

Az e/k arány mérése

A mérés célja:

- termikusan aktivált folyamat tanulmányozása félvezető $p-n$ átmenetben,
- az e/k arány meghatározása.

Ennek érdekében:

- összefoglaljuk a $p-n$ átmeneten folyó áramra vonatkozó elméleti alapismereteket, (a jelenségek igen részletes leírása a megadott irodalomban olvasható),
- kimérjük egy tranzisztor kollektor-áramának a bázis-emitter feszültségtől való függését, és meghatározzuk az e/k arányt.

1. Elméleti összefoglaló

Az elektron töltése (e) és a Boltzmann-állandó (k) fontos természeti állandók, amelyek ismeretére számos jelenség leírásánál szükségünk van. Az olyan folyamatokat, amelyeknek során pl. egy részecske a továbbhaladásához szükséges energiát a termikus mozgásból származó véletlen energiaközlés révén szerzi meg, *termikusan aktivált folyamatoknak* nevezik. Ezen jelenségek tanulmányozása lehetőséget ad a két állandó arányának (e/k) meghatározására. Magával ezzel az aránnyal is gyakran találkozunk, de emellett arra is felhasználhatjuk, hogy az egyik állandó és az arány ismeretében a másik állandó értékét kiszámítsuk.

Félvezetőkben az elektromos áramot *elektronok* és *lyukak* (elektronhiányok) mozgása eredményezi. Bizonyos adalék anyagok (foszfor, arzén) hatására a félvezetőkben az elektronok annyira túlsúlyba kerülnek a lyukakhoz képest, hogy gyakorlatilag csak elektronvezetés alakul ki: az ilyen félvezetőt *n típusúnak* nevezik. Más adalékok (bór, gallium, alumínium) viszont a félvezetőben lyukvezetést hoznak létre: az ilyen félvezetők a *p típusú* félvezetők.

Ha egy p típusú és egy n típusú félvezetőt érintkezésbe hozunk (ez az ún. $p-n$ átmenet), akkor az érintkezési helyen kontaktpotenciál jön létre, mert energetikai okok miatt az n típusú részből elektronok mennek át a p típusú részbe (így az negatív többlettöltésre tesz szert), a p típusú részből viszont lyukak mennek át az n típusú részbe (így abban pozitív többlettöltés jön létre). A kontaktus létrejöttének pillanatában tehát egy, a p rétegből az n rétegbe irányuló kez-

deti áram folyik. Az áram hatására a potenciálkülönbség nő, ami egyre jobban akadályozza a további töltésátmenetet, ezért egy bizonyos feszültség elérése után a $p \rightarrow n$ irányú áram megszűnik, és kialakul egy állandósult kontaktpotenciál. Ezzel egyidejűleg a kontaktus két oldalán létrejön egy olyan tartomány, amelyben nincsenek mozgásképes töltéshordozók. A töltéshordozók áthaladását (a $p \rightarrow n$ irányú áramot) ezen a kiürített tartományon át a létrejött U_D magasságú potenciálgát akadályozza, ezért külső feszültség nélkül a töltéshordozók csak a termikus mozgás segítségével, véletlenszerűen jutnak át.

Eléggé általánosan igaz, hogy a termikusan

aktivált folyamat gyakorisága az $e^{\frac{E}{kT}}$ faktorial arányos, ahol E a továbbhaladáshoz szükséges energia, k a Boltzmann-állandó, T pedig az abszolút hőmérséklet. Ennek megfelelően annak gyakorisága, hogy egy lyuk $p \rightarrow n$ irányban vagy egy elektron $n \rightarrow p$ irányban az U_D magasságú

potenciálgáton átugrik, az $e^{\frac{eU_D}{kT}}$ faktorial arányos (e az elektron töltésének nagysága). Ez egyben azt is jelenti, hogy a termikus aktiváció segítségével a potenciálgáton át egy $p \rightarrow n$ irányú, ún. *injektált áram* folyik:

$$I_I = C_0 e^{\frac{eU_D}{kT}} \quad (1)$$

A kiürített tartományon át ugyanakkor létrejön egy ellenkező irányú áram is, ami annak következménye, hogy a termikus mozgás (termikus aktiváció) révén, ha kis számban is, de mindig keletkeznek töltéshordozók, így – többek között – a kiürített réteg n oldalán lyukak, p oldalán pedig elektronok jelennek meg. Mivel a kontaktpotenciál ezeknek a mozgását a kontaktuson át éppen elősegíti, ily módon egy $n \rightarrow p$ irányú, ún. *telítési (szaturációs) áram*, I_S jön létre. Ez az áram nem függ a kontaktuson kialakult feszültségtől, csak a termikusan keltett töltéshordozók mennyiségétől. Külső feszültség nélküli (egyensúlyi) állapotban a két áram egymást kiegyenlíti, vagyis ekkor $I_I = I_S$.

Ha a $p-n$ átmenetre U külső feszültséget kapcsolunk, akkor ez módosítja a potenciálgát magasságát, ezért megváltoztatja az injektált áramot, amely most

$$I_I = C e^{-\frac{e(U_D - U)}{kT}} \quad (2)$$

Itt C állandó, az U feszültség pedig negatív, ha a feszültség a kontaktpotenciállal egyirányú, és pozitív, ha azzal ellentétes. Mivel $U = 0$ esetén $I_I = I_S = C e^{-\frac{eU_D}{kT}}$,

$$C = I_S e^{\frac{eU_D}{kT}}, \quad (3)$$

amivel az injektált áramra azt kapjuk, hogy

$$I_I = I_S e^{\frac{eU}{kT}}. \quad (4)$$

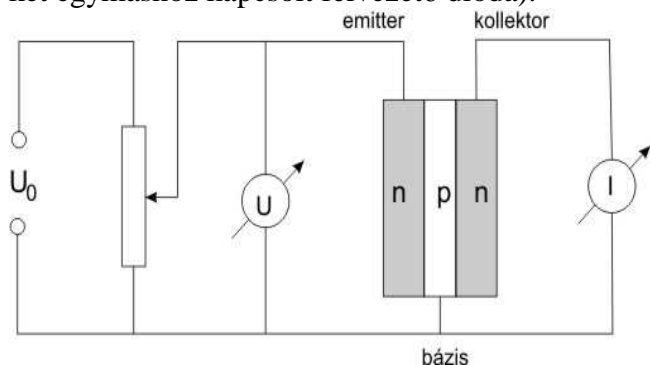
A kontaktuson átfolyó I eredő áram a feszültségfüggő I_I injektált áram és a feszültségtől független I_S telítési áram különbsége:

$$I = I_S \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right). \quad (5)$$

Ez az összefüggés azt az ismert tapasztalatot tükrözi, hogy egy ilyen kontaktus különböző irányban előfeszítve különböző nagyságú áramot bocsát át, más szóval *egyenirányít*. Az ilyen egyenirányító p - n átmenetet *félvezető diódának* nevezik.

2. A mérési módszer

A mérés során egy félvezető eszközben az (5) egyenlettel leírható áram-feszültség összefüggést (ún. áram-feszültség karakterisztikát) mérünk ki, és az exponensben szereplő kifejezés kiértékelésével meghatározzuk az e/k arányt. A mérés könnyebben megvalósítható, ha nem közvetlenül dióda-karakterisztikát vizsgálunk, hanem az 1. ábrán látható elrendezésben egy tranzistor kollektoráramának (I) a bázis-emitter feszültségtől (U) való függését vizsgáljuk, amely ugyancsak az (5) egyenlettel írható le (a tranzistor – mint az ábrán is látható – lényegében két egymáshoz kapcsolt félvezető dióda).



1. ábra

Az (5) alakú karakterisztikából az e/k hányados elvileg meghatározható, de az összefüggés egyszerűsítésével a feladat is egyszerűsíthető. Mivel méréseinket szobahőmérséklethez közeli hőmérsékleteken végezzük, érvényes, hogy $e^{\frac{eU}{kT}} \gg 1$, így az egyenletben az exponenciális tag mellett az „1” elhanyagolható, mivel a félvezetők jellemző tiltott sáv szélessége 100meV nagyságrendű. Ezért jó közelítéssel érvényes, hogy

$$I = I_S e^{\frac{eU}{kT}}. \quad (6)$$

Ha az egyenlet mindkét oldalának a természetes alapú logaritmusát vesszük, akkor az I - U összefüggés linearizálható, hiszen

$$\ln I = \ln I_S + \frac{e}{kT} U. \quad (7)$$

Ez azt jelenti, hogy ha a hőmérsékletet állandó értéken tartva megmérjük a kollektoráramot különböző bázis-emitter feszültségeknél, majd az áramértékek természetes logaritmusát ábrázoljuk a feszültség függvényében, akkor a pontok egy egyenest adnak. Jelölje a mérési pontokhoz illesztett egyenes meredekségét M_U :

$$M_U = \frac{e}{kT} \quad (8)$$

összefüggés, amiből az e/k hányadosra azt kapjuk, hogy

$$\frac{e}{k} = M_U T \quad (9)$$

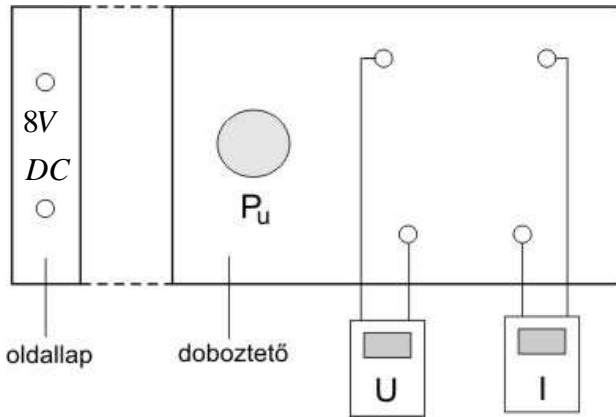
3. A méréshez használt eszközök

- MINISTAT 650 termosztát
- HAMEG digitális multiméter
- HAMEG hármas tápegység
- Mérődoboz az alumínium tömbbe szerelt tranzistorral és beállító elemekkel.

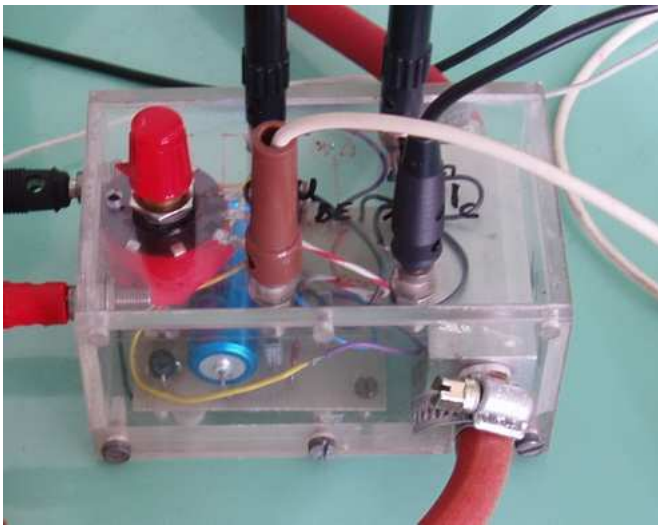
4. A mérőberendezés használata

A mérés az 1. ábrán már bemutatott áramkörben történik. Az áramkör és az egyenfeszültséget adó tápegység egy átlátszó műanyag dobozban található, amelyhez a tápfeszültséget az *oldallapján* levő csatlakozó hüvelyekre kapcsolt 8 V -os egyenfeszültséggel biztosítjuk (2-3. ábra). Az I kollektoráram és az U bázis-emitter feszültség mérésére szolgáló műszereket a doboz

tetején található hüvelyekhez csatlakoztatjuk, az U feszültséget a P_u potenciométerrel változtatjuk.



2. ábra



3. ábra

Mivel az áram erősen függ a hőmérséklettől, a mérésnél a hőmérséklet állandó értéken tartásáról külön gondoskodni kell. A vizsgált tranzisztort tartó alumínium tömbön ezért termosztáttal stabilizált hőmérsékletű vizet áramoltattunk át. A tranzisztor hőmérséklete jó közelítéssel a víz hőmérsékletével egyezik meg, amelyet a termosztát hőmérőjével mérünk. A víz hőmérsékletét a termosztáton található kontakthőmérő segítségével állíthatjuk a kívánt értékre.

A mérés a hőmérséklet beállításával kezdődik, az áram–feszültség mérést csak akkor kezdjük el, ha a hőmérséklet kellően stabilizálódott.

5. Mérési feladatok

1. Kb. $0,4V - 0,5V$ között $20mV$ -onként változtatva a bázis–emitter feszültséget, vegye fel az áram–feszültség karakterisztikát $30\text{ }^\circ\text{C}$ -on! Ügyeljen arra, hogy a feszültséggel semmiképp ne lépje túl az $1V$ értéket! Ezután attól a tartománytól kezdve, ahonnan (az exponenciális jelleg miatt) az áram láthatóan gyorsan változik ($0,5V$ környékén várható), sűrítse a mérési pontokat $10mV$ távolságra! A mérést a potenciométer által behatárolt teljes feszültségtartományban végezze el. Ismétlje meg a mérést $45, 60, 70, 80\text{ }^\circ\text{C}$ -on! (A felfűtés után várja ki, amíg a termosztát néhányszori ki-be kapcsolása után biztosan stabilizálódott a tranzisztor hőmérséklete.)
2. A kapott adatokat ábrázolja az $\ln I - U$ grafikonon, illesszen egyenest a pontokra, és határozza meg az egyenesek meredekségét!
3. A meredekségek mindegyikéből határozza meg az e/k hányadost, átlagolja a kapott értékeket, és becsülje meg a mérés hibáját!
4. Számolja ki I_S értékeit és ábrázolja az $I_S - T$ grafikon!

Irodalom:

Aldert van der Ziel: Szilárdtest elektronika
Műszaki Könyvkiadó, 1982