

---

ELEKTRONIKAI TECHNIKUS KÉPZÉS

2013

ANALÓG  
ELEKTRONIKA II.  
FÉLVEZETŐK

ÖSSZEÁLLÍTOTTA  
NAGY LÁSZLÓ  
MÉRNÖKTANÁR

---

---

## Tartalomjegyzék

Félvezetők alapjai .....	3
Tiszta félvezetők .....	3
Töltéshordozók mozgása a félvezetőben.....	4
Szennyezett félvezetők.....	4
A rétegátmenet.....	5
A rétegdióda .....	6
A rétegátmenet hőmérséklet függése .....	7
Rétegdiódák fontosabb katalógus adatai.....	7
Diódák hálózatai .....	7
Különleges félvezető diódák .....	8
Zener dióda .....	8
Kapacitás vagy varicap dióda .....	8
Schottky dióda .....	9
Alagút vagy Esaki dióda.....	9
Réteg vagy bipoláris tranzisztor .....	9
A tranzisztor fizikai működése .....	10
Közös bázisú alapkapsolás.....	10
Közös emitteres alapkapsolás.....	11
Összefüggések a nagyjelű áramerősítési tényezők között.....	11
A tranzisztor jellemzése, paraméterei .....	11
A bipoláris tranzisztor fontosabb katalógus adatai .....	13
A tranzisztor hőmérsékletfüggése.....	14
Térvezérlésű vagy unipoláris tranzisztorok.....	14
JFET-ek felépítése, működése, jellemzői.....	14
IGFET-ek felépítése, működése, jellemzői .....	16
N csatornás kiürítéses típus.....	16
N csatornás növekményes típus .....	16
FET-ek előnyei.....	17

## Félvezetők alapjai

Az anyagokban az atommag körül keringő elektronoknak, az atommag vonzó hatása miatt helyzeti energiájuk van. Ez az energiatartalom az atommag és az elektron távolságától függ. A legkisebb energiájú állapotra törekvés az atom körül is érvényes, de egy héjon belül több energia minimum, pálya létezik. A legnagyobb energiatartalommal a külső héjon keringő vegyérték vagy valencia elektronok rendelkeznek. Energiaközlés során a valencia elektronok kapcsolata lazul az atommaggal, mivel egyre távolabbi pályára lépnek, ionizációs energia esetén kiszakadnak az atomi kötelékből. A vegyértéksávot ily módon elhagyó elektronok a vezetési sávba kerülnek, és mint szabad töltéshordozók növelik az anyag vezetőképességét. A vegyérték és vezetési sáv közötti ún. tiltott sáv szélessége az anyagok fontos jellemzője, az az energia szint, amelyet a kristályrácsában kötött vegyérték elektronnak fel kell vennie a vezetési sávba lépéshez. ( $1\text{eV}=1,6 \cdot 10^{-19}\text{ J}$ )

Vezetők: a tiltott sáv  $< 0,2\text{ eV}$ , alacsony hőmérsékleten is sok a vezetési elektron, a fajlagos vezetés  $10^8 \div 10^6\text{ S/m}$ , fémeknél gyakorlatilag tiltott sáv nincs.

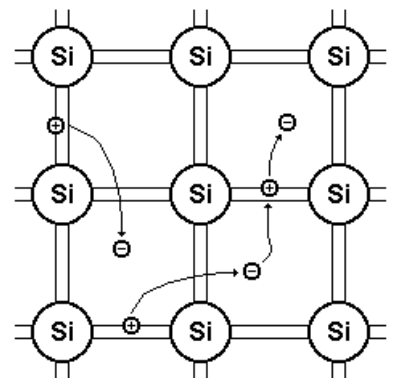
Félvezetők: a tiltott sáv  $0,7\text{eV} \div 1,2\text{eV}$ , szobahőmérsékleten és vegytiszta állapotban a viszonylag sok vezetési elektron ellenére szigetelő jellegűek, növekvő hőmérséklet hatására a töltéshordozók száma növekszik, ezért NTK típusúak, fajlagos vezetés  $10^5 \div 10^9\text{ S/m}$ . Félvezető elemek: a periódusos rendszer IV. oszlopban Ge, Si, C, melyekre a tetraéderes rácsszerkezet, 4 vegyérték, kovalens kötés jellemző. Félvezető vegyületek ZnO, CuO, GaAs stb.

Szigetelők: tiltott sáv  $> 1,5\text{ eV}$ , vezetési elektronok gyakorlatilag nincsenek.

### Tiszta félvezetők

A tiszta, rácshibától mentes félvezetőben alacsony hőmérsékleten a vegyérték elektronok kötésben vannak. Az anyag szigetelő jellegű. A vegyérték elektronok külső energia - hő, fény, villamos vagy mágneses tér, mechanikai deformáció - hatására a vegyértéksávból átlépnek a vezetési sávba. A kötésből való kilépés miatt elektron hiány azaz "lyuk" keletkezik. Az atomon belül a töltések egyensúlyának megbomlása miatt a protonok töltése a meghatározó, ezért a lyuk töltése pozitív.

A lyukak a környezetükben lévő kötött vegyérték elektronokat vonzzák. Ez a kis többlet energia elegendő, hogy a kilépéshez amúgy is közel álló valamelyik elektron a kötetst elhagyva a lyuk helyére ugorjon. A jelenség folyamatos: a töltéshordozó párok állandóan keletkeznek, generálódnak és megszűnnek, rekombinálódnak. A töltéshordozó párok számát a pillanatnyi hőmérséklet határozza meg. A hőmérséklet emelkedésével a töltéshordozó párok száma exponenciálisan növekszik. A termikus hatás miatt keletkező töltéshordozó pá-



rok hozzák létre a félvezető saját, szerkezeti vagy intrinsic vezetését.

300 K°-on	Si-ban	$1,5 \cdot 10^{16}$ db thp/cm <sup>3</sup>	$\rho=2,4$ k $\Omega$ m
	Ge-ban	$2,4 \cdot 10^{19}$ db thp/cm <sup>3</sup>	$\rho=0,45$ k $\Omega$ m

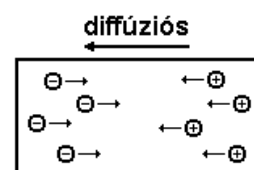
### Töltéshordozók mozgása a félvezetőben

A félvezető kristályban a töltéshordozók vándorlása, áramlása két ok miatt jöhet létre:

- a töltéshordozók eloszlása nem egyenletes,
- egy belső vagy külső villamos tér hat a töltéshordozókra.

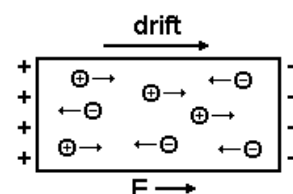
A koncentráció különbség miatt kialakuló töltéshordozó áramlást diffúziós áramnak nevezzük.

(konvencionális áram irány!)



Külső vagy belső villamos tér miatt kialakuló töltéshordozó áramlást sodródási vagy drift áramnak nevezzük.

(konvencionális áram irány!)



A félvezetőben folyó áramot gyakorlatilag az elektronok vándorlása jelenti. Míg a vegyértékkötésből kilépő elektron a kristályközi térben szabadon mozoghat, a lyukak mozgása, fizikai természetükből következően, szakaszos. Az elektronok mozgékonyasága kb. 2,5-szerese a lyukak mozgékonyaságának. A félvezető alkatrészekben lejátszódó folyamatok megértéséhez, a lyukakat önálló töltéshordozónak tekintjük.

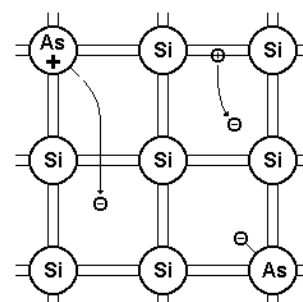
A tiszta félvezető anyagok az erős hőmérsékletfüggésük és a nagy fajlagos ellenállásuk miatt ritkán használhatók fel a gyakorlatban. A töltéshordozók számának növelésére két lehetőség kínálkozik:

- a rácsszerkezeti hibák növelése,
- a félvezető anyag szennyezése.

A rácshibák reprodukálása technológiailag nem vagy nehezen oldható meg, ezért a vezetőképesség növelésére a szennyezés használható fel.

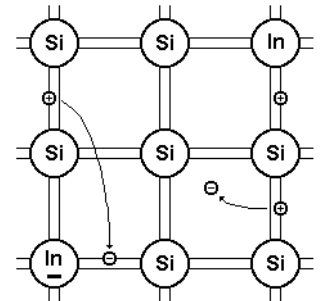
### Szennyezett félvezetők

Tiszta félvezetőt öt vegyértékű elemmel szennyezve "n" típusú félvezető keletkezik. Szennyező elemként a periódusos rendszer V.A. oszlopából a P, As, Sb a fontosabb. A szennyező atom beépül a kristályrácsba, négy valencia elektronjával négy szomszédos Si atomhoz kapcsolódik. Az ötödik elektronja nem tud kötésbe lépni, ezért könnyen leválik, vezetési sávba lép, és az atomok közötti térben növeli a szabad töltéshordozók számát. A szennyező atom mi-



vel egy elektronját leadta, pozitív töltésű (donor) ionná válik. Ez a pozitív ion nem töltéshordozó, mert a helyéről elmozdulni nem tud. A félvezetőben a szennyezésből származó elektronok a többségi töltéshordozók, a termikus hatás miatt állandóan keletkező elektron-lyuk párokból fennmaradó lyukak a kisebbségi töltéshordozók. Az "n" típusra szennyezett félvezető a környezete felé villamosan semleges.

Tiszta félvezetőt három vegyértékű elemmel szennyezve "p" típusú félvezető keletkezik. Szennyező elemként a periódusos rendszer III.A. oszlopából a Ga, Al, In a fontosabb. A szennyező atom beépül a kristályrácsba, de csak a három valencia elektronjával tud kötetést létesíteni. Minden egyes szennyező atomnál egy elektron hiány, azaz lyuk keletkezik. Ezt a lyukat egy szomszédos kötés meg bomlásából származó elektron, egy lyukat maga után hagyva betöltheti.

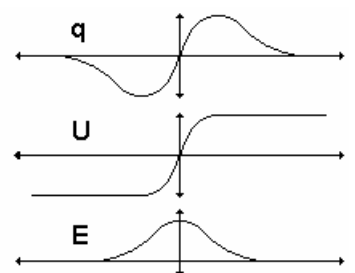
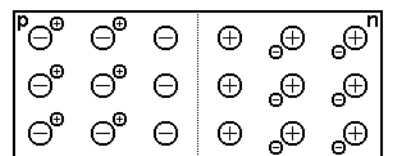
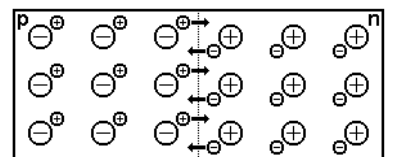


A szennyező atom mivel egy többlet elektront felvett (akceptor), negatív töltésű ionná válik. Ez a negatív ion nem töltéshordozó, mivel helyéről elmozdulni nem tud. A félvezetőben a szennyezésből származó lyukak a többségi töltéshordozók, a termikus hatás miatt állandóan keletkező elektron-lyuk párokból fennmaradó elektronok a kisebbségi töltéshordozók. Az "n" típusra szennyezett félvezető a környezete felé villamosan semleges.

A szennyezett félvezetőkben a többségi töltéshordozók áramlását idegen vezetésnek nevezzük. A szennyezés hatására a félvezető fajlagos ellenállása nagyságrendekkel csökken: a termikus töltéshordozókhoz viszonyítva  $10^3 \div 10^6$  szorosára nő a töltéshordozók száma. A szennyezés mértékére jellemző, hogy  $\approx 10^5 \div 10^8$  félvezető atomra jut egy szennyező atom.

### A rétegátmenet

Egy "p" és egy "n" típusra szennyezett félvezető összeillesztésekor rétegátmenet keletkezik. A félvezetők érintkezési felületén, a többségi töltéshordozók egyenlőtlen eloszlása miatt, diffúziós áram indul meg. Az "n" rétegbe lyukak, a "p" rétegbe elektronok diffundálnak át és az ott lévő többségi töltéshordozókkal rekombinálnak. A rétegátmenet környezete töltéshordozókban elszegényedik (kiürül), ezért a magukra maradt szennyező ionok egy töltött kettősréteget hoznak létre. A "p" rétegben az akceptor ionok negatív potenciálgátja az elektronok diffúzióját, az "n" rétegben a donor ionok pozitív potenciálgátja a lyukak diffúzióját csökkenti, illetve szünteti meg. A rétegátmenet környezetében a töltés, a potenciál és a térerősség alakulása az ábrán figyelhető meg. A kiürített rétegbe bejutó, elegendő energiával rendelkező kisebbségi töltéshordozókra a másik réteg szennyező ionjainak töltése gyorsítólag hat. A "p" rétegből az elektronok, az "n" réteg-



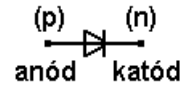
ből a lyukak a rétegátmeneten átsodródva hozzák létre a drift áramot. Mivel a kisebbségi töltéshordozók száma hőmérsékletfüggő, ezért a drift áram is az.

A magára hagyott rétegátmenetben a drift és diffúziós áram azonos nagyságú és ellentétes irányú. A kiürített réteg szélessége a szennyezés mértékétől függően  $10^{-3} \div 10^{-5}$  mm.

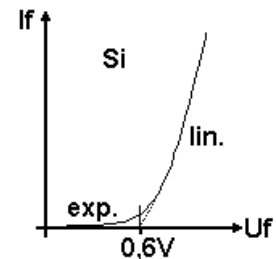
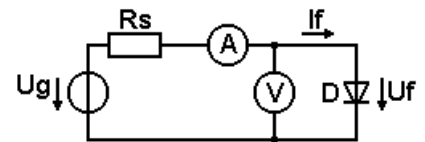


### A rétegdióda

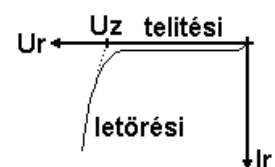
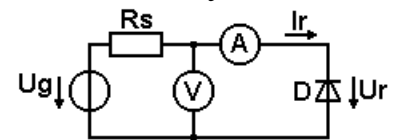
A kivezetésekkel ellátott rétegátmenetet diódnak nevezzük. A dióda áramkörileg nemlineáris passzív kétpólus. Rajzjele:



A rétegátmenet nyitóirányban működik, ha a "p" rétegre pozitívabb, az "n" rétegre negatívabb külső feszültséget kapcsolunk. A külső feszültség hatására a potenciálgát letörik. A többségi töltéshordozók diffúziója és rekombinálódása folyamatossá válik. A potenciálgát letöréséhez Si esetén  $0,6 \div 0,7$  V, Ge esetén  $0,3 \div 0,4$  V nyitófeszültség szükséges. A rétegdióda nyitóirányú (forward) mérését és feszültség-áram karakterisztikáját az ábra mutatja be. Nyitófeszültség alatt a rétegátmenet árama exponenciális. Nyitó feszültség felett a karakterisztika közel lineáris, azaz ellenállásként viselkedik, melyet a félvezető geometriai méretei, anyaga és a szennyezettség mértéke határoznak meg. A diffúziós áram és a nyitó feszültség szorzata egy disszipációs teljesítményt határoz meg, melyet a rétegátmenetnek hőmennyiség formájában a környezet felé le kell adnia. Ha a hő leadás akadályozott a rétegátmenet a túlmelegedés miatt tönkremegy. A disszipációs teljesítményt elsősorban a rétegátmeneten folyó  $n \times 1 \div 100$  mA áram határozza meg, mivel a nyitófeszültség közel állandó értékűnek vehető.



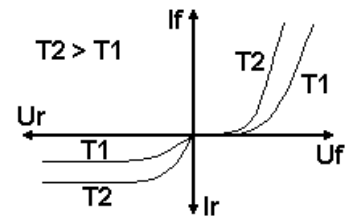
A rétegátmenet záróirányban működik, ha a "p" rétegre negatívabb, az "n" rétegre pozitívabb külső feszültséget kapcsolunk. A külső feszültség hatására a potenciálgát kiszélesedik. A többségi töltéshordozók a rétegátmenet környezetéből a kivezetések felé koncentrálnak, a diffúziós áram megszűnik. A kisebbségi töltéshordozók drift árama, mivel a megszűnt diffúziós áram nem kompenzálja, az energiaforráson keresztül záróirányú áramként (visszáram) jelenik meg. A rétegdióda záróirányú (reverse) mérését és feszültség-áram karakterisztikáját az ábra mutatja. A záróirányú áram ( $n \times 0,1 \mu A$ ) a záró feszültségtől ( $n \times 100$  V) gyakorlatilag független, értéke a hőmérséklettől függ (telítési szakasz). A záró feszültség egy kritikus értékénél ( $U_z$ ) a kisebbségi töltéshordozók akkora sebességre gyorsulnak, hogy semleges atomokkal ütközve újabb töltéshordozókat hoznak létre. A visszarám rohamosan, lavinaszerűen megnövekszik (letörési szakasz), és a fejlődő hő a rétegátmenetet tönkretelhe-



ti. Ebben a szakaszban a rétegátmenet feszültsége jelentősen nem változik ezért feszültség stabilizálásra alkalmas (Zener dióda).

### A rétegátmenet hőmérséklet függése

A rétegátmenet hőmérsékletfüggő tulajdonságait a kisebbségi töltéshordozók okozzák. A záróirányú (drift) áram, a hőmérséklet emelkedésével exponenciálisan növekszik. A növekedés mértéke: Ge esetén  $10\% / C^\circ$ , Si esetén  $16\% / C^\circ$ .



A kiürített rétegen áthaladó kisebbségi töltéshordozók csökkentik a potenciálgátat. Mivel a drift áram hőmérsékletfüggő, ezért a hőmérséklet növekedésével arányosan a nyitófeszültség csökken. A csökkenés mértéke: Ge esetén  $-2,2 \text{ mV} / C^\circ$ , Si esetén  $-1,8 \text{ mV} / C^\circ$ .

A megengedhető maximális réteghőmérséklet: Ge esetén  $75 C^\circ$ , Si esetén  $150 C^\circ$ .

### Rétegdiodák fontosabb katalógus adatai

$I_f, I_o$  nyitóirányú áram átlagértéke, mellyel a dióda tartósan, üzemszerűen terhelhető.

$U_f$  nyitóirányú feszültség  $I_f, I_o$  esetén (paraméter: hőmérséklet).

$U_r$  záróirányú feszültség, melyet a dióda tartósan, üzemszerűen elvisel.

$I_r$  záróirányú áram  $U_r$  esetén (paraméter: hőmérséklet).

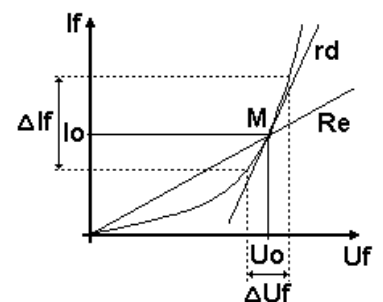
$I_{fm}$  nyitóirányú áram csúcsértéke (paraméter: időtartam).

$R_{th}$  réteg és tokozás közötti termikus ellenállás [ $C^\circ/W$ ].

$P_d$  maximális disszipációs teljesítmény (paraméter: hőmérséklet).

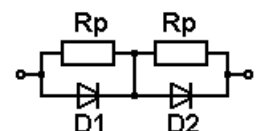
$C_d$  záróirányú rétegekcapacitás.

A rétegdioda egyenáramú ellenállása ( $R_e$ ) annak az ellenállásnak az értéke, mellyel a dióda egy kiválasztott munkapontban egyenáramúlag helyettesíthető. A rétegdioda váltakozó áramú ellenállása ( $r_d$ ) annak az ellenállásnak az értéke, mellyel a dióda egy kiválasztott munkapontban, a kis változásra vonatkozóan, tehát váltakozó áramúlag helyettesíthető. Az  $r_d$  értéke a változások hányadosa azaz  $\Delta U_f / \Delta I_f$ , a munkaponthoz húzott érintő meredeksége.

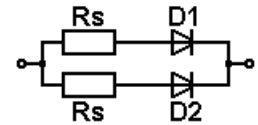


### Diódák hálózatai

Nagyobb záróirányú feszültség esetén több dióda sorba kapcsolható. A diódák eltérő karakterisztikája miatt az egyes diódákon nem oszlanak meg a feszültségek egyenletesen, ezért párhuzamos kiegyenlítő ellenállásokat kell alkalmazni.



Nagyobb nyitóirányú áram esetén több dióda párhuzamosan kapcsolható. A diódák eltérő karakterisztikája miatt az egyes diódákon nem oszlanak meg az áramok egyenletesen, ezért soros kiegyenlítő ellenállásokat kell alkalmazni.



### Különleges félvezető diódák

#### Zener dióda

A rétegátmenet záróirányú működését két jelenség határozza meg:

Lavinaletörés: közepesen szennyezett rétegek esetén a záróirányú feszültség egy kritikus (letörési) értékénél a kisebbségi töltéshordozók akkora sebességre gyorsulnak, hogy semleges atomokkal ütközve újabb töltéshordozókat hoznak létre, a záróirányú áram lavinaszerűen megnő.

Zener letörés: erősen szennyezett rétegek esetén a záróirányú feszültség egy kritikus értékénél ( $U_z$ ) a potenciálgát kiszélesedése töltéshordozókat szabadít ki a félvezető kristályból, a záróirányú áram jelentős mértékben megnő.

Mindkét jelenség közös jellemzője, hogy a letörési feszültség közel állandó értéke mellett a záróirányú áram viszonylag széles tartományban vehet fel értéket, azaz a záróirányú karakterisztikában az áramtengellyel közel párhuzamos jellegű szakasz alakul ki. A Zener dióda mérési elrendezése a rétegdiodáéhoz hasonló. A karakterisztika telítési, könyök és letörési szakaszokkal jellemezhető. Fontosabb katalógus adatok:

$U_z$  névleges letörési vagy könyök feszültség.

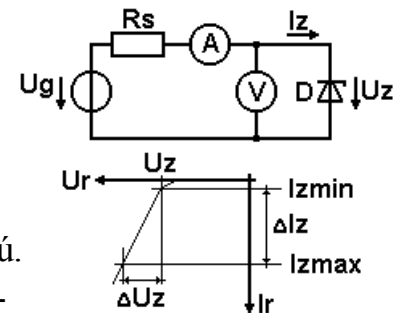
$I_{zmin}$   $U_z$ -hez tartozó áram

$I_{zmax}$  Zener áram maximális értéke egy adott hőmérsékleten

$r_z$  letörési szakasz dinamikus ellenállása =  $\Delta U_z / \Delta I_z$ .

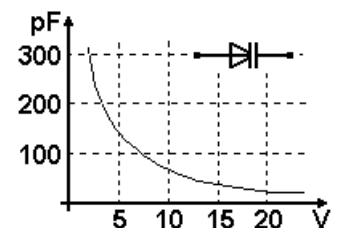
A lavina és a Zener effektus hőmérséklet függése ellentétes irányú.

Az 5,1÷5,6V-os Zener diódák hőmérséklet függetlennek tekinthetők, mivel a két hatás ebben a tartományban kompenzálja egymást.



#### Kapacitás vagy varicap dióda

Egy záróirányban előfeszített rétegátmenet a töltés-kiürített rétegtöltés elrendezés alapján kondenzátornak tekinthető. Az így kialakuló kondenzátor kapacitását a rétegátmenet felülete, a szennyezettség mértéke és a záró feszültség pillanatnyi értéke határozzák meg. A záró feszültség és a rétegek kapacitás közötti kapcsolat nem lineáris, a rétegek kapacitása a záró feszültség négyzetének reciprokával arányos, tehát  $C \approx 1 / U_r^2$ . Az átfogható kapacitás tartomány 1÷300 pF. Fontosabb katalógus adatok: a Cr- $U_r$  ka-

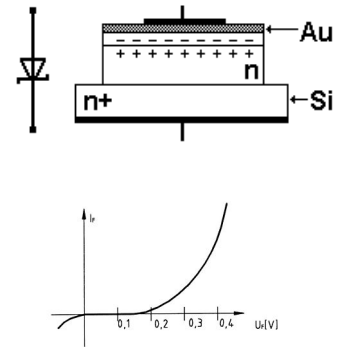




rakterisztika, a  $Q_{cr}$  és az  $I_r$ . Felhasználási terület: rezgőkörök feszültség vezérelt hangolása, URH rádiózás.

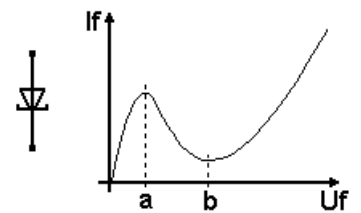
### Schottky dióda

Egy n típusra szennyezett félvezető és a felületére gőzölögtetett fémbevonat között, a p-n rétegátmenethez hasonló tulajdonságú működés alakul ki. A n rétegből a fémrétegbe diffúzióval átlépő elektronok negatív töltésű, a félvezetőben magukra maradt szennyező ionok pozitív töltésű potenciálgátat hoznak létre. A fémrétegre kapcsolt pozitívabb az n rétegre kapcsolt negatívabb feszültség hatására az elektronok diffúziója folyamatossá válik, az átmenet kinyit. A nyitófeszültség értéke  $0,2 \div 0,4$  V. A záróirányú áram pA-es nagyságrendű. A Schottky dióda működési sebessége igen nagy, GHz-es tartományban is használható. Az S jelzésű TTL áramkörökben alkalmazzák telítésgátlásra.



### Alagút vagy Esaki dióda

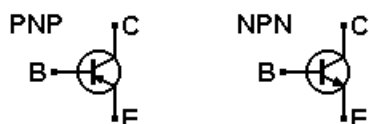
A magára hagyott rétegátmenetben a drift és a diffúziós áram egyensúlyban van. Ha a rétegek igen erősen szennyezettek, akkor a Zener hatás a magára hagyott rétegátmenetben is kialakul, mind a drift, mind a diffúziós áram jelentős mértékű. Kis nyitóirányú feszültség esetén a többségi töltéshordozók csökkentik a potenciálgátat így a Zener hatás miatti drift áram csökken, de a kompenzáló diffúziós áram jelentős része az áramforráson keresztül záródik (0-a szakasz). Növekvő nyitófeszültség megszünteti a Zener hatást ezért a diffúziós áram is csökken (a-b szakasz). A nyitófeszültség további növelése a p-n átmenetre jellemző diffúziós áramot hozza létre. Az alagútdióda jellegzetessége a negatív ellenállású szakasz. A karakterisztika jellemző értékei:  $U_a \approx 50 \div 100$  mV,  $I_a \approx 1$  mA,  $U_b \approx 0,5 \div 0,9$  V és  $I_b \approx 0,2$  mA. Az alagútdiódára kapcsolt kis értékű záróirányú feszültség is. a Zener hatás miatt, nagy áramot hoz létre, ebben az üzemmódban gyakorlatilag nem használható. Felhasználási területe:  $1 \div 100$  GHz tartományban oszcillátor és erősítő kapcsolásokban.



### Réteg vagy bipoláris tranzisztor

A rétegtranzisztor három, PNP vagy NPN elrendezésű, szennyezett rétegből áll.

Rajzjelei:



Kivezetések elnevezése:

- E: emitter
- B: bázis
- C: kollektor

## A tranzisztor fizikai működése

A három réteg közül a középső a nagyon vékony B réteg, gyengén, a két szélő réteg erősen, kb.  $50 \div 1000$ -szeresen szennyezett. A tranzisztor analóg üzemmódjának a feltétele, hogy a BE rétegátmenet nyitóirányban, a CB rétegátmenet záróirányban működjön. A BE rétegátmenetre kapcsolt nyitóirányú feszültség hatására megindul a többségi töltéshordozók diffúziója. Az E rétegből a B rétegbe átjutó lényegesen nagyobb számú többségi töltéshordozók csak kis része tud rekombinálni, mivel a B réteg gyengén szennyezett. A fennmaradó töltéshordozók - melyek a B rétegben kisebbséginek számítanak - a CB réteg záróirányú feszültsége miatt átsodródnak a C rétegbe. A rétegekből ki és belépő töltéshordozók mozgása folyamatos, mert a feszültség forrásokon zárt áramkör alakul ki. Az E rétegből a C rétegbe átsodródó töltéshordozók számát a nyitóirányban működő BE rétegátmenet nyitófeszültségének, illetve nyitóáramának pillanatnyi értéke határozza meg. A CB rétegátmenet drift áramát a BE rétegátmenet diffúziós áramával lehet vezérelni. Ezt a fizikai jelenséget nevezzük tranzisztor effektusnak. PNP rétegrendezés esetén a folyamat ugyanígy lezajlik, csak a feszültség és áramirányok ellentétesek. A kivezetések elnevezésének magyarázata:

a B réteg mindkét rétegátmenet közös része, a viszonyítás alapja ezért BÁZIS

a töltéshordozókat az E réteg bocsájtja ki, emittálja, ezért EMITTER

a töltéshordozókat a C réteg gyűjti be, ezért COLLEKTOR

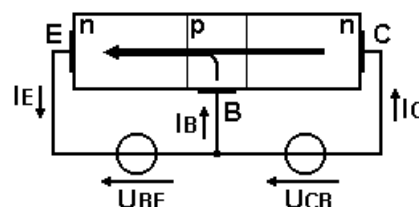
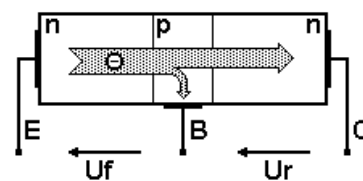
A tranzisztor áramkörileg nemlineáris aktív négy-pólus. Attól függően, hogy melyik kivezetést tekintjük a négy-pólus bemenetén és kimenetén közösnek, három alapkapcsolás létezik. A közös kollektoros alapkapcsolásnak nincs gyakorlati jelentősége.

### Közös bázisú alapkapcsolás

A közös kivezetés a bázis. A bemeneti kapocspár az  $U_{BE}$ - $I_E$ , a kimeneti kapocspár az  $U_{CB}$  -  $I_C$ . A működés feltétele:  $U_{CB} > U_{BE}$ . Az elrendezés egyenáramú működését, állandó feszültségek esetén kialakuló áramok jellemzik. A kimeneti és bemeneti áramok aránya a közös bázisú, egyenáramú vagy nagyjelű áramerősítési tényező.

Jele: A régebben:  $\alpha$   $A = \frac{I_C}{I_E}$

Mivel az  $I_E = I_C + I_B$  ezért az  $A < 1$ .

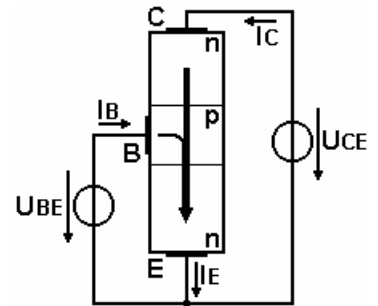


## Közös emitteres alapkapcsolás

A négy pólus közös pontja az emitter. A működés feltétele:  $U_{CE} \gg U_{BE}$ . Az  $U_{BE}$ - $I_B$  a bemeneti kapocspár, az  $U_{CE}$ - $I_C$  a kimeneti kapocspár. Az elrendezés egyenáramú működését, állandó feszültségek esetén kialakuló áramok jellemzik. A kimeneti és bemeneti áramok aránya a közös emitteres, egyenáramú vagy nagyjelű áramerősítési tényező.

Jele: B régebben  $\beta$

$$B = \frac{I_C}{I_B}$$



Mivel az  $I_E \approx I_C$  ezért a  $B \gg 1$ .

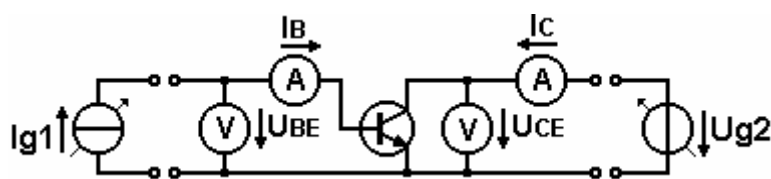
Összefüggések a nagyjelű áramerősítési tényezők között

$$I_E = I_B + I_C \quad A = \frac{I_C}{I_E} = \frac{B \cdot I_B}{B \cdot I_B + I_B} = \frac{B}{B + 1} \quad B = \frac{I_C}{I_B} = \frac{A \cdot I_E}{I_E - A \cdot I_E} = \frac{A}{1 - A}$$

A tranzisztor jellemzése, paraméterei

A tranzisztor kivezetésein üzemközben mérhető feszültségek és áramok függvénykapcsolatai a rétegátmenetek tulajdonságai miatt nem lineárisak. A tranzisztort feszültség-áram karakterisztikákkal és helyettesítő képpel jellemezzük. A gyakorlati felhasználás szempontjából a legnagyobb jelentősége a közös vagy földelt emitteres alapkapcsolásnak van.

A földelt emitteres (FE) karakterisztika felvétele méréssel:



A tranzisztor fizikai működéséből következik, hogy mind az  $U_{BE}$  mind az  $I_C$  függvénye a bázisáramnak és a kollektor-emitter feszültségnek. Ennek megfelelően célszerű független változónak az  $I_B$ -t és  $U_{CE}$ -t, függő változónak az  $U_{BE}$ -t és  $I_C$ -t választani. Mivel a karakterisztika egy térfegyedében csak egy függő és egy független változó kapcsolatát lehet ábrázolni, ezért a másik független változót állandó értéken kell tartani. A mérés során tehát állandó  $U_{CE}$  mellett az  $I_B$  értékekhez tartozó  $U_{BE}$ -t és  $I_C$ -t kell felvenni, majd állandó  $I_B$  mellett az  $U_{CE}$  értékekhez tartozó  $U_{BE}$ -t és  $I_C$ -t kell felvenni. A mérési sorozat eredményeit négy térfegyedű koordináta rendszerben ábrázolva áll elő egy adott típusú tranzisztor FE karakterisztikája.

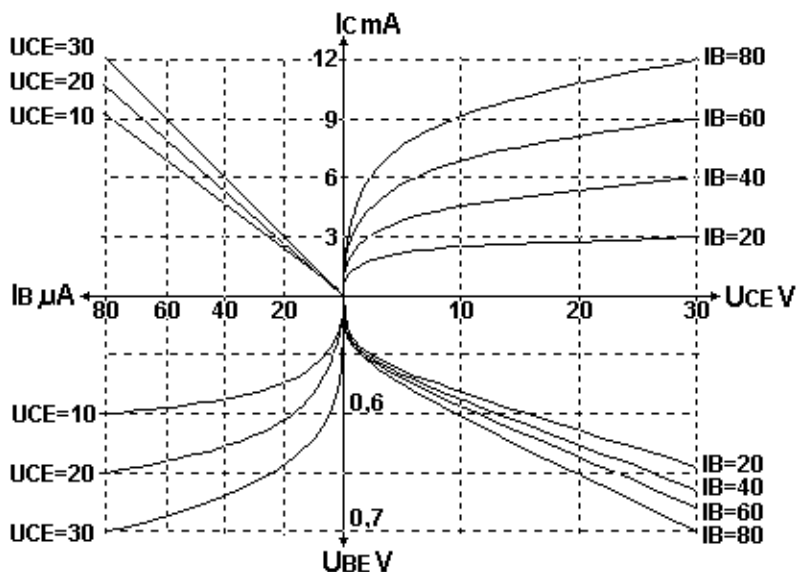
Térnegyedek:

$U_{BE} - I_B$  bemeneti

$I_C - I_B$  transzfer

$I_C - U_{CE}$  kimeneti

$U_{BE} - U_{CE}$  visszahatás



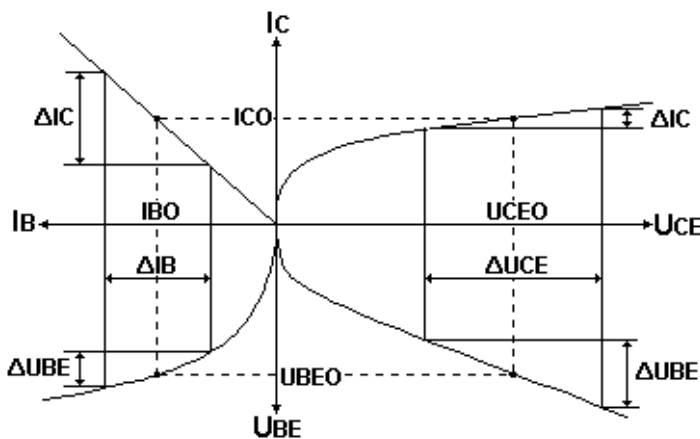
A tranzisztoros áramkörök méretezéséhez, számításához egy munkapont kiválasztására és erre a munkapontra jellemző paraméterekre van szükség. A munkapont tetszőlegesen vagy a felhasználás céljának megfelelően megválasztható és minden térnegyedben bejelölhető. A munkapont környezetében (az állandók mentén) előállított kis változások képezik az alapját a váltakozó áramú paraméterek meghatározásának. A változások mértéke olyan kicsi (közelel a 0-hoz), hogy az alkatrész a munkapont környezetében váltakozó áramúlag lineárisnak tekinthető. A változásokból képzett hányados a paraméterek számszerű értékét adja.

$$\left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE}=0} = h_{11}$$

$$\left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE}=0} = h_{21}$$

$$\left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \right|_{I_B=0} = h_{22}$$

$$\left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} \right|_{I_B=0} = h_{12}$$



A paraméterek tipikus értékei:

$$h_{11} \approx 0.5 \div 5 \text{ k}\Omega$$

$$h_{21} \approx 30 \div 1000$$

$$h_{12} \approx n \times 10^{-2} \div 10^{-4}$$

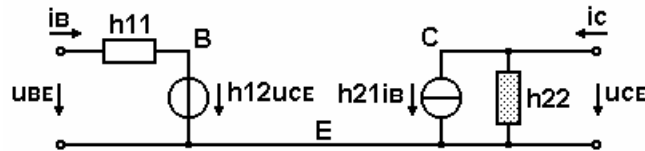
$$h_{22} \approx 10 \div 100 \mu\text{S}$$

A mérés során állandó értéken tartott független változók ( $U_{CE}$  és  $I_B$ ) az üzemszerű működés esetén nem maradnak állandó értéken, azaz a vezérlés hatására szintén változnak. A függő változók ( $U_{BE}$  és  $I_C$ ) vezérléskor kialakuló értékét így a független változók összegződő hatása, superponálódása hozza létre. Ezt fejezi ki a tranzisztor "h" paraméteres egyenlet rendszere:

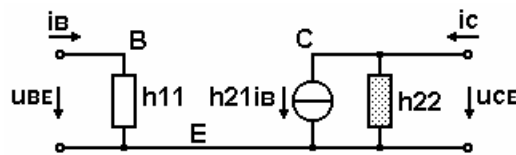
$$u_{BE} = h_{11} \cdot i_B + h_{12} \cdot u_{CE}$$

$$i_C = h_{21} \cdot i_B + h_{22} \cdot u_{CE}$$

Az egyenletrendszer alapján a tranzisztor váltakozó áramú, kisfrekvenciás, kisjelű, "h" paraméteres helyettesítő képe:



A gyakorlatban használható egyszerűsített helyettesítő kép a  $h_{12}$  elhanyagolásával:



A bipoláris tranzisztor fontosabb katalógus adatai

Egyenáramú határ adatok:

$P_{DMAX}$  - az  $I_C$  és az  $U_{CE}$  szorzataként megjelenő teljesítmény amit a tranzisztor üzemszeren, tartósan, károsodás nélkül elvisel.

$U_{CEMAX}$  - kollektor - emitter kivezetésekre kapcsolható legnagyobb feszültség, zárt tranzisztor esetén.

$I_{CMAX}$  - kollektor áram maximális értéke, amit a tranzisztor tartósan, károsodás nélkül üzemszerűen elvisel.

$U_{EBMAX}$  - BE rétegátmenetre kapcsolható legnagyobb záróirányú feszültség.

$U_{CESAT}$  - a telítésbe vezérelt tranzisztor kollektor - emitter szaturációs vagy maradék feszültsége.

$I_{BMAX}$  - a bázisáram megengedett legnagyobb értéke.

Egyenáramú munkaponti adatok:  $U_{CEO}$ ,  $I_{CO}$ ,  $U_{BEO}$ ,  $I_{BO}$

Váltakozó áramú munkaponti adatok:  $h_{11E} \approx U_T / I_B$ ,  $h_{21E} \approx B \approx \beta$ ,  $h_{22E}$

( az  $U_T$  az ún. termikus feszültség, értéke 20 C-on 26 mV)

Határfrekvenciák:

$f_{\alpha}$  - az a frekvencia, ahol a közös bázisú áramrősítési tényező  $\sqrt{2}$ -ed részére csökken.

$f_{\beta}$  - az a frekvencia, ahol a közös emitteres áramrősítési tényező  $\sqrt{2}$ -ed részére csökken.

$f_T$  - az a frekvencia, ahol a közös emitteres áramrősítési tényező 1-re csökken.

Réteg kapacitások:  $C_{CB}$  - nyitott emitter esetén,  $C_{BE}$  - nyitott kollektor esetén

Termikus ellenállás:  $R_{th}$  - réteg és a tokozás közötti termikus ellenállás

## A tranzisztor hőmérsékletfüggése

Egy áramkörben működő tranzisztor melegszik. A rétegátmenet hőmérséklet függése fejezetben ismertetett módon, a hőmérséklet növekedés hatására a BE rétegátmenet nyitófeszültsége csökken, a CB rétegátmenet záróirányú árama növekszik. Mindkét hatás a tranzisztor áramainak növekedését, a munkapont eltolódását eredményezi. A növekvő áramok egyre jobban fűtik a rétegátmenetet, és ha nem alakul ki a környezet felé termikus egyensúly, az alkatrész tönkremegy. Ezt a jelenséget nevezzük hőmegfűtésnek. A hőmérsékletfüggés hatását megfelelő munkapont beállító kapcsolással, visszacsatolással vagy a hőmérséklet stabilizálásával, hűtéssel lehet csökkenteni.

## Térvezérlésű vagy unipoláris tranzisztorok

A térvezérlésű tranzisztorokat angol Field Effect Transistor elnevezésük alapján, rövidítve FET-nek nevezzük. A FET-ek működési elve, egy félvezető csatorna vezetőképességének villamos térrel való vezérlésén alapszik.

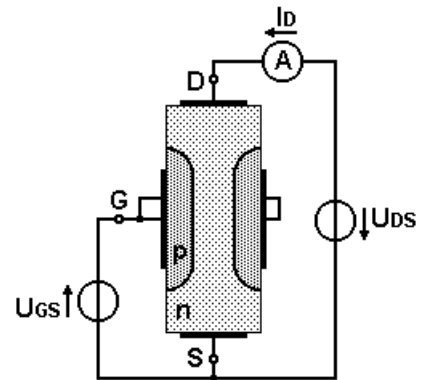
Típusai: a felépítés alapján: réteg vagy JFET-ek,  
szigetelt elektródás vagy IGFET-ek.  
a csatorna szennyezése alapján: n csatornás  
p csatornás.

A FET-ek kivezetéseinek elnevezései:

- S (source) forrás (emitter)
- G (gate) kapu vagy vezérlő elektróda (bázis)
- D (drain) nyelő (kollektor)

## JFET-ek felépítése, működése, jellemzői

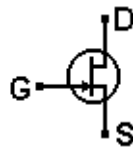
Egy n típusra szennyezett félvezető hasáb két oldalán, erősen szennyezett p típusú réteg van. A pn rétegátmenetek mentén kiürített réteg alakul ki, mely túlnyomórészt a gyengébben szennyezett n típusú részben helyezkedik el. Pozitív  $U_{DS}$  esetén, az n rétegen keresztül, mint csatornán, áram indul meg. A rétegátmenetekre kapcsolt záróirányú feszültség, tehát negatív  $U_{GS}$  hatására a kiürített réteg kiszélesedik, így a csatorna árama, a vezető keresztmetszet beszűkülése miatt csökken. A csatorna a záróirányú feszültség egy meghatározott értékénél teljesen elzárható. Ezt a  $U_p \sim 3 \div 4$  V feszültséget nevezzük elzáródási feszültségnek. Az eszköz erősítő elemként csak a  $-U_{GS}$  tartományban működtethető. Mivel a vezérlő jel egy záróirányban működő rétegátmenetre érkezik, ezért a bemeneti ellenállás gyakorlatilag sza-



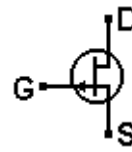
adás. A FET-ek jelentősége, a teljesítmény felvétel nélküli vezérlés.

Rajzjele:

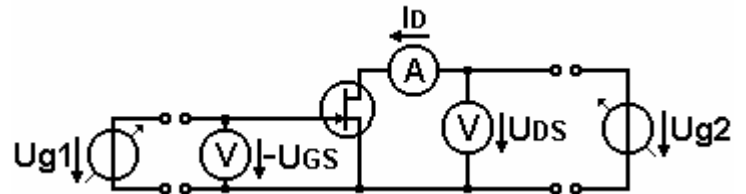
n csatornás



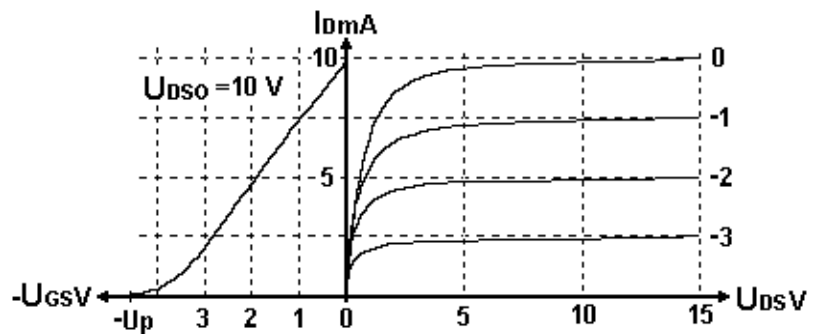
p csatornás



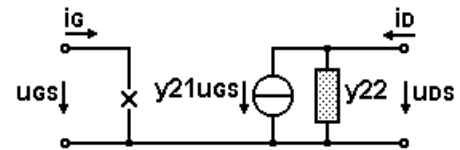
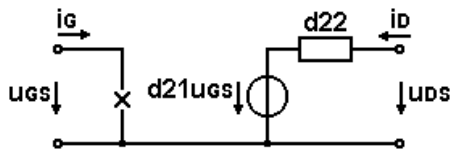
A JFET karakterisztikáinak mérése a bipoláris tranzisztorokhoz hasonlóan történik, de a  $I_G$  áramot szükségtelen mérni.



A JFET transzfer és kimeneti karakterisztikái.  $U_{GS} = 0$  V esetén folyik az  $I_D$  áram, ezért az önvezető FET-ek csoportjába sorolható.



A JFET d és y paraméteres helyettesítő képei



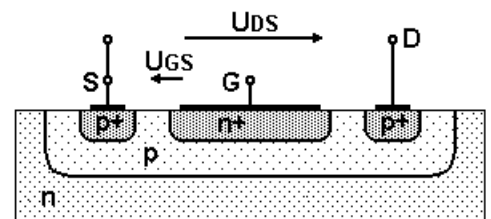
A  $d_{21}$  paraméter az üresjárású feszültség erősítési tényező:

$$d_{21} = \left. \frac{u_{DS}}{u_{GS}} \right|_{i_D=0}$$

Az  $y_{21}$  paraméter a rövidzársú transzfer meredekség (admittancia):

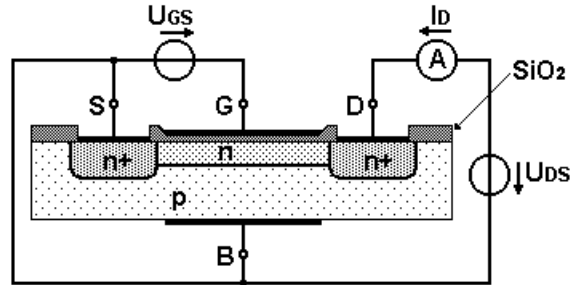
$$y_{21} = \left. \frac{i_D}{u_{GS}} \right|_{u_{DS}=0}$$

A p csatornás JFET-ek működése megegyezik az n csatornáséval, csak a feszültségek polaritása ellentétes. JFET-ek planár, azaz felület szerelt technológiával is készülnek.

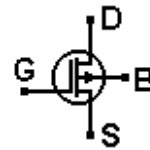
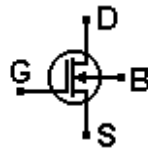


N csatornás kiürítéses típus

Egy p típusra szennyezett félvezető lapka felületén két erősen n típusra szennyezett sziget van, melyeket kb 1  $\mu\text{m}$  vastagágú, gyengébben szennyezett n típusú csatorna köt össze. A vezérlő elektródát a csatornától egy nagyon vékony kb. 0,05÷0,1  $\mu\text{m}$  vastagságú  $\text{SiO}_2$  réteg szigeteli el. Negatív  $U_{GS}$  esetén a csatornában a többségi töltéshordozók száma (kiürítés) és emiatt a csatorna vezetőképessége is, csökken, ellenkező esetben növekszik. A drainre kapcsolt feszültség áramot hoz létre a csatornában, melyet az  $U_{GS}$  feszültséggel lehet vezérelni. A felhasználás szempontjából az eszköz működése megegyezik a JFET-ével. Az eltérés az, hogy a vezérlő elektródán a feszültség polaritása megfordítható. Az eszközt a vezérlő elektróda fém - oxid - félvezető, angolul Metal Oxide Semiconductor miatt, MOSFET-nek is nevezzük.



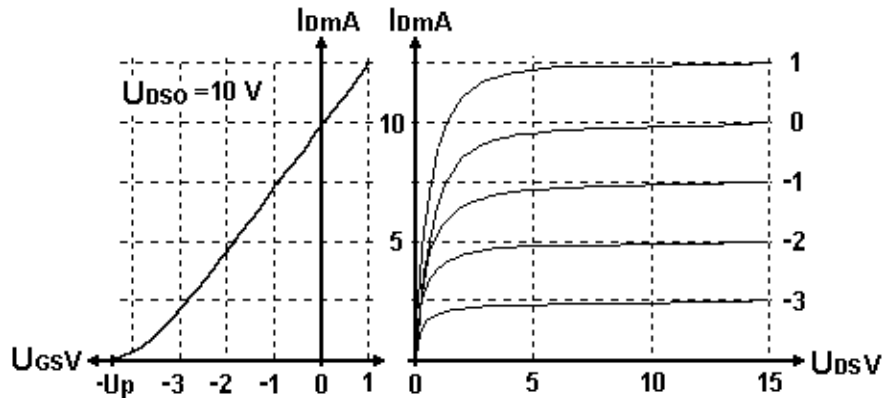
Rajzjele: n csatornás



p csatornás

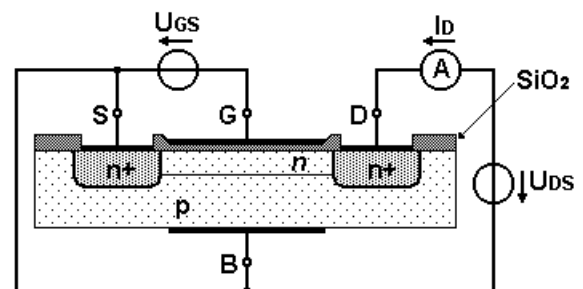
Az n csatornás önvezető MOSFET karakterisztikái

A helyettesítő képek és paraméterek megegyeznek a réteg FET-ével.



N csatornás növekményes típus

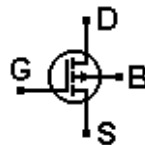
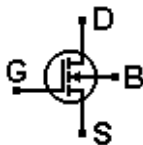
Egy p típusra szennyezett félvezető felületén két erősen n típusra szennyezett sziget van. Elegendő nagyságú pozitív  $U_{GS}$  esetén a vezérlő elektróda környezete kisebbségi töltéshordozókban feldúsul, így kialakul egy ún. növekményes csatorna. Ebben a csatornában hozza létre a drain áramot az  $U_{DS}$  fe-





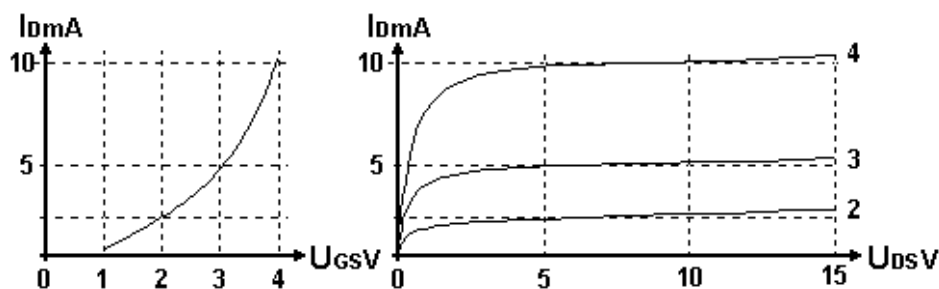
szültség. A növekményes vagy más néven inverziós csatorna vezetőképessége az  $U_{GS}$  pillanatnyi feszültségétől függ.  $U_{GS} = 0V$  esetén rétegátmenetek határán kialakuló kiürített rétegek miatt drain áram nem tud kialakulni, tehát a növekményes IGFET önzáró.

Rajzjele: n csatornás



p csatornás

N csatornás növekményes MOSFET karakterisztikái



A helyettesítő képek és paraméterek megegyeznek a réteg FET-ével.

Az IGFET-ek szubsztrát (hordozó) kivezetését (BULK) általában tokon belül a gyártó vagy tokon kívül a felhasználó a source kivezetéssel közösítheti.

FET-ek előnyei

- rendkívül nagy  $10^7 \div 10^{14} \Omega$  bemeneti ellenállás,
- nincs rekombináció ezért alacsony a zajszint,
- integrált kivitelben nagyon nagy elemsűrűség érhető el,
- vezérelhető ellenállásként is felhasználhatók, inverz  $U_{GS}$  üzemmódban,
- a kimeneti karakterisztikájuk áramgenerátoros jellegű.

\*\*\*