

## 4. FÉLVEZETŐK

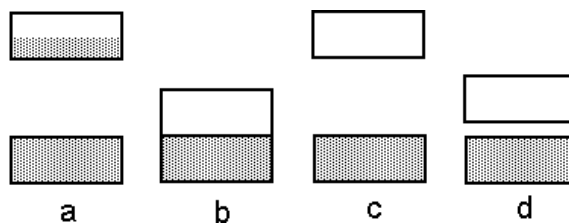
*Félvezetők* alatt olyan kristályos szilárd anyagokat értünk, amelyeknek fajlagos elektromos vezetése közönséges hőmérsékleten  $10^{-9} - 10^3 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ , azaz kevesebb, mint a fémeké és több, mint a szigetelőké, és amelyekben a vezetést elektronok (tehát nem ionok) közvetítik. Vannak elemi félvezetők, mint a szilícium vagy a germánium, és vegyület-félvezetők, pl. a gallium-arszenid (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 szinteken 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 szintek 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 szintek egy energiatarományt -sávot- alkotnak. A sávok közötti energiák tiltottak, ez a *tiltott sáv*, vagy angol szóval *gap*.

0 K hőmérsékleten az elektronok a legmélyebb szinteket 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* pályából 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 szinteken 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 szint 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 szigetelőkéétől 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

Félvezetőknél 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 tetraédes kötással 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 sáv szerkezetben 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 -egyegy 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 sáv szerkezete

Az intrinsic koncentráció erősen hőmérsékletfüggő. Adalékolt félvezetőkben viszont a donornívó 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 tetraédes kötés kialakításához a szennyező atomról hiányzik egy elektron. A szennyező atom, hogy kötés 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 sáv szerkezetében 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 vezetik 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*.

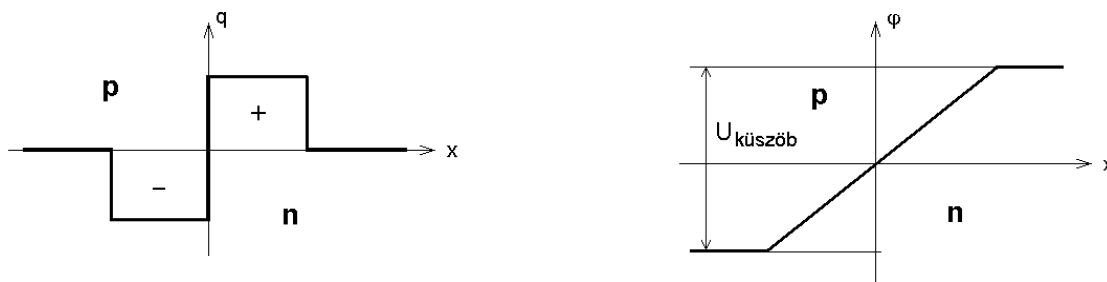
### A p-n átmenet

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.: a töltéeloszlás és b.: az elektromos potenciál változása (leegyszerűsítve) a p-n átmenet környezetében.

### A dióda

A *rétegdíoda* egyetlen p-n átmenettel rendelkező félvezető eszköz, olyan kétpólus, ahol az egyik kivezetés (az anód) egy félvezető kristály p-típusúra adalékolt 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 határreteken 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 határretegben a kisebbségi töltéshordozók akadálytalanul átjuthatnak, mivel a térerősség az áthaladás irányába mutató erővel hat rájuk. Ez az erő azonban áthaladásakor 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 lavinyszerű 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 rétegtranzisztornál. Vannak ennél több p-n átmenetű eszközök is, pl. a vezérelhető egyenirányító 3, ill. 4 p-n átmenetet tartalmaz.

### A dióda mint áramköri elem

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.

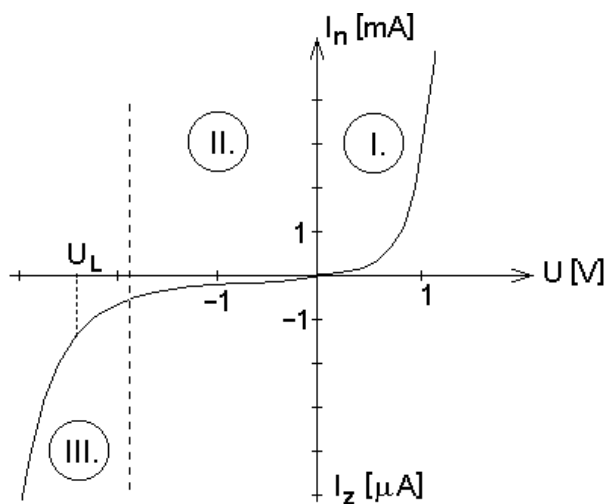
Tipikus diódakarakterisztikát mutat a 4. ábra.

A dióda karakterisztikáján a fent elmondottak alapján megkülönböztetjük az I.-gyel jelölt nyitóirányú, II.-vel jelölt záróirányú, és a III.-mal jelölt letörési tartományt. Jól közelíthetjük a karakterisztikát az I. és a II. tartományban a következő összefüggés segítségével:

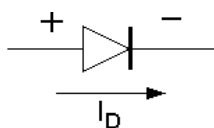
$$I_D(U_D) = I_0(e^{U_D/U_0} - 1), \quad (1)$$

ahol  $I_D$  a diódán átfolyó áram,  $U_D$  a dióda anódja és katódja közötti feszültség (nyitóirányban pozitív, záróirányban negatív),

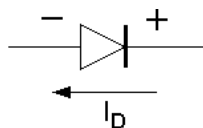
$I_0$  és  $U_0$  a diódára jellemző konstansok:  $I_0$  a visszáram,  $U_0$  a küszöbfeszültség.



4. ábra. Rétegdióda egyenáramú karakterisztikája



nyitóirányban pozitív



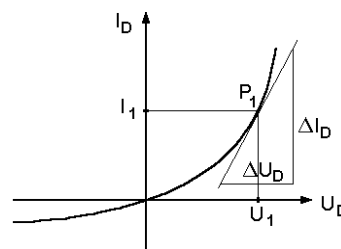
záróirányban negatív

A feszültség és az áram előjele a diódán

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

$$R_e = U_1 / I_1 \quad \text{egyenáramú ellenállásáról, illetve az}$$

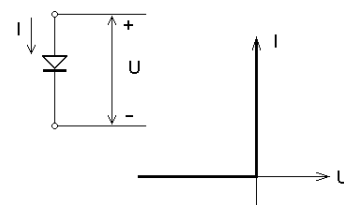
$$R_d = \left. \frac{dU_D}{dI_D} \right|_{P_1} \quad \text{dinamikus (differenciális) ellenállásáról.}$$



Nemlineáris áramköri elemek karakterisztikája általában grafikonon, katalógusokban található meg, ritkábban használunk (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*.

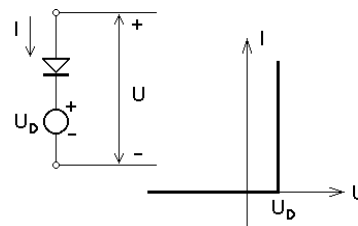
#### A félvezető dióda helyettesítő képei

Az egyenirányításra használt diódák legegyszerűbb helyettesítő képe az ún. ideális dióda. 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.



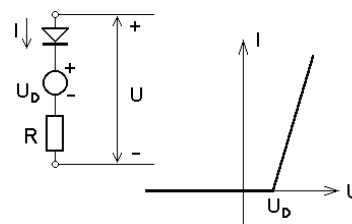
5. ábra

A következő, kissé pontosabb modell (6. ábra) 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.



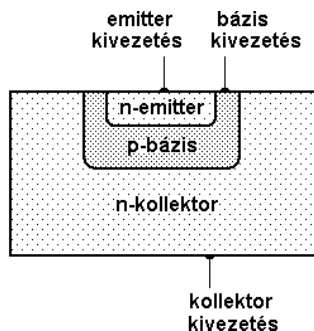
6. ábra

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

## A bipoláris tranzisztor



8. ábra. A bipoláris npn tranzisztor szerkezete

A tranzisztor két p-n átmenetet tartalmazó félvezető eszköz (8. 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/cm<sup>3</sup>) n-típusú Si szeletből kiindulva, arra szilíciumdioxid réteget növesztenek. A szigetelő rétegbe ablakokat vágnak, és most egy bórüveg-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/cm<sup>3</sup> adalékkoncentrációval. A bórüveg rétegbe is újabb ablakokat vágnak, és most foszforüveget 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 foszforüveg-réteg alatt a kristály újból n-típusú lesz, a szennyezőkoncentráció itt  $10^{18}$  -  $10^{19}$  atom/cm<sup>3</sup>. 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 fémvezetékekhez vezetéseket 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 elszívárgó 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  $\Delta I_B$  áramváltozás a kollektorvezetéken két-három nagyságrenddel nagyobb  $\Delta I_C$  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.

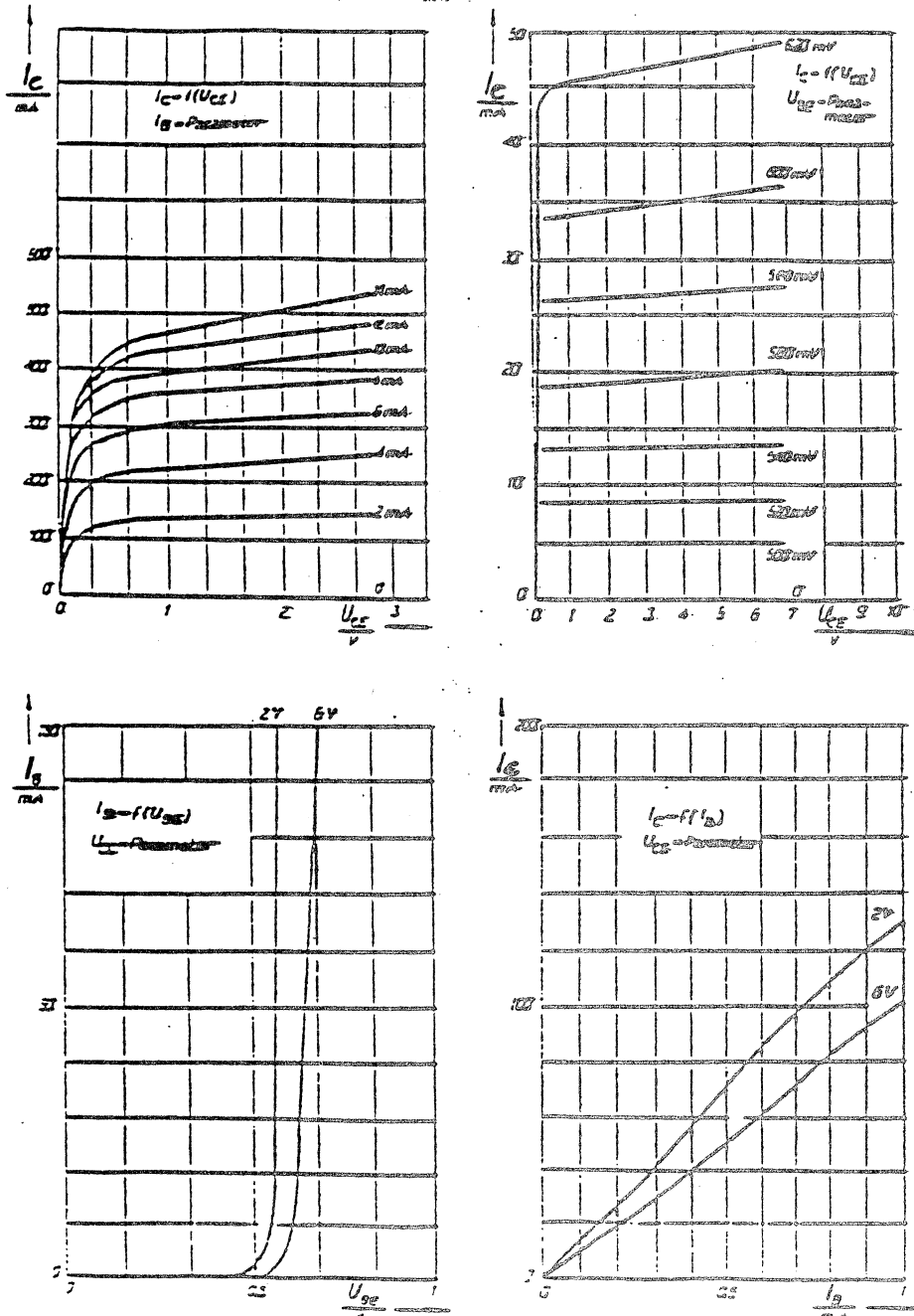
Ha a 8. ábrán látható tranzisztor n-rétegeit p-re, a p-réteget n-re cseréljük, egy másik típust, az úgynevezett pnp tranzisztorot kapjuk. Működése az npn tranzisztoréval azonos, azzal a különbséggel, hogy itt az elektromos áramot a lyukak mozgása hozza létre, így a tranzisztorra ellentétes polaritású feszültségeket kell kapcsolnunk, mint az előző esetben.

## A tranzisztor mint áramköri elem

Tekintsünk egy npn szilícium rétegztranzisztort, méghozzá konkrétan az SF 128 típusút (ezt fogjuk mérni). 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*.



9. ábra. Az SF-128 tranzisztor karakterisztikái

A 9. ábrán láthatók az SF-128 tranzisztor katalógusban megadott egyenáramú karakterisztikái. A karakterisztikákból határozhatunk meg néhány, a tranzisztort jellemző paramétert. A sokféle jellemző paraméter közül kettőt említünk meg: az áramerősítési tényezőt és a kimeneti ellenállást. Az *áramerősítési tényezőt* általában  $\beta$ -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

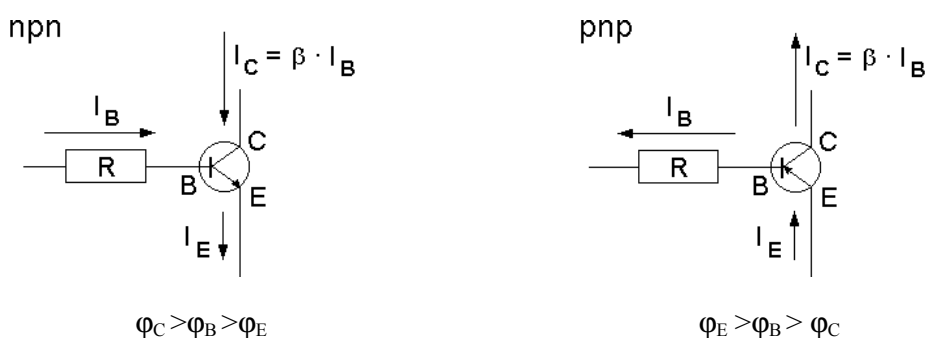
$$R_{ki} := \left( \frac{\partial U_{CE}}{\partial I_C} \right)_{I_B}, \quad (3)$$

azaz szintén egy érintő meredekségével egyenlő, csak most az  $U_{CE} - I_C$  karakterisztika megfelelő pontjáról van szó (állandó bázisáram mellett). Az ilyen-típusú, deriváltakkal 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 négy-pólust, 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-négy-pólus 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 10. ábrán látható.



10. ábra

Tranzisztort tartalmazó áramkörök számításánál a következő egyszerűsítő feltevésekkel szokás élni:

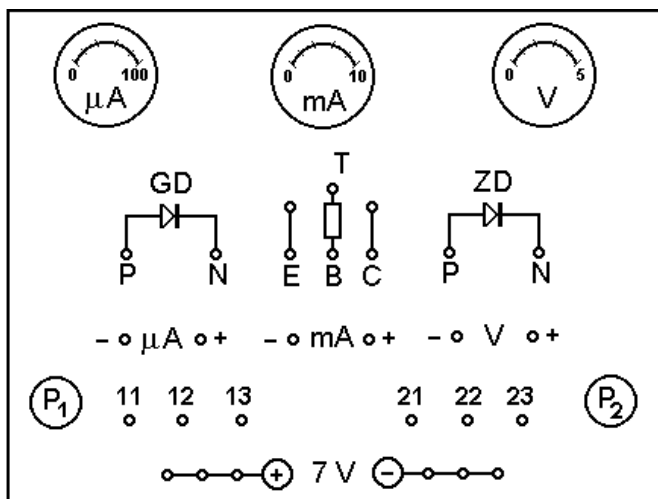
1.  $U_{BE} = U_0 = \text{konstans}$ , a bázis-emitter dióda kinyitásához szükséges feszültség, szilíciumnál  $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$ .
2. ha  $U_{CE}$  meghalad egy bizonyos értéket (kb.  $1 \text{ V}$ -ot), akkor  $I_C$  független  $U_{CE}$ -től, és csak  $I_B$ -től függ, méghozzá  $I_C = \beta \cdot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



## Mérés

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

**Szükséges eszközök:** mérőpanel, forrasztópáka, drótok.

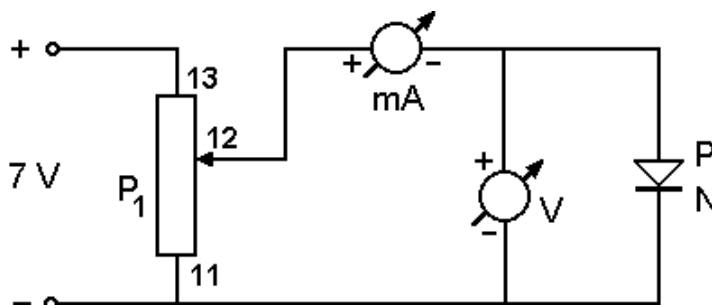


11. ábra. A mérőpanel

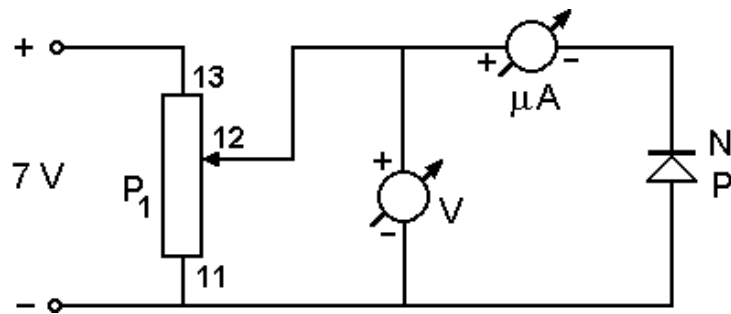
GD: germánium dióda, T: tranzisztor, ZD: Zener-dióda,  
 P: dióda p-réteg kivezetése, N: dióda n-réteg kivezetése,  
 E, B, C: az npn tranzisztor emitter, bázis és kollektor kivezetései;  
 $\mu\text{A}$ : a mikroampermérő kivezetései, mA: a milliampermérő kivezetései, V: a voltmérő kivezetései,  
 $P_1$  és  $P_2$ : potenciométerek,  
 11, 12, 13, 21, 22, 23: a  $P_1$  és  $P_2$  potenciométerek kivezetései;  
 7V: a tápfeszültség kivezetései.

### 1. Dióda karakterisztikájának mérése

Állítsuk össze a 12., majd a 13. ábra kapcsolását, és mérjük meg a dióda nyitó- és záróirányú karakterisztikáját a táblázatban feltüntetett értékek esetén!



12. ábra. Kapcsolás a nyitóirányú dióda-karakterisztika méréséhez



13. ábra. Kapcsolás a záróirányú dióda-karakterisztika méréséhez

I. Táblázat

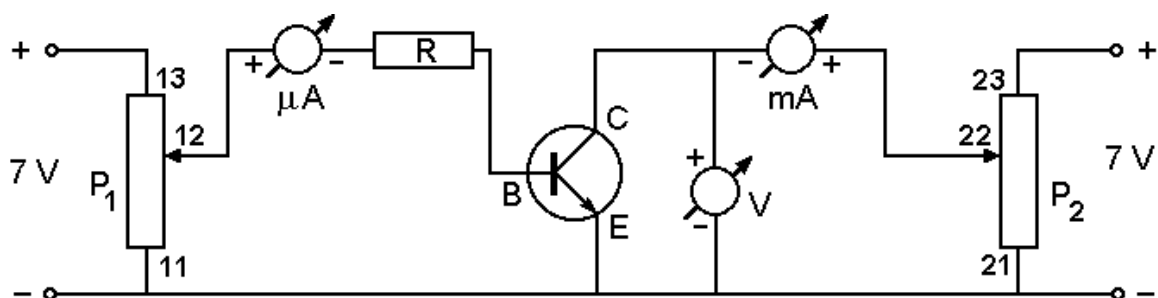
<b>I[mA]</b>	+0,5	+1	+2	+3	+7	+10	<b>[μA]</b>					
<b>U[V]</b>								-1	-2	-3	-4	-5

A táblázatban + jellel jelöljük a nyitóirányú áramot és feszültséget, ill. - jellel a záróirányú áramot és feszültséget.

Felrajzolendő a dióda I(U) karakterisztikája.

## 2. Tranzisztor karakterisztikáinak mérése

Állítsuk össze a 14. ábrán látható kapcsolást, és mérjük meg  $U_{CE} = 0,5; 1; 2; 3; 5$  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 potencióméter szimultán állítása szükséges!



14. ábra. Kapcsolás a tranzisztor-karakterisztika méréséhez

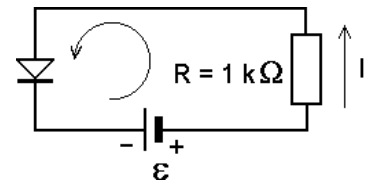
Ábrázoljuk az  $U_{CE} = 3$  V-hoz tartozó  $I_C - I_B$  karakterisztikát, és a karakterisztika lineáris részén határozzuk meg a  $\beta$  áramerősítési tényezőt. A leolvasott értékek hibáinak ismeretében becsüljük meg  $\beta$  hibáját!

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!

## Példák

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  $U_D \cong 4,195 \text{ V}$ .  
A R ellenálláson  $U_R = 1 \text{ k}\Omega \cdot 2 \text{ mA} = 2 \text{ V}$  esik, ezért  $\varepsilon = U_D + U_R \cong 6,195 \text{ V}$ .

$$R_E = U_D / I \cong 4,195 \text{ V} / 2 \text{ mA} = 2,097 \text{ k}\Omega, \text{ és}$$

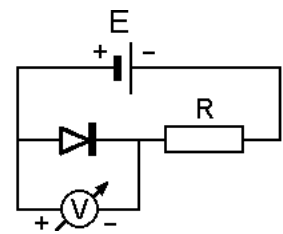
$$R_d = \frac{dU_D}{dI_D} = \frac{U_0}{I_D + I_0} \cong \frac{0,7 \text{ V}}{2 \text{ mA} + 5\mu\text{A}} = 0,349 \text{ k}\Omega .$$

2. Egy dióda karakterisztikáját az alábbi kifejezéssel közelíthetjük:

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

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.)



$$R = 10 \Omega$$

*Megoldás:*

- a)  $U = 0,4 \text{ V}$ , mert a diódán nem folyik áram, így az ellenálláson sem, és a teljes feszültség a diódára jut.  
b) A karakterisztikából  $I = (3 - 0,6)^2 \cdot 50 = 288 \text{ mA}$ . Az ellenálláson  $U_R = I R = 2,88 \text{ V}$  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 teljes feszültség a diódán esik, így  $U = - 5,88 \text{ V}$ .

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

$$R_B = 100 \text{ k}\Omega,$$

$$R_C = 4 \text{ k}\Omega,$$

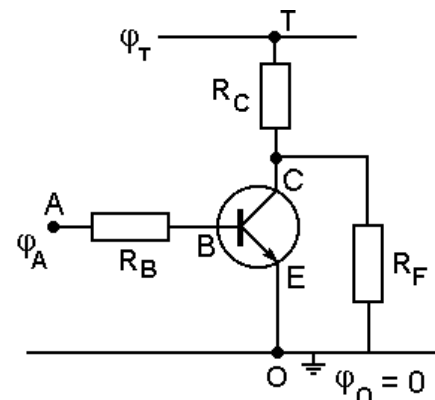
$$R_F = 4 \text{ k}\Omega,$$

$$U_{BE} = 0,7 \text{ V},$$

$$\varphi_A = 1,7 \text{ V},$$

$$\varphi_T = 10 \text{ V és}$$

$$\beta = 50!$$



Megoldás:

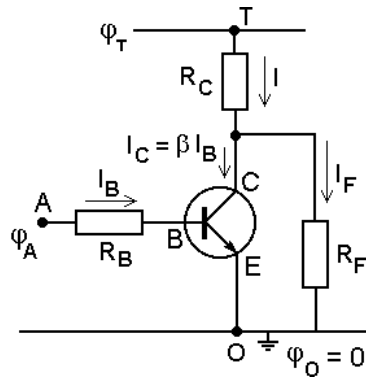
$$\text{A bázisáram: } I_B = \frac{\varphi_A - U_{BE}}{R_B} = 0,01 \text{ mA},$$

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

Kirchhoff törvényei alapján

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

$$\text{amiből } I_F = 1 \text{ mA} \quad \text{és} \quad U_{CO} = 2 \text{ V}.$$



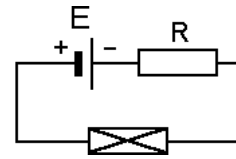
4. A nemlineáris elem karakterisztikája

$$U_x = 3 I^2 - 8 I, \quad \text{ha } I > 0$$

$$U_x = 0, \quad \text{ha } I \leq 0$$

Mekkora, milyen irányú áram folyik a körben?

$$E = 12 \text{ V}, \quad R = 3 \Omega.$$



Megoldás:

$$\text{A Kirchhoff-törvényt felírva } U_x + IR = E, \quad 3 I^2 - 8 I + 3I = 12.$$

$$\text{Ennek megoldása } I_1 = 3 \text{ A}, \quad I_2 = -4/3 \text{ A}.$$

A negatív gyöknek ebben az esetben nincs fizikai értelme, mivel az áram iránya a telep polaritásából egyértelműen meghatározott. A körben tehát 3 A folyik pozitív irányban.