

3.6. Félvezetők

3.6.1. Az félvezetők kristályszerkezete

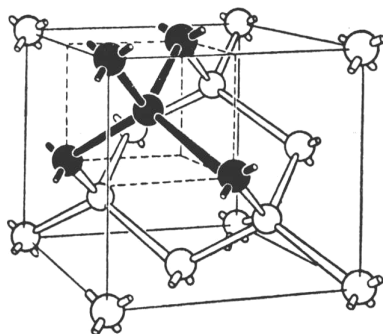
Az elektronikában használt félvezető eszközök működésének magyarázatához (ugyanúgy, mint a 3.1.1. pontban) a Bohr-féle atommodellt használjuk. Röviden összefoglalva, az atom pozitív töltésű *atommagból* és negatív töltésű *elektronokból* áll. Az atommag pozitív töltése megegyezik az elektronok negatív töltésével, azaz az atom kifelé elektromosan semleges.

Az elektronok az atommag körüli pályákon, *elektronhéjakon* keringenek az atommag körül. Egy atomon belül több elektronhéj lehetséges, és az adott héj minél közelebb esik az atommaghoz, annál jobban hat rá az az elektrosztatikus vonzás, amely a pozitív töltésű atommag és a negatív töltésű elektron között fellép, és amely az elektront a héjban pályáján megtartja. Az atommagtól legtávolabb lévő, külső elektronhéjon keringő elektronok (az ún. *vegyértékelektronok*) viszont kevésbé kötődnek az atommaghoz, egyrészt, mert távolabb vannak tőle, másrészt, mert a közbenső héjakon keringő elektronok negatív töltésükkel elektrosztatikus árnyékolást jelentenek.

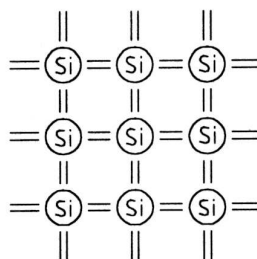
Az atomok jellemző tulajdonsága, hogy igyekeznek külső héjukat „betölteni”, azaz vegyértékelektronjaik egy részét a szomszédos atomokkal közösen használják úgy, hogy minden atom külső héjára az adott héjra megengedett maximális számú elektron kerül.

A félvezetők (az elektronikában elsősorban *szilíciumot* és *germániumot* használnak) 4 vegyértékű anyagok, azaz külső elektronhéjukon 4 vegyértékelektron található. E héjukra 8 elektron fér, ezért a héj betöltéséhez további négy elektronra van szükség, amit 4 szomszédos atom „magukhoz kötésével” biztosítanak. (Az ilyen kémiai kötést *elektronpár kötésnek* vagy *kovalens kötésnek* nevezik.)

Pl. szilíciumatom esetén, (ha a szomszédos atomok szintén szilíciumatomok), a kovalens kötés az atomokat szabályos térbeli helyzetben (*térrácsban*) rögzíti, az ilyen szabályos rácsszerkezetek összessége a *kristály*. A szilíciumkristály szerkezetét, illetve a gyakorlati szemléltető ábrákon alkalmazott kétdimenziós vázlatát az 1. ábra mutatja.



a) Szilíciumkristály



1. ábra

b) Szilíciumkristály kétdimenziós vázlata

Ha egy szilíciumdarabka teljes szerkezete egyetlen szabályos kristályból áll, azt *egykristálynak* (*monokristálynak*), ha pedig sok, véletlenszerűen kialakult és egymáshoz határfelületein szabálytalanul csatlakozó kristályból áll, *polikristályos* szerkezetűnek nevezik. A félvezető eszközök alapanyagaként monokristályos szerkezetű anyagot használnak.

Az 1.a. ábrán bemutatott ideális kristálytól eltérően a valóságos kristályban kristályhibák lehetnek, melyek közül a kristály elektromos tulajdonságait a *diszlokáció* és a *szennyeződés* befolyásolja. Diszlokáció esetén a kristályból egy vagy több atom hiányzik, illetve az atom a szabályos rácpontok közötti térben helyezkedik el. A szennyeződés azt jelenti, hogy a kristályszerkezetbe idegen anyag atomja került.

Vezetők, szigetelők, félvezetők

Ha a kovalens kötésű kristályszerkezet az anyag vegyértékelektronjait erős kötésben tartja, az anyagban nincsen elmozdulni képes töltéshordozó, az anyag *szigetelő*. Ilyen pl. a tökéletes szénkristály (gyémánt).

Vannak anyagok (pl. réz), melyekben egyes vegyértékelektronok nem kötődnek a kristályszerkezet egy pontjához sem, hanem szabadon mozoghatnak a kristályban, ezek a sok „szabad” töltéshordozót tartalmazó anyagok a *vezetők*.

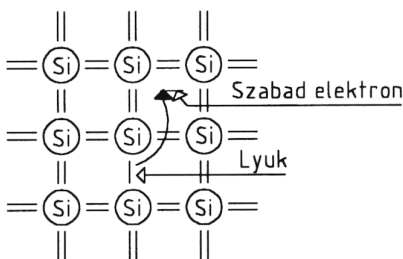
A **félvezetőkben** alacsony hőmérsékleten a vegyértékelektronok kötöttek, ezért az anyag szigetelőként viselkedik. A hőmérséklet növekedésével azonban a felhalmozódó hőenergia hatására az atommaggal csak laza kapcsolatban álló vegyértékelektronok egy része kimozdulhat a kristályszerkezetben elfoglalt helyéről, és szabad töltéshordozóvá válhat, az anyag vezetővé válik. Ha pedig a hőmérséklet eléri az anyag olvadáspontját (szilíciumnál 1420 °C), a megmaradó vegyértékelektronok már nem képesek a kristályt összetartani, az anyag megolvad.

Elektronok és lyukak

Amikor tehát a félvezető kristály energiát vesz fel (hőmérséklete növekszik, vagy - mivel a fény is az energia egy formája - megvilágítják), vegyértékelektronok válnak le az atomról. A levált vegyértékelektron elhagyja az atomot, a kristályszerkezetben elfoglalt helyét, és nagy sebességgel cikázik a kristályrácsban, miközben az atommagokba ütközve rendszeresen változtatja irányát. Átlagosan minden irányban azonos utat tesz meg, így eredeti helyétől nem nagyon távolodik el.

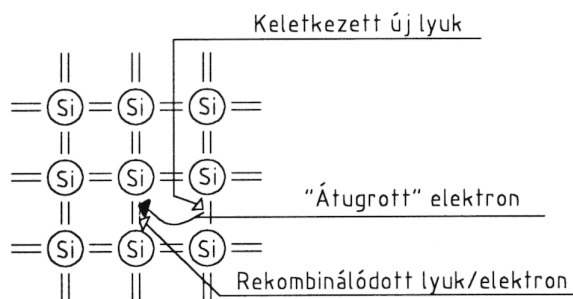
Abban az esetben azonban, ha a félvezető kristályban elektromos erőteret hozunk létre (a kristály mentén potenciálkülönbséget létesítünk), a szabad elektronok mozgásának eredője a létrehozott elektromos erőter irányába mutat, azaz áram folyik.

A félvezető azonban nem csak szabad elektronjai útján vezeti az áramot (mint a fémek), hanem egy másik vezetési mechanizmus: a *lyukvezetés* útján is. Ha ti. két atom között egy vegyértékelektron szabad elektronná vált, a kristályszerkezetben már csak egy vegyértékelektron tartja fenn a kötést, az elszabadult elektron helyén elektronhiány, *lyuk* keletkezik (2. ábra). Az eredetileg elektromosan semleges atom a negatív töltésű elektron távozásá folytán pozitív töltésűvé válik, ezért a lyukat pozitív töltésűnek tekintjük.



2. ábra
Szabad elektron - lyuk páros keletkezése

Előfordulhat, hogy egy szomszédos atom valamelyik vegyértékelektronja szintén elszabadul, és „beugrik” az előbb említett (pozitív töltésénél fogva az elektront vonzó) lyukba (3. ábra). Ezzel az előbbi lyuk (és az oda beugró szabad elektron is) megszűnik, hiszen a rácsszerkezet rendje az adott helyen helyreállt (ezt a folyamatot nevezik *rekombinációnak*), viszont a most elszabadult szabad elektron helyén új lyuk keletkezett. Ha valamelyik szomszédos atomból elszabaduló elektron most ebbe a lyukba ugrik be, tehát rekombinálódik, a lyuk a most elszabadult atom helyére „vándorol át”.



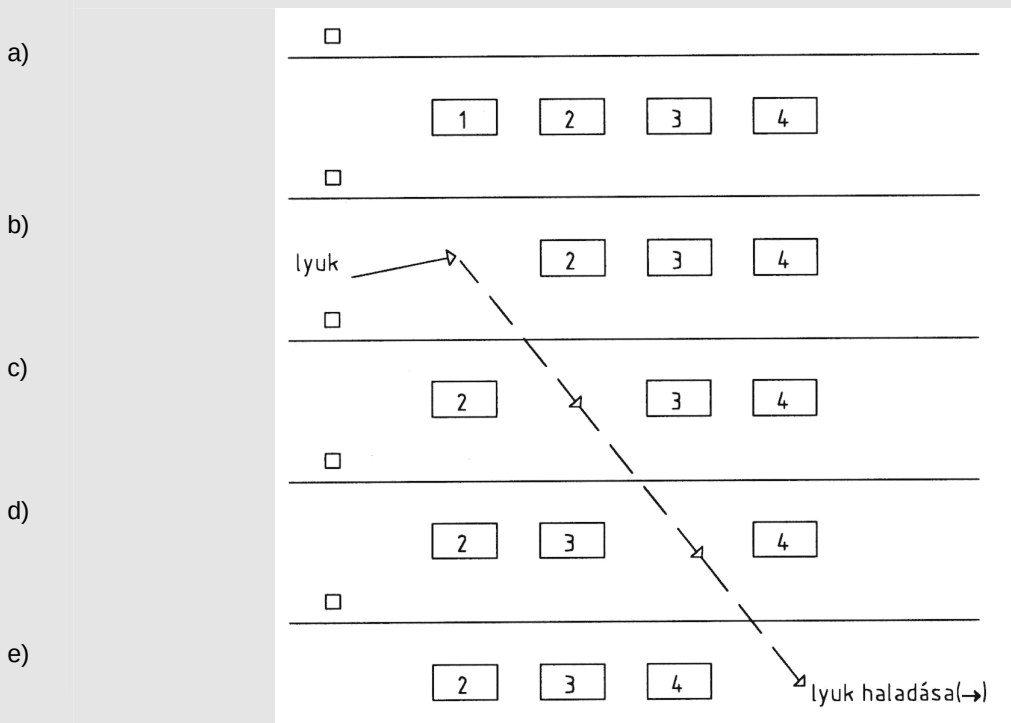
3. ábra
Lyukvezetés

A lyukvezetést jól példázza a taxiállomás forgalma (4. ábra).

Tegyük fel, hogy a taxiállomáson 4 taxi áll (4.a. ábra). Az első taxiba beül egy utas, a taxi távozik. Helyén egy „lyuk” keletkezik (4.b. ábra). A második taxi sofőre beindítja a kocsit, és előre áll az első helyre (4. c. ábra) Ezzel az első helyen a lyuk megszűnik („rekombinálódott” az előre állt taxival), és a lyuk a második

helyre vándorolt. Ezután a harmadik taxi sofőrje áll egy hellyel előre (4. d. ábra), minek következtében a lyuk a harmadik helyre került. A negyedik taxi elfoglalja a harmadik helyet (4. e. ábra), mire a lyuk a negyedik helyre vándorolt.

A példán látható, hogy miközben mindig más és más taxi („elektron”) változtatja meg a helyét, tehát a taxik mozgása szakaszos, addig a „lyuk” mozgása folyamatos és egyirányú (és ellentétes irányú a taxik mozgásával).



4. ábra
„Lyukvezetés” taxikkal szemlélítve

A pozitív töltésű lyuk tehát az elszabadult vegyértékelektron helye. A félvezetők működése a vegyértékelektronok helycseréivel is magyarázható lenne, azonban a lyukvezetéssel a feladat lényegesen egyszerűbbé válik.

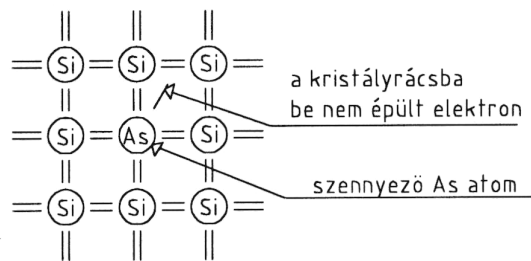
A félvezetőben a hőmozgás miatt leszakadó vegyértékelektronok száma megegyezik az ugyanezen idő alatt rekombinálandó szabad elektronok számával, ezért a félvezetőben a szabad elektronok és lyukak száma adott hőmérsékleten állandó, a rendszer dinamikus egyensúlyban van.

A szennyezetlen félvezetőt szerkezeti (*intrinsic*) vagy „i”-típusú félvezetőnek nevezik.

Az n-típusú félvezető

A félvezető elektronikus eszközök előállításához olyan félvezetőkre van szükség, ahol főként vagy az elektronok, vagy a lyukak vezetik az áramot. Ezért e célra a tiszta (szennyezésmentes) félvezetők önmaguk nem alkalmasak, a megfelelő félvezető anyagot *szennyezéssel* hozzák létre.

Csak elektronok útján vezető félvezető valamely 5 vegyértékű anyaggal (pl. arzén, antimon) való szennyezéssel állítható elő. Az arzénatom a kristályrácsban a szilícium atom helyére kerül. Öt vegyértékelektronja közül négy a kristályszerkezetbe beépül, az ötödik pedig az atommal csak laza kötésben marad (5. ábra). Szobahőmérsékleten ez az elektron már elszakad az atommagtól, és a kristályrácsban rendezetlen hőmozgást végez. Az arzénatom az ötödik elektron elszakadásakor pozitív töltésűvé válik, de az egész kristály - az elszakadt elektron jelenléte miatt - továbbra is villamosan semleges lesz.



5. ábra
„n” típusú Si előállítás As donorszennyezéssel

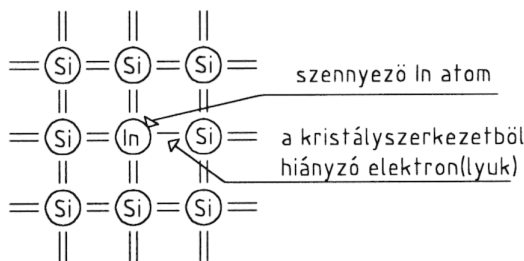
Tekintettel arra, hogy az 5 vegyértékű szennyező anyag egy szabad elektront „ad” a kristálynak, *donor* (adó) anyagnak nevezik.

A donor szennyezéssel létrejött félvezetőben a szabad elektronok vannak túlsúlyban, melyek töltése negatív. Ezért a létrejött szennyezett félvezetőt negatív, azaz „n” típusú félvezetőnek nevezik.

Az „n” típusú félvezetőben a szabad elektronok száma a szennyezés (adalekolás) megfelelő beállításával szabályozható, jellemzően 10^7 félvezető atomra jut egy donoratom.

A p-típusú félvezető

Csak lyukak útján vezető félvezetőt 3 vegyértékű adalekanyaggal (pl. indium, gallium) történő szennyezéssel lehet előállítani. Az indiumatom beépül a félvezető pl. Si kristályszerkezetbe, de - mivel csak három vegyértékelektronja van - a kristályszerkezetben egy vegyértékelektron hiányzik, azaz egy „lyuk” van jelen. (6. ábra).



6. ábra
„p” típusú Si előállítás In akceptorszennyezéssel

Előfordulhat, hogy a kristályszerkezet egy más pontjáról a hőmozgás hatására elszabaduló vegyértékelektron a lyukba „ugrik be”, rekombinálódik, és ezzel a pozitív töltésű lyuk átkerült arra a helyre, ahonnan az elszabadult vegyértékelektron távozott. A létrejött lyuk tehát ugyanúgy viselkedik (ugyanolyan töltéshordozó), mint amilyen a tiszta félvezető anyagban a hőenergia hatására létrejött lyuk.

Mivel az indiumatom átvesz egy elektront a Si atómtól, *akceptor* (elfogadó, felvevő) anyagnak nevezik. Az akceptor szennyezéssel létrehozott félvezetőben a töltéshordozó a pozitív töltésű lyuk, ezért „p” típusú félvezetőnek nevezik.

Többségi és kisebbségi töltéshordozók

A tiszta (intrinsic) félvezetőben energiaközlés hatására jönnek létre a szabad elektron - lyuk párok. Számukat a hőmérséklet határozza meg; az elektronok és lyukak száma megegyezik egymással.

Az „n” típusú félvezetőben a szennyezés következtében - a hőmérséklettől függetlenül - nagy számmal vannak jelen a szabad elektronok, míg a „p” típusú félvezetőben a szabad lyukak.

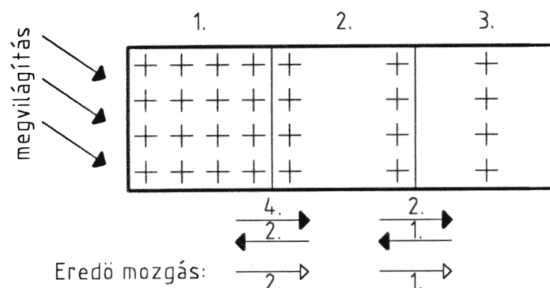
Ugyanakkor azonban a hő hatására az „n” és a „p” típusú félvezetőben egyaránt létrejönnek szabad elektron-lyuk párok is. Számuk töredéke a szennyezéssel létrehozott töltéshordozóknak, pl. minden tízezer szennyezéssel létrehozott töltéshordozóra jut egy, a hő hatására létrejött töltéshordozó pár. Ez azt jelenti, hogy az „n” típusú félvezetőben nem csak szabad elektronok, hanem (elenyésző számban) lyukak is jelen vannak, illetve a „p” típusú félvezetőben a lyukakon kívül (ugyancsak elenyésző számú) szabad elektron is található. Ezért megkülönböztetésül az adott félvezető anyagban szennyezéssel létrehozott töltéshordozókat *többségi*, míg a másik fajta töltéshordozót *kisebbségi* töltéshordozónak nevezik.

Tehát a „p” típusú félvezetőben a lyuk a többségi, az elektron a kisebbségi, míg az „n” típusú félvezetőben az elektron a többségi és a lyuk a kisebbségi töltéshordozó.

Diffúzió

Ha a félvezető kristály szomszédos tartományaiban a töltéshordozók koncentrációja különböző, *diffúzió* útján kiegyenlítődésként jön létre a töltéshordozók között.

A 7. ábrán látható kristálynak a bal oldalát megvilágítva, abban az energiaközlés hatására sok szabad töltéshordozó jön létre, a megvilágított helytől távolodva a töltéshordozók koncentrációja csökken. Az ábrán a kristályt három zónára osztottuk, legyen a vizsgálat kezdetekor a bal oldali, 1-el jelölt zónában 16, a 2. zónában 8, a 3. zónában 4 szabad töltéshordozó.



7. ábra

A töltéshordozók koncentrációjának kiegyenlítődésként diffúzióval

Tegyük fel, hogy valamekkora idő alatt a rendszertelen hőmozgással ide-oda cikázó szabad töltéshordozók fele hagyja el a kristály adott zónáját. Mivel a mozgás rendszertelen, ugyanannyi töltéshordozó távozik a zóna bal, mint a jobb oldalán. Ez azt jelenti, hogy az adott idő alatt

- az 1. zónát 8 töltéshordozó hagyja el, ebből 4 balra, 4 jobbra,
- a 2. zónát 4 töltéshordozó hagyja el, ebből 2 balra, 2 jobbra,
- a 3. zónát 2 töltéshordozó hagyja el, ebből 1 balra, 1 jobbra.

Mivel az 1. zónából jobbra, a 2. zónába 4, míg a 2. zónából az 1. zónába balra 2 töltéshordozó mozgott, megállapítható, hogy eredőként az 1. zónából 2 töltéshordozó került a 2. zónába.

A 2. zónából jobbra, a 3. zónába 2 töltéshordozó került, míg a 3. zónából balra, a 2. zónába csak 1, azaz eredőként a 2. zónából 1 töltéshordozó jutott a 3. zónába.

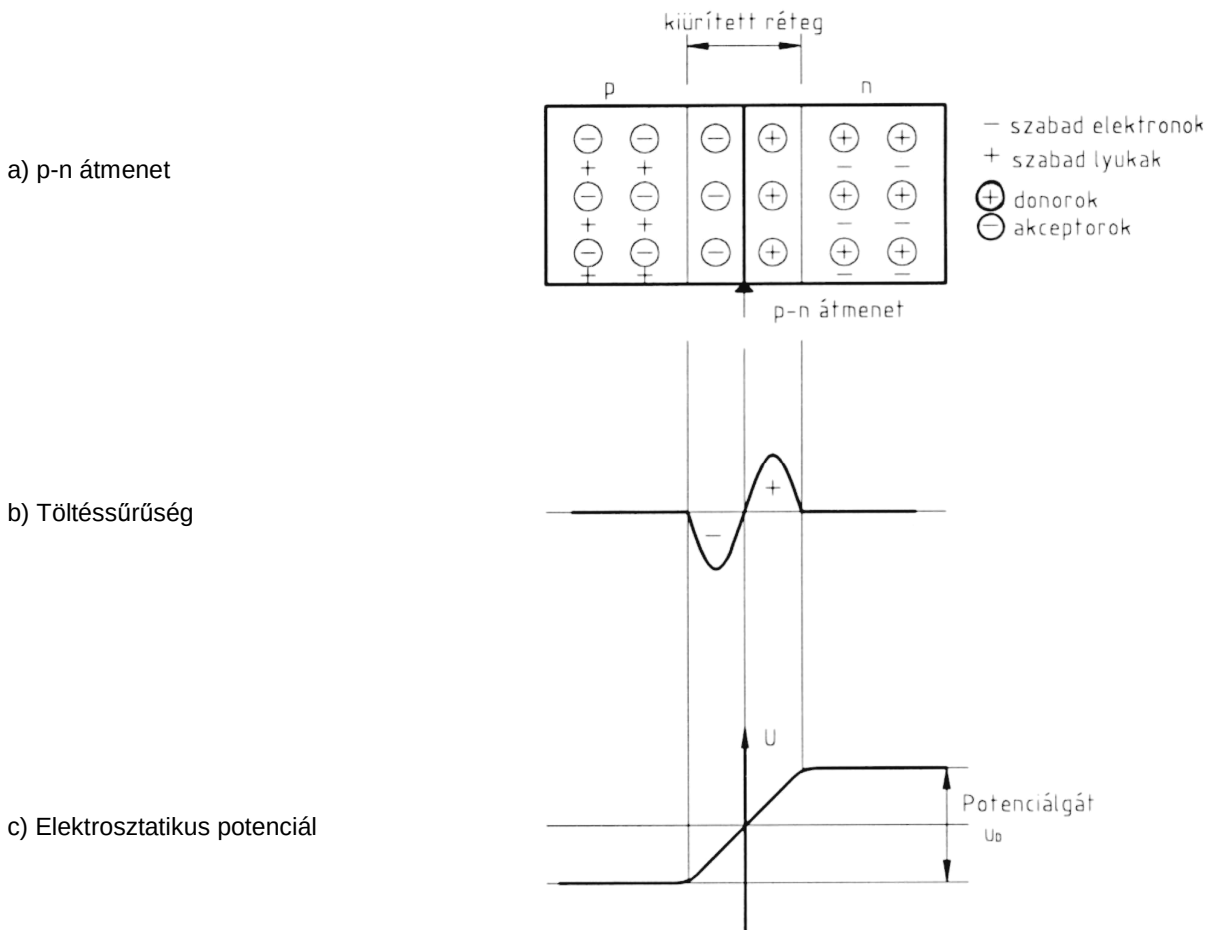
Megállapítható tehát, hogy - csupán a spontán, rendszertelen hőmozgás következtében - a nagyobb koncentrációjú helyről töltéshordozók áramlanak a kisebb koncentrációjú helyre. Ez a diffúzió. A diffúzió olyan értelmű, hogy a töltéshordozók koncentrációját az egész kristályban kiegyenlítsse.

3.6.2. Félvezető dióda

A p-n átmenet

A félvezető diódát egy *monokristály* lapkából alakítják ki úgy, hogy a lapka egyik felét p, míg a másik felét n típusú adalékanyaggal szennyezik. A p-n átmenet tehát csak a vezetési típus megváltozását jelenti, de a kristályszerkezet továbbra is szabályos marad.

A 8. ábra mutatja a létrejött p-n átmenetet. A bal oldali, p típusú tartományban a lyukak, a jobb oldali, n típusú tartományban az elektronok a többségi töltéshordozók, amelyek az adott tartományban nagy koncentrációban vannak jelen.



8. ábra

A p-n átmenet kialakulása pillanatában a szabad töltéshordozók diffúziós áramlása kezdődik meg. Ennek kapcsán a p rétegből lyukak kerülnek át (a határrétegen keresztül) az n rétegbe, ahol a jelenlévő elektronokkal rekombinálódnak. Ugyanígy az n rétegből a diffúzió folytán elektronok kerülnek a határréteg másik oldalára, a p rétegbe, ahol az ott nagy számban lévő többségi töltéshordozó lyukakkal rekombinálódnak. Mindennek következtében:

a) Az n rétegben, a határréteg környékén nem lesznek szabad elektronok, mert egyrészt a p rétegbe távoztak, másrészt rekombinálódtak a p rétegből érkezett lyukakkal,

b) a p rétegben, a határréteg környékén nem lesznek szabad lyukak, mert egyrészt az n rétegbe távoztak, másrészt rekombinálódtak az n rétegből érkezett elektronokkal,

c) az n réteg, amely eddig elektromosan semleges volt, most pozitív töltésűvé vált, mert a határrétegen keresztül negatív töltésű elektronok hagyták el, ugyanakkor pozitív töltésű lyukak érkeztek,

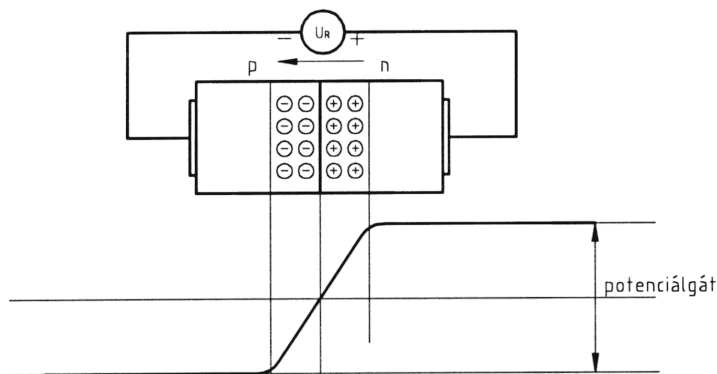
d) a p réteg, amely önmaga szintén elektromosan semleges volt, most negatív töltésűvé vált, mert pozitív töltésű lyukak hagyták el, és elektronok érkeztek.

a) és b) következtében a határréteg környezetében egyik oldalon sem lesznek szabad töltéshordozók, ezért ezt a réteget „kiürített rétegnek” nevezik.

c) és d) következtében a határréteg bal oldalán, a p rétegben negatív töltések gyűlnek össze, amelyek elektrosztatikus taszításukkal akadályozzák az n rétegből a további elektronok átjutását, ezért az egyensúly beállása után további elektronok nem érkezik. Az n rétegben, a határréteg jobb oldalán viszont a pozitív töltések gyűlnek össze, amelyek elektrosztatikusan taszítják a p rétegből még átdiffundálni szándékozó lyukakat, itt is beáll egy egyensúly, ami után további lyukak nem érkezik. A határréteg két oldalán kialakuló *potenciálgát* tehát megakadályozza, hogy a határrétegen további többségi töltéshordozók jussanak át. (Meg kell azonban jegyezni, hogy ugyanaz a potenciálgát, amely a további többségi töltéshordozóknak a határrétegen való átjutását megakadályozza, a kisebbségi töltéshordozók átjutását segíti!) A potenciálgát (diffúziós potenciál) nagysága germánium esetében 0,1-0,2V, szilícium esetében 0,5-0,7V.

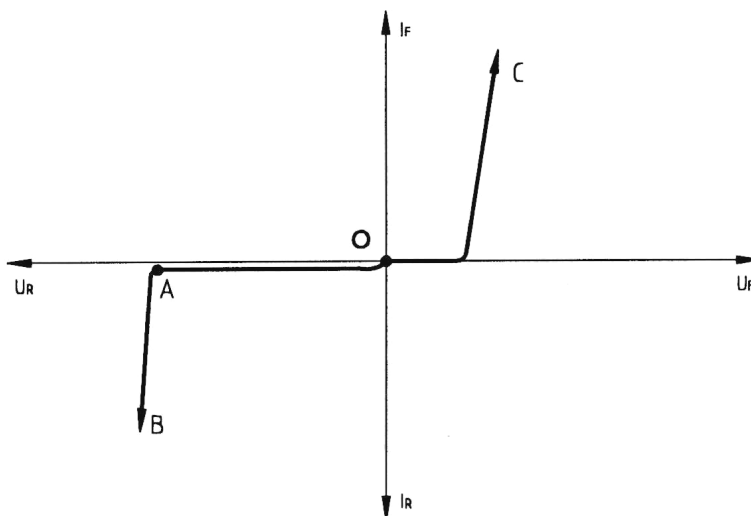
A dióda záróirányú működése

Ha a 8. ábra szerinti p-n átmenetet *rezisztív érintkezőkkel* (olyan érintkezőkkel, amelyeknek a félvezetőhöz csatlakozásakor nem alakul ki újabb p-n átmenet) látjuk el, és a p kivezetéshez külső feszültségforrásból negatív, az n kivezetéshez pozitív feszültséget vezetünk (9. ábra), a p kivezetésen keresztül a külső feszültségforrásból további elektronok érkezik a p rétegbe, míg az n réteget elektronok hagyják el a külső feszültségforrás felé. Ez által a két réteg közötti potenciálgát tovább növekszik, ami lehetetlenné teszi a többségi töltéshordozóknak a határrétegen való átjutását.



9. ábra
Záró irányban előfeszített dióda

A dióda karakterisztikáját a 10. ábra mutatja. A záró irányú feszültséget U_R -el, a záró irányú áramot I_R -el jelöljük.



10. ábra
A dióda karakterisztikája

A határrétegen csak a kisebbségi töltéshordozók juthatnak át, melyek elenyésző mennyiségben vannak csak jelen a többségi töltéshordozókhoz képest. Ezért a záró irányban előfeszített diódán csak a kisebbségi töltéshordozók általánosan elhanyagolható árama, az ún. *záróáram* folyik át, amely - egy bizonyos értékig - gyakorlatilag független a diódára kapcsolt zárófeszültségtől (10. ábra O-A szakasz).

Lavina- és Zener-hatás

Abban az esetben, ha a diódára nagy zárófeszültséget kapcsolnak, a vékony kiürített rétegben olyan nagy télerősség jöhet létre ($8 \cdot 10^4$ V/cm), amelynek hatására a határrétegen átjutó kisebbségi töltéshordozók olyan mértékben felgyorsulnak, hogy ütközéseikkel vegyértékelektronokat tudnak leszakítani a kristályrácsban lévő atomokról. A leszakadt elektronok ugyanilyen mértékben felgyorsulva, további elektronokat sodornak el, és így lavinaszerűen megnő a szabad elektronok (és lyukak) száma, és ezzel a határrétegen átfolyó áram. A kialakuló áramot csak a félvezető soros ellenállása korlátozza (10. ábra A-B szakasz, ún. *letörési tartomány*.)

Ha a határréteg nagyon vékony, és a zárófeszültség nagy, *belső téremisszió* folytán az átmenet mentén uralkodó nagy télerősség szakít le elektronokat a rácsszerkezetből és hozhat létre ezáltal újabb lyukakat is. Ez a Zener - hatás. A folyamat a félvezető által meghatározott feszültségen (Zener - feszültség) zajlik le, és a kialakuló áramot itt is csak a félvezető soros ellenállása korlátozza.

A dióda zárókarakterisztikán (10. ábra) ugyancsak az A-B szakasz ábrázolja ezt a tartományt.

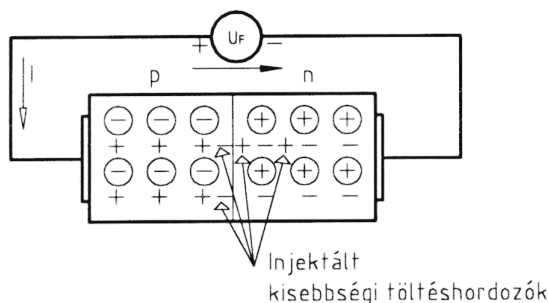
Feszültségstabilizátorokban való alkalmazás céljából, megfelelő adalékolás és geometria alkalmazásával különféle feszültségekre készítenek a fenti elven működő diódákat. Gyakorlatilag szilíciumban 5V letörési feszültség alatt a Zener-hatás, 8V letörési feszültség felett a lavinahatás okozza a letörést. 5V és 8V letörési feszültség között mindkét effektus egyidejűleg működik, ezért ebben a feszültségtartományban lehet a legjobb tulajdonságú diódát készíteni. Amikor rétegdiódákon először figyelték meg a letörési tartományt, azt a Zener - hatásnak tulajdonították, és az ilyen diódákat Zener-diódának nevezték el. Később kiderült, hogy sokszor a lavinamechanizmus hozza létre a letörést, de az elnevezésen már nem változtattak, és ezért e diódákat a letörés jellegétől függetlenül Zener-diódának nevezik.

A dióda nyitóirányú működése

Abban az esetben, ha a dióda p rétegére pozitív, n rétegére negatív feszültséget (nyitófeszültséget) kapcsolunk (11. ábra), az n rétegbe a feszültségforrásból elektronok érkeznek, a p rétegből elektronok távoznak, minek következtében a potenciálgát csökken. Ha a nyitófeszültség eléri a diffúziós potenciált, a potenciálgát megszűnik, és nincs akadálya annak, hogy a többségi töltéshordozók átlépjék a határréteget. (Tekintettel arra, hogy a többségi töltéshordozók a határréteg átlépése után, a másik tartományban kisebbségi töltéshordozókká válnak, ezt a folyamatot a *kisebbségi töltéshordozók injektálásának* nevezik.) Így a diódán áram folyhat, melynek nagyságát a nyitófeszültség befolyásolja:

$$I = I_0 \cdot \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

ahol I_0 állandó,
 U a diódára kapcsolt nyitófeszültség
 U_T az abszolút hőmérséklettől függő állandó, szobahőmérsékleten 26mV .



11. ábra
Nyitóirányban előfeszített dióda

A dióda nyitóirányú karakterisztikáját a 10. ábra O-C szakasza mutatja. A nyitóirányú feszültséget U_F -el, a nyitóáramot I_F -el jelöljük.

Megjegyzés: A 10. ábra áram tengelyének léptéke nyitóirányban és záró irányban nem egyforma. A záróáram csak μA nagyságrendű, ezért I_R tengelyen mikroamperek, míg a nyitóáram akár A nagyságrendű is lehet, ezért I_F tengelyen milliamperek vagy amperek szoktak felmérve lenni.

A kisteljesítményű diódákon kb. 0,8V nyitófeszültség felett már olyan nagy áram folyik, amely a meghaladja a diódára megengedett maximális áramot (illetve a diódán eső feszültség és az áram szorzata meghaladja a diódára engedélyezett disszipációs teljesítményt), ezért a dióda túlmelegszik, tönkremegy.

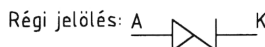
A dióda elektródái és jelölésük

A dióda p típusú tartományához csatlakozó elektródáját *anódnak* (A), az n típusú tartományhoz csatlakozó elektródát *katódnak* (K) nevezik.

A kapcsolási rajzon a diódát a 12. ábra szerinti rajzzel jelölik. A Zener-dióda rajzjele a 13. ábrán látható.



12. ábra
Dióda rajzjele



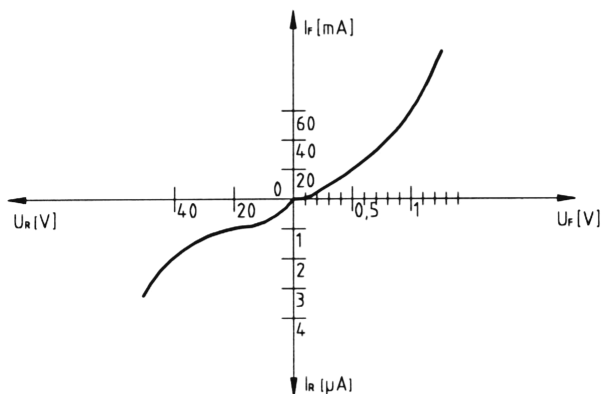
13. ábra
Zener-dióda rajzjele

A germániumdióda karakterisztikája

A p-n átmenetnél kialakuló potenciálgát (diffúziós potenciál) nagyságát a félvezető anyaga határozza meg. Germánium esetén a diffúziós potenciál 0,1-0,2V. Nyitó irányban jelentős áram akkor indul meg a diódán, amikor a diódára kapcsolt nyitófeszültség ezt az értéket eléri. Ez után a nyitófeszültség akár kb. 1,5V-ig növelhető, miközben a diódán átfolyó áram növekszik. A hőmérséklet növekedésével a nyitóáram növekszik.

Záró irányban - a letörésig - a kisebbségi töltéshordozóknak a határretegen való áthaladásából származó záróáram folyik. A kisebbségi töltéshordozók számával együtt a záróáram is a hőmérséklet függvénye.

Egy germániumdióda jellegzetes karakterisztikája az 14. ábrán látható.



14. ábra
Ge dióda karakterisztikája

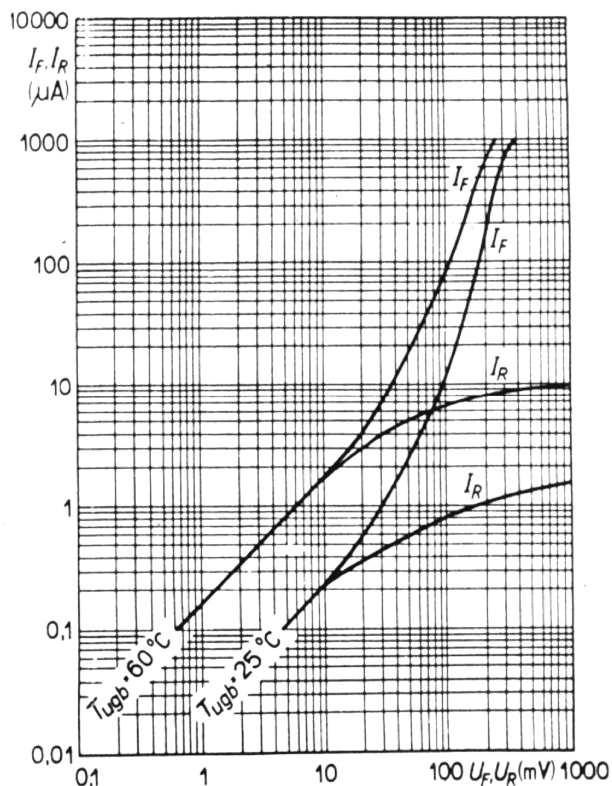
Tekintettel arra, hogy mind a nyitóáram, mind a záróáram a hőmérséklet függvénye, a katalógusokban a dióda karakterisztikáit a hőmérséklettel is szokták paraméterezni. A 15. ábrán az OA1160 germániumdióda ilyen karakterisztikáit láthatjuk. (A görbék azért nem az 14. ábra szerinti alakúak, mert itt

mind a feszültség-, mind az áramtengely logaritmikus léptékű. A nyitó- és záróáram is ugyanabba a koordináta-rendszerbe van beábrázolva.)

Figyeljük meg, hogy:

- ameddig a nyitófeszültség meg nem közelíti a diffúziós potenciált, a nyitó- és záróáram azonos hőmérsékleten ugyanakkora (I_R és I_F még nem válik szét), mert ekkor mindkét áram csak a kisebbségi töltéshordozók mozgásából adódik,

- azonos nyitó (vagy záró) feszültség esetén nagyobb hőmérsékleten nagyobb a nyitó (vagy záró) áram is. Pl. ha $U_F = 0,2V$, I_F 25 °C-n 200 μA , 60 °C-n pedig 700 μA .



15. ábra

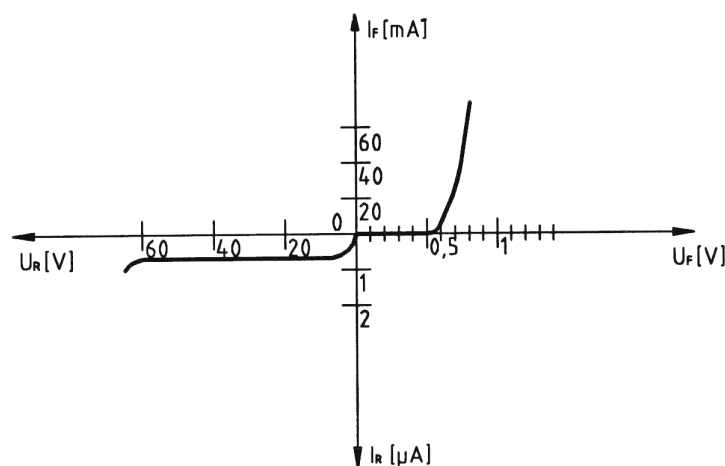
OA 1160 germániumdióda karakterisztikáinak hőfokfüggése

A szilíciumdióda karakterisztikája

A szilícium diffúziós potenciálja kb. 0,5V, ezért a dióda akkor nyit ki, amikor a nyitófeszültség ezt az értéket eléri. A nyitófeszültséget kb. 1 V-ig lehet növelni a nyitóáram jelentős növekedése mellett. A hőmérséklet növekedésével - azonos nyitófeszültségnél - a nyitóáram is nő.

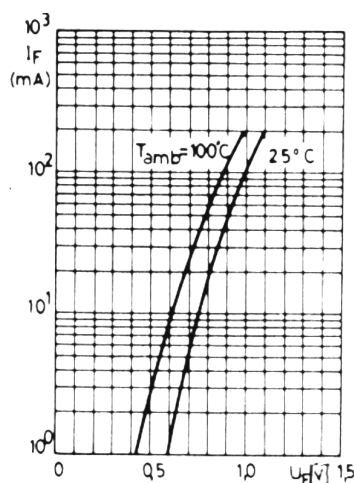
A szilíciumdióda záróárama kisebb, mint a germániumdiódáé, de szintén függ a hőmérséklettől.

Egy szilíciumdióda jellegzetes karakterisztikája látható a 16. ábrán.



16. ábra
Si dióda karakterisztikája

A 17. ábra a katalógusban szokásos módon adja meg az 1N4151 szilíciumdióda nyitóáramának hőmérsékletfüggését. Az ábrából leolvasható, hogy pl. 0,7V nyitófeszültségnél 25 °C környezeti hőmérsékleten 5 mA, míg 100 °C környezeti hőmérsékleten 25 mA a nyitóáram.



17. ábra
Az 1N4151 dióda nyitóáramának hőfokfüggése

Letörés záró irányban

Ha a záró irányú feszültség eléri a letörési feszültséget (ld. *laviza-* és *Zener hatás*), a dióda záróárama megnő, a dióda vezetni kezd.

A diódán eső feszültség és a rajta átfolyó áram szorzata megadja diódán disszipálódó teljesítményt, amely a diódán hővé alakul. A katalógusban minden diódához megadják azt a (mechanikai kialakításától, hűtési módjától függő) teljesítményt, amelyet a dióda károsodás nélkül képes eldisszipálni.

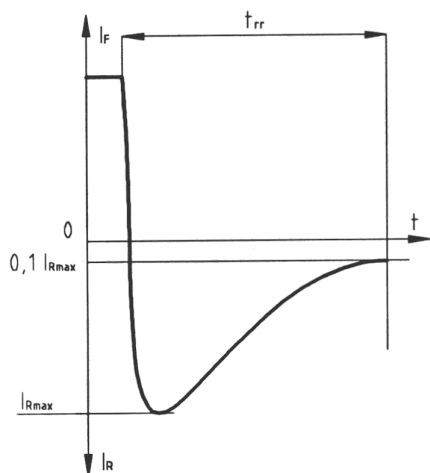
Az általános felhasználású dióda gyártásánál arra törekednek, hogy az minél nagyobb zárófeszültségnél is működhessen, tehát letörési feszültsége nagy legyen. Nagy letörési feszültségnél pedig igen kis áram is elegendő ahhoz, hogy a dióda által disszipált teljesítmény meghaladja a megengedett határértéket, ekkor pedig a dióda túlhevül és tönkremegy. (Mindez a másodperc törtrésze alatt mehet végbe.) Az ilyen dióda letörése tehát általában azonnali tönkremenetelét jelenti.

A kifejezetten feszültségstabilizálásra szánt (Zener-) diódákat eleve kisebb letörési feszültségre méretezik, és a nagyobb teljesítmény disszipálására szánt példányokat megfelelő hűtéssel látják el. Ezért ezeknek a diódáknak normális üzemmódja a karakterisztikájuk letörési szakaszában való üzemeltetés.

A dióda impulzusüzemű és nagyfrekvenciás viselkedése

A nyitóirányban előfeszített rétegdíoda p rétegeből lyukak áramlanak az n rétegbe, ahol kisebbségi töltéshordozókká válnak. Hasonló módon, az n rétegből érkező elektronok a p rétegben számítanak kisebbségi töltéshordozónak. Mindkét rétegben bizonyos mennyiségű *kisebbségi töltéshordozó halmozódik fel*.

Ha a diódára kapcsolt feszültség hirtelen záró irányúra változik, az azonnal létrejövő potenciálgát elektrosztatikus hatásával gátolja a többségi töltéshordozók átlépését a határrétegen, ugyanakkor a mindkét rétegben már felhalmozódott kisebbségi töltéshordozók átjutását nem akadályozza meg, sőt segíti. Ezért a még nem rekombinálódott kisebbségi töltéshordozók mindkét rétegben irányt változtatnak, átlépik a határréteget, és rövid ideig (ameddig valamennyi felhalmozódott töltéshordozó ki nem ürül) exponenciálisan csökkenő záró irányú áram folyik a diódán keresztül. (18. ábra). Az *újraéledési idő* (t_{rr}) az az idő, amely alatt ez a záró irányú áram a csúcstértékének a tizedére esik vissza.



18. ábra

A dióda áramának alakulása, ha a nyitófeszültség hirtelen záró irányúvá válik

Mindez azt jelenti, hogy az átkapcsolás után rövid (ps...µs nagyságrendű) ideig a dióda záró irányban is vezet. Ez a jelenség a dióda impulzusüzemű illetve nagyfrekvenciás felhasználását korlátozza, ha a jel periódusideje összemérhető az újraéledési idővel.

Nagyfrekvenciás alkalmazásra ezért úgy alakítják ki a diódát, hogy a kisebbségi töltéshordozók igen rövid idő alatt rekombinálódjanak, és így felhalmozódásuk minimális legyen.

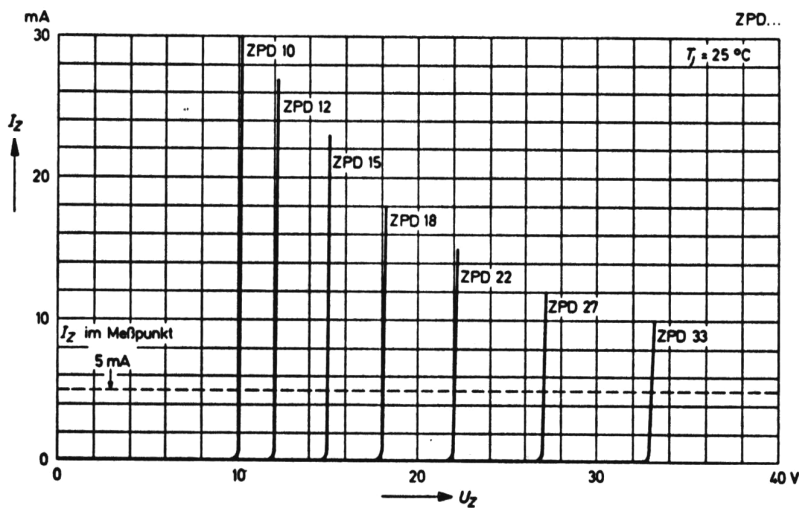
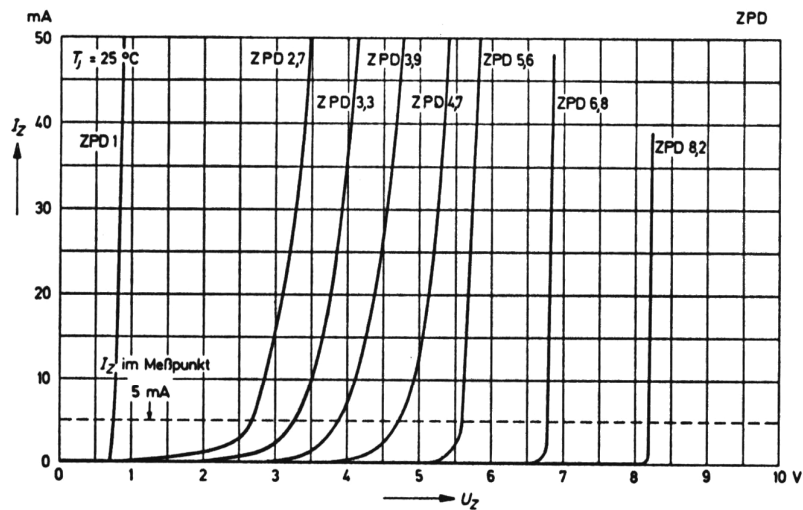
Zener dióda

A Zener-dióda Zener- vagy lavinaeffektuson alapuló működésű, feszültségstabilizálás céljára gyártott dióda.

A Zener-diódákat különféle disszipációs teljesítménnyel és feszültségtűréssel, általában az E12 sor szerinti névleges letörési feszültséggel gyártják. A 19. ábrán a kis teljesítményigény (500mW) esetén általánosan használt, ZPD sorozatú szilícium Zener-diódák zárókarakterisztikáit látjuk.

Feszültségstabilizálás céljára az az előnyös, ha a záróáram változásakor a diódán eső záró- (letörési) feszültség minél kisebb mértékben változik. Figyeljük meg, hogy a sorozat diódáin ez 5,6...8,2 V között teljesül a leginkább (itt a legmeredekebbek a karakterisztikák), mivel ebben a feszültségtartományban egyszerre érvényesül a Zener- és a lavinaeffektus.

A szaggatott vonallal jelölt 5 mA munkaponti árammal kell mérni a névleges letörési feszültséget.



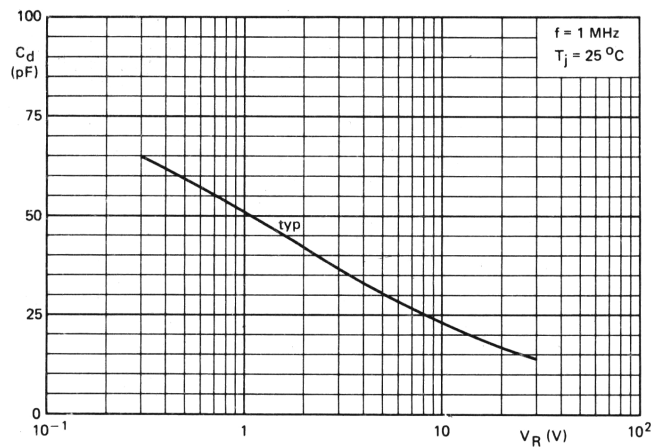
19. ábra
ZPD sorozat karakterisztikái

Varicap (kapacitás-) dióda

A záró irányban előfeszített diódában a kiürített rétegben nincsenek szabad töltéshordozók. Minél nagyobb a zárófeszültség, annál szélesebb lesz a kiürített réteg, amely elválasztja egymástól a katódban és az anódban felhalmozódott szabad töltéshordozókat.

A lezárt dióda tehát úgy viselkedik, mint egy kondenzátor, ahol a szabad töltéshordozókat tartalmazó „fegyverzetek” távolsága a kiürített réteg szélességével, azaz a záró irányban bekapcsolt feszültség nagyságával szabályozható. Minél nagyobb a zárófeszültség, annál távolabb kerülnek egymástól a „fegyverzetek”, így annál kisebb lesz a kapacitás.

A katód- és anód speciális adalékolásával különféle feszültség/kapacitás jelleggörbéjű *varicap* (kapacitás-) diódákat állítanak elő. (Nagyfrekvenciás alkalmazásokra kisebb, kisfrekvenciás célra nagyobb kapacitás tartományban működő varicap diódák szükségesek). A 20. ábrán a BB 204 varicap dióda zárófeszültség/kapacitás karakterisztikáját látjuk (a zárófeszültség logaritmusos léptékű).



20. ábra

A BB204 varicap dióda zárófeszültség/kapacitás karakterisztikája

A varicap dióda rajzjelét a 21. ábra mutatja.



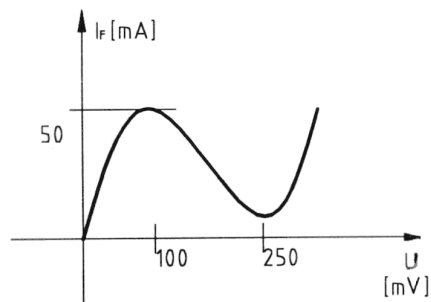
21. ábra

Varicap dióda rajzjele

Alagút (tunnel-, Esaki-) dióda

Mind a p, mind az n réteget sok adalékanyaggal szennyezve, speciális karakterisztikájú dióda állítható elő. (A működés részletezésére terjedelmi okokból nem térhetünk ki.) A 22. ábra szerinti dióda karakteristika jellemzői:

- záró irányban azonnal letörik, és jelentős áram folyik (ezt a tartományt nem használják),
- nyitó irányban 50-100 mV feszültségig az áram növekszik, majd kb. 250 mV nyitófeszültségig növekvő feszültséghez csökkenő áram tartozik, 250 mV nyitófeszültség felett az áram ismét növekszik. A 100 mV...250 mV közötti szakaszban a dióda differenciális ellenállása negatív. Ezt a tulajdonságát pl. LC oszcillátorokban, a rezgőköri veszteségek kompenzálására használják fel.



22. ábra

Alagútdiód karakterisztikája

Az alagútdiód rajzjele a 23. ábrán látható.



23. ábra

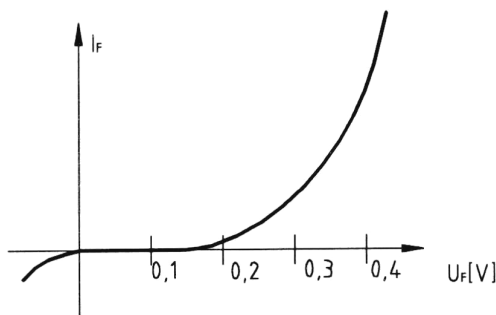
Alagútdiód rajzjele

Schottky-dióda

A Schottky-dióda fém és félvezető között létesített átmenet. Az n típusú félvezető és a fém átmeneténél potenciálgát keletkezik, melynek magassága a félvezető felől nézve a rákapcsolt külső feszültséggel változtatható. A nyitó irányú (a félvezető a negatív, a fémréteg a pozitív) feszültség hatására a potenciálgát lecsökken, és a félvezetőből többségi töltéshordozókból álló áram indul meg a fém felé.

Tekintettel arra, hogy a dióda működésében a kisebbségi töltéshordozók nem játszanak szerepet, nem jön létre a kisebbségi töltéshordozók felhalmozódása (ld. 1.4.), ezért a Schottky-dióda igen gyors kapcsolóeszköz. A kapcsolási sebességet csak a katód és az anód közti kapacitás korlátozza.

A Schottky-dióda karakterisztikáját a 24. ábra mutatja. Nyitófeszültsége 0,2-0,4V, a záróáram kicsi.

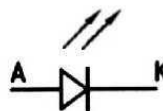
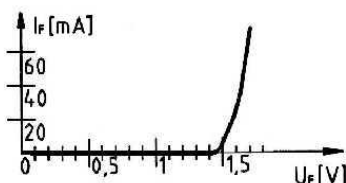


24. ábra
Schottky-dióda karakterisztikája

Fényemittáló dióda (LED)

Egy nyitó irányban előfeszített p-n átmenetben az n rétegből szabad elektronok haladnak a p rétegbe, ahol rekombinálódnak az ott többségi töltéshordozó lyukakkal. Hasonló módon a p rétegből lyukak haladnak át a határrétegen keresztül az n rétegbe, ahol az ott többségi töltéshordozó elektronokkal rekombinálódnak. Bizonyos félvezető anyagokban (ezek jellegzetesen 3 és 5 vegyértékű anyagok, pl. galliumarzenid) ez a rekombináció közvetlen fénykibocsátással jár. A keletkező fény színe az alapanyagtól, és a megfelelő arányban ötvözött adalékanyagoktól (pl. foszfor) függ. Jelenleg a vörös, zöld, sárga, narancs, kék színek különféle árnyalataiban, illetve fehér fényű fényemittáló diódákat (Light Emitting Diode=LED) gyártanak.

A LED-ek nyitóirányú karakterisztikája a szilíciumdiódához hasonló, azzal az eltéréssel, hogy a diffúziós potenciál nagyobb, pl. a vörös fényt kibocsátó (GaAsP) dióda esetén kb. 1,5V (25. ábra, az ábra jobb oldalán a fényemittáló dióda rajzjele látható), a más színt kibocsátó LED-ek diffúziós potenciálja még nagyobb (2-2,5V).



25. ábra
Vörös (GaAsP) LED nyitókarakterisztikája, és a LED áramköri rajzjele

Záróirányban a LED karakterisztikája a kristály erős szennyezése miatt már kevésbé hasonló a szilíciumdiódához, a letörési feszültség sokszor csak 3...5V.

A LED-eket különböző méretben, alakban (kerek, nyíl alakú, stb.), más-más munkaponti áramhoz (általában 10...50 mA) ill. hatásfokkal gyártják. A jobb hatásfokú LED ugyanakkora munkaponti áram esetén nagyobb intenzitású fényt szolgáltat.

Szokás vörös és zöld fényű LED-et egy (színtelen) műanyag tokban gyártani. Az egyik kivezetés (pl. a két katód) közös, ezt, és a diódák anódját vezetik ki. Így ugyanaz a LED vörös, zöld, ill. mindkét fény bekapcsolásakor sárga színt bocsát ki.

A diódák kivitele és jelölése

A kisteljesítményű diódák általában miniatűr (hengeres) üvegházaz tokozásúak. A *katód*ot az üveg házon, a kivezetés melletti fekete (vagy más színű) karika jelzi. A dióda típusát számmal és betűkkel (néha több sorban egymás alá) szokták a házra írni, de előfordul színsávok jelölés is.

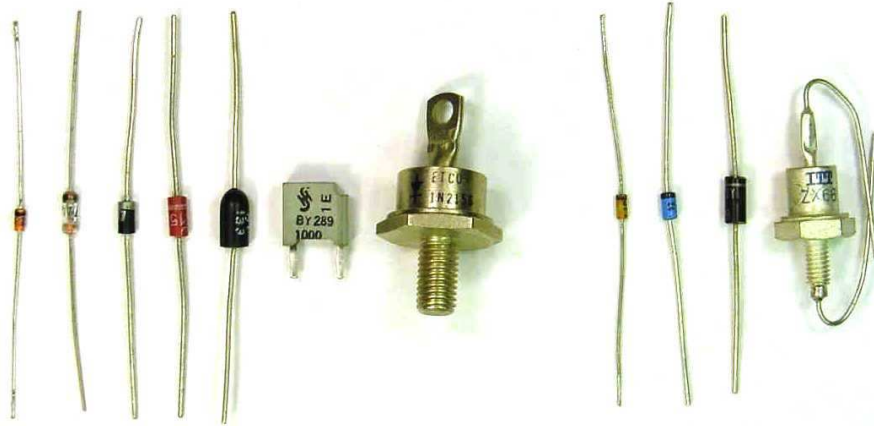
A diódák tokja sokszor szintelen (miniatűr dióda ekkor ránézésre rózsaszín jellegű).

Közepes teljesítmény esetén a tok szintén hengeres, műanyagból készül. A katódot a szintén a tokon, a megfelelő kivezetés mellett körbefutó karika jelzi.

A nagyobb teljesítményre méretezett diódákat fém házban hozzák forgalomba, amely alkalmas hűtőfelületre való felszerelésre (a fém házzal elektromosan összekötött elektróda - általában a katód - kivezetése körül csavarmentet van kialakítva, vagy a kivezetés maga csavarmentet). A fém házon megjelölik a dióda kivezetéseit.

Előfordulnak speciális tokozású (pl. hasáb alakú) diódák is, ha ezek kivezetései nincsenek a tokon egyértelműen megjelölve, a gyártó katalógus adatlapján kell tájékozódniuk.

A 26. ábra különféle teljesítményű és tokozású diódákat mutat.



26. ábra

Üveg- műanyag és fémtokozású diódák és Zener-diódák

Az ábra jobb oldalán látható kis- és közepes teljesítményű Zener-diódák szintén üveg ill. műanyag tokozásúak. Az üveg tokot régebben sárgára festették, ami megkönnyítette felismerésüket. Sajnos újabban elterjedt, hogy a Zener-diódák házáat sem színezik (vagy más színűek), így csak a felirat alapján állapítható meg, milyen diódáról van szó.

A nagyobb teljesítményű Zener-diódák hűtőfelületre szerelhető fém tokozással készülnek (ld. a jobb szélső diódát, a katódkivezetés a csavarmentes fém házzal van összekötve).

A Zener-dióda névleges feszültségének jelzésénél a tizedes pont helyett V betűt alkalmaznak:

$$8V2 = 8,2V$$

A különféle gyártmányú diódák típusjele igen sokféle lehet, a névleges feszültségre utaló jelzést sokszor több karakter előzi meg, ill. követi. Ha a dióda feliratában a

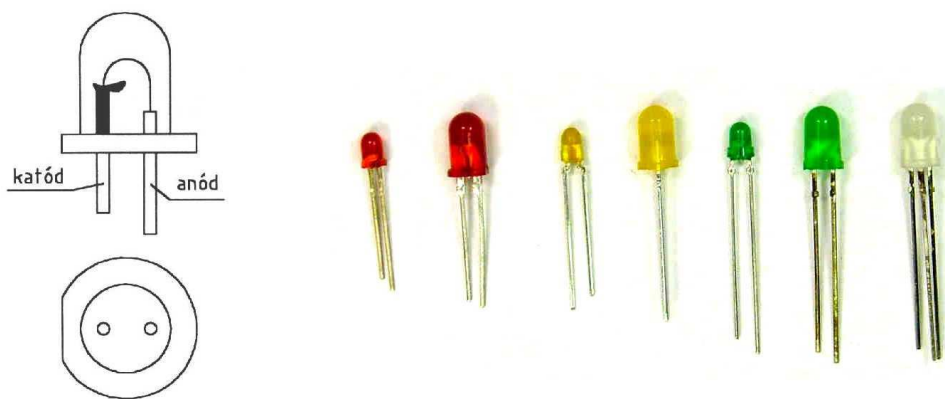
(szám) V (szám)

kombináció előfordul, akkor az adott névleges feszültségre készített Zener-diódáról van szó.

LED-ek jelölése

A LED (fényemittáló dióda) katódját a műanyag búra peremének letörésével szokták jelölni (27. ábrán bal oldalt).

Gyári új állapotban az anód kivezetés hosszabb, a katód rövidebb szokott lenni.



27. ábra
LED és bekötése

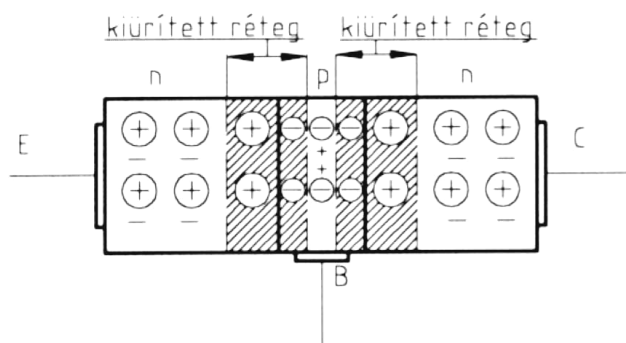
A hagyományos kialakítású LED *katódja* az áttetsző műanyag burán belül láthatóan egy „tálcát” tart, amelybe az anódtól egy vékonyabb vezeték érkezik be. (Speciális, nagy fényerejű LED-ek esetében előfordul, hogy az anód tartja a „tálcát”).

A fenti három ismerv alapján könnyen megállapítható, hogy melyik kivezetés a katód.

Az ábra jobb oldalán 3 ill. 5 mm. átmérőjű piros, sárga és zöld LED-ek, a jobb szélén 5 mm. átmérőjű közösen tokozott piros/zöld LED látható (a három kivezetés közül a középső a közös katód).

3.6.3. A bipoláris tranzisztor felépítése és működési elve

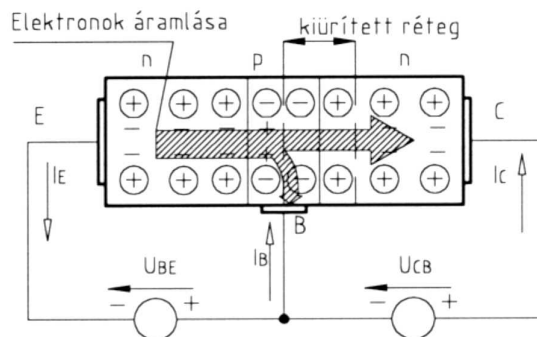
A bipoláris tranzisztor (ezt a tranzisztortípust nevezik egyszerűen tranzisztornak) egy kisméretű monokristály darabon létrehozott két azonos, és közte egy vékony, ezzel ellentétes vezetési típusú rétegből áll. Minden réteg rezisztív érintkezővel van ellátva. A két lehetséges felépítés: p-n-p illetve n-p-n tranzisztor. Az n-p-n tranzisztort feszültségmentes állapotban a 28. ábra mutatja. Mindkét p-n átmenetnél hasonló kiürített réteg jön létre, mint a dióda esetében.



28. ábra
n-p-n tranzisztor feszültségmentes állapotban

A tranzisztor elektródái az *emitter* (E), *bázis* (B), és a *kollektor* (C, magyar szövegben néha: K). Sokszor az emitter-bázis réteg között kialakult diódát „emitterdiódának”, a kollektor-bázis réteg közötti diódát „kollektordiódának” nevezik.

A tranzisztor működéséhez az szükséges, hogy *emitterdiódája nyitó irányban, kollektordiódája záró irányban* legyen előfeszítve (29. ábra).



29. ábra
n-p-n tranzisztor előfeszített állapotban

A bázisra az emitterhez képest nyitó irányú feszültséget kapcsolnak. Ennek hatására (a dióda nyitóirányú működésénél leírt módon) az emitter-bázis átmenetnél a kiürített réteg és a potenciálgát megszűnik, ezért nincsen akadálya annak, hogy a határreteken a többségi töltéshordozók áthaladjanak. Az n típusú emitterből a bázisrétegbe jutott elektronok (lévén a bázisréteg p típusú) ott *kisebbségi töltéshordozók*.

A kollektordióda záró irányban van előfeszítve. Ezért a bázis-kollektor határreternél kiürített réteg és potenciálgát alakul ki. A potenciálgát elektrosztatikus hatásánál fogva megakadályozza a többségi töltéshordozók átjutását, ugyanakkor azonban az ellentétes töltésű, kisebbségi töltéshordozóknak a határreteken való áthaladását segíti, azokat „átszippantja”.

Jelen esetben a bázisrétegben az emitter által injektált nagy számú kisebbségi töltéshordozó (elektron) van jelen. A bázisréteget olyan keskenyre (kisebb, mint $25\ \mu\text{m}$) készítik, hogy a bázis-kollektor határreteken kialakult potenciálgát a bázisba érkezett elektronoknak minél nagyobb részét (95-99,9 %-át) „szippantsa át” a kollektorba.

Így az emitterből érkező elektronok (emitteráram) döntő hányada a kollektoron távozik (kollektoráram), és csak a bázisban rekombinálódott kis része adja a bázisáramot.

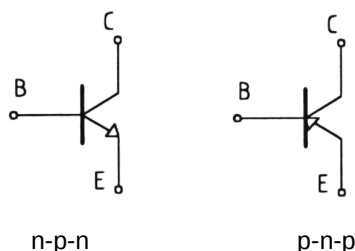
(Mindebből következik, hogy az emitteráram a kollektoráram és a bázisáram összege.)

A tranzisztor lényeges jellemzője az α -val jelölt *áramátviteli tényező*, amely a kollektoráram és az emitteráram hányadosa. Szokásos értéke 0,95...0,999.

Az áramátviteli tényező a tranzisztor kialakításától, és a gyártási technológiától is függő érték, amely a technológia apró eltérései miatt azonos tranzisztortípus nem egy technológiai eljárásban készült példányai között is jelentősen különbözik („szór”).

Az áram a nyitóirányban előfeszített, kis ellenállású emitter-bázis diódán folyik be a tranzisztorba, és (nagyjából ugyanez az áram) a záró irányban előfeszített, nagy ellenállású kollektor-bázis diódán távozik. Mivel a teljesítmény $P = I^2 R$, a kollektordióda nagyobb teljesítményt ad le, mint amennyit az emitterdióda felvesz, azaz a tranzisztor teljesítményt erősít. Ez a *tranzisztorhatás*. A teljesítménykülönbséget a kollektorfeszültséget szolgáltató energiaforrás fedezi.

Kapcsolási rajzon a tranzisztor jelölését a 30. ábra mutatja.



30. ábra
Tranzisztor rajzjele

A bipoláris tranzisztor áramviszonyai, áramerősítés

A 29. ábrából látható, hogy

$$I_E = I_B + I_C$$

Figyelembe véve, hogy a tranzisztor áramátviteli tényezője

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

kifejezhetjük a *kollektoráram és a bázisáram viszonyát*, melyet **áramerősítési tényezőnek** neveznek és β -val jelölnék:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_E - I_C} = \frac{\alpha I_E}{I_E - \alpha I_E} = \frac{\alpha I_E}{I_E(1 - \alpha)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Amint α , úgy β tényezőre is igaz, hogy (még azonos típusú tranzisztorok esetén is) a nem egy gyártási eljárásban készült példányok β értéke jelentősen különbözik egymástól.

A most definiált áramerősítési tényezővel kifejezhetjük az bázisáram és az emitteráram viszonyát is:

$$\frac{I_B}{I_E} = \frac{I_B}{I_B + I_C} = \frac{I_B}{I_B + \beta I_B} = \frac{1}{1 + \beta}$$

Ebből pedig

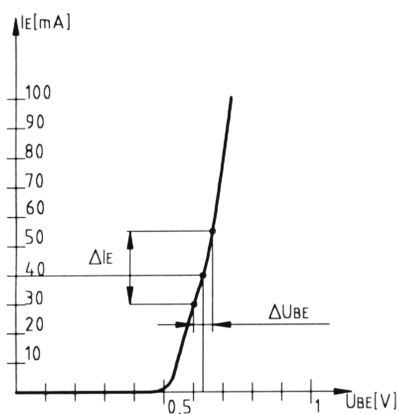
$$I_E = (1 + \beta) I_B$$

A bipoláris tranzisztor karakterisztikái

A tranzisztor legjellegzetesebb karakterisztikái a *bemenő* ($U_{BE} - I_E$) és a *kimenő* ($U_{CE} - I_C$) karakterisztikák.

A bemenő karakterisztika a bázis-emitter feszültség és a kialakuló emitteráram közötti kapcsolatot mutatja (31. ábra). Mivel a tranzisztor üzemelésekor a bázis-emitter dióda nyitóirányban van előfeszítve, ez nem más, mint egy dióda nyitóirányú karakterisztikája.

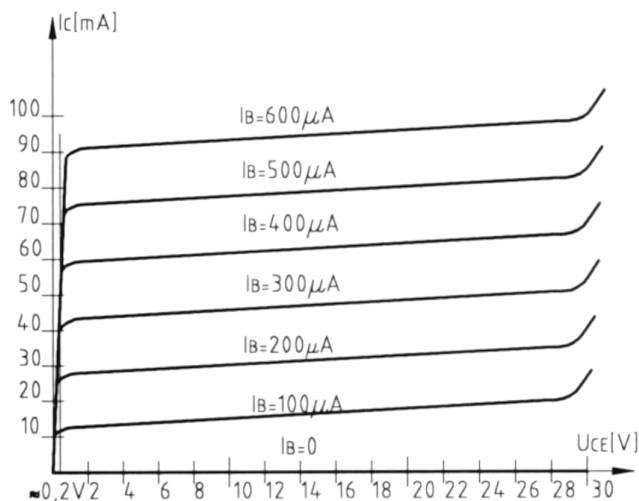
A valóságban a kollektor-emitter feszültség változása is befolyásolja az adott U_{BE} feszültségnél kialakuló I_E áramot (*feszültségvisszahatás*), mert hatására változik a lezárt kollektor-bázis határrétegnél kialakult kiürített réteg szélessége, amelynek bázis oldali része mintegy „levonódik” a nagyon keskeny bázisréteg szélességéből („bázisszélesség moduláció”). Az így kialakuló feszültségvisszahatás azonban olyan csekély mértékű, hogy a további vizsgálatainkban elhanyagolhatónak tekintjük. Így a bemenő karakterisztika ugyanúgy egyetlen görbéből áll, mint a dióda esetében.



31. ábra
Szilícium npn tranzisztor $U_{BE} - I_E$ karakterisztikája

Tekintettel arra, hogy a kollektoráram és az emitteráram közelítőleg megegyezik (a különbség még az igen csekély, $\alpha = 0,95$ áramátvitelű tranzisztornál is csak 5%), azt lehet mondani, hogy a tranzisztor $U_{BE} - I_E$ karakterisztikája gyakorlatilag megegyezik $U_{BE} - I_C$ karakterisztikájával.

A tranzisztor kimenő karakterisztikája azt mutatja, hogy a kollektor-emitter feszültség (változatlan bázisáram mellett) miként hat a kollektoráramra (32. ábra).



32. ábra
Szilícium npn tranzisztor $U_{CE} - I_C$ karakterisztikája

Tekintettel arra, hogy a kollektoráram az emitteráram (és ezzel együtt a bázisáram) függvénye, a kimenő karakterisztikaként több görbét adnak meg, melyek különböző bázisáramok esetén mutatják a kollektoráramnak a kollektor-emitter feszültségtől való függését.

Ideális esetben a kollektor-emitter feszültség nem befolyásolná a kollektoráramot, vagyis az ideális tranzisztor kimenő karakterisztikái vízszintes egyenesek lennének (a vízszintes tengelyen növekvő feszültség nem idézné elő a függőleges tengelyen az áram növekedését).

Ténylegesen azonban több különféle, a tárgyaltnál bonyolultabb jelenség miatt a kollektorfeszültség növekedésekor a kollektoráram is nő.

A tranzisztor kivitele és bekötése

A tranzisztorok méretét, kivitelét alapvetően az a teljesítmény határozza meg, amelyet a tranzisztor képes disszipálni (hővé alakítani).

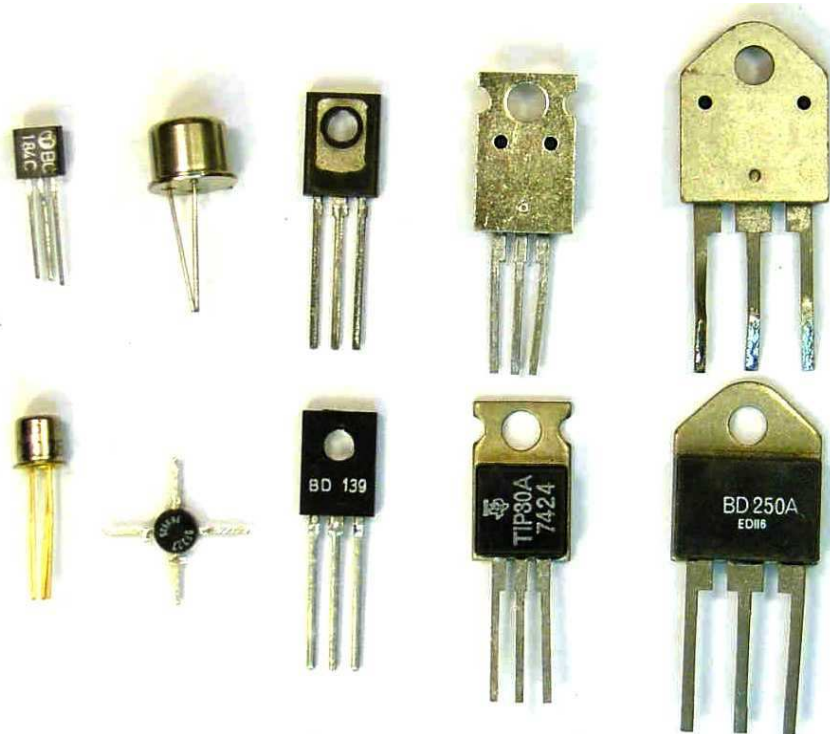
A kis teljesítményű tranzisztorok miniatűr műanyag vagy fém tokban kerülnek forgalomba. Nagyfrekvenciás célra készült tranzisztornál sokszor (mint árnyékoló burát) a fém tokot is kivezetik.

A tranzisztoron disszipálódó hő a kollektoron keletkezik, ezért a tranzisztor kollektorát közepes, vagy nagyobb teljesítmény esetén hűteni kell. Közepes teljesítményű tranzisztor kollektorát belülről a fém házra szerelik. Szükség esetén a házra a hőszűrő felületet növelő fém „hűtőcsillag” húzható.

A nagyobb teljesítményre méretezett tranzisztor kollektorát szintén a tok részét képező fém felületre szerelik, amely lehetővé teszi, hogy a tranzisztor *hűtőbordára* erősítsék. Így a működés során keletkező hő a tranzisztor hővezetéssel adja át a hűtőbordának, amely azt nagy felületével a környezetbe sugározza.

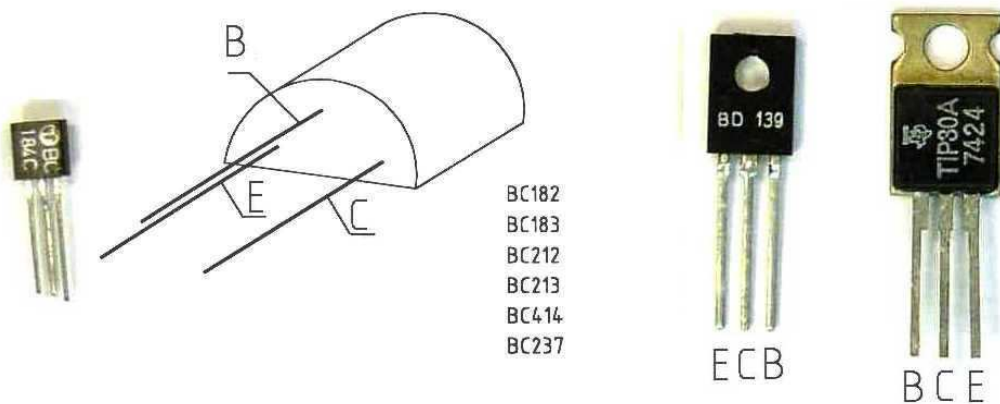
A 33. ábra különféle teljesítményű és tokozású tranzisztorokat mutat. Bal oldalon kis teljesítményű, felül műanyag, alatta fém tokozású tranzisztort láthatunk. A felső sorban balról a második egy valamivel nagyobb teljesítményű fémtokos tranzisztor (erre a tokra szükség esetén hűtőcsillag húzható). Az alatta látható műanyag tokozású tranzisztor igen nagy frekvenciákra készült. Az ábra jobb oldalán három, közepes, ill. nagyobb teljesítményű tranzisztort láthatunk két nézetben. Figyeljük meg, hogy a teljesítménnyel nő a méret, és annak a fém felületnek a mérete is, amely a hűtőbordával érintkezhet (a tranzisztor fém részén lévő lyuk teszi lehetővé a hűtőbordára csavarral való felszerelést).

A tranzisztor fém hűtőfelülete a kollektorral van összekötve, ezért ha a hűtőborda nem kerülhet a kollektor potenciáljára, elektromosan szigetelve kell felerősíteni. Ilyenkor a hűtőborda és a tranzisztor közé hővezető pasztával bekent csillám szigetelőlemezt helyeznek, a felerősítő csavart a tranzisztor fém részétől a célra szolgáló hengeres műanyag szerelvénnyel szigetelik.



33. ábra
Kis és közepes teljesítményű tranzisztorok

A tranzisztorok kivezetéseinek bekötése típusonként változhat, kétség esetén a gyártó katalógus adatlapja alapján tájékozódhatunk. A 34. ábra bal oldalán a kis teljesítményű tranzisztorok legáltalánosabb bekötését (néhány, ilyen bekötésű tranzisztortípus felsorolásával) láthatjuk, az ábra jobb oldala a közepes, ill. nagyobb teljesítményű tokok szokásos bekötését mutatja.

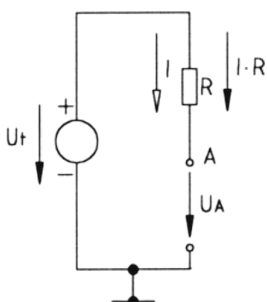


34. ábra
Tranzisztorok kivezetéseinek bekötése

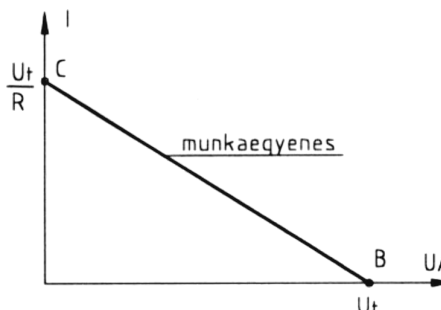
3.6.4. A bipoláris tranzisztor mint feszültségerősítő

Munkaegyenes, munkapont

A 35.a. ábrán látható kapcsolásban a tápegység U_t egyenfeszültséget szolgáltat, mellyel R ellenállás kapcsolódik sorba. Vizsgáljuk meg, hogy milyen összefüggés állapítható meg U_A feszültség és I áram között!



a) Kapcsolás



b) Munkaegyenes

35.ábra

A kapcsolásra Kirchhoff huroktörvénye alapján felírható:

$$U_t = U_A + I R$$

ebből pedig kifejezhetjük U_A -t:

$$U_A = U_t - I R$$

A matematikából ismert, hogy az $y = ax + b$ formájú függvény *egyenes*et határoz meg, ez az $U_A = U_t - I R$ összefüggésre is érvényes. Az egyenes megszerkesztéséhez elegendő két pontját meghatározni.

$U_A - I$ függvényében a 30.b. ábrán ábrázoltuk. Az egyenes egyik pontját $I = 0$ esetben határozzuk meg, ekkor $I R = 0$ és $U_A = U_t - I R = U_t - 0 = U_t$. A rajzon ezt a pontot B-vel jelöltük.

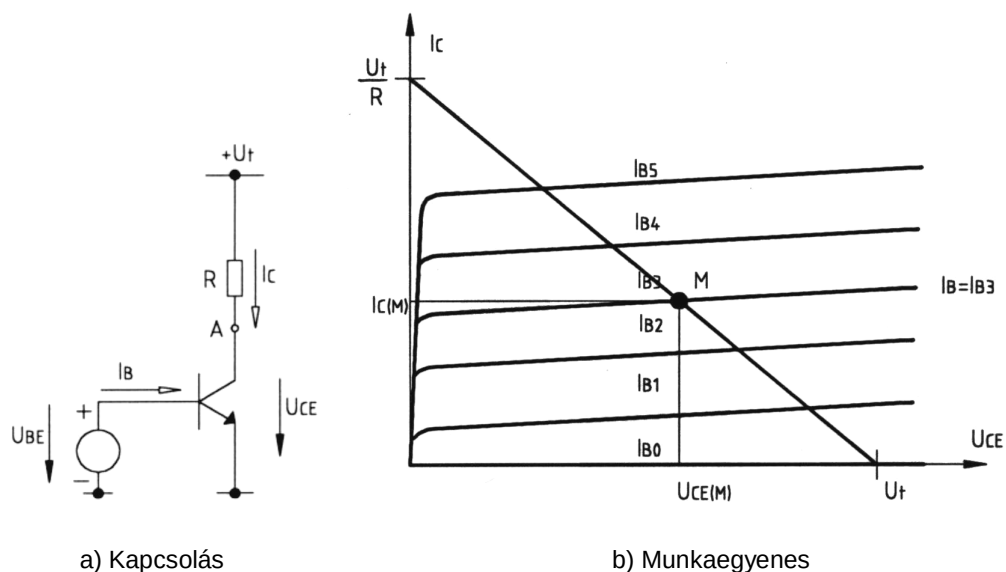
Az egyenes második pontját (a rajzon C-vel jelölve) viszont $U_A = 0$ helyen állapítjuk meg. Ha $U_A = 0$, $U_t = U_A + I R = I R$, ebből pedig $I = U_t / R$.

„B” és „C” pontokat összekötve kapjuk meg azt az egyenest, amely U_A feszültség és I áram lehetséges összetartozó értékeinek mértani helye. Ezt az egyenest - amelyet *munkaegyenes*nek neveznek - csak U_t tápfeszültség és R ellenállás határozza meg.

Az viszont, hogy ténylegesen milyen I áram (és ehhez tartozó U_A feszültség) alakul ki, az „A” pont és a föld közé helyezett elektronikus elemtől függ.

Ha A pont és a föld közé most egy npn tranzisztor kollektorát illetve emitterét kötjük, a 36.a. ábra szerinti kapcsoláshoz jutunk. I áram most megegyezik a tranzisztor kollektoráramával, U_A pedig megegyezik a kollektor-emitter feszültséggel. Ez azt jelenti, hogy az a koordináta-rendszer, amelybe a 35.b. ábrán a munkaegyenes rajzoltuk, most ugyanaz, mint amelyben a tranzisztor kimenő karakterisztikáit ábrázoljuk (36.b. ábra).

Ha U_t és R értéke nem változott, a munkaegyenes is változatlan, azt pedig, hogy mekkora kollektoráram folyik, a bázisáram ismeretében leolvashatjuk a kimenő karakterisztikáról. Pl. az I_{B1} bázisáramnál kialakuló kollektoráramot és kollektor-emitter feszültséget a tranzisztor I_{B1} bázisáramhoz tartozó kimenő görbéje és a munkaegyenes *metéspontja* határozza meg. Ezt a pontot *munkapont*nak hívják, és M betűvel jelölik.



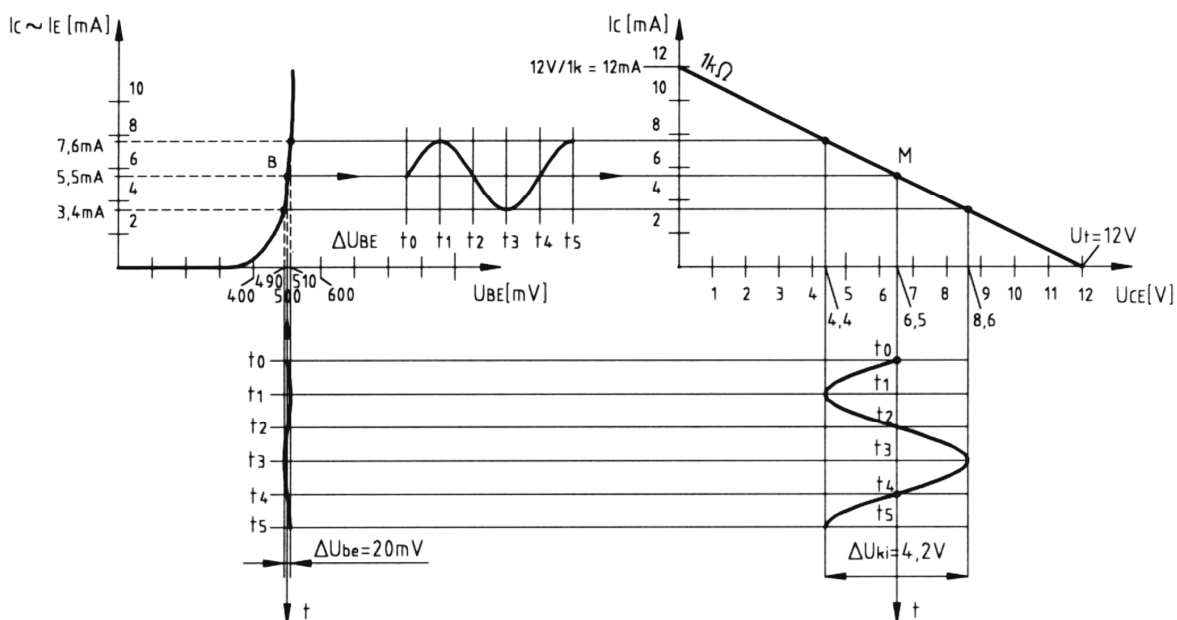
36. ábra

A tranzisztoros erősítő működése

A *munkaegyenes* tehát kijelöli a lehetséges összetartozó kollektor-emitter feszültségek és kollektoráramok értékét (ez csak az U_t tápfeszültség és az R ellenállás függvénye), azt pedig, hogy ezek közül ténylegesen melyik értékpáros alakul ki, a *tranzisztor* (pontosabban a tranzisztor kollektorárama) határozza meg.

A tranzisztor kollektorárama azonban jó közelítéssel megegyezik az emitteráramával, emitterárama pedig - a bemenő karakterisztika által megadott görbe szerint - a bázis-emitter közé kapcsolt U_{BE} feszültségtől függ. Ez azt jelenti, hogy a 36.a. ábra szerinti kapcsolásban a tranzisztor bázis-emitter feszültségét változtatva, változik az emitteráram, ezzel együtt a kollektoráram, a kollektorárammal pedig - ahogyan azt a munkaegyenes meghatározza - az U_{CE} kollektorfeszültség.

Ezt a folyamatot láthatjuk a 37. ábrán. Az ábra bal oldalán a tranzisztor bemenő karakterisztikáját, jobb oldalán a kimenő karakterisztikáját látjuk. Legyen a tápfeszültség 12V, R ellenállás 1 k Ω . Ennek megfelelően rajzoltuk be a kimenő karakterisztikába az áramkör munkaegyenesét.



37. ábra
Tranzisztoros erősítő működésének grafikus vizsgálata

Először t_0 pillanatban kapcsoljunk a tranzisztor bázisa és emittere közé $U_{BE1} = 500\text{mV}$ nyitófeszültséget. Ennek hatására - mint a bemenő karakterisztika mutatja - I_{E1} (az ábra szerint 5,5 mA) emitteráram alakul ki. Feltételezve, hogy az emitteráram és a kollektoráram megegyezik, a munkaponti kollektoráram is 5,5 mA lesz. Ezt az értéket átvétítve a kimenő karakterisztika munkaegyenesére, látható, hogy a munkaponti kollektorfeszültség ekkor 6,5V értékű.

Adjunk most U_{BE1} bázis-emitter feszültséghez egy 10 mV amplitudójú szinuszelet (azaz a bázis-emitter feszültséget szinuszfüggvény szerint növeljük 510 mV-ra, majd csökkentjük 490 mV-ra stb. A 37. ábrán az „idő” tengely mind a bemenő, mind a kimenő karakteristikánál lefelé mutat.)

A bemenő karakterisztikán leolvashatjuk, hogy t_1 időpontban, amikor U_{BE} pillanatértéke 510 mV, az emitteráram (és közelítőleg a kollektoráram) 7,6 mA-ra nő. Ezt átvétítve a kimenő karakterisztika munkaegyenesére, 4,4V U_{CE} feszültséget kapunk. Amikor pedig t_3 időpontban a bemenő feszültség 490 mV, a kollektoráram 3,4 mA és a kollektor-emitter feszültség 8,6V.

Megfigyelhető, hogy amikor a bemenő feszültség nőtt, a kimenő feszültség csökkent, azaz erősítőnk *fázist fordít*.

Az ábráról leolvashatjuk, hogy az erősítő bemenetére (a tranzisztor bázisa-emittere közé) csúcsról csúcsig +20 mV feszültséget adva, a kimeneten (a kollektor-emitter között) szintén csúcsról csúcsig 4,4V-8,6V = -4,2V feszültség keletkezett. Tranzistoros fokozatunk tehát erősíti a feszültséget, feszültségerősítése

$$A_U = \frac{\Delta U_{ki}}{\Delta U_{be}} = \frac{-4,2\text{V}}{20\text{mV}} = -210$$

lesz. A negatív előjel az erősítő *fázisfordítását* mutatja.

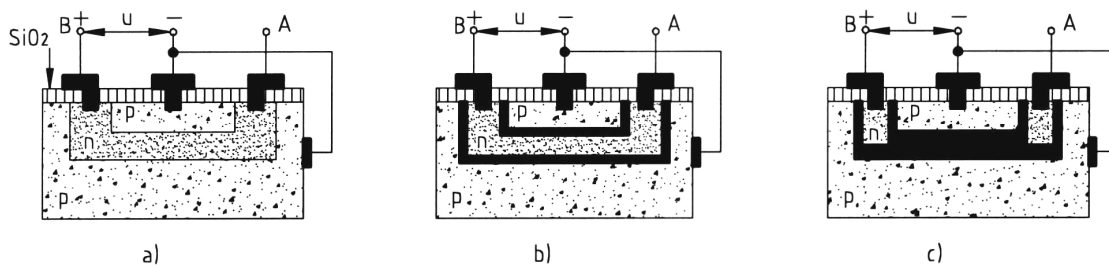
3.6.5. Unipoláris (térvezérlésű, FET) tranzisztorok

Az unipoláris (FET = field effect tranzisztor, térvezérlésű tranzisztor) tranzisztorok elnevezésüket onnan nyerték, hogy a tranzisztoron átfolyó áramot a vezérlőelektródájukra kapcsolt feszültséggel vezérelt villamos térrel lehet befolyásolni.

Feszültséggel vezérelhető ellenállás

A félvezető dióda tárgyalásánál láthattuk, hogy a záró irányban előfeszített p-n átmenet feszültséggel vezérelhető kapacitásként működik: minél nagyobb a zárófeszültség, annál szélesebb lesz a kiürített réteg, így annál távolabb kerülnek egymástól a „p” és „n” réteg szabad (többségi) töltéshordozói, ezzel mintegy nő a távolság a kondenzátor „fegyverzetei” között és ezért csökken az eszköz kapacitása.

A záró irányban előfeszített p-n átmenet *feszültséggel vezérelhető ellenállásként* is felhasználható. A 38. ábrán látható eszközben két „p” réteg között egy „n” réteg helyezkedik el, a két „p” rétegen, valamint az „n” réteg (az ún. *csatorna* = channel) két végpontján (A és B) rezisztív kivezetéseket helyeztek el. A két „p” réteghez tartozó kivezetéseket összekötve, ezek képezik a vezérlő elektródát („kapu” = gate). A vezérelhető ellenállás a csatorna „A” és „B” végpontja közt jelentkezik.



38. ábra
Feszültséggel vezérelhető ellenállás

Ha a vezérlő elektródára „A” ponthoz képest 0 feszültséget adunk, a p-n átmeneteken csekély szélességű kiürített réteg alakul ki, ezért a csatorna szabad keresztmetszete viszonylag nagy, két végpontja közötti ellenállás pedig kicsi (38.a. ábra).

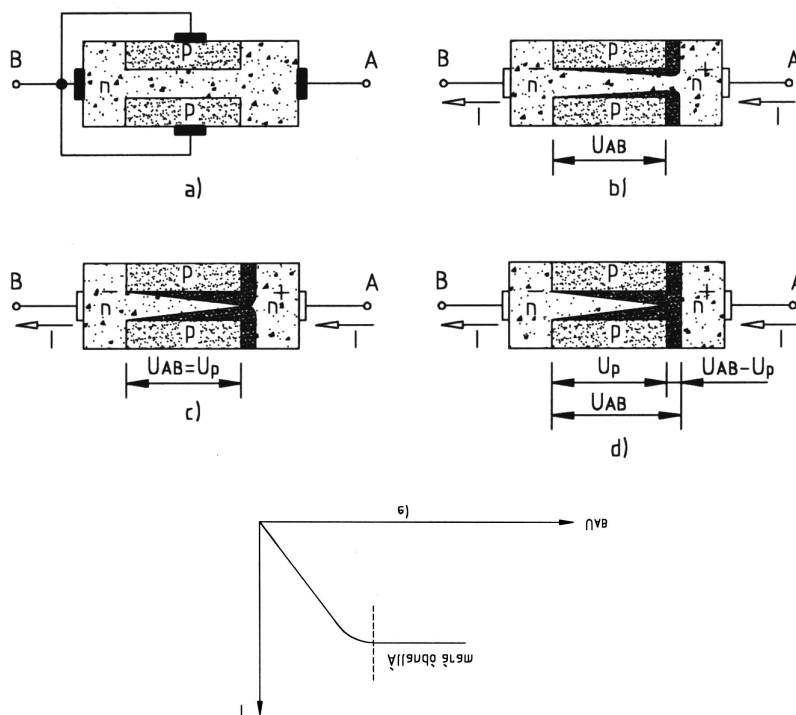
A vezérlő elektródára kis zárófeszültséget kapcsolva, a kiürített réteg szélessége megnő, a csatorna keresztmetszete csökken, ezért ellenállása megnő (38.b. ábra).

A vezérlő elektródára kapcsolt zárófeszültséget növelve a kiürített réteg egyre szélesedik, és egy, az eszközre jellemző U_p vezérlő feszültségnél már a csatorna teljes keresztmetszetét elzárja (38.c. ábra). Ekkor „A” és „B” pont között nem folyhat áram, az ellenállás gyakorlatilag végtelen (a csatorna elzáródott).

A csatorna ellenállását tehát a vezérlő elektródára kapcsolt feszültséggel lehet változtatni; a vezérlő feszültség a kiürített réteg szélességét befolyásolja. Célszerű, ha a kiürített réteg inkább az ellenállást képező csatornába nyúlik be, ezért gyártáskor a csatornát igen gyengén, míg a vezérlő elektródát erősen adalékolják.

Az eszköz jellegzetes lezáró feszültsége $U_p = 1...7V$, a csatorna ellenállása pedig a 0 vezérlő feszültségnél érvényes kb. $100\ \Omega$ -tól több $M\Omega$ -ig (elzáródáskor) terjedhet.

Ha a csatornán áram folyik, a csatorna ellenállásán feszültség esik. Ha ez a feszültség nem hanyagolható el az elzáródáshoz tartozó U_p feszültséghez képest, a csatorna mentén a feszültség „A” és „B” pont között változik, ennek megfelelően változik a csatorna és a vezérlő elektróda közti lezáró feszültség is. A folyamatot a 39. ábrán követhetjük.



39. ábra

A 39.a. ábra azt az állapotot mutatja, amikor (0 gate feszültség mellett) az ellenálláson nem folyik áram.

A 39.b. ábrán látható, hogy ha a csatornára $U_{AB} < U_p$ feszültséget kapcsolnak, az eszközön áram indul meg, a csatorna mentén eső U_{AB} feszültség miatt a kiürített réteg a csatorna mentén változó szélességű.

Amikor az eszközre kapcsolt U_{AB} feszültség eléri U_p értéket, a csatorna elzáródik (39.c. ábra). Ez a pont felel meg a 39.e. ábra szerinti görbe állandó áramú tartománya kezdetének.

Ha a csatornára kapcsolt U_{AB} feszültség nagyobb, mint U_p lezárófeszültség, a kiürített réteg és az elzáródott tartomány a 39.d. ábra szerint az eszköz jobb oldala felé terjeszkedik, elszigetelve a csatornát az „A” kivezetéstől. Ezért a kívülről rákapcsolt feszültség növekedése nem befolyásolja már a csatorna elzáródását, tehát a csatorna áramát sem: az átfolyó áram stabilizálódik (39.e. ábra állandó áramú tartomány).

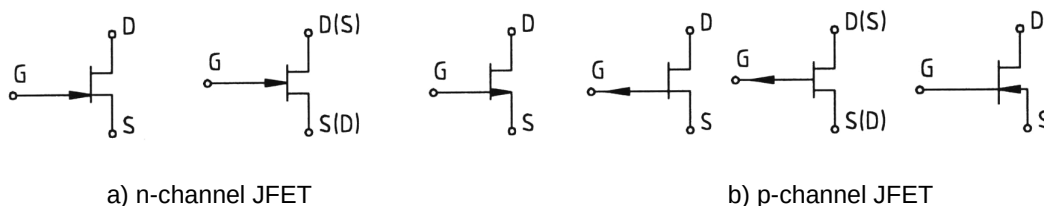
Ilyen formán az eszköz mint áramstabilizátor használható.

A feszültséggel vezérelhető ellenállás az elzáródás miatt lineáris elemként kevésbé használható, viszont a térvezérlésű tranzisztor alapját képezi.

Feszültséggel vezérelhető ellenállás természetesen nem csak a tárgyalt „n csatornás”, hanem „p csatornás” kivitelben is készíthető, amikor is a vezérlő elektródát képező két „n” réteg fogja közre a „p” típusú csatornát.

Záróréteges térvezérlésű tranzisztor (Junction FET = JFET)

Az záróréteges térvezérlésű tranzisztor felépítésében azonos az 1.1. pontban megismert feszültséggel vezérelhető ellenállással. A FET vezérlő elektródáját (amely a tranzisztor bázisának felel meg) **gate**-nek (**G**, kapu) nevezik, a csatorna kivezetései pedig a tranzisztor emitterének megfelelő **source** (**S**, forrás) illetve a tranzisztor kollektorának megfelelő **drain** (**D**, nyelő). A JFET rajzjelét a 40. ábra mutatja.



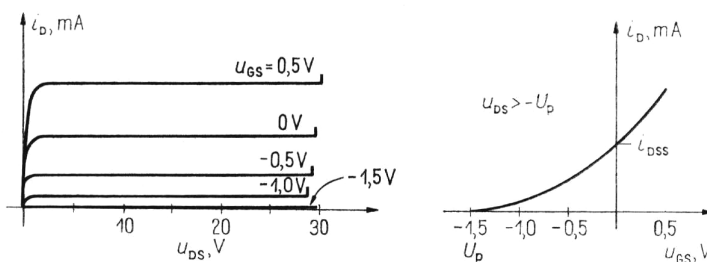
40. ábra

A csatorna típusát a nyíl irányával szemléltetik: „n” csatornás JFET esetében a (source elektródával szemközti) gate elektródára a csatorna felé mutató nyíl kerül (jelölve, hogy a gate a „p”, a csatorna pedig az „n” típusú), vagy ezzel azonos jelentésű, ha a source elektródára egy az előzővel azonos irányítású, tehát kifelé mutató nyilat rajzolnak (40.a. ábra).

A „p” csatornás JFET rajzjelén a gate-ra rajzolt nyíl kifelé, vagy a source-ra rajzolt nyíl befelé mutat (40.b. ábra).

A gate és a drain feszültségét a source-hoz képest mérik. A JFET működéséhez az szükséges, hogy a gate záró irányban legyen előfeszítve (vagy legalább is a nyitóirányú előfeszítése kisebb legyen, mint az adott félvezető anyagra jellemző kontaktpotenciál, azaz szilícium esetén kb. 0,5V), pl. n csatornás FET esetén a source-hoz képest *negatív* vagy legfeljebb +0,5V legyen.

Ha a gatefeszültség 0, akkor az eszköz és működése ugyanaz, mint az előző pontban tárgyalt feszültséggel vezérelhető ellenállásé (ld. 41. ábra $U_{GS}=0V$ görbe). Ameddig U_{DS} drain-source feszültség nem éri el U_p feszültséget, az eszköz (nem teljesen lineáris) ellenállásként viselkedik, azaz a drain-source feszültség növekedésekor a drain áram is nő. U_p drainfeszültség elérésekor a csatorna lezáródik, ettől kezdve a drain áram nem nő tovább U_{DS} növelésekor.



41. ábra
n csatornás JFET karakterisztikái

Ha a gatefeszültség negatív pl. -0,5V értékű, a csatornában a kiürített réteg kiszélesül, a csatorna keresztmetszete csökken, ezért ellenállása megnő, és azonos U_{DS} feszültség hatására kisebb áram folyhat, mint $U_{GS}=0V$ esetén. A drain-source feszültség növelésekor a csatorna mentén a kiürített réteg tovább terjeszkedik, így a csatorna keresztmetszete tovább csökken. Mivel a negatív gate-source feszültség miatt a csatorna már $U_{DS}=0$ esetén is részben el volt zárva, a teljes elzáródáshoz most kevesebb U_{DS} feszültség tartozik.

Még negatívabb gatefeszültségnél a csatorna nagyobb elzáródása miatt még kisebb draináram alakul ki azonos U_{DS} feszültség esetén, illetve a csatorna teljes elzáródása még kisebb U_{DS} feszültségnél következik be.

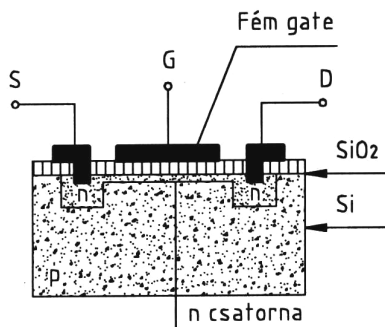
A JFET drain áram - gate feszültség karakterisztikáját az 41.b.ábra mutatja. Az ábra azt az állapotot szemlélteti, amikor a csatorna (U_{DS} feszültség hatására) már el van záródva. U_p gatefeszültségnél a FET lezár, ekkor a drain áram 0. Ha U_G ennél az értéknél pozitívabb, a drain áram növekszik. A gatefeszültség kb. +0,5V-ig növelhető, ennél nagyobb U_G esetén a gate-source dióda kinyit, és a FET már nem működőképes.

Szigetelt vezérlőelektrodájú térvezérlésű tranzisztor (MOSFET)

Kiürítéses MOSFET

A 42. ábra a FET kialakításának egy másik lehetőségét mutatja. A „p” típusú hordozóban (szubsztrát) a gyártás során két erősen szennyezett „n” típusú szilíciumüreget alakítanak ki, melyeket közvetlenül a szilícium felületén létrehozott oxidréteg alatt gyengén szennyezett és vékony „n” típusú csatornával kötnek össze. A csatorna fölött az szilíciumoxid rétegre fémréteget csapatnak, ez képezi a tranzisztor vezérlő elektrodáját.

(A szubsztrátot általános gyakorlat szerint a source-el kötik össze).



42. ábra
Kiürítéses üzemmódú MOS FET

Az eszköz nevét a **Metal Oxide Semiconductor** (fém-oxid félvezető) elrendezés adta. Mivel a gate egy oxidréteggel a félvezetőtől el van választva, sokszor szigetelt vezérlőelektrodájú (**Insulated Gate**), azaz **IG-FET** elnevezést is használnak.

A 42. ábrán „n” csatornás MOS FET-et látunk, de teljesen hasonló módon a komplementer „p” csatornás MOS FET is előállítható.

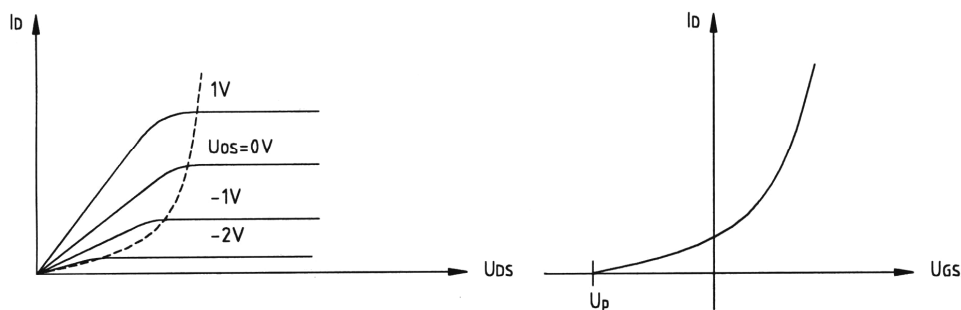
Ha a gate-re a source-hoz képest nem kapcsolunk vezérlő feszültséget, a drain és a source között a felületi szilíciumoxid réteg alatt kialakított csatornában jelen lévő szabad elektronok vezetik az áramot, a FET kis ellenállást tanúsít.

A gate-re negatív feszültséget kapcsolva, a létrejövő elektromos tér a vékony „n” típusú csatorna negatív töltésű töltéshordozóit, az elektronokat taszítja, és mintegy kikényszeríti azokat a csatornából. Minél negatívabb a gate, annál több elektront kényszerít a csatorna elhagyására, így „kiüríti” a csatornát, melynek ellenállása a szabad töltéshordozók számának csökkenése miatt növekszik.

Ha a gate-ra kapcsolt negatív feszültség egy, az adott tranzisztorra jellemző U_p lezárófeszültséget elér, a csatorna teljesen kiürül, lezáródik és rajta nem folyik áram.

Egyebekben a MOS-FET a JFET-el azonos módon működik: a csatorna mentén feszültség esik, mely a drain oldalán a pozitívabb. Ez azt eredményezi, hogy a drain felől a kiürített réteg éppen úgy kiterjed, mint a JFET-nél, és a csatorna elzáródik, az áram nem nő tovább.

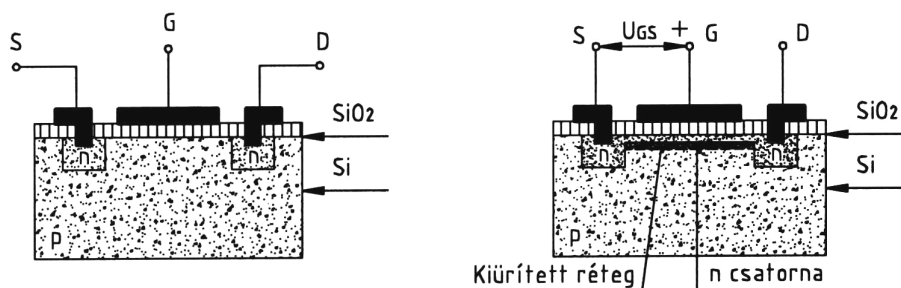
Az n csatornás kiürítéses MOS FET karakterisztikáit a 43. ábra mutatja. Ez a karakterisztika hasonló az n csatornás JFET-éhez, azzal az eltéréssel, hogy mivel a vezérlő elektróda el van szigetelve, pozitív vezérlő feszültség esetén is működőképes marad a tranzisztor, ilyenkor ui. a pozitív feszültség által a csatornában létrehozott elektromos tér oda vonzza az elektronokat, ezáltal növelve a töltéshordozók számát és így az áramot.



43. ábra
Kiürítéses MOS FET karakterisztikái

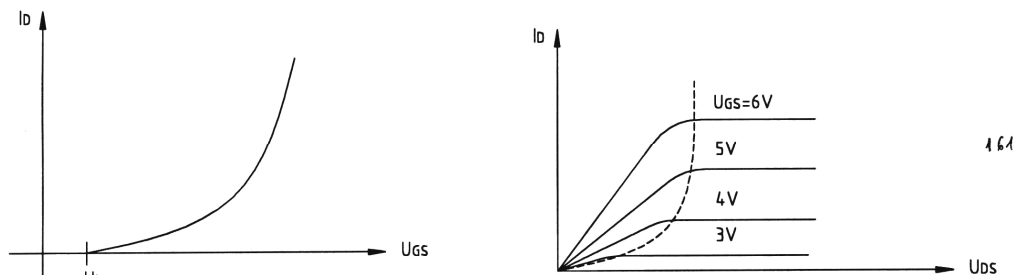
Növekményes MOS FET

A 44. ábra szerinti kialakításban a „p” típusú szubsztráton csak a két erősen szennyezett „n” típusú üreget alakítják ki, de a felületi oxidréteg alatti „n” típusú csatornát nem. Ez a csatorna akkor alakul csak ki, ha a felületi oxidrétegen a két üreg közötti szakaszon kialakított gate-ra pozitív feszültséget kapcsolnak. A pozitív vezérlőfeszültség olyan elektrosztatikus teret alakít ki, amely taszítja a lyukakat, és vonzza az elektronokat. Ezért kis pozitív gatefeszültség esetén először a p típusú szubsztrát gate alatti részéből távoznak a lyukak, és kiürített réteg alakul ki, illetve a pozitív gatefeszültség növelésével a kialakuló elektromos tér a source üregből elektronokat vonz erre a területre, és létrehozza a csatornát. Azt a feszültséget, ahol a csatorna létrejön, U_K küszöbfeszültségnek nevezik (jellegzetes értéke 2...4 V). Ha a gate feszültségét U_K fölé növelik, a csatornában az elektronok száma növekszik, ezért vezetőképessége nő.



44. ábra
n csatornás növekményes MOS FET kialakítása

A növekményes MOS FET karakterisztikái a 45. ábrán láthatók.

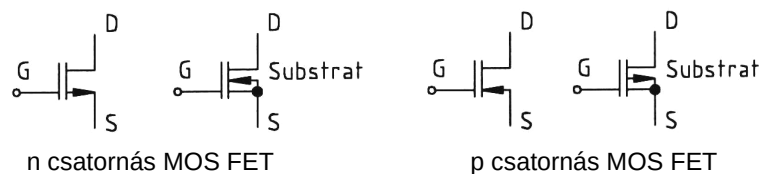


45. ábra
Növekményes MOS FET karakterisztikái

A MOS-FET-ek előnyös tulajdonsága a JFET-hez képest, hogy míg utóbbi gate-jén folyik valamennyi záróáram, a MOS FET gate-je el van szigetelve, tehát az tökéletes szakadásként viselkedik. E miatt azonban a source-hoz képest egy kis kapacitású kondenzátort képez, amely a környezetéből kapott igen kis töltés hatására is olyan nagy feszültségre töltődhet fel, amely miatt az oxidréteg átüt, és az eszköz tönkremegy.

Ezért a MOS eszközök kezelése különös gondosságot igényel. A gyárból a MOS tranzisztorokat úgy bocsátják ki, hogy kivezetései - a feltöltődés megakadályozása céljából - egy elektromosan vezető gumigyűrűvel össze vannak kötve. Ezt a gyűrűt csak az áramkörbe való beforrasztás után szabad eltávolítani!

A MOS-FET áramköri rajzjeleit a 46. ábra mutatja.



46. ábra
MOS-FET áramköri rajzjelei

A tervezérlésű tranzisztorok kivitele és bekötése

A tervezérlésű (unipoláris, FET) tranzisztorok ugyanolyan tokozásban kerülnek forgalomba, mint a bipoláris tranzisztorok.

A kivezetések bekötését a gyártó katalógus adatlapján találhatjuk meg.