

7. FÉLVEZETŐK

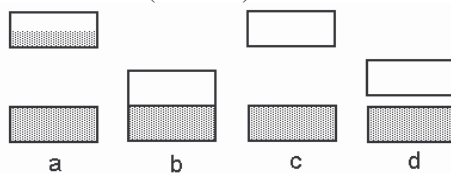
Félvezetők alatt olyan kristályos szilárd anyagokat értünk, amelyeknek fajlagos elektromos vezetése közönséges hőmérsékleten $10^{-9} - 10^3 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$, azaz kevesebb, mint a fémeké és több, mint a szigetelőké, és amelyekben a vezetést elektronok (tehát nem ionok) közvetítik. Vannak elemi félvezetők, mint a szilícium vagy a germánium, és vegyület-félvezetők, pl. a gallium-arsenid (GaAs). A legfontosabb félvezető anyag napjainkban a szilícium.

OLVASMÁNY: Kristályos anyagok vezetése, sávmodell

A továbbiakban röviden ismertetjük a kristályos anyagok vezetési tulajdonságaira vonatkozó sávmodell egy egyszerűsített, kvalitatív változatát.

Kvantummechanikai megfontolások alapján bizonyítható, hogy adott kristályszerkezetben található elektronok energiája csak egy meghatározott intervallumrendszerbe eső értékeket vehet fel. Ezt az intervallumrendszert *sáv szerkezetnek* nevezzük, struktúrája jellemző a kristály szerkezetére és függ az azt kialakító anyagoktól. A kristály építőkövein – az egységcellát alkotó atom-, ion- vagy molekulacsoportokon – az elektronok meghatározott energiájú nívókon helyezkednek el, ha ezek a csoportok izoláltak. A kristálybeli kölcsönhatás miatt azonban az izolált egységek azonos elektronállapotainak energiája eltolódik egymáshoz képest, az energiaszintek felhasadnak, mégpedig annyi állapotra, ahány ismétlődő egységből (cellából) épül fel a kristály. Így teljesülhet a Pauli-elv, mely szerint egy elektronállapotot legfeljebb két, ellentétes spinű elektron tölthet be. A felhasadás mértéke annál nagyobb, minél erősebb a kölcsönhatás az eredeti nívók között. A külső pályák energiái hasadnak fel leginkább, és a felhasadás mértéke fémeknél és kovalens kristályoknál sokkal nagyobb, mint a gyenge van der Waals-erővel kötött molekula-kristályoknál. A felhasadt nívók egy energiatartományt –sávot– alkotnak. A sávok közötti energiák tiltottak, ez a *tiltott sáv*, vagy angol szóval *gap*.

0 K hőmérsékleten az elektronok a legmélyebb nívókat töltik be. A szigetelők (1c. ábra) és a félvezetők (1d. ábra) sávjai vagy teljesen be vannak töltve, vagy teljesen üresek. A legfelső teljesen betöltött sávot *vegyértéksávnak*, a felette lévő üres sávot *vezetési sávnak* nevezzük. A fémek esetében a legfelső teljesen betöltött sáv felett egy részben betöltött vezetési sáv van, illetve a vegyértéksáv és a vezetési sáv átlapolódik. Az alkáli fémek pl. egyetlen vegyérték-elektronnal rendelkeznek, mely egy *s* pályán helyezkedik el. Az atomi *s* pályákból kialakuló sávban *N* atom esetén $2N$ elektron számára van hely, így ez a sáv félig lesz betöltve (1a. ábra). Az alkáli földfémek esetében viszont, ahol mindkét *s* pálya be van töltve, a vegyértéksáv és a vezetési sáv átlapolódásáról van szó (1b. ábra).



1. ábra. Fémek (a,b), szigetelők (c), és félvezetők (d) vegyérték- és vezetési sávjai

Elektromos vezetésre az olyan nívókon elhelyezkedő elektronok képesek, melyek felett tetszőleges kis távolságban van üres szint. Csak ebben az esetben tud tetszőleges kis elektromos tér energiát közölni az elektronnal, a tér irányával párhuzamos sebességre felgyorsítani, ezzel elektromos áramot hozni létre. A vezetési sávban lévő *vezetési elektronok* szabadon mozoghatnak a kristályban, nincsenek meghatározott ionhoz, atomhoz vagy molekulához kötve. *Szabad elektronoknak* is hívjuk őket.

Szabad elektronokat szigetelőkben és félvezetőkben is kelthetünk, ha a kötött, vegyértéksáv-beli elektront a tiltott sáv szélességénél nagyobb energiával a vezetési sávba gerjesztjük. Az elektron gerjesztésével viszont egy üres nívó marad a vegyértéksávban. Ezt betöltheti egy másik elektron, de akkor annak a helye marad üres. Az üres hely *-lyuk-* úgy viselkedik, mint egy pozitív töltésű szabad részecske, és az elektronnal együtt hozzájárul az elektromos vezetéshez.

A félvezetők sáv szerkezete (1d. ábra) a szigetelőkéthől annyiban különbözik, hogy a gap nagysága viszonylag kicsi (1c. ábra). A tiltott sáv szélessége germániumra 0,72 eV, szilíciumra 1,1 eV, gyémántra 6-7 eV.

Az elektronok gerjesztésére, azaz elektron-lyuk pár képzésére sok lehetőség van, pl. elektromágneses sugárzás (fény, röntgensugárzás, stb...) fotonjainak elnyelésével, ha ezek energiája meghaladja a tiltott sáv energiáját.

Tiszta (intrinsic) félvezetők

Félvezetőknel az elektron-lyuk pár keltéséhez szükséges energiát már a kristály hőenergiája fedezi. A véletlenszerű hőmozgás következtében egyes elektronok elég nagy energiára tesznek szert a gap leküzdésére és a vezetési sávba kerülnek, miközben a vegyértéksávban egy mozgékony lyukat hagynak maguk után. Ezt a folyamatot termikus egyensúlyban az elektronok és lyukak egymásra találásakor bekövetkező *rekombináció* ellensúlyozza, amikor az elektron "beleesik" a lyukba, az elektron-lyuk pár eltűnik. Az ilyen, a hőmozgás következtében bekövetkező gerjesztést *termikus gerjesztésnek* nevezzük. Emiatt egy szobahőmérsékletű *intrinsic* (nem szennyezett) félvezetőnek a vezetési sávja nem teljesen üres, a vegyértéksávja pedig nincs teljesen betöltve, hanem a vezetési sávban lévő elektronokkal megegyező számú elektronhiányt -lyukat- tartalmaz. Növelve a hőmérsékletet, a *tiszta félvezető egyre jobban vezet*, mert egyre több szabad töltéshordozó jön létre benne termikus gerjesztéssel. Ez ellen hat, hogy a szabad töltéshordozók egyre gyakrabban ütköznek a rács rezgő atomjaival vagy egymással. Egy ilyen ütközésben a szabad töltéshordozó elveszti az elektromos

tértől szerzett többlet-sebességét, és felveszi az adott hőmérsékletre jellemző sebességeloszlásnak megfelelő véletlenszerű sebességet. A fémeknél a szabad elektronok száma adott, ezért itt a hőmérséklet növekedésével az ütközések száma nő, a fajlagos vezetés csökken.

Szennyezett (adalékolt) félvezetők

A szilícium kristály gyémántszerkezetű, a 4 vegyértékű atomok tetraéderes kötéssel kapcsolódnak a körülöttük levő négy másik atomhoz. Helyettesítsük egy ilyen kristályban az egyik Si atomot egy ötvegyértékű atommal (pl. arzénnel, antimonnal vagy foszforral)! A szennyező atom 4 vegyértékelektronja felhasználódik a négy szomszédos atommal való kötés kialakításához, az ötödik viszont felesleges. Ezt az elektront csak viszonylag gyenge Coulomb-erő köti a szennyező atom törzséhez, melyről könnyen leszakad, szabaddá válik. A sávszerkezetben ezek a kötésben részt nem vevő ötödik elektronok a tiltott sávban megjelenő *donornívón* helyezkednek el, néhány század eV távolságban a vezetési sáv aljától (2a. ábra). Már a szobahőmérséklet elegendő ahhoz, hogy az összes donor –egy-egy elektront juttatva a vezetési sávba– ionizálódjon. A donorszennyezőt tartalmazó félvezetőt *n-típusúnak* nevezzük, mert az elektromos vezetést csaknem teljesen elektronok –negatív töltéshordozók– hozzák létre. A donoratom gerjesztésével csak szabad elektron keletkezik, a visszamaradt pozitív töltés most a donoratomhoz kötődik, lokalizált. Sőt, a donoroktól származó elektronok vissza is szorítják a lyukképződést. A szabad elektronok és lyukak koncentrációja között ugyanis a tömeghatás törvényével analóg összefüggés áll fenn:

$$n_e \cdot n_l = n_i^2,$$

ahol n_e a szabad elektronok, n_l a lyukak koncentrációja, n_i pedig a szennyezetlen félvezetőben az adott hőmérsékleten termikus gerjesztéssel létrejövő elektron-lyuk párok koncentrációja (intrinsic koncentráció).



2. ábra. a: n-típusú, b: p-típusú félvezető sávszerkezete

Az intrinsic koncentráció erősen hőmérsékletfüggő. Adalékolt félvezetőkben viszont a donornívók szobahőmérsékleten már gyakorlatilag teljesen kiürülnek, a töltéshordozó-koncentráció gyakorlatilag megegyezik a szennyező koncentrációjával. Magasabb hőmérsékleten (néhány 100 °C) azonban az intrinsic koncentráció túlhaladhatja a donorkoncentrációt, és újból mindkét típusú töltéshordozó szerepet játszik a vezetésben.

Nemcsak 5 vegyértékű szennyezőket vihetünk be a kristályrácsba, hanem 3 vegyértékűeket is, mint pl. bór, gallium, indium. Ilyen esetben a tetraéderes kötés kialakításához a szennyező atomról hiányzik egy elektron. A szennyező atom, hogy kötetst kialakíthasson, elragad egy elektront valamelyik közeli Si atomról, így az elektronhiány -a lyuk- vándorolni fog a kristályban. Az ilyen típusú szennyezőket *akceptoroknak* nevezzük, a szennyezett félvezetőt pedig *p-típusúnak*, mely az előző, donorszennyezett kristálytól abban különbözik, hogy az elektronok és a lyukak szerepet cserélnek, a vezetést túlnyomórészt a pozitív töltéshordozók hozzák létre. Az anyag sávszerkezetében ez a 2.b ábrán látható módon jelentkezik: a vegyértéksávhoz közel létrejön egy ún. *akceptorszint*, ami abszolút zéró Kelvin-fokon elvileg betöltetlen, szobahőmérsékleten pedig gyakorlatilag az akceptor-koncentrációval egyező számú elektron tölti be, azonos számú lyukat hozva létre a vegyérték sávban. A p-típusú félvezetőben a pozitív töltésű lyukak a többségi töltéshordozók.

A félvezető kristály donor illetve akceptor atomokkal történő szennyezését közös szóval *adalékolásnak* nevezzük. Az adalékolással az intrinsic koncentrációt több nagyságrenddel meghaladó töltéshordozó-koncentrációt biztosíthatunk a félvezetőben. A létrejövő n-vezetőben az elektronok, a p-vezetőben a lyukak vezeték túlnyomórészt az áramot, ezeket *többségi töltéshordozóknak* nevezzük. Az áram egy -bár jóval kisebb- részét az n-vezetőben a lyukak, a p-vezetőben az elektronok szállítják. Ezek az ún. *kisebbségi töltéshordozók*.

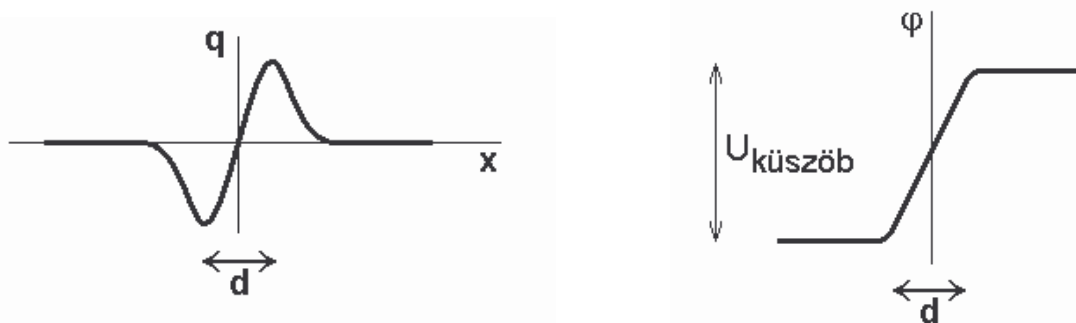
A p-n átmenet

Adalékoljuk egy félvezető kristály egyik felét n-típusúra, a másikat p-típusúra (3. ábra). A p-típusú és n-típusú tartomány közötti határfelületet *p-n átmenetnek* nevezzük.

Vizsgáljuk meg, milyen lesz a szabad töltéshordozók eloszlása a p-n átmenet környezetében! A szabad töltéshordozók véletlenszerű termikus mozgásukat végezve átjutnak a p- és n-típusú tartományt elválasztó határfelületen, és mivel az n-típusú részben nagyobb az elektronok koncentrációja, mint a p-típusúban, természetesen több elektron érkezik időegység alatt a p-típusú tartományba, mint onnan vissza. Ugyanígy, a p-típusú részből több lyuk jut át az n-típusúba, mint elektron. Tulajdonképpen az "elektron gáz" és "lyuk gáz" diffúziójáról van szó a p-n átmeneten keresztül.

A p-n átmeneten átdiffundáló töltéshordozók azonban nem maradnak "szabadok", hanem legnagyobb részük rekombinálódik az azon a részen lévő többségi töltéshordozóval: a p-típusú részben a lyukakkal, n-típusúban az elektronokkal. A rekombinációs folyamat miatt a p-n átmenet mindkét oldalán egy szabad töltéshordozókban szegény *kiürített réteg* jön létre. A szabad töltéshordozók ugyanakkor töltéssel bíró részecskék. A p-típusú részt mind a beérkező elektronok, mind a távozó lyukak negatívvá teszik, míg az n-típusú részben a szabad töltéshordozók diffúziója miatt pozitív többlettöltés halmozódik fel. Ennek következtében a p-n átmenet körül a p-típusú oldalon negatív, az n-típusúban pozitív töltéssűrűség jön létre. Ez a *tértöltés tartomány* a kiürített (rekombinációs) rétegre terjed ki.

A töltések elektromos teret hoznak létre, az elektromos tér iránya a pozitív tértöltésű tartománytól a negatív felé, azaz az n-rétegtől a p-réteg felé mutat. Ennek megfelelően az n-típusú tartomány elektromos potenciálja pozitívabb, mint a p-típusú tartományé. A p-n átmeneten kialakult feszültség, a *küszöbfeszültség* végül megakadályozza a szabad töltéshordozók további átvándorlását az ellentétes típusú tartományba. A küszöbfeszültség értéke a dióda anyagától függ, egyéb tényezőktől közel független. Szilíciumdiódáknál a tipikus érték 0,7 V.



3. ábra.

A töltéssűrűség
ill. az elektromos potenciál
változása (leegyszerűsítve) a p-n átmenet környezetében.
'd' a kiürített réteg vastagsága.

A dióda

A *rétegdióda* egyetlen p-n átmenettel rendelkező félvezető eszköz, olyan kétpólus, ahol az egyik kivezetés (az anód) egy félvezető kristály p-típusúra adalékolta oldalához, a másik kivezetés (a katód) az n-típusú oldalhoz csatlakozik. Nézzük meg, hogyan alkalmazható a félvezető dióda p-n átmenete egyenirányításra! Kapcsoljunk a p-oldalra pozitív, az n-oldalra negatív feszültséget. Ekkor a potenciálgát alacsonyabb lesz és újabb elektronok diffundálhatnak át az n-oldalról a p-oldalra, illetve újabb lyukak a p-oldalról az n-oldalra, a rekombinációs tartomány keskenyebb lesz. Az átdiffundáló töltéshordozók az elektródokhoz jutnak, áram indul meg. Ha a külső feszültség meghaladja a küszöbfeszültséget, a kiürített réteg eltűnik, és a p-n átmeneten semmi nem akadályozza a szabad töltéshordozók áthaladását. Az áramerősség a diódára kapcsolt külső feszültség növelésével rohamosan nő. A dióda tehát átvezet. Az ilyen irányú feszültséget *nyitófeszültségnek*, az áramot *nyitóirányú áramnak* nevezzük.

Fordítsuk meg a feszültség irányát. Most a rákapcsolt külső feszültség a belső potenciálgát magasságát növeli, a többségi töltéshordozók diffúziója a határreágen keresztül gátolva van, a rekombinációs tartomány kiszélesedik, a dióda "lezár". Az ilyen irányú feszültséget *zárófeszültségnek* nevezzük. Ilyenkor is folyik egy kis áram (nagyságrendekkel kisebb, mint nyitóirányban), melyet a kisebbségi töltéshordozók hoznak létre. Ez a *záróirányú áram*. Növelve a záróirányú feszültséget azt tapasztaljuk, hogy egy bizonyos értékéig az áram gyakorlatilag állandó, de ezen feszültség túlhaladása után rohamosan növekedni kezd. Ezt nevezzük a dióda *letörési feszültségének* (4. ábra, U_L). Nézzük, mi lehet az áramnövekedés oka! Mint mondtuk, a határreágen a kisebbségi töltéshordozók akadálytalanul átjuthatnak, mivel a télerősség az áthaladás irányába mutató erővel hat rájuk. Ez az erő azonban áthaladáskor fel is gyorsítja őket, annál nagyobb mértékben, minél nagyobb a potenciálgát. Egy bizonyos záróirányú feszültségnél már annyira felgyorsulnak, hogy ütközve a kristályrács kötött atomjaival, azokról elektronokat szakíthatnak le, további szabad töltéshordozókat hozván létre. Ezek tovább ütköznek és egy lavinaszerű folyamat indul meg, mely az áram nagymértékű növekedéséhez vezet. Ez az ún. Zener-effektus. A letörési feszültség annál nagyobb, minél kevésbé szennyezett a félvezető. A Zener-tartományban reverzibilisen működő diódákat *Zener-*, vagy *Z-diódáknak* nevezzük. A Zener-diódákat feszültségstabilizásra használják a letörési feszültségnél üzemeltetve.

A p-n átmenet a félvezető eszközök jelentős részében a működés alapja. Egyetlen p-n átmenetet tartalmazó eszköz a dióda. Két p-n átmenetet találunk a bipoláris rétegranzisztornál. Vannak ennél több p-n átmenetű eszközök is, pl. a vezérelhető egyenirányító 3, ill. 4 p-n átmenetet tartalmaz.

A dióda mint áramköri elem

A dióda áramköri jele:



A nyíl mutatja a nyitóiránynak megfelelő irányt, vagyis a fenti ábrán a bal oldalon van a p-oldal és jobb oldalon az n-oldal, és a dióda akkor nyit ki, ha a bal oldal potenciálja nagyobb, mint a jobb oldalé:

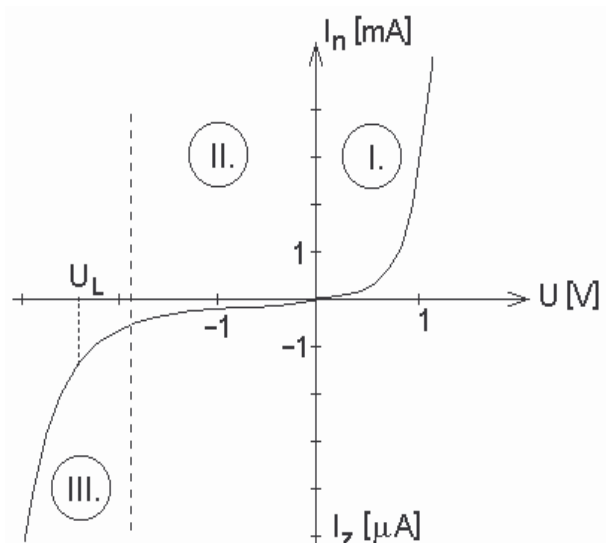


A feszültség és az áram előjele a diódán nyitó irányban pozitív, záró irányban pedig negatív.

Áramköri szempontból tetszőleges kétpólusú alkatrészt elegendően jellemez, ha megadjuk, hogy valamely rákapcsolt feszültség hatására mekkora áram folyik át rajta. Amennyiben egyenfeszültségről van szó, akkor az alkatrészt jellemző $I(U)$ függvény grafikonját, azaz a megfelelő egyenáram-egyenfeszültség értékpárok halmazát az alkatrész egyenáramú *karakterisztikájának* nevezzük. Az egyenáramú karakterisztika nem túl gyorsan változó feszültségek esetén is használható.

Tipikus dióda-karakterisztikát mutat a 4. ábra.

A dióda karakterisztikáján a fent elmondottak alapján megkülönböztetjük az I.-gyel jelölt nyitóirányú, II.-vel jelölt záróirányú, és a III.-mal jelölt letörési tartományt.

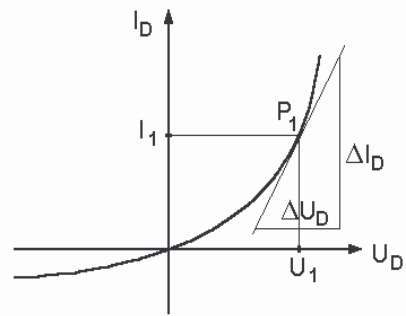


4. ábra. Rétegdióda egyenáramú karakterisztikája

Mivel a dióda nemlineáris elem,
beszélhetünk a karakterisztika egy P_1 pontjában az

$R_e = U_1 / I_1$ egyenáramú ellenállásáról, illetve az

$R_d = \left. \frac{dU_D}{dI_D} \right|_{P_1}$ dinamikus (differenciális) ellenállásáról.



Jól közelíthetjük a karakterisztikát az I. és a II. tartományban a következő összefüggéssel:

$$I_D = I_0 \left(e^{U_D/U_0} - 1 \right), \quad (1)$$

ahol

I_D a diódán átfolyó áram,

U_D a dióda anódja és katódja közötti feszültség (nyitó irányban pozitív, záró irányban negatív),

I_0 és U_0 a diódára jellemző konstansok, mégpedig

I_0 a visszáram: ha nagy záróirányú feszültséget kapcsolunk a diódára, vagyis $U_D < 0$, akkor

$U_D/U_0 < 0 \Rightarrow e^{U_D/U_0} \approx 0 \Rightarrow I_D \approx -I_0$, vagyis a záróirányú feszültséget növelve az áram abszolút értéke a visszáramhoz tart (a letörési szakasz előtt)

U_0 a küszöbfeszültség (ld. 3. ábra): az a nyitó irányú feszültség, amit meghaladva az áram értéke jelentősen növekedni kezd.

Nemlineáris áramköri elemek karakterisztikája általában grafikonon, katalógusokban található meg, ritkábban használunk az (1)-hez hasonló közelítő formulát. Mindezek használata egy áramkörben folyó áramok és az elemeken eső feszültségek számítására elég kényelmetlen, és ráadásul pontatlan, hiszen egy adott alkatrész valóságos viselkedése csak bizonyos hibahatáron belül egyezik meg a karakterisztikákban rögzítettel. Ezért bonyolult számítások helyett általában egyszerűbb összeállítani az áramkört és mérni a keresett áramot vagy feszültséget. Az áramkör megtervezéséhez, a megfelelő alkatrész kiválasztásához, a várható viselkedés becsléséhez viszont mégiscsak hasznos valamiféle hozzávetőleges számítást végezni. Ilyenkor jó szolgálatot tesznek a nemlineáris elemet modellező *helyettesítő kapcsolások, helyettesítő képek*.

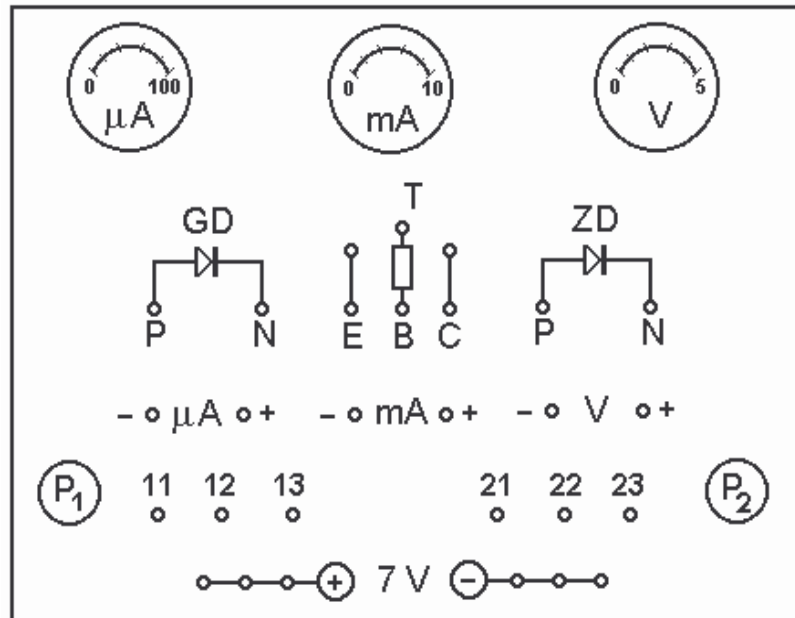
A félvezető dióda néhány egyszerű helyettesítő képe

Az egyenirányításra használt diódák legegyszerűbb helyettesítő képe az ún. <i>ideális dióda</i>. Ez egy olyan elem, mely nyitó irányban zérus, záró irányban végtelen ellenállást képvisel. Az ideális diódán nyitó irányban nem esik feszültség, záró irányban nem folyik áram. Rajzjele és karakterisztikája az 5. ábrán látható.	5. ábra
A következő, kissé pontosabb modell már figyelembe veszi, hogy a dióda tényleges "kinyitásához" a küszöbfeszültségnél nagyobb nyitóirányú feszültséget kell rákapcsolni a diódára. Az ennek a modellnek megfelelő karakterisztika és a karakterisztikának megfelelő helyettesítő kép a 6. ábrán látható.	6. ábra
A még pontosabb modell figyelembe veszi a dióda ohmos ellenállását is (7. ábra), ami az ideális diódával sorba kötődik. Az ohmos ellenállás következtében a feszültség-áram karakterisztika meredeksége véges.	7. ábra

Mérés

A **mérés célja** az elméleti részben leírtak kézzelfoghatóvá tétele, ill. manuális forrasztási gyakorlat szerzése.

Eszközök: mérőpanel, forrasztópáka, drótok, forrasztóón, mérőműszerek.



8. ábra. A mérőpanel

GD: germánium dióda, T: tranzisztor, ZD: Zener-dióda,

P: dióda p-réteg kivezetése, N: dióda n-réteg kivezetése,

E, B, C: az npn tranzisztor emitter, bázis és kollektor kivezetései;

μA: a mikroampermérő kivezetései, mA: a milliampermérő kivezetései, V: a voltmérő kivezetései,

P₁ és P₂ : potenciométerek,

11, 12, 13, 21, 22, 23: a P₁ és P₂ potenciométerek kivezetései;

7V: a tápfeszültség kivezetései.

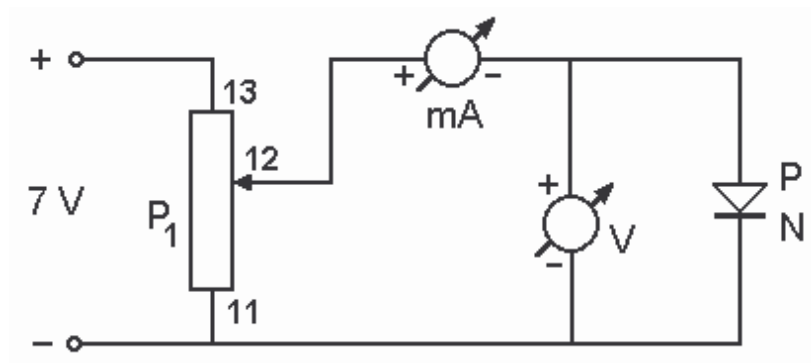
Feladat: Dióda karakterisztikájának mérése

Forrasszuk össze a panelen a 9., majd a 10. ábra kapcsolását, és mérjük meg a dióda nyitó- és záróirányú karakterisztikáját!

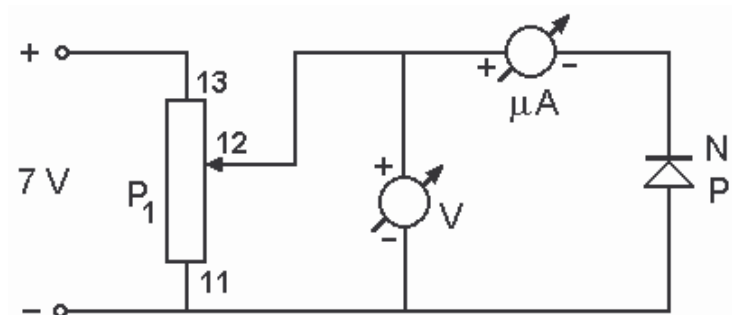
Nyitó irányban az áramot állítsuk 2 mA-ig ~0,5 mA-enként, majd 10 mA-ig ~1 mA-enként, és írjuk fel a ténylegesen beállított áramot és a mért feszültséget;

záró irányban pedig a feszültséget állítsuk ~1 V-onként 5 V-ig és mérjük az áramot!

(A nyitóirányú áramot és feszültséget jelöljük + jellel, a záróirányú áramot és feszültséget – jellel.)



9. ábra. Kapcsolás a nyitóirányú dióda-karakterisztika méréséhez



10. ábra. Kapcsolás a záróirányú dióda-karakterisztika méréséhez

Kiértékelés:

Rajzoljuk meg a dióda $I(U)$ karakterisztikáját!

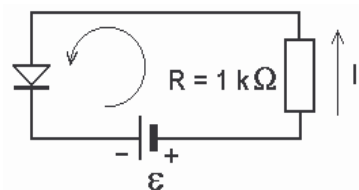
Határozzuk meg a dióda egyenáramú és dinamikus ellenállását $I = 7 \text{ mA}$ -nél!

Szorgalmi feladat:

Határozzuk meg a dióda küszöbfeszültségét és visszáramát! Mivel tudjuk magyarázni a mért karakterisztika eltérését az (1) egyenlettel megadott karakterisztikától?

Megoldott feladatok:

1. Az ábrán látható áramkörben $I = 2 \text{ mA}$ áram folyik a jelzett irányban. A dióda karakterisztikája az (1) összefüggéssel adott, ahol most $I_0 = 5 \mu\text{A}$, $U_0 = 0,7 \text{ V}$. Mekkora a telep elektromotoros ereje? Mekkora a dióda egyenáramú és dinamikus ellenállása?



Megoldás:

A jelölt áramirány nyitóirányú áram a diódán, így (1) alapján

$$I_D = 2 \text{ mA} = I_0 \left(e^{U_D/U_0} - 1 \right) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ mA} \cdot \left(e^{U_D/0,7 \text{ V}} - 1 \right) \Rightarrow U_D \cong 4,894 \text{ V},$$

az R ellenálláson pedig $U_R = 1 \text{ k}\Omega \cdot 2 \text{ mA} = 2 \text{ V}$ esik,

tehát a telep elektromotoros ereje $\varepsilon = U_D + U_R \cong 6,894 \text{ V}$.

Az egyenáramú ellenállás

$$R_E = U_D / I = 4,195 \text{ V} / 2 \text{ mA} \cong 2,447 \text{ k}\Omega.$$

A differenciális ellenállást úgy kapjuk meg, hogy (1)-ből kifejezzük U_D -t és deriváljuk I_D szerint:

$$R_d = \frac{dU_D}{dI_D} = \frac{d\left(U_0 \left(\ln \frac{I_D}{I_0} + 1\right)\right)}{dI_D} = \frac{U_0}{I_D + I_0},$$

ami most $R_d = \frac{0,7 \text{ V}}{2 \text{ mA} + 5 \mu\text{A}} \approx 0,349 \text{ k}\Omega$.

2. Egy dióda U – I karakterisztikája két egyenessel adható meg: záró irányban és $0,7 \text{ V}$ nyitó irányú feszültségig nem folyik rajta áram, $0,7 \text{ V}$ felett pedig egy 200Ω -os differenciális ellenállással jellemezhető módon nő rajta az áram.

a) Rajzoljuk le az U – I karakterisztikát! (A tengelyekre tegyünk skálát!)

b) Ezt a diódát kapcsoljuk sorba egy 60Ω -os ellenállással, valamint egy 2 V -os teleppel. Számítsuk ki az áramkörben folyó áramot és a diódán eső feszültséget

b1) amikor a dióda záró irányban, és

b2) amikor nyitó irányban van kapcsolva.

c) Most kapcsoljunk a diódával párhuzamosan egy 50Ω -os ellenállást.

Mekkora feszültség jut a diódára, ha a két áramköri elemen folyó áram összesen

c1) 20 mA , és a létrejövő feszültség záró irányú a diódára nézve;

c2) 20 mA , és a létrejövő feszültség nyitó irányú a diódára nézve;

c3) 10 mA , és az áram irányát nem ismerjük.

Megoldás:

a)

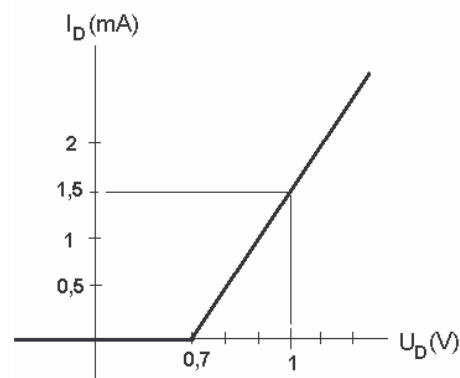
A differenciális ellenállás

$$R_D = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_D - 0,7 \text{ V}}{I_D} = 200 \Omega, \quad \text{amiből}$$

$$\text{a diódán átfolyó áram } I_D = (U_D - 0,7 \text{ V}) / 200 \Omega,$$

illetve

$$\text{a diódán eső feszültség } U_D = 0,7 \text{ V} + I_D \cdot 200 \Omega.$$



b1) Ha a dióda záró irányba van kapcsolva, akkor nem folyik rajta áram, tehát az ellenálláson se folyik áram, $I = 0$, így $U_R = 0$, és a teljes feszültség a diódán esik: $U_D = 2 \text{ V}$.

b2) A telep feszültsége megoszlik a diódán és az ellenálláson:

$$(0,7 + 200 I) + 60 I = 2 \Rightarrow I = 5 \text{ mA}, \quad U_D = 0,7 + 200 \cdot 0,005 = 1,7 \text{ V}, \quad U_R = 60 \cdot 0,005 = 0,3 \text{ V}.$$

c1) Ha a dióda záró irányba van kapcsolva, akkor nem folyik rajta áram, így a teljes 20 mA az ellenálláson folyik, amin $U_R = 0,02 \cdot 50 = 1 \text{ V}$ esik, és ez megegyezik a diódán eső feszültséggel, vagyis $U_D = 1 \text{ V}$.

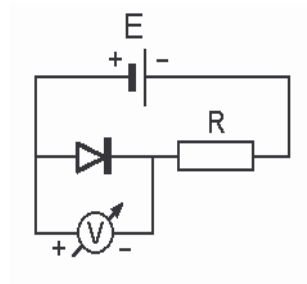
c2) A diódán átfolyó áram I_D , az ellenálláson átfolyó áram $(0,02 - I_D) \text{ [A]}$, a diódán és az ellenálláson eső feszültség egyenlő:

$$0,7 + 200 I_D = 50 \cdot (0,02 - I_D) \Rightarrow I_D = 1,2 \text{ mA} \Rightarrow U_D = 0,94 \text{ V} \quad (\text{és } I_R = 18,8 \text{ mA}).$$

c3) Ha a dióda záró irányba van kötve, akkor nem folyik rajta áram (ld. c1)). Ha nyitó irányba van kötve, akkor itt a c2)-höz hasonló számolásból I_D -re negatív érték jönne ki, ami lehetetlen. Ilyenkor tehát a teljes 10 mA az ellenálláson folyik át, az ellenálláson eső feszültség $U_R = 0,01 \cdot 50 = 0,5 \text{ V}$, tehát ennyi esik a diódán is: $U_D = 0,5 \text{ V}$ (látható, hogy ez kisebb feszültség, mint aminél a dióda nyitni kezd).

3. Egy dióda karakterisztikáját az alábbi kifejezéssel közelíthetjük:

$$I = \begin{cases} 0 & \text{ha } U \leq 0,6 \text{ V} \\ k(U - 0,6)^2 & \text{ha } U > 0,6 \text{ V} \end{cases} \quad k = 50 \text{ mA/V}^2$$



$$R = 10 \, \Omega$$

a) Mit mutat az ideális voltmérő, ha $E_1 = 0,4 \text{ V}$?

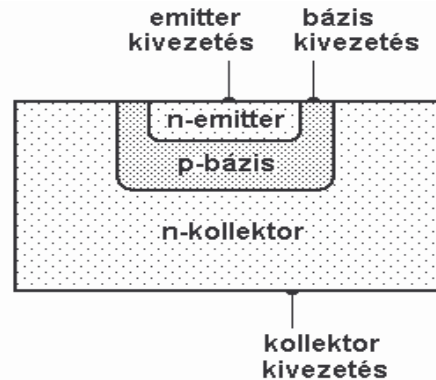
b) Ezután a telepet kicseréljük egy másikra. Ha olyan polaritással kötjük be, mint az a) feladatban, akkor a voltmérő 3 V-ot mutat. Mit mutat akkor, ha a telepet fordított polaritással kötjük be? (A telep belső ellenállása elhanyagolható.)

Megoldás:

- a) Mivel $E_1 < 0,6 \text{ V}$, ami alatt a diódán nem folyik áram, így nem folyik a vele sorba kötött ellenálláson sem, és a teljes feszültség a diódára jut, ezt mutatja a voltmérő: $U = 0,4 \text{ V}$.
- b) A karakterisztikából számolható a diódán folyó áram: $I = (3 - 0,6)^2 \cdot 50 = 288 \text{ mA}$. Ez az áram folyik az ellenálláson is, így azon $U_R = I \cdot R = 2,88 \text{ V}$ esik. A telep elektromotoros ereje $E_2 = U_D + U_R = 3 + 2,88 = 5,88 \text{ V}$. Ha a telepet fordítva kötjük be, a dióda záró irányban van kötve, nem folyik áram, a teljes feszültség a diódán esik, így $U = -5,88 \text{ V}$.

Rövid kérdések

- 1) Abszolút zérus fokon a tiszta szilícium a) félvezetőként b) szigetelőként, vagy c) vezetőként viselkedik?
- 2) Mi történik a lyukak koncentrációjával, amikor a tiszta szilíciumot foszforral adalékoljuk?
a) nő, b) csökken, c) nem változik
- 3) Mi történik a vezetés elektronok koncentrációjával, ha a szilíciumot bórral adalékoljuk?
a) nő, b) csökken, c) nem változik
- 4) Mi történik, ha foszfort és bórt is adagolunk a szilíciumhoz?
- 5) Mi történhet a szilícium vezetésével, ha túlságosan sok bórt adalékolunk hozzá?
- 6) Vonjunk párhuzamot a vizes oldatban létrejövő sav-bázis egyensúly és a félvezetőben létrejövő termikus egyensúly között! Milyen reakciók játszanak szerepet az egyik és másik esetben?
- 7) Egy diódán $0,6 \text{ V}$ alatt gyakorlatilag nem folyik áram. E feszültség felett viszont a karakterisztika egy egyenessel közelíthető, amelyek differenciális ellenállása $10 \, \Omega$.
a) A fenti diódát sorba kötjük egy $10 \, \Omega$ -os ellenállással, amelyen 1 V feszültséget mérünk. Mekkora a feszültség a diódán?
b) A diódával párhuzamosan kötünk egy $5 \, \Omega$ -os ellenállást. Mekkora feszültséget mérhetünk ezen a párhuzamos rendszeren, ha a rendszerrel sorba kötött $10 \, \Omega$ -os ellenálláson 1 V feszültség esik?



11. ábra. A bipoláris npn tranzisztor szerkezete

A tranzisztor két p-n átmenetet tartalmazó félvezető eszköz (11. ábra). A pnp tranzisztor két p-típusú réteg között egy n-típusú réteget, az npn tranzisztor pedig két n-típusú réteg között egy p-típusút tartalmaz.

A szilícium npn planár tranzisztor pl. úgy készül, hogy egy viszonylag gyengén adalékolt (10^{14} atom/cm³) n-típusú Si szeletből kiindulva, arra szilíciumdioxid réteget növesztenek. A szigetelő rétegbe ablakokat vágnak, és most egy bőrűveg-réteget növesztenek a szeletre. Az ablakok felett a növesztést követő hőkezelés során bóratomok diffundálnak az üvegből a Si-ba, úgy, hogy az ablakok alatt létrejön egy p-n átmenet, és a kristály felszíne p-típusúvá válik, kb. 10^{15} atom/cm³ adalékkoncentrációval. A bőrűveg rétegbe is újabb ablakokat vágnak, és most foszforűveget növesztenek a szelet felületére, a növesztés után egy újabb diffúziós lépést alkalmazva. Most a p-típusú tartományba diffundáló foszforatomok hozzák létre a második p-n átmenetet, és a foszforűveg-réteg alatt a kristály újból n-típusú lesz, a szennyezőkoncentráció itt $10^{18} - 10^{19}$ atom/cm³. A leggyengébben adalékolt alapréteg lesz a tranzisztor *kollektora*, a középső réteg, melynek vastagsága mm nagyságrendű, a *bázis*, és a legerősebben adalékolt tartomány lesz az *emitter*. Minden tartományban ablakot nyitnak a kontaktusok számára, és az ablakokba fémeket párologtatnak. A szeletet azonos darabokra szétvágják, egy darabka, a *chip*, melynek mérete pár tized mm, tartalmazza a tranzisztor kollektorát, bázisát és emitterét. A fémhezékekhez vezetékeket forrasztanak, ezek csatlakoznak majd a tranzisztor *lábaihoz*, végül az eszközt *tokba* helyezik.

Kapcsoljunk egy npn tranzisztor p-n átmeneteire feszültséget úgy, hogy $U_{BE} > 0,7$ V, $U_{CB} > 1$ V legyen. Nézzük meg, mi történik! A bázis-emitter diódára nyitóirányú feszültséget adtunk, ezért ott megindul az áram. Mivel az emitter sokkal szennyezettebb, mint a bázis, az áramot főként az emitterből a bázisba belépő elektronok szállítják. Azt várnánk, hogy ezek az elektronok a bázis kivezetésén eltávoznak, és mivel a bázis-kollektor dióda záróirányú feszültséget kap, a kollektor-vezetéken nem folyik áram. Csakhogy a bázis igen vékony, és az elektronok kisebbségi töltéshordozók a bázisban! Számukra a bázis-kollektor határréteg nyitott, itt akadálytalanul áthaladnak, és belezuhannak a kollektorba, ami -mint a neve is mutatja- összegyűjti ezeket. Tehát a tranzisztorban az emittert elhagyó és a bázisba belépő elektronok majdnem teljes áramát a kollektor összegyűjti és csak a maradék -mely a teljes áramnak csak néhány százaléka (vagy csak 1-2 ezreléke)- adja a bázisáramot.

Ezt a jelenséget -melynek lényege, hogy az elektronok egy n-tartományból egy vékony p-tartományon át egy záróirányban előfeszített határrétegen egy másik n-tartományba jutnak- nevezzük *tranzisztor-effektusnak*. A tranzisztornak az a tulajdonsága, hogy a kollektoráramot főleg az emitteráram, illetve a bázisáram határozza meg, a bázis-kollektor feszültség (ha meghaladja a kb. 1 V küszöbértéket) csak kissé befolyásolja.

Mi történik, ha most az U_{BE} feszültséget kissé megnöveljük? Az U_{BE} növekedése az I_E emitteráramban nagy változást okoz (4. ábra). Az emitterből a bázisba belépő elektronokat a bázis-kollektor átmeneten kialakult térerősség átsöpri a kollektorba, kivéve a kb. századrésznyi, a bázisvezetéken elszivárgó töltéshordozót. Ez azt jelenti, hogy a bázisfeszültség kis változása, mely kis bázisáram-változásnak felel meg, nagy változást okoz a kollektoráramban. Tehát a tranzisztor áramot erősítő elem, mivel a bázisvezetéken létrehozott kis ΔI_B áramváltozás a kollektorvezetéken két-három nagyságrenddel nagyobb ΔI_C áramváltozást ad. A tranzisztorral azonban feszültségerősítés is megvalósítható. A kollektort egy ellenálláson keresztül kötve a telepre, a nagy kollektoráram-változás az ellenálláson nagy feszültségváltozást hoz létre. Ezzel a kollektor és a bázis közötti feszültség csökken, de ez nem befolyásolja számottevően a kollektoráramot. A kollektoráram csak akkor csökkenne, ha a kollektor-bázis diódára a küszöbértéknél kisebb feszültség jutna, mely már nem lenne elég a bázisba jutott kisebbségi töltéshordozóknak a kollektorba vonzásához.

Ha a 11. ábrán látható tranzisztor n-régeit p-re, a p-réteget n-re cseréljük, egy másik típust, az úgynevezett pnp tranzisztort kapjuk. Működése az npn tranzisztoréval azonos, azzal a különbséggel, hogy itt az elektromos áramot a lyukak mozgása hozza létre, így a tranzisztorra ellentétes polaritású feszültségeket kell kapcsolnunk, mint az előző esetben.

A tranzisztor mint áramköri elem

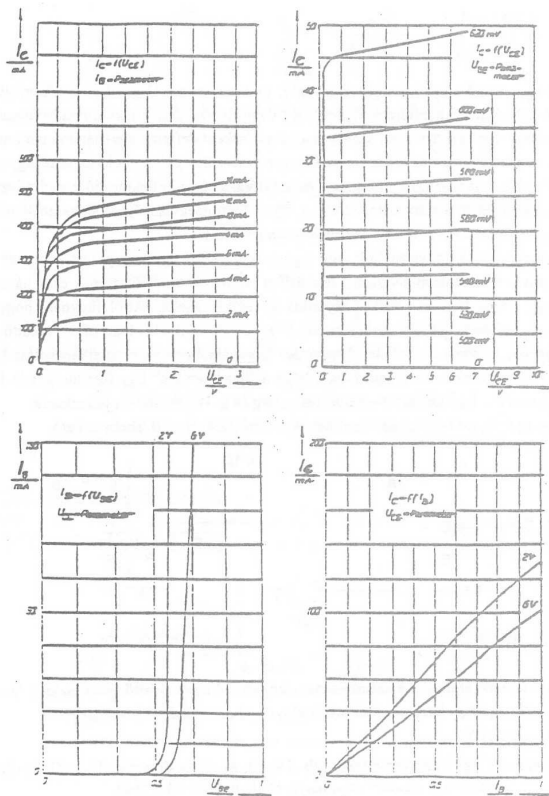
Tekintsünk egy npn szilícium rétegtranzisztort, méghozzá konkrétan az SF 128 típusút. Egy tranzisztornak három kivezetése van, ezért háromféle áramot és feszültséget mérhetünk rajta, melyek mindegyike függ az összes többi mennyiségtől. Ezeknek az összefüggéseknek egy része triviális:

$$U_{EB} + U_{BC} = U_{EC}, \quad I_C + I_B = I_E,$$

tehát marad 4 mennyiség, melyek közül kettő szabadon választható, a másik kettő pedig ezek függvénye.

A bázisáramot főleg a bázis-emitter feszültség határozza meg és csak kissé befolyásolja a kollektor-emitter feszültség. A tranzisztor kollektorárama viszont függ a bázisáramtól és a kollektor-emitter feszültségtől. Ezeket a függvényeket paraméteresen szokták ábrázolni a tranzisztor-katalógusokban: az első a *bemeneti*, a második a *kimeneti karakterisztika*.

A 12. ábrán láthatók az SF-128 tranzisztor katalógusban megadott egyenáramú karakterisztikái. A karakterisztikákból határozhatunk meg néhány, a tranzisztort jellemző paramétert.



12. ábra. Az SF-128 tranzisztor karakterisztikái

A sokféle jellemző paraméter közül kettőt említünk meg: az áramerősítési tényezőt és a kimeneti ellenállást.

Az *áramerősítési tényezőt* általában β -val jelöljük, és definíció szerint

$$\beta := \left(\frac{\partial I_C}{\partial I_B} \right)_{U_{CE}}, \quad (2)$$

azaz az $I_C - I_B$ karakterisztika adott pontjában az ahhoz a ponthoz húzott érintő meredekségével egyenlő. Más szavakkal: megmondja, hogy a bázisáram egységnyi megváltozásakor hányszorosára változik a kollektoráram, ha a kollektor-emitter feszültség állandó. A dinamikus *kimeneti ellenállás* definíció szerint

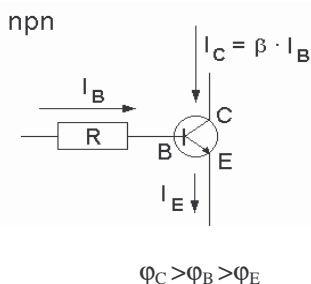
$$R_{ki} := \left(\frac{\partial U_{CE}}{\partial I_C} \right)_{I_B}, \quad (3)$$

azaz szintén egy érintő meredekségével egyenlő, csak most az $U_{CE} - I_C$ karakterisztika megfelelő pontjáról van szó (állandó bázisáram mellett). Az ilyen-típusú, deriváltakal meghatározott jellemzőket *dinamikus* mennyiségeknek nevezik, szemben a hányadosként definiált egyenáramú paraméterekkel.

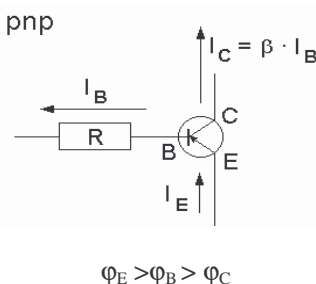
Tekintsük az npn tranzisztort az előző fejezetben vázolt feszültségviszonyokkal, azaz legyen $U_{BE} > 0,7 \text{ V}$ és $U_{CB} > 1 \text{ V}$, tehát a bázis-emitter dióda legyen kinyitva, a bázis-kollektor dióda pedig lezárva. Ennél az *előfeszítésnél* jelentkezik a tranzisztor-effektus, ilyen feszültségviszonyoknál használható a tranzisztor erősítőként: a tranzisztor *normál aktív tartományban* működik.

Ha a tranzisztort erősítőként használjuk, úgy foghatjuk fel, mint egy négypólust, melynek a bemenetére egy kis jelet adva, a kimeneten a válasz a felerősített jel. Mivel a tranzisztornak csak három pólusa van, ezek közül egy közös lesz az erősítő-négypólus ki- és bemenetén. Attól függően, hogy a tranzisztor melyik pólusa a közös pontja a bemenetnek és a kimenetnek, háromféle erősítő-alapkapcsolás lehetséges: bázis-, emitter- és kollektorkapcsolás. Leggyakrabban az emitterkapcsolást használják. Az így kapcsolt tranzisztorokat tekinthetjük úgy, hogy a "bemenetükre" U_{BE} feszültséget és I_B bázisáramot adva a "kimenetükön" U_{CE} kollektor-emitter feszültség és I_C kollektoráram jelentkezik.

Az npn és pnp tranzisztor rajzjele az áramirányok feltüntetésével a 13. ábrán látható.

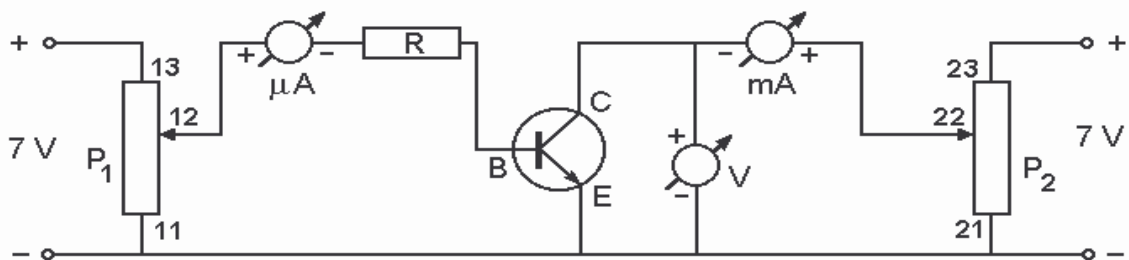


13. ábra



Szorgalmi feladat: Tranzisztor karakterisztikáinak mérése

Állítsuk össze a 14. ábrán látható kapcsolást, és mérjük meg $U_{CE} = 0,5; 1; 2; 3; 5 \text{ V}$ kollektor-emitter feszültség értékeket beállítva és állandó értéken tartva az I_C kollektoráramot $I_B = 10; 20; 30; 40; 50; 60 \mu\text{A}$ bázisáramoknál. A kollektor-emitter feszültség állandó értéken tartásához a két potenciométer szimultán állítása szükséges!



14. ábra. Kapcsolás a tranzisztor-karakterisztika méréséhez

Ábrázoljuk az $U_{CE} = 3 \text{ V}$ -hoz tartozó $I_C - I_B$ karakterisztikát, és a karakterisztika lineáris részén határozzuk meg a β áramerősítési tényezőt. A leolvasott értékek hibáinak ismeretében becsüljük meg β hibáját!

Ábrázoljuk az egyes bázisáram értékekhez mint paraméterhez tartozó $I_C - U_{CE}$ karakterisztikákat!

Az $I_B = 40 \mu\text{A}$ -hez tartozó karakterisztika lineáris szakaszán válasszunk ki egy U_{CE} értéket és becsüljük meg ebben a pontban a tranzisztor R_{ki} kimenő ellenállását!

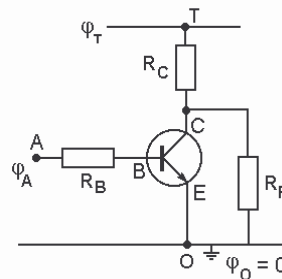
Tranzisztort tartalmazó áramkörök számításánál a következő egyszerűsítő feltevésekkel szokás élni:

1. $U_{BE} = U_0 = \text{konstans}$, a bázis-emitter dióda kinyitásához szükséges feszültség, szilíciumnál $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$.
2. ha U_{CE} meghalad egy bizonyos értéket (kb. 1 V -ot), akkor I_C független U_{CE} -től, és csak I_B -től függ, méghozzá $I_C = \beta \cdot I_B$ (azaz a β áramerősítési tényezőt állandónak tekintjük).

Megoldott feladat:

Határozzuk meg az R_F fogyasztóra jutó U_{CO} feszültséget és a rajta átfolyó áramot, ha

- $R_B = 100 \text{ k}\Omega$,
- $R_C = 4 \text{ k}\Omega$,
- $R_F = 4 \text{ k}\Omega$,
- $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$,
- $\varphi_A = 1,7 \text{ V}$,
- $\varphi_T = 10 \text{ V}$ és
- $\beta = 50$!



Megoldás:

$$\text{A bázisáram: } I_B = \frac{\varphi_A - U_{BE}}{R_B} = 0,01 \text{ mA},$$

$$\text{ezért } I_C = \beta \cdot I_B = 0,5 \text{ mA}.$$

Kirchhoff törvényei alapján

$$I = I_F + I_C \quad \text{és} \quad \varphi_T = I R_C + I_F R_F,$$

$$\text{amiből } I_F = 1 \text{ mA} \quad \text{és} \quad U_{CO} = 4 \text{ V}.$$

