

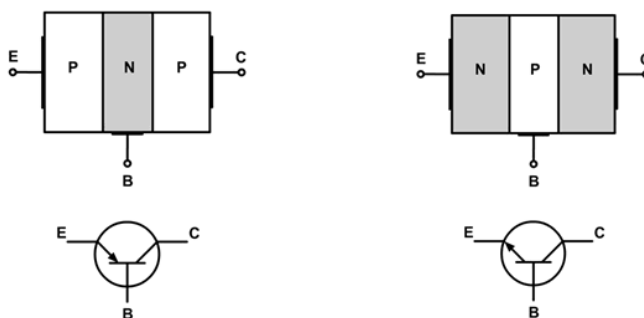


Az e/k hányados (elektrontöltés/Boltzmann állandó) meghatározása tranzisztor kollektor-áramának mérésével

A természeti, ill. fizikai állandók minél pontosabb mérése (például az elektron töltése, tömege, a fénysebesség, vagy akár a Planck- vagy a Boltzmann-állandó) alapvető fontosságú a fizikában. Bár a legfontosabbakat már több mint száz éve megmérték, de a mért értékek más módszerekkel történő mérése és pontosítása az időközben létrejött újabb tudományos-technikai vívmányok segítségével minden korban aktuális.

A mostani mérésben félvezető (tranzisztor) segítségével mérjük meg az elektrontöltés és a Boltzmann-állandó hányadosát.

A tranzisztor egy félvezetőkből álló, alapvetően erősítés céljából készített elektronikai alkatrész. Legkönnyebben egy háromrétegű szendvicsnek képzelhetjük el, ahol két, elektrontöbbséggel rendelkező réteg (n típusú félvezető) között helyezkedik el egy igen vékony, elektronhiányos, „lyukakkal” rendelkező réteg (p típusú félvezető), vagy ugyanez ellenkező polaritással. Az előzőt **npn** tranzisztornak, az utóbbit **pnp** tranzisztornak nevezzük.

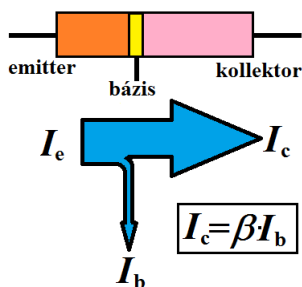


A félvezető dióda

A pn rétegek határfelületén külső feszültség rákapcsolása nélkül semleges, szigetelő réteg, és kis potenciálkülönbség alakul ki – kicsit hasonlóan, mint két különböző, összeérintett fém határfelületén. Ha a pn átmenetre a kialakult feszültséggel megegyező polaritású külső feszültséget kapcsolunk, akkor az elektronok és a lyukak által kiürített, szigetelő réteg megnő, a pn-átmenet szigetel. Ellenkező polaritású külső feszültség rákapcsolása esetén viszont a kiürített réteg lecsökken, illetve megszűnik, a töltéshordozók át tudnak haladni a határfelületen – áram indul meg. Így működnek a félvezető diódák, amelyek tehát a rájuk kapcsolt feszültség polaritásától függően, vezetik az áramot, illetve szigetelnek.

A tranzisztor

A tranzisztorban – mint fentebb írtuk – két pn átmenet is van: az emitter és a bázis között, valamint a kollektor és a bázis között. Az elrendezés azonban annyiban speciális, hogy a bázisréteg igen vékony, így például a nyitott emitter-bázis diódán áthaladó töltéshordozók legnagyobb része áthalad a vékony bázisrétegen, és a kollektorba kerül. Ezt a helyzetet mutatja a következő ábra. Ennek az lesz az eredménye, hogy a működési tartományban a kollektoron mérhető áram egyenesen arányos lesz a bázison mérhető árammal $I_c = \beta \cdot I_b$. Ráadásul ez a β arányossági tényező igen nagy is lehet ($\beta \gg 50 \dots 300$). Ezen alapul a tranzisztor „erősítő” hatása. A tranzisztor, vezérelt kapcsolóként / erősítőként alapvető fontosságú a modern elektronikában.



A β -t erősítési tényezőnek hívják, és mint az ábrán is látható, a kollektor-áram és a bázis-áram arányát adja meg. Természetesen

$$I_e = I_b + I_c = (1 + \beta) \cdot I_b$$

Fontos dolog, hogy a félvezetőkben lévő szabad töltéshordozók mennyiségét (itt nem részletezett okokból) komolyan befolyásolja a hőmérséklet is: magasabb hőmérséklet jobb vezetőképességet jelent.

A mérés során a tranzisztor emitter-bázis diódájára kapcsolunk majd nyitóirányú feszültséget, azaz ezen az átmeneten folyó áramot kellene vizsgálnunk. Egy dióda pn (pozitív-negatív) átmenetén átfolyó áramot a következő képlettel lehet leírni:

$$I_b = I_0(T) \cdot \left[e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right]$$

Esetünkben ez az áram a bázis-áram, ezért jelöltük I_b -vel. Itt $I_0(T)$ a pn átmenetre jellemző hőmérsékletfüggő állandó, U a bázis-emitter nyitóirányú feszültség, T a tranzisztor hőmérséklete, e az elemi töltés és k a Boltzmann-állandó. A tranzisztor működése (erősítése) miatt azonban sokkal célszerűbb a jóval nagyobb kollektor-áramot mérni, amely – mint láttuk – egyenesen arányos a bázisárammal. Azaz

$$I_c = \beta \cdot I_b = \beta \cdot I_0 \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$$

Mivel a mérést nem túl magas hőmérsékleteken végezzük, $eU > kT$, azaz $e^{\frac{eU}{kT}} \gg 1$, így az egyenletben az exponenciális tag mellett az 1 elhanyagolható, és jó közelítéssel érvényes:

$$I_c \approx \beta \cdot I_0 \cdot e^{\frac{eU}{kT}}$$

Ha az egyenlet mindkét oldalának a természetes alapú logaritmusát („e” alapú logaritmusát) vesszük, akkor azt kapjuk, hogy

$$\ln I_c = (\ln \beta + \ln I_0) + \frac{e}{kT} \cdot U = \text{konst.} + \frac{e}{kT} \cdot U$$

ahol a konstans az I_0 hőmérsékletfüggése miatt szintén hőmérsékletfüggő. Ez azt jelenti, hogy ha a **hőmérsékletet állandó értéken** tartva megmérjük a kollektor-áram erősségét különböző, nyitóirányú bázis-emitter feszültségek mellett, majd a feszültség függvényében ábrázoljuk a kollektor-áram természetes alapú logaritmusát, akkor a kapott mérési pontokra egy egyenest illeszthetünk. Az egyenesek meredeksége a fenti képletből:

$$M = \frac{e}{kT}$$

A képletből a T hőmérséklet ismeretében ki lehet számítani az e/k hányados értékét.



A mérési feladat

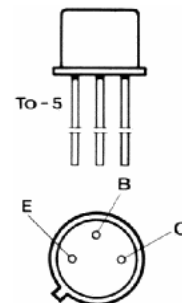
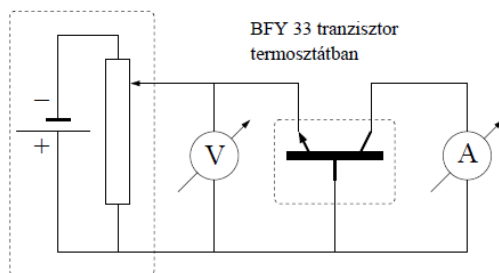
A feladatunk a feszültség változtatásával, a hőmérséklet állandó értéken tartása mellett meghatározni az e/k arányt.

A méréshez szükséges eszközök:

- BFY33 tranzisztor kivezetésekkel
- Szabályozható tápegység
- Változtatható ellenállás (potenciométer), nyomtatott áramköri panelen
- Két multiméter, röpszinórok
- Hideg és meleg ioncserélt víz
- Három pohár
- Hőmérő

Mérési feladatok:

- Állítsuk össze a következő kapcsolást!



A tranzisztor lábainak (csatlakozóinak) kiosztása

- A hőmérséklet állandóan tartásához használjuk az ioncserélt vizet, mérítsük a mérni kívánt tranzisztort a vízbe! Rövid ideig várjunk, míg a félvezető eszköz és a víz hőmérséklete egyensúlyba kerül.
- Változtassuk a potenciométerrel az emitter-bázis feszültséget, és jegyezzük fel az ennek hatására létrejött kollektor-áramot.

FONTOS! Ügyeljünk arra, hogy mérés közben a feszültség ne haladja meg a 0,7 V-ot, és/vagy az áram az 1,5 mA-t! Efőlött a tranzisztor hőtermelése meghamisíthatja a mérést.

- Végezzük el a mérést három hőmérsékleten (a meleg vizet kérjük a kísérletvezetőtől)! Egy-egy hőmérsékleten válasszunk legalább öt mérési pontot!
- Gondoljuk végig, hogy a grafikus ábrázoláshoz célszerű úgy felvenni a mérni kívánt értékeket, hogy a *grafikonon* a pontok eloszlása körülbelül egyenes legyen.
- Egy adott hőmérsékleten végzett mérésnél úgy válasszuk a multiméterek méréshatárát, hogy ne kelljen közben méréshatárt váltani. A méréshatár-váltás során megváltozik az adott műszer belső ellenállása, és ez meghamisíthatja az eredményeket.
- Készítsünk számítógépen, vagy kézzel írt jegyzőkönyvet, amelyben szerepelnek a mért adatok, az adatok értékelése, a kapott eredmények! Írjuk le, hogyan végeztük a mérést! Ne csak az eredmény átlagértékét adjuk meg, hanem a mért érték hibáját is. Adjuk meg a hibák forrását is. Vizsgáljuk meg, hogy a mért érték és annak hibája összefér-e az e/k irodalmi értékével. Fontos: a pontok nagy része a munka dokumentációjára jár, és nem arra hogy mennyire „sikerült” közel kerülni az irodalmi értékhez.



Ha a jegyzőkönyvet számítógépen készítjük, csináljunk egy mappát, amit a saját kódszámunkról nevezünk el, és minden mért adatot, táblázatot, értékelést mentsünk ebbe a mappába. Ha kézzel írt jegyzőkönyvet készítünk, de van, amit a számítógépre mentettünk, jelezzük a jegyzőkönyvön.



Szilárd Leó Verseny kísérleti és szimulációs forduló

Általános tanácsok jegyzőkönyv íráshoz

Az elfogadható jegyzőkönyv olyan, ami alapján a mérés megismételhető, tehát minden lényeges információ, paraméter és adat megtalálható benne. A beadott jegyzőkönyvnek tartalmaznia kell:

- A versenyző kódszámát;
- Ha lehetséges, az előzetes várakozásokat: mit vár, milyen eredményeket fog kapni;
- A méréshez használt módszert, annak indoklását;
- A mérés körülményeit, a mérés menetét, a megisméltetéshez szükséges paramétereit;
- A mért adatokat;
- A mért adatokból számított / kikövetkeztetett adatokat és a számítás menetét;
- Ha szükséges, ábrá(ka)t;
- A mérési bizonytalanság és különböző típusú hibák becslését (lásd következő oldal);
- Összehasonlítást az előzetes várakozással;
- A mért eredmények szöveges értékelését, a levont konklúziókat.

Az elmúlt évek tapasztalata alapján egy maximális pontot érő tömör, ugyanakkor minden lényeges információt tartalmazó jegyzőkönyv nem kell feltétlenül hosszabb legyen körülbelül 2-3 oldalnál (adatokkal, ábrákkal stb. együtt).

A jegyzőkönyv beadható papíron és elektronikus formátumban is a versenyző döntésétől függően (egyik sem jelent pontbeli megkülönböztetést). Amennyiben a jegyzőkönyv egyébként rendezett, olvasható és értelmezhető, úgy a külalak és extra formázás szintén nem jelent pontbeli előnyt, ezzel a versenyen ne töltsünk időt!

Mellékelhetőek elektronikus fájlok (pl. szöveges dokumentum, a versenyző által írt program, táblázat, képernyőkép stb.), de csak ha a fájlnev egyértelműen tartalmazza a versenyző kódját. A fájlok olvashatóságáért és megnyithatóságáért a versenyző felel. Ha egynél több elektronikus fájlt adunk be, azokat helyezzük egy mappába a munkaasztalon, ahol a mappa neve a kódunk. Amennyiben csak elektronikus fájlokat adunk be, a papír jegyzőkönyvet akkor is **KÖTELEZŐ** beadni, ezesetben írjuk rá hogy „**A jegyzőkönyvet lásd: <fájlnev>**” vagy „... **<mappanév>**”.

A verseny során explicit pontbeli előnyt nem jelent az elektronikusan végzett adatrögzítés, számítás, ábrázolás, függvényillesztés vagy jegyzőkönyvírás. Viszont ezzel általában időt lehet spórolni, illetve csökkenteni lehet a hibák számát (pl. elütés számológépen). Ezért bátorítanánk minden versenyzőt, hogy éljen a számítógépen található programok adta előnyökkel! Gyakorolni MS Office programokon felül ingyenes eszközökkel (OpenOffice család, Google Docs, stb.) is lehet, ezek alapfunkcionalitásukat és kezelésüket tekintve gyakorlatilag ekvivalensek.

A mérési eredményeket csak annyi számjegyig érdemes feltüntetni, ahány jegyig pontosságuk (lásd hibabecslés, következő oldal) terjed. Papíron ne írjunk több tizedesjegyet mint ami szükséges és értelmes. Elektronikus fájlok (pl táblázat) beadása esetén viszont nem szükséges időt tölteni extra formázással (pl. a táblázatkezelő program alapbeállítása szerinti esetleg túl sok tizedesjegy csökkentésével).

Lásd továbbá:

Ujvári Sándor, „A Szilárd Leó Országos Fizikaverseny kísérleti feladataiból”, Nukleon VI 145 (2013)

http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/Nukleon_6_3_145_Ujvari.pdf

„Országos Szilárd Leó Fizikaversenyek 2011-2016” c. kötet gyakorlati része

<http://www.szilardverseny.hu/cikkek/orszagos-szilard-leo-fizikaversenyek-2011-2016>

Egy oldalas útmutató a mérések bizonytalanságáról

A méréssel meghatározott fizikai mennyiségek szükségképpen véges pontosságúak. Az ismételt mérések valamilyen mértékben mindig eltérnek egymástól. A mért értékek bizonytalansága különböző forrásokból származhat, pl. a mérőberendezések tökéletlensége, ismeretlen környezeti hatások, vagy a vizsgált jelenségek sztochasztikus jellege. Ezért a mérés csak akkor tekinthető teljesnek, ha a legvalószínűbbnek tartott érték mellett megadjuk annak várható bizonytalanságát is. **A mérési bizonytalanság legalább közelítő meghatározása nélkül a mérési eredmény információ tartalma vitatható!** Eredetük szerint két fő hibafajtát különböztetünk meg:

- (1) **Szisztematikus hiba:** Azonos körülmények között végzett méréseknél nagysága és előjele nem változik. Ilyenek pl. a mérőeszköz tökéletlenségéből származó hibák, a mérési módszerek specifikus hibái, vagy az elhanyagolt külső hatásokból eredő bizonytalanság. Ha hatásukra és mértékükre becslést tudunk adni, úgy hatásuk sok esetben korrigálható.

A mérések számának növelésével hatásuk nem átlagolódik ki.

- (2) **Statisztikus hiba:** A mérést befolyásoló sokfajta külső ok együttes következményeként lép fel. Minden egyes mérésnél másképp jelentkezik. Előjele negatív és pozitív egyaránt lehet. Ilyen eredményre vezetnek pl. a véletlenszerűen fellépő környezeti hatások, alkatrészek kotyogása, beállítási- és leolvasási pontatlanságok, stb. A véletlen hibák teljes kiküszöbölésére nincs mód, számításba venni csak átlagos hatásukat lehet.

Közös jellemzőjük, hogy a mérések számának növelésével átlagos hatásuk csökken.

- (2b) **Statisztikus bizonytalanság:** A statisztikus hiba speciális esete: nagyszámú, egymástól független esemény megfigyelésekor lép fel. Ilyen például a részecskeszámlálásnál észlelt hiba. Ha t idő alatt N független esemény következett be, ez nem jelenti azt, hogy t idő alatt minden esetben N az események bekövetkezésének száma: egyszer több, másszor kevesebb. Ez a *statisztikus ingadozás*. A valószínűségszámítás szerint, ha az észlelt események száma meghatározott idő alatt középértékben N , akkor ez az érték $\pm\sigma_N = \sqrt{N}$ statisztikus ingadozást mutat. Ez a valószínű statisztikus bizonytalanság. A statisztikusan ingadozó mennyiségek relatív bizonytalansága úgy csökkenthető, hogy a megfigyelést lehetőleg hosszú időre ill. nagyszámú eseményre terjesztjük ki. A $\pm\sqrt{N}/N = \pm 1/\sqrt{N}$ relatív bizonytalanság mértéke ugyanis N növelésével csökken.

A verseny során az alapvető elvárás a mérést befolyásoló hibák és bizonytalanságok felismerése, amennyiben lehet, úgy forrásának felderítése, és a hatásuk diszkutálása. Nagyságukra elegendő egy reális becslést adni, és ennek keretein belül a mérési eredményt értékelni.

Felhívjuk a figyelmet, hogy egy adott mérés hibája nem egyenlő a mért és az irodalmi adat (amennyiben elérhető) különbségével! Ha ismert az irodalmi érték, és ez beleesik a hiba-intervallumba, akkor valószínűleg reális a hibabecslés is. Ha nem, akkor vagy rossz a mérés, vagy túl kicsire becsültük a hibát, vagy van elhanyagolt szisztematikus effektus. Ilyenkor próbáljuk meghatározni, hogy vajon melyik eset forog fenn és miért. A pontok nem az irodalmi adattól való eltéréstől függenek, de az eltérés ne legyen irreálisan nagy (pl. nagyságrendek).

A verseny során részecskeszámlálás alapuló mérés vagy szimuláció esetén, N beütésszám mellett a beütésszámok szórása a fentebb is közölt

$$\pm\sigma_N = \sqrt{N}$$

képlettel becsülhető. Ha célzott mértékére nincs külön utalás, akkor törekedjünk arra, hogy a mérési bizonytalanság kellően kicsi legyen az aktuálisan vizsgált effektushoz mérten. Pl. ha az általunk vizsgált effektus 10% körüli várható változást okoz a beütésszámban, akkor a relatív bizonytalanságot jóval 10% alá kell vinnünk a forraserősség és/vagy mérési idő növelésével.