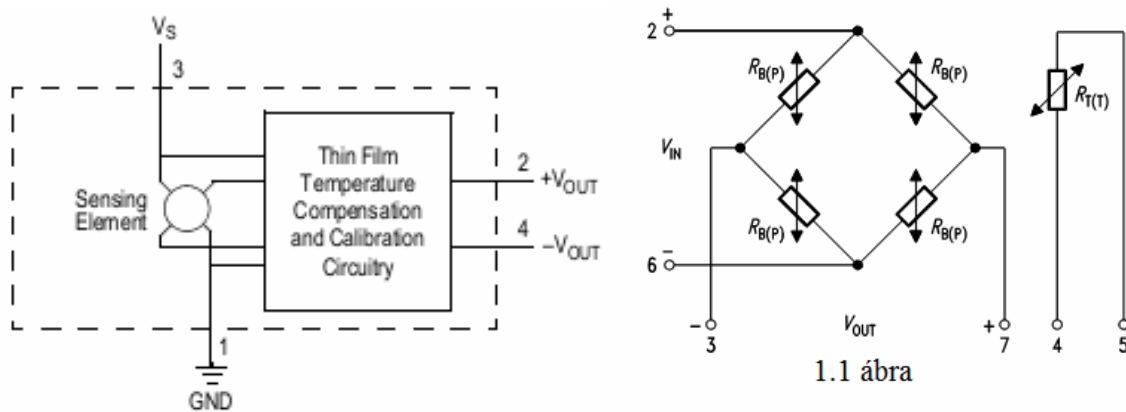
Elméleti összefoglaló

A vizsgálatra szánt nyomásérzékelők szilícium lapkát tartalmaznak. A szenzor egy membránon elhelyezett 4 db hídba kapcsolt diffundáltatott ellenállást tartalmaz. A nyomás érzékelése a piezorezisztív elv alapján történik: a nyomás hatására deformálódik a membrán, és ezáltal megváltozik az ellenállások értéke.

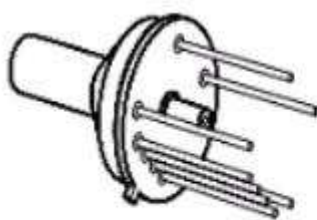
A szenzorban lévő ellenálláshíd ellenállásainak változása olyan, hogy a szomszédos hídágak változása ellentétes. A hidat áram- vagy feszültséggenerátorral táplálva a híd kimenetén a nyomással arányos feszültség jelenik meg. A mérési összeállítás egy KPY-12, egy KPY-42 és egy MPX2010DP típusú szenzor vizsgálatát teszi lehetővé, amelyeknek belső felépítéseit az 1.1. ábra mutatja. A nyomásérzékelővel egybe van építve egy hőszensor is (ellenállás).

Háromféle nyomásértéket különböztethetünk meg:

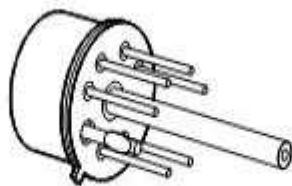
- abszolút nyomásérték: a légüres térhez viszonyított nyomásérték;
- relatív (effektív) nyomásérték: a légnyomástól való eltérés (légnyomáshoz viszonyított érték);
- differenciális nyomásérték: egy referencia nyomáshoz viszonyított nyomásérték.



1.1 ábra



KPY-12
relatív nyomásszenzor



KPY-42
abszolút nyomásszenzor



MPX2010DP
differenciál nyomásszenzor

A mérések célját a vizsgálatra szánt nyomásérzékelők nyomás-feszültség karakterisztikájának felvétele (feszültség- és áramgenerátoros táplálás), hőmérséklet függésének vizsgálata, valamint a nyomásérzékelő hibáinak megmérése és kiszámítása képezi.

A nyomásérzékelő alaphibája három összetevőből áll:

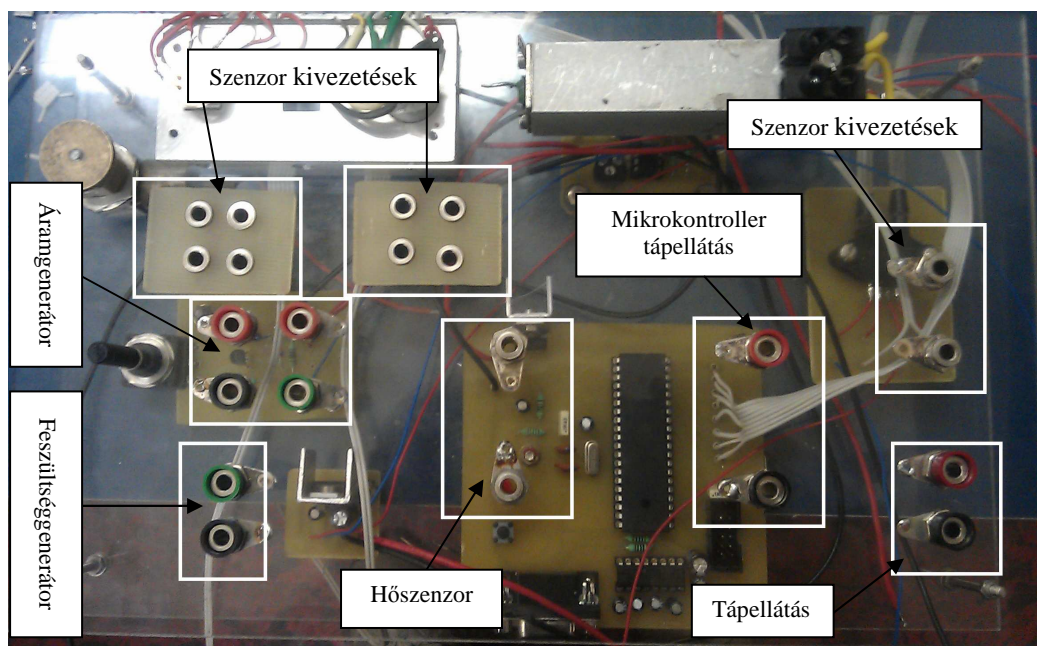
- nemlinearitási hiba (NL-hiba);
- hiszterézis (H-hiba);
- ismétlődési hiba (I-hiba).

Ezekből az alaphiba a következőképpen számítható:

$$A_H^2 = NL^2 + H^2 + I^2$$

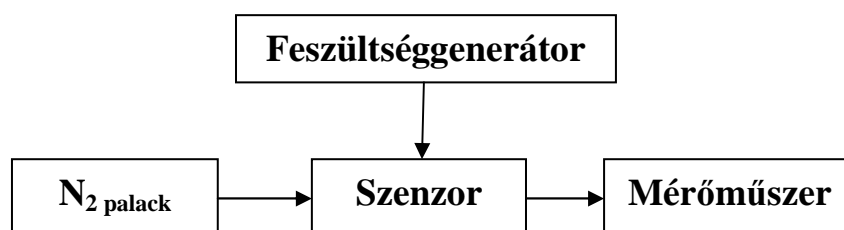
A nyomásérzékelő az alaphibán kívül járulékos hibákkal is rendelkezik, ezek közül legjelentősebb a hőmérsékleti hatás. Tekintve, hogy a szilícium fajlagos ellenállása hőmérsékletfüggő, a szenzorban kialakított ellenállások értékét a nyomáson kívül a hőmérséklet is befolyásolja.

Mérendő kapcsolások ismertetése



1.2. ábra

FONTOS: AZ ÁRAMGENERÁTORRA 20V-OT ADJUNK, A MIKROKONTROLLERRE CSAK 12V-OT! ÜGYELJÜNK A POLARITÁSOK HELYES BEKÖTÉSÉRE!!!!



1.3 ábra

Feszültséggenerátoros meghajtás

A nyomásérzékelőt egy alumínium tömbbe helyeztük, amelynek fűtését 12V egyenfeszültséggel kell ellátni. Az alumínium tömbben is elhelyeztünk egy termisztort a környezeti hőmérséklet mérésére.

A mérési elrendezést az 1.2 ábra szemlélteti, a feszültséggenerátoros összeállítást az 1.3. ábra. Az 1.4. ábra a nyomásérzékelő kivezetéseit mutatja. A mérési elrendezésen az 1. és 4. kivezetésekre kell adni a tápfeszültséget, illetve a hidat tápláló áramot (bemenet az 1.4. ábrán). A 2. és 3. kivezetések a híd kimenetei. Az 1.1. ábrán jelzett hőszensor kivezetéseit szintén jelöltük az 1.2. ábrán. Erre azért volt szükség, mert a fűtés miatt alumínium tömbbe ágyazott nyomásszenzor lábkiosztása nem látható. Mielőtt a mérést elkezdenénk, mérjük ki a híd ellenállását, illetve határozzuk meg az egyes ellenállások értékét szobahőmérsékleten, valamint a hőszensor ellenállását.

A híd U_{KI} kimeneti jele áramgenerátoros meghajtás esetén a következő módon függ a híd $R(T)$ ellenállásától és a meghajtó áram erősségétől (I):

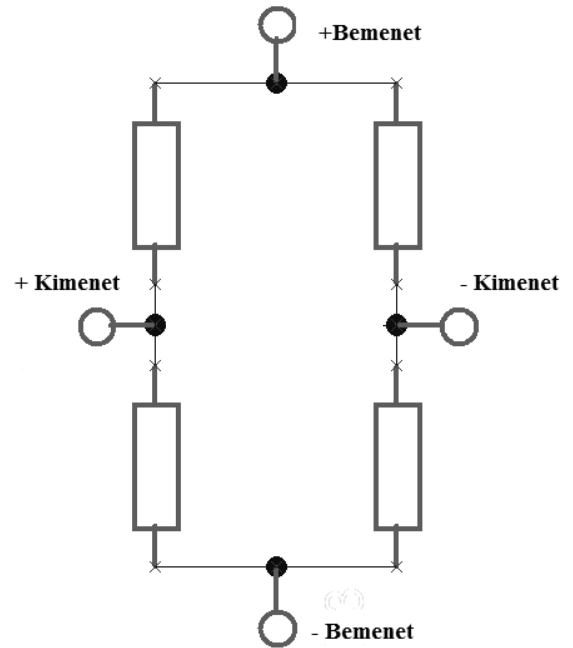
$$U_{KI}(T) = G(T) \cdot R(T) \cdot I$$

Ahol $G(T)$ az érzékenységi tényező (ú.n. Gauge faktor). Az érzékenységi tényező és az ellenállás érték ellenkező irányban függenek a hőmérséklettől, ezért a kimeneti feszültség csak kis mértékben függ a hőmérséklettől.

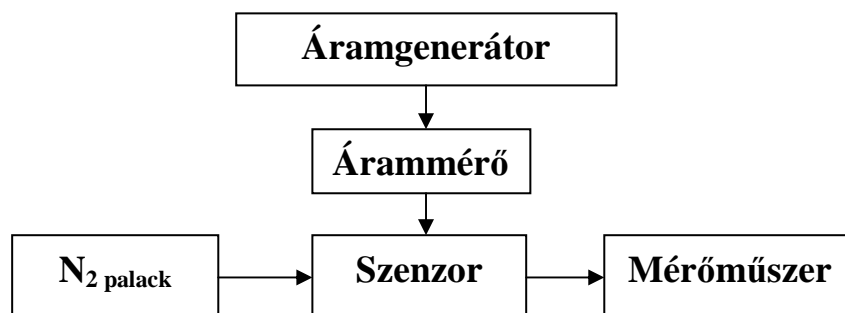
Feszültséggenerátoros meghajtás esetén a kimeneti feszültség az $U_{táp}$ tápfeszültségtől függ:

$$U_{KI}(T) = G(T) \cdot U_{táp}$$

Ez esetben azonban a kimeneti jel csupán $G(T)$ révén lesz hőmérsékletfüggő, $R(T)$ kompenzáló hatása elvész, és a híd kimeneti jele erősen hőmérsékletfüggő lesz. Tehát a hidat a lehetőségek szerint áramgenerátorról kell táplálni, érdekes feladat azonban a feszültséggenerátoros eset hőmérsékletfüggését is megvizsgálni.



1.4. ábra



1.5 ábra

Áramgenerátoros meghajtás

A mérési összeállítást a 1.5 ábra szemlélteti. A potméter segítségével állítható be a hídáram értéke (5 mA), amit egy sorosan bekötött árammérővel tudunk pontosan megmérni.

Feladatok

1., A nyomásérzékelő nyomás-feszültség karakterisztikájának felvétele

a., Feszültséggenerátoros meghajtás

Az 5 V-os feszültségforrást kössük rá a szenzor bemenetére, vegyük fel a nyomásszenzor karakterisztikáját (nyomás-feszültség karakterisztika) 0 és 1,4 bar között 0,2 bar lépésközzel. Ábrázoljuk a kimeneti jel nyomásfüggését. Elvégezendő a KPY-12 és a KPY-42 szenzor esetében.

b., Áramgenerátoros meghajtás

Az áramgenerátort kössük rá a szenzor bemenetére és vegyük fel a nyomásszenzor karakterisztikáját (kimeneti feszültség a nyomás függvényében) 0 és 1,4 bar között 0,2 bar lépésközzel növekvő nyomás mellett 5 mA meghajtó áramnál. Ábrázoljuk a kimeneti jel nyomásfüggését. Elvégezendő a KPY-12 és a KPY-42 szenzor esetében.

2., Hiszterézis-hiba felvétele

A nyomásérzékelőt a 3.3. ábra összeállításában (áramgenerátoros meghajtás) csökkenő nyomás értékekkel is megvizsgáljuk 1,4 és 0 bar között 0,2 bar lépésközzel 5 mA meghajtó áramnál. A hiszterézis következtében ugyanazon a nyomáson más lesz a válaszjel a nyomás növekvő és más a nyomás csökkenő menete esetében. Képezzük az azonos nyomásértékekhez tartozó jelek különbségét, és százalékosan (a különbségeket rendre elosztjuk a névleges jellel) adjuk meg a hiszterézis-hibát a nyomás függvényében. Ezt a mérést csak azután végezzük el, hogy a mérendő eszközre egyszer már a névleges nyomás értéket ráadtuk, majd visszaengedtük az alapnyomásra. Csak a KPY-42 szenzor esetében kell elvégezni.

3., Ismétlődési hiba felvétele

Az ismétlődési hiba meghatározása céljából a KPY-42 típusú nyomásérzékelővel megismételjük a hiszterézis mérést. Képezzük rendre az első ciklusban növekvő nyomás mellett kapott értékek és a második ciklusban növekvő nyomás mellett kapott értékek különbségét, majd ugyanúgy járunk el a csökkenő nyomás mellett kapott értékek esetében is. Az ismétlődési hiba %-os értéke a két mért feszültségérték különbsége osztva a névleges jellel.

4., Hőmérsékleti hiba meghatározása

A hőmérsékleti hibát a KPY-42 típusú szenzoron mind áramgenerátoros, mind feszültséggenerátoros meghajtás esetén el kell végezni. Az alumínium fűtőtestet a szenzorra helyezük, Bekapcsoljuk a fűtést és mérjük a hőszensor ellenállását. A vezérlés 45 °C-ra melegíti fel a fűtőtestet, majd ezen a hőmérsékleten tartja. Ha beállt a 45 °C, a hőszensor ellenállása nem változik tovább. Ekkor vegyük fel a szenzor kimeneti jelének nyomásfüggését a 0-1,4 bar nyomástartományban 0,2 bar lépésközzel. A hőmérsékleti hibát a szobahőmérsékletű (25 °C) és a 45 °C-on mért értékekből lehet meghatározni a nyomás függvényében. A hiba dimenziója %/°C, tehát meghatározzuk az 1°C-ra eső változást, azt a szobahőmérsékleten mért nettó kimeneti jelhez viszonyítjuk, és %-ban fejezzük ki.

Műszerek és kellékek

Mérési elrendezés

2 db egyenáramú tápegység (Hameg HM8040, FOK-GYEM TR9175 – a fűtéshez!)

2 db feszültségmérő (Hameg HM8012)

Árammérő (Hameg HM8012)

Mérési jegyzőkönyv

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

A jegyzőkönyvnek tartalmaznia kell:

- 1., A mérést végzők nevét, a mérés helyét, idejét, tárgyát;
- 2., Nyilatkozatot arról, hogy a mérést a nevezett személyek saját maguk végezték és az eredményeket maguk értékelték ki;
- 3., A műszerek jegyzékét;
- 4., Mérési feladatonként külön-külön a mért adatokat, az azokból kiértékelt adatokat, és a válaszjelek és a meghatározott hibák nyomásfüggésének grafikonon történő ábrázolását. Az ugyanazon szenzoron különböző módon kapott válaszjeleket célszerű egy grafikonon ábrázolni. Ez igaz a hibák nyomásfüggésére is.
- 5., Mérési feladatonként külön-külön az eredmények értékelését.**
- 6., A két különböző szenzor tulajdonságainak összehasonlítását.**

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

2. Fényemittáló diódák és fotodetektorok vizsgálata

A mérés célja

A mérési gyakorlat elején különböző színű fényemittáló (világító) diódák (LED-ek) spektrumát vizsgáljuk és hasonlítjuk össze. A továbbiakban három különböző fotodetektor összehasonlító vizsgálatát végezzük el: egy fotoellenállásét, egy pin fotodiódáét és egy fototranzisztorét. A vizsgálatok célja a LED-ek által kibocsátott fény spektrumának és a fotodetektorok relatív spektrális érzékenységének (azaz a fotoválasz hullámhosszfüggésének) és válaszidejének összehasonlítása.

A relatív spektrális érzékenységet a fenti fényemittáló diódák segítségével vizsgáljuk. A világító diódák viszonylag keskeny különböző hullámhossztartományban világítanak intenzíven. A világító diódák által kibocsátott fény maximális intenzitásához tartozó hullámhosszat egy AvaSpec-ULS2084 típusú spektrofotométerrel mérjük. A hullámhossz függvényében vizsgáljuk a relatív spektrális érzékenységet oly módon, hogy a detektorokat a világító diódákkal egyenként megvilágítva mérjük azok fotoválaszát. Az így kapott fotoválasz értékeket súlyozni kell az egyes világító diódák által kibocsátott fény relatív intenzitásával.

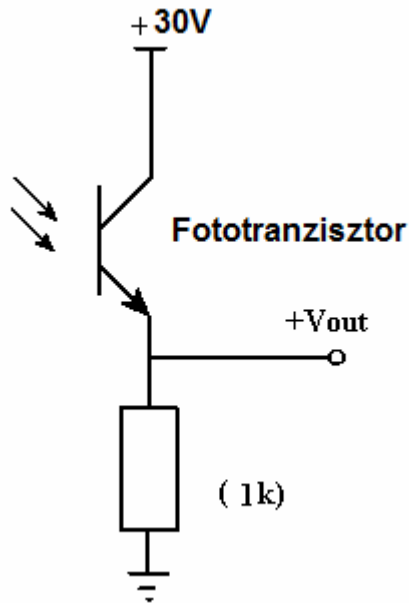
A világítódiodákat meghajtó áramot impulzusgenerátor négyszögjelével szaggatjuk. A detektorok fotoválaszának és válaszidejének vizsgálatokor oszcilloszkóp segítségével mérjük mind a fotoválasz amplitúdóját, mind a válaszidőt. Az utóbbit a jel fel- és lefutásakor is meghatározzuk.

Mérési összeállítás

Mindhárom fotodetektor és a segédáramkörök egyetlen mérődobozba vannak beépítve. Az elektromos csatlakozás banánhüvelyekkel és amphenol csatlakozóval, a megvilágítás a mérődoboz oldalán lévő nyílásokon át történik. Mind a banánhüvelyeknél (tápfeszültség csatlakoztatása), mind az amphenol csatlakozóknál (mérőjel kicsatolása), mind a megvilágító nyílásoknál fel van tüntetve az adott detektor típusa. A világító diódasor csúsztatható sínekkel van rögzítve a mérődoboz oldalához annak érdekében, hogy mindegyik detektort mindegyik világító diódával meg lehessen világítani.

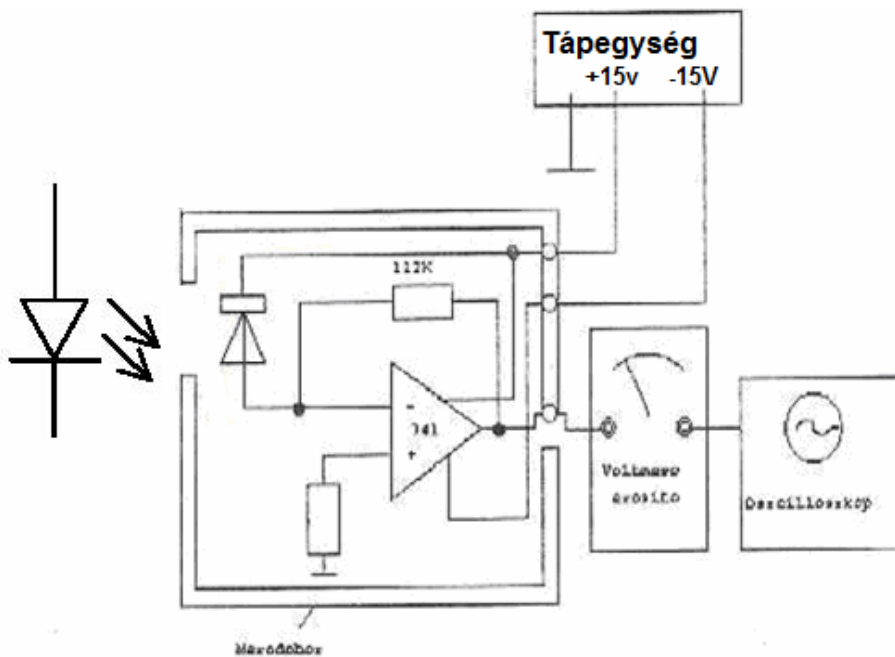
A megvilágítás különböző hullámhosszú nagy fényerejű világító diódákkal van biztosítva, melyek az Osram cég Golden Dragon Plus termékei. A LED-ek 1,2W fényteltjesítményre képesek, ami 400 mA meghajtóáram esetén érhető el. Ennek a teljesítménynek csak a töredékét használjuk ki. Egyszerre csak egy dióda világít. 12 állású körkapcsolóval (yaxley) választható ki az aktuális LED. A LED-ek áramgenerátorosan vannak meghajtva (IC: LM338), fix 26 mA árammal. A tápellátás 5 V egyenfeszültség. Az impulzusüzemről MOSFET gondoskodik (N-csatornás növekményes, IRFZ48), mely sorba van kötve az áramgenerátorral, és amelynek gate-je ki van vezetve a doboz oldalára. Egy kapcsolóval válthatunk az üzemmódok között. Amennyiben fix világításra van szükségünk, a kapcsolóval rövidre zárhatjuk a FET-et, impulzusüzemnél viszont külső impulzusgenerátort kell a FET gate-jére csatlakoztatni. Impulzus amplitúdónak legalább 5 V-ot kell beállítani. A világító dióda sorban 7 db színes LED (vöröstől kékig) és két 3000 K és 5600 K színhőmérsékletű hideg- ill. melegfehér színű LED foglal helyet.

A mérődoboz jobb oldalán, a kis rézcső mögött helyezkedik el a fototranzisztor. A 30 V tápfeszültséget a megfelelő banánhüvelyeken keresztül csatlakoztatjuk. A tranzisztor földelt emitteres erősítő kapcsolásban működik, ennek kimenetéhez csatlakozik a megfelelő feliratú amphenol aljzat. Az amphenol aljzatot koaxiális kábellel csatlakoztatjuk az oszcilloszkóp bemenetéhez a spektrális érzékenység és a válaszidő vizsgálatánál. A mérés kapcsolása a 2.1. ábrán látható.



2.1. ábra: A fototranzisztoros erősítő kapcsolása

A doboz középső részében helyezkedik el a pin fotodióda, ami egy $\mu A741$ -es erősítőhöz illeszkedik. A dióda 15 V zárófeszültséget kap a megfelelő banánhüvelyeken keresztül, az erősítő pedig +15 V és -15 V tápfeszültséget. Az erősítő kimenete a megfelelő felíratú amphenol aljzathoz csatlakozik. A mérés kapcsolása a 2.2. ábrán látható.



2.2. ábra: A pin fotodióda mérési vázlata.

A mérődoboz bal oldalán található a fotoellenállás, mely egy 10 k Ω -os mérőellenállással van sorba kötve. A fotoellenállást 30 V tápfeszültséggel hajtjuk meg az erre szolgáló banánhüvelyeken keresztül. Az amphenol kimenet párhuzamosan csatlakozik a mérőellenálláshoz.

Mérési feladatok

1., A világító diódák spektrumának vizsgálata

AvaSpec-ULS2084 spektrofotométer segítségével egyenként megvizsgáljuk az összes világító dióda fényének spektrumát és feljegyezzük a maximális intenzitáshoz tartozó hullámhossz(ak)at és a spektrum szélességének és magasságának arányát. A spektrum szélességének az ú.n. félérték szélességet tekintik, ami a spektrumnak a maximális intenzitásérték felénél mért szélessége. Ehhez be kell kapcsolni a számítógépet, elindítani az „AvaSoft 7.5 for USB” programot, majd a képernyőn a „Start” gombra kell kattintani. Mérés közben ügyeljünk, hogy az érzékelő fej szemben álljon a mérendő világító diódával. A mért maximális intenzitáshoz tartozó hullámhossz értéket használjuk a relatív spektrális érzékenység meghatározásához.

2., A spektrális relatív érzékenység mérése

Egyenként végigmérjük mind a három fotodetektort a 7 db színes világító diódával megvilágítva. A diódák áramát megfelelő frekvenciájú négyszögjellel szaggatjuk mérés közben. Fontos a kellően alacsony frekvencia kiválasztása, mert a válaszidőnek megfelelő frekvenciánál nagyobb frekvencia esetén a jel nem tud fel- ill. lefutni az impulzus ideje alatt, a mért jel amplitúdója csökken. A detektorkapcsolások kimenetét oszcilloszkóphoz csatlakoztatjuk. Mindhárom detektor esetén a relatív érzékenység hullámhossz függését úgy kapjuk meg, hogy a mért feszültségértékeket megszorozzuk az adott világító diódára vonatkozó súlyfaktoral, mely a LED-ek egymáshoz viszonyított fényintenzitását veszi figyelembe. Ezek az értékek az 1. sz. táblázatban találhatóak.

A fotodetektorok érzékenységének definíciója a detektor árama osztva a detektorra egységnyi idő alatt beeső fotonok energiájával, mértékegysége A/W. A beeső fotonok energiája megegyezik a beeső fotonok számának és egy foton energiájának szorzatával. Mivel a foton energiája fordítottan arányos a hullámhosszal, ugyanannyi beeső foton és ugyanakkora kvantumhatásfok esetén az érzékenység lineárisan nő a hullámhosszal. Az összeállított mérési elrendezés nem a detektorok áramát, hanem feldolgozott jelet mér, így az érzékenység abszolút értéke nem határozható meg, csak relatív spektrális érzékenységet tudunk mérni.

1. sz. táblázat

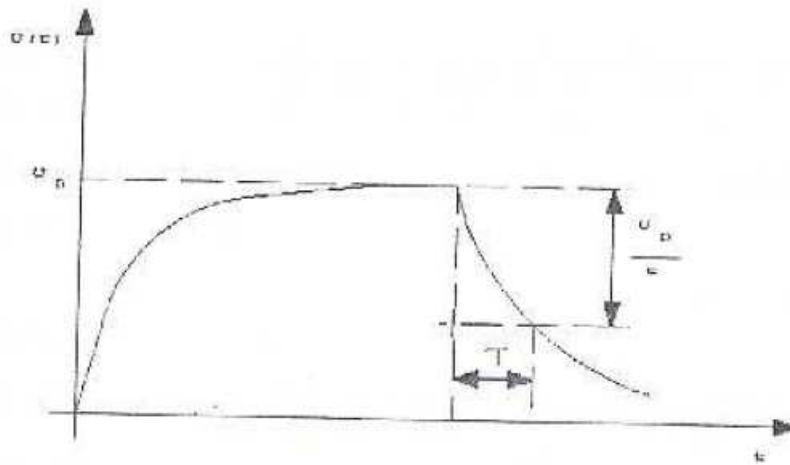
LED száma	1	2	3	4	5	6	7
Súlyfaktor	0,25	0,19	0,43	0,83	0,29	0,31	0,31

3., Válaszidők mérése

Megmérjük mindhárom fotodetektor válaszidejét. Ehhez a fotodiódák áramát megfelelő frekvenciájú négyszögjellel szaggatjuk, a detektorok kimenő jelét oszcilloszkópra vezetjük, és külön-külön megmérjük a válaszidőt fel- és lefutáskor. A mérést mindhárom detektor esetén a legrövidebb, a leghosszabb és egy közbenső hullámhosszon is elvégezzük. A kikapcsolási válaszidő az az idő, ami a jel lefutásakor a lefutás kezdetétől addig tart, amíg a jel az $1/e$ -ed részére nem csökken (e a természetes logaritmus alapja) - lásd 3. ábrát. (A jel kb. az $1/3$ -ára csökken - $1/e=0,37$.) A bekapcsolási válaszidő az az idő, ami a jel felfutásakor a felfutás kezdetétől addig tart, amíg a jel az $(1-1/e)$ -ed részére nem nő. (A jel kb. a maximális jel $2/3$ -ára nő.)

A pin fotodióda összeállításában az erősítő kimenete beleng, így a fent leírt és a 3. ábrán definiált válaszidő nem határozható meg. Helyette a fel- és lefutási időt határozzuk

meg. Mivel nagyságrendi eltérések vannak az egyes fotodetektorok válaszüdejében, ez a detektorok összehasonlításában nem okoz lényeges hibát.



3. ábra: Fotoválasz négyszögjelre és a kikapcsolási válaszüdő definíciója

Műszerek és kellékek

Mérési elrendezés

Hármas tápegység (Hameg HM8040), $\pm 15V$ illetve $+5V$

Impulzus generátor (TGP110)

Digitális multiméter (Hameg HM8012)

Oscilloszkóp (Hameg HM303-6 vagy Hameg HM400)

Spektrofotométer (AvaSpec-ULS2084)

Mérési jegyzőkönyv

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

A jegyzőkönyvnek tartalmaznia kell:

- 1., A mérést végzők nevét, a mérés helyét, idejét, tárgyát.
- 2., Nyilatkozatot arról, hogy a mérést a nevezett személyek saját maguk végezték és az eredményeket maguk értékelték ki.
- 3., A műszerek jegyzékét.
- 4., Mérési feladatonként külön-külön a mért adatokat, az azokból kiértékelt adatokat, és a spektrális relatív érzékenységek grafikonon történő ábrázolását.
- 5., Mérési feladatonként külön-külön az eredmények értékelését.**
- 6., A három különböző detektor tulajdonságainak összehasonlítását.**

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

3. Hall-szondák alkalmazásai

a. Félvezető anyagjellemzők mérése

Elméleti háttér

A jelenleg forgalomban lévő félvezető eszközök és integrált áramkörök döntő többsége szilíciumból, és kisebb hányada vegyületfélvezetőkből készül (pl. GaAs, InSb, GaAsP, stb.), amelyeket főként optoelektronikai és mikrohullámú célokra alkalmaznak. A félvezetőkre jellemző kétféle áramvezetési mechanizmus lehetővé teszi a p-n-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 valamennyi adalékatom egy-egy szabad töltéshordozót (elektront vagy lyukat) ad le. Amennyiben tehát meghatározzuk a félvezető vezetőképességét, kiszámíthatjuk a bevitt donor- vagy akzeptorkoncentrációt.

A vezetés jellemzéséhez azonban nem elég a töltéshordozók mennyiségének ismerete, meg kell határozni azok haladási sebességét is. A fémes vezetéssel ellentétben, a félvezetőkben a töltéshordozóknak az elektromos tér hatására történő elmozdulási sebessége erősen függ a tér nagyságától. Mivel az összefüggés lineáris, definiálhatjuk a töltéshordozók mozgékonyágát, mint azt az átlagos haladási sebességet, amelyre a töltéshordozók az egységnyi térerősség hatására (a térrel párhuzamos irányban) felgyorsulnak.

A sodródási vagy driftmozgékonyág:

$$\mu = v/E \text{ [cm}^2/\text{Vs]}$$

ahol v az átlagos driftsebesség és E az elektromos térerősség.

Az elektromos vezetőképesség a differenciális Ohm-törvény alapján:

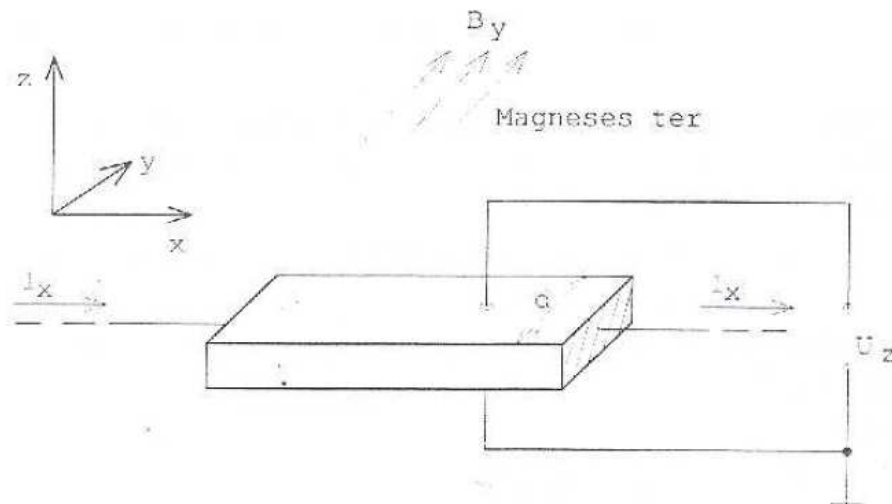
$$\sigma = q \cdot (\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p),$$

ahol q az elemi töltés ($q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ As), μ_n az elektronok és μ_p a lyukak mozgékonyága, míg n és p a töltéshordozókoncentráció. σ reciproka ρ a fajlagos ellenállás, amelyet általában Ωcm -ben adnak meg.

A mozgékonyág függ a félvezető anyagától, a hőmérséklettől, az adalékkoncentrációtól és a töltéshordozók fajtájától. Pontosabb számításokhoz nomogramok és táblázatok állnak rendelkezésre. Átlagosan adalékolts félvezetőre szobahőmérsékleten elfogadhatók az alábbi adatok:

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:	$\mu_p = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
InSb	elektronmozgékonyág:	$\mu_n = 80000 \text{ m}^2/\text{Vs}$
	lyukmozgékonyág:	$\mu_p = 450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
CdSe	elektronmozgékonyág:	$\mu_n = 600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
	lyukmozgékonyág:	nincs adat.

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 keresztirányú mágneses térben a félvezető lemezen áram folyik át, az áram és a mágneses tér irányára merőlegesen feszültség (Hall-feszültség) keletkezik. A viszonyokat az 3.1. ábra szemlélteti.



3.1 ábra

A feszültség polaritása attól függ, hogy p- vagy n-típusú a félvezető. Ilyen méréssel eldönthető tehát a félvezetőminta típusa. A Hall-feszültség nagysága arányos az áram és az indukció vektoriális szorzatával:

$$U_H = R_H \cdot (\mathbf{I} \times \mathbf{B}) / d.$$

ahol R_H - a Hall-állandó (mértékegysége $\text{cm}^3/\text{Coulomb}$).

\mathbf{I} - a mintán átfolyó áram (húzóáram),

\mathbf{B} - a fluxussűrűség (Tesla; Vs/m^2).

d - a minta vastagsága (cm).

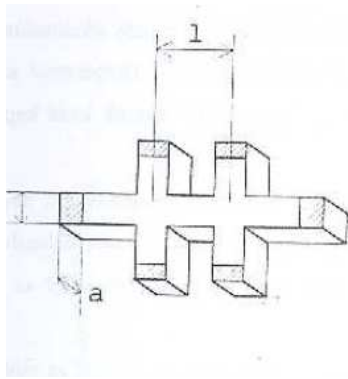
Az R_H Hall-állandó kifejezhető a szabad töltéshordozó koncentráción keresztül. n-típus, ill. p-típus esetén:

$$R_H = 1 / (p \cdot q), \text{ ill. } R_H = 1 / (n \cdot q)$$

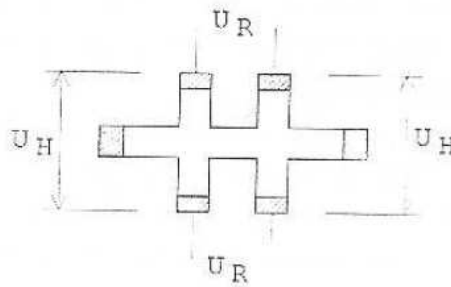
A mérések ismertetése

Méréseink első részét a vizsgált félvezetőminta fajlagos ellenállásának és a Hall-feszültség meghatározása képezi. Erre a célra az elektromágneset tartalmazó Hall-mérő berendezést és a hozzátartozó áramgenerátort fogjuk felhasználni. Az elektromágnes légrésébe fixen beépítve található egy félvezető Hall-minta. A minta alakja, méretei és feszültségjellemzői a 3.2. ábrán láthatók.

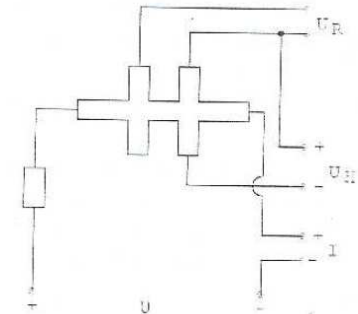
A 3.2. ábrán látható méretek nagysága: $a = b = 0,4 \text{ mm}$, $l = 3,08 \text{ mm}$. A számításokhoz ezeket az adatokat használjuk. A Hall-minta bekötése a 3.3. ábrán látható.



3.2. ábra



3.3. ábra



Fajlagos ellenállás mérése

A félvezetőminta fajlagos ellenállását Ohm törvénye alapján mérjük és számítjuk:

$$U_R = R \cdot I = \rho \cdot l / A$$

ahonnan a fajlagos ellenállás:

$$\rho = U_R \cdot A / (I \cdot l) = U_R \cdot a \cdot b / (I \cdot l)$$

az $R = \rho \cdot l / A$

kifejezés alapján.

A fajlagos ellenállás mérésénél - értelemszerűen - mágneses teret nem alkalmazunk. A DC feszültségmérőt az "U_R" jelzésű hüvelypárok közé kapcsoljuk. Az I húzóáramot az „I” jelzésű hüvelypáron mérjük digitális multiméterrel. A táplálást az "U" pontok közé kapcsolt: stabilizált tápegységről biztosítjuk.

A Hall-feszültség mérése

A fajlagos ellenállás meghatározása után bekapcsoljuk az elektromágneket úgy, hogy az áramgenerátort az "U_g" hüvelypár közé kapcsoljuk. A generátoron lévő kijelzőről leolvashatjuk a mágneses teret előállító gerjesztőáram nagyságát és irányát is. A voltmérőt ekkor az "U_H" hüvelypárra kapcsoljuk a Hall-feszültség leolvasásához

Első feladatként a minta típusát határozzuk meg. A mágneses tér irányát az előlapon, lévő LED jelzi. Ismerve az áram- és a mágneses tér irányát, leolvassva a Hall-feszültség előjelét, a minta típusa eldönthető.

Az elektromágnes B fluxussűrűsége és az I_g gerjesztőáram közötti összefüggést a 3.4. ábra szemlélteti. Mint látható, a görbének hiszterézise van, ezért különös gondot igényel a kívánt B érték beállítása. A Hall-feszültség mérésénél adódó hibák csökkenthetők, ha mindkét áramiránynál elvégezzük a mérést, és a két Hall-feszültség abszolút értékének átlagát képezzük.

Tegyük fel, hogy I_g = 0,8 A-nél szeretnénk U_H értékét meghatározni. Ekkor növeljük az áramgenerátor áramát pozitív irányba 1.5 A-ig, majd innen visszafelé haladva érjük el a 0,8 A-t. Ekkor a görbe felső ágáról olvastatjuk le a +B értéket, majd a voltmérőről az U_H értéket. Ezután csökkentjük az áramot, majd negatív irányba haladva érjük el a -1.5 A áramot. Visszafelé haladva álljunk be a -0,8 A-re, és ekkor a görbe alsó ágáról olvashatjuk le a -B értéket, ill. a voltmérőről az U_H megfelelő értékét.

Miután a fenti méréseket elvégeztük, számítással meghatározhatjuk a Hall-állandót, a minta többségi töltéshordozó koncentrációját és a többségi töltéshordozók mozgékonyosságát.

A Hall-állandó az

$$R_H = U_H \cdot a / (I \cdot B)$$

kifejezés alapján számítható, felhasználva a mért Hall-feszültséget, az I húzóáramot, a B indukciót és az "a" mintaméretet (a Hall-minta vastagságát).

A töltéshordozók sűrűsége:

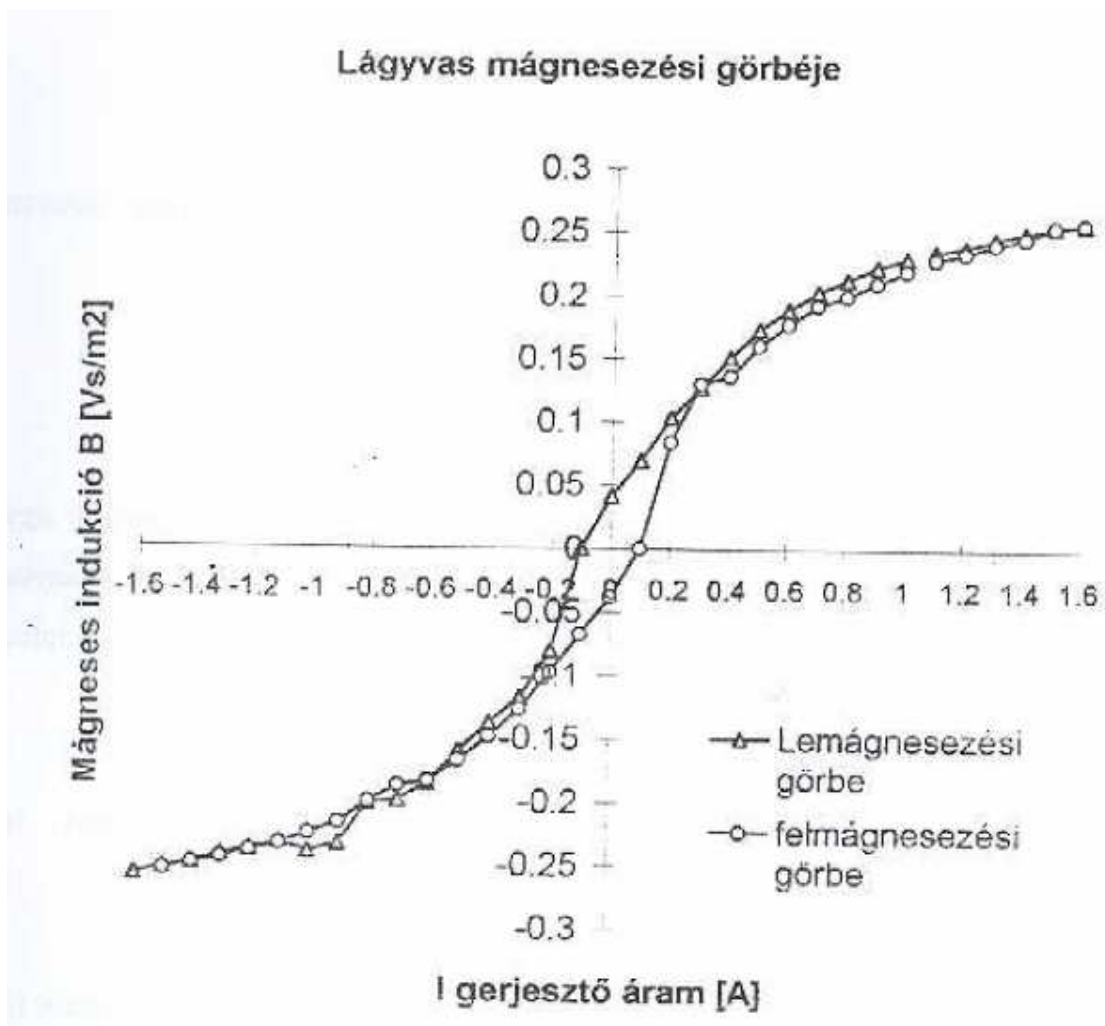
p-típus esetén: $p = 1 / (R_H \cdot q)$

n-típus esetén: $n = 1 / (R_H \cdot q)$

A mozgékonyság meghatározásához a fajlagos ellenállást, ill. annak reciprokát, a vezetőképességet használjuk fel:

p-típus esetén: $\mu_p = \sigma / (q \cdot p)$

n-típus esetén: $\mu_n = \sigma / (q \cdot n)$



3.4. ábra

Mérési feladatok

1., Fajlagos ellenállás meghatározása

Határozzuk meg az ismeretlen minta fajlagos ellenállását (vezetőképességét) úgy, hogy legalább ötféle I húzóárammal elvégezzük a méréseket. I értéke 1-6 mA tartományba essék. Ekkor a gerjesztőáram nincs bekapcsolva, potenciométerrel szabályozzuk az U tápfeszültség áramát, hogy a kívánt I húzóáram értékét vegye fel. A fajlagos ellenállást a kapott ellenállásértékek átlagából számoljuk ki.

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

Állítsunk be 3 mA húzóáramot. Mérjük meg a Hall-feszültséget lépésenként a gerjesztő áram függvényében növekvő gerjesztő áram értékeknél 0-tól +1,6 A-ig, majd lépésenként csökkentsük az áramot -1,6 A-ig, és növeljük ismét +1,6 A-ig. Minden negyed szakaszon (0-1,6 A abszolút áramérték között) 6-8 pontot vegyünk fel, ott, ahol meredeken nő az indukció (kis áramértékeknél – lásd 3.4. ábrát), 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 - 3.4. 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 felvett hiszterézis görbe hat különböző pontjára (három pozitív, három ugyanakkora negatív gerjesztő áramértéknél). A Hall-állandó átlagértékét véve állapítsuk meg a többségi töltéshordozók koncentrációját. Felhasználva a vezetőképesség-mérés eredményét, határozzuk meg a többségi töltéshordozók mozgékonyosságát A kiszámított eredmények alapján döntsük el, hogy germánium vagy szilícium minta mérését végeztük-e?

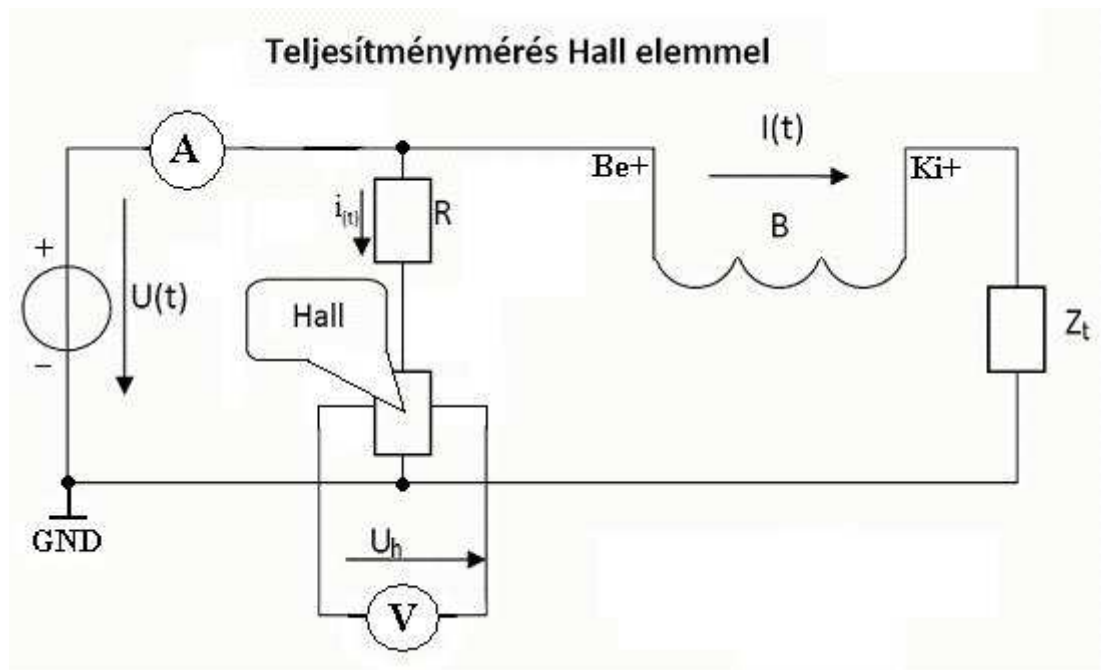
3., A Hall-feszültség húzóáram függésének vizsgálata

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!

A gyakorlat második része a következő lapon kezdődik.

b. Villamos teljesítménymérés Hall-szenzorral

Elméleti összefoglaló



3.5. ábra

A 3.5 ábra mutatja a Hall-szenzorral történő teljesítménymérés alapkapcsolását. Váltakozó áram esetén amennyiben a szenzor a nullvezető és egy fázis közé van bekötve, úgy hatásos teljesítményt mér. A működés könnyed értelmezhetőségének érdekében célszerű a kapcsolást matematikai módon megközelíteni.

$$U_h = k \cdot i(t) \cdot B(t) \quad (1. \text{ képlet})$$

Ahol: U_h = Hall-feszültség (kimeneti feszültség);
 k = a szenzorra jellemző állandó;
 $i(t)$ = Hall-cella húzóárama;
 $B(t)$ = mágneses indukció.

Természetesen ugyanígy valósítható meg az egyenáramú teljesítmény mérése, akkor az előző képlet az alábbira módosul:

$$U_h = k \cdot I_h \cdot B \quad (2. \text{ képlet})$$

Ahol: i_h = az 1. képlet szerinti $i(t)$.

A továbbiakban a teljesítménymérést egyenáramú szemszögből közelítjük meg, váltakozó áramra ugyanaz a magyarázat igaz.

A kapcsolatban szereplő **R előtét 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** („egytekercses transzformátor”) légrésébe helyezük, így a mágneses erővonalak jelentős része a szenzoron keresztül záródik. Az induktitásnak kis menetszámúnak kell lennie (és kis impedanciájúnak váltakozó áramúlag), 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 már mindenki által ismert kell, hogy legyen:

$$P = U \cdot I \quad (3. \text{ képlet})$$

Ha tüzetesebben megvizsgáljuk a kapcsolást, akkor fény derül az alábbiakra:

1. A Hall-áram a tápfeszültséggel egyenesen arányos (az induktivitás ellenállása hanyagolható), vagyis $I_h \sim U_{\text{táp}}$ ($U_{\text{táp}} = U_{\text{terhelés}} \mid Z_L \sim 0$)
2. A mágneses tér, amibe a szenzort helyezük, egyenesen aránylik a tekercsen átfolyó árammal: $B \sim I_{\text{terhelő}}$

$$3. \quad B = \mu \cdot H \quad (4. \text{ képlet})$$

és $\mu = \text{állandó}$ (mágneses permeabilitás, vasmag jellemző); valamint

$$H = N \cdot I \cdot L \quad (5. \text{ képlet})$$

Ahol: H = mágneses térerősség;
 N = tekercs menetszáma;
 I = induktivitás árama ($I_{\text{terhelő}}$);
 L = tekercs (cséve) hossza.

Az előbb felsorakoztatott összefüggések alapján kijelenthető, hogy a 3.5. ábrán szereplő kapcsolás szerint a **Hall-szenzor kimeneti feszültsége (U_h) arányos** kell, hogy legyen 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 előtét ellenállás szórása, a szenzor hőmérsékletfüggése, valamint a tekercs vasmagjának mágnesezési görbéje; a B-H görbe pusztán az origó közelében lineáris.

Mérési feladatok

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. (Az R előtét ellenállás értéke 3.3 k Ω , a szenzor ohmikus ellenállása 1056 Ω , a tekercs menetszáma $N = 48$, a cséve hossza $L = 26$ mm, a ferritmag mágneses permeabilitása pedig $\mu_r = 1500$.)

1., Húzóáram mérése:

Mérje meg a Hall-szenzor húzóáramát 5 V-os léptékekben 0-40 V-ig terhelés nélküli állapotban ($R_t = \infty$, ekkor csak a szenzor vesz fel áramot), majd ábrázolja. (Az 1. feladatot célszerű a 2. feladattal együtt végezni.)

2., Ofszethiba meghatározása:

Ideális esetben a szenzor kimeneti feszültsége 0, ha nincs terhelés. A valóságban ilyenkor is néhány mV kimeneti feszültséget szolgáltat a szenzor. Mérje meg és ábrázolja a kimeneti ofszet feszültséget **0-40 V** tápfeszültség és $R_t = \infty$ mellett 5 V-os léptékekben.

3., Terhelési karakterisztikák felvétele:

A digitális multimétert kapcsoljuk Ampermérő állásba és a megfelelő mérővezetékét is dugjuk át mA mérő bemenetről az Ampermérőbe!

Vegye fel a „Hall-feszültség - terhelő áram (és tápfeszültség)” karakterisztikát, ha R_t értéke 50 Ω , 150 Ω , 270 Ω , 1 k Ω (legalább 2 esetben). (20 Ω terhelést csak indokolt esetben használjon és csak rövid ideig!)

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

Műszerek és kellékek

Változtatható áramforrás (FETV/89)

Digitális multiméter, 2db (Hameg HM8012)

Stabilizált tápegység (FOK-GYEM TR9175/A)

Elektromágneset tartalmazó Hall-mérő összeállítás

Teljesítménymérő összeállítás

Mérési jegyzőkönyv

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

A jegyzőkönyvnek tartalmaznia kell:

- 1., A mérést végzők nevét, a mérés helyét, idejét, tárgyát.
- 2., Nyilatkozatot arról, hogy a mérést a nevezett személyek saját maguk végezték és az eredményeket maguk értékelték ki.
- 3., A műszerek jegyzékét.
- 4., Mérési feladatonként külön-külön a mért adatokat, az azokból kiértékelt adatokat, és azok grafikonon történő ábrázolását.
- 5., Mérési feladatonként külön-külön az eredmények értékelését.**
- 6., A három különböző detektor tulajdonságainak összehasonlítását.**

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

4. Termisztor karakterisztikák vizsgálata

Elméleti áttekintés

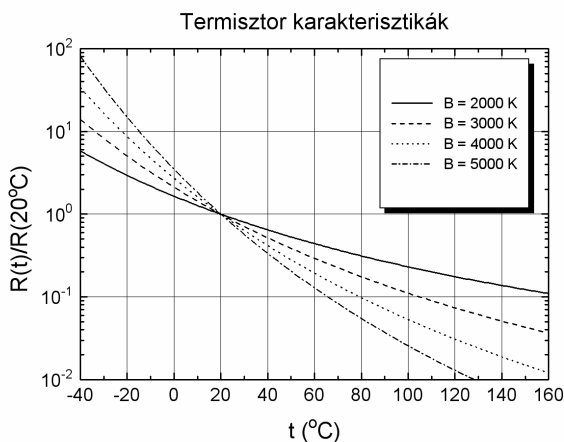
A termisztorok olyan ellenállások, amelyek ellenállás értéke erősen függ a hőmérséklettől. Főként hőmérsékletmérésre és hőfokszabályozásra használják őket. A termisztorok hőmérsékleti tényezője nagy és általában negatív, de vannak pozitív együtthatójú termisztorok is. Az előbbieket negatív TK-jú vagy NTC, vagy melegen vezető termisztoroknak, az utóbbiakat pozitív TK-jú vagy PTC, vagy hidegen vezető termisztoroknak nevezik.

Az NTC termisztorok alapanyaga félvezető tulajdonságú fénoxidok (MnO, NiO, stb.), amelyeknek nagy a hőmérsékleti együtthatójuk, ellenállásuk stabil, és gyártásuk jól reprodukálható. Kedvező tulajdonsággal rendelkeznek a keverék oxidok, mint pl. a $\text{TiO}_2 + \text{MnO}$, vagy a $\text{Mn}_2\text{O}_3 + \text{NiO} + \text{CoO}$ keverékek. A nagyobb hőkapacitású és szélesebb hőmérséklettartományban alkalmazható termisztorok grammnyi tömegűek is lehetnek, míg a gyöngy-, fólia-, szál-, stb. termisztorok tömege miniatűr változatban néhány mg is lehet.

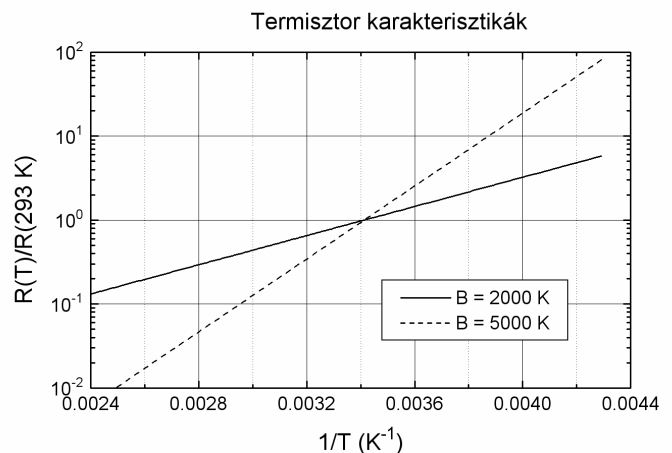
A negatív TK-jú termisztorok ellenállásának hőmérsékletfüggése az alábbi kifejezéssel adható meg:

$$R(T) = A \cdot \exp(B / T)$$

ahol A és B a termisztorra jellemző állandók, T az abszolút hőmérséklet (K). Különböző B állandójú termisztorok ellenállásának a 20 °C-os értékhez viszonyított relatív hőmérsékletfüggése a 4.1. ábrán látható.



4.1. ábra.



4.2. ábra.

Az ellenállás logaritmusát a következő módon fejezhető ki a fenti képlet alapján:

$$\ln R = \ln A + B/T$$

Ebből látszik, hogy az ellenállás logaritmusát az abszolút hőmérséklet reciprokanak a függvényében ábrázolva egyenest kapunk, mint az a 4.2. ábrán látható két különböző B érték esetében. Itt az ellenállásértékek szintén a szobahőmérsékleten (293 K, 20 °C) mért értékekhez vannak viszonyítva.

Ez a lineáris összefüggés lehetővé teszi az A és B állandók egyszerű meghatározását az ellenállás hőmérsékletfüggéséből. Az egyenes meredkségéből a B, a függőleges tengelymetszetből az A állandó határozható meg az alábbiak szerint:

$$B = d(\ln R_t)/d(1/T)$$

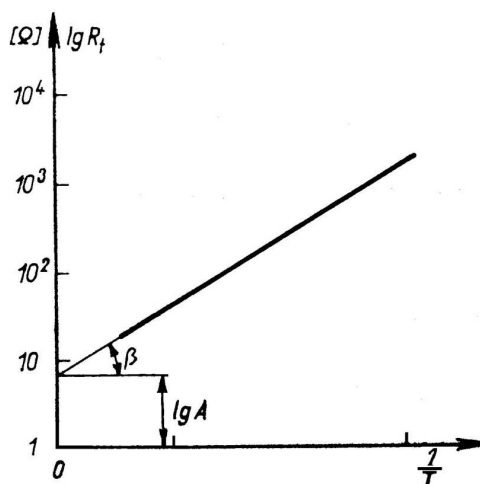
$$A = e^{\ln A}$$

vagy 10-es alapú logaritmus esetén (lásd 4.3. ábrát):

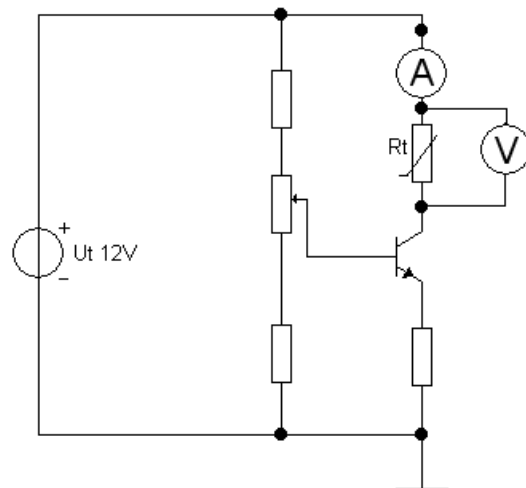
$$B = \ln 10 \cdot d(\lg R_t)/d(1/T) = \ln 10 \cdot \text{tg} \beta$$

$$A = 10^{\lg A}$$

ahol $\ln 10 = 2,31$.



4.3. ábra



4.4. ábra

Mérési összeállítás, feladatok

A mérési gyakorlat során három különböző termisztor összehasonlító vizsgálatát végezzük el. A termisztorokat áramgenerátorral hajtjuk a rendelkezésre bocsátott áramkör segítségével (4.4. ábra), amely 12 V tápfeszültséget igényel. Az áram értékét sorba kapcsolt árammérővel mérjük. A mérés során kis áramerősséget kell alkalmaznunk, hogy a mérés ne befolyásolja a termisztor hőmérsékletét. Az egyszerűség kedvéért az áramot 100 μA -re állítsuk be. A termisztor ellenállását a rajta eső feszültség és az átfolyó áram hányadosaként kapjuk meg az Ohm törvény alapján. A feszültséget a vizsgált termisztor kapcsaira párhuzamosan kötött feszültségmérővel mérjük. A termisztorokat a főzőpohárban lévő vízbe lógatjuk a feltét felhelyezésével. A víz hőmérsékletét kontaktus hőmérő segítségével mérjük és villanyrezsó segítségével változtatjuk.

A mérési feladat a három termisztor ellenállásának vizsgálata a 20-100 °C hőmérséklet tartományban 20 °C-os lépésként növekvő hőmérséklet mellett. A mért adatokból ki kell számolni az ellenállás hőmérsékletfüggését és azt grafikonon kell ábrázolni. A negatív TK-jú termisztorokra megszerkesztendő a $\lg R-1/T$ függvény (lásd 4.3. ábrát), amiből meg kell határozni az A és B állandókat.

Műszerek és kellékek

Mérési elrendezés

Tápegység 12V (Hameg HM8040)

2 db digitális multiméter (Hameg HM8012)

Főzőpohár

Villanyrezsó

Kontaktus hőmérő

Mérési jegyzőkönyv

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

A jegyzőkönyvnek tartalmaznia kell:

- 1., A mérést végzők nevét, a mérés helyét, idejét, tárgyát.
- 2., Nyilatkozatot arról, hogy a mérést a nevezett személyek saját maguk végezték és az eredményeket maguk értékelték ki.
- 3., A műszerek jegyzékét.
- 4., Termisztoronként külön-külön a mért adatokat, az azokból kiértékelt adatokat, és azok grafikonon történő ábrázolását. A negatív TK-jú termisztorok esetében a megszerkesztett $I_g R-1/T$ függvényt és az azokból kiértékelt állandókat.
- 5., A három különböző termisztor tulajdonságainak összehasonlítását.**

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