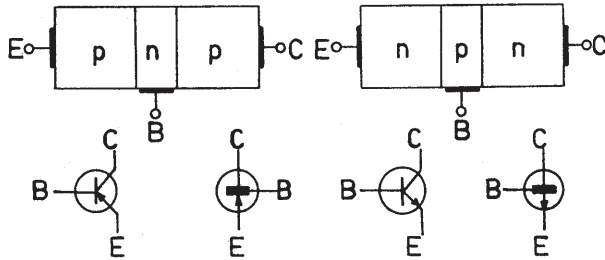


#### 4-4. A rétegranzisztor

##### 4-4.1. A rétegranzisztor felépítése és egyenáramu viselkedése

A rétegranzisztor lényegében félvezető egykristály lemezke, amelyben három különböző módon szennyezett réteg található pnp vagy npn elrendezésben. Az alapanyag germánium vagy szilícium, bár készülnek tranzisztorok egyéb félvezető anyagból is. A rétegranzisztor elvi felépítését és jelképes ábrázolását a 4-42. ábra mutatja.

A tranzisztor rétegei rendben az emitter-, a bázis- és a kollektor-réteg. Az emitter - pnp típusnál - erősen szennyezett p, a bázis gyengén szennyezett n, a kollektor pedig gyengén szennyezett p típusu. Az emitter-bázis átmenetet nyitóirányban, a kollektor-bázis átmenetet záróirányban kell előfeszíteni. A két p réteg átmenete között a távolság kisebb, mint a kisebbségi töltéshordozók szabad utthossza, a bázis-réteg vastagsága ugyanis csak néhány  $10 \mu$ . (A későbbiek folyamán is a



4-42. ábra

pnp és npn rétegranzisztor elvi felépítése és jelképes ábrázolása

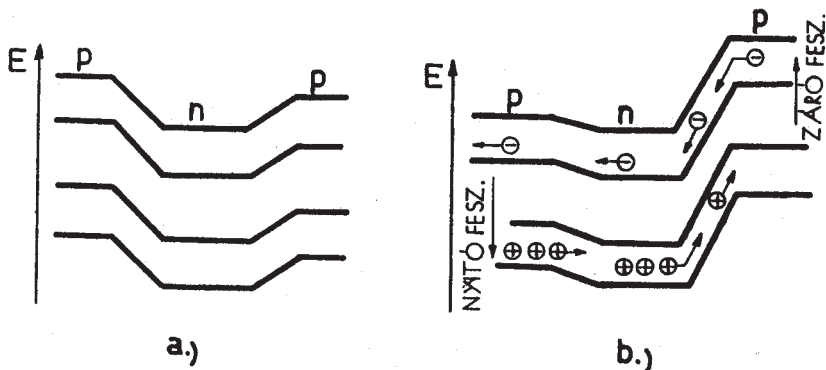
pnp tranzisztorral fogunk foglalkozni, de ugyanezek vonatkoznak az npn tranzisztorokra is, csak a lyukak és elektronok valamint a feszültségpolaritások szerepet cserélnek.)

Az emitter-bázis átmenet a nagy szennyezési koncentráció különbség miatt jó hatásfoku emitterként működik, lyukakat injektál a bázisrétegbe. Mivel a bázisréteg igen vékony, az oda injektált lyukak diffúzióval eljutnak a kollektor-bázis átmenetig, ott a záróirányú tér elfogja és a kollektor kontaktusa felé mozgatja őket. Az emitternek igen kicsiny, a kollektornak pedig nagy az ellenállása - ami az erősen eltérő szennyezési koncentrációból következik.

Az emitter-bázis közé kapcsolt feszültség alacsony (0,1 V nagyságrendű). Mivel a kollektor és a bázis gyengén szennyezett, a közöttük lévő átmenet tértöltési tartománya széles, így erre viszonylag magas (10 V nagyságrendű) zárófeszültséget adhatunk, anélkül, hogy letörési jelenségek állnának elő. A bázisba injektált és a kollektorba átdiffundált lyukak kis ellenállású áramkörből nagy ellenállású áramkörön át magas feszültség szintre jutnak, ezért nagy teljesítmény- és feszültségerősítés jön létre. A megfelelő energiasávdigramokat a 4-43. ábrán láthatjuk.

Az emitterből a bázis felé folyó diffúziós áram az átmenetre kapcsolt nyitóirányú feszültséggel tág határok között változtatható, ezáltal a bázisból a kollektorba folyó áram is nagymértékben változik. Tehát az első átmenet árama hat a második átmenet áramára. Ezt a hatást tranzisztorhatásnak nevezzük.

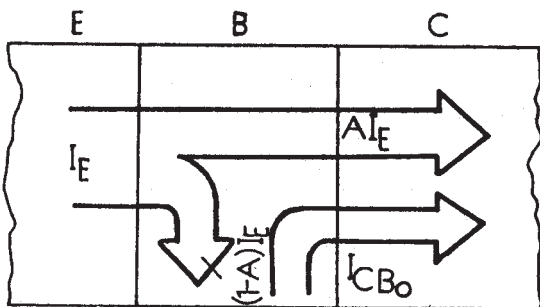
Ha a tranzisztoron átfolyó áramokat vizsgáljuk (4-44. ábra), a következő megállapításokat tehetjük: a külső emittercsatlakozáson befolyó teljes áram  $I_E$ . Az emitteráram létrehozásában elektronok is részt vesznek, továbbá bizonyos mértékű rekombináció is van a bázisban, ezért a kollektorátmeneten csak az emitteráram egy része jut át,  $\alpha I_E$ , ahol  $\alpha$



4-43. ábra

Energiasávok pnp rétegtranszisztorban:  
 a) külső feszültség nélkül, b) külső feszültséggel

a tranzisztor nagyjelű vagy egyenáramú áramerősítési tényezője. A 1-nél kisebb szám, de ahhoz igen közel eső érték, 0,9...0,995 és a munkapont környezetében első közelítésben állandónak tekinthető. (Ha pl. a bázis szennyezettsége két nagyságrenddel kisebb, mint az emitteré, úgy az emitter áram 1%-át elektronok teszik ki. Mivel csak a lyukáramnak van hasznos szerepe, az  $\beta$  értéke 0,99 lenne, ha nem lépne fel rekombináció.)



4-44. ábra

A tranzisztor áramai működés közben

A lezárt bázis-kollektor átmeneten átfolyik a kisebbségi töltéshordozókból álló záróirányú vagy kollektor-visszáram,  $I_{CBo}$  is, így a kollektorátmeneten átfolyó teljes áram

$$I_C = \beta I_E + I_{CBo} \quad (4-18)$$

A folytonossági törvényből következik, hogy a bázisvezetéken kifolyó áramnak egyenlőnek kell lennie az emitteráram és a kollektoráram különbségével:

$$I_B = I_E - I_C$$

ami az előbbi egyenlet felhasználásával:

$$I_B = I_E (1 - A) - I_{CBo} \quad (4-19)$$

$I_E$  értékét (4-18) összefüggésből kifejezve és behelyettesítve a (4-19) egyenletbe, a kollektoráramra

$$I_C = \frac{A}{1 - A} I_B + \frac{1}{1 - A} I_{CBo} = B I_B + (1 + B) I_{CBo} \quad (4-20)$$

összefüggés adódik. Itt  $B = \frac{A}{1 - A}$  a bázisáramra vonatkozó nagyje-lű, illetve egyenáramu áramerősítési tényező, amely 1-nél jóval nagyobb érték.

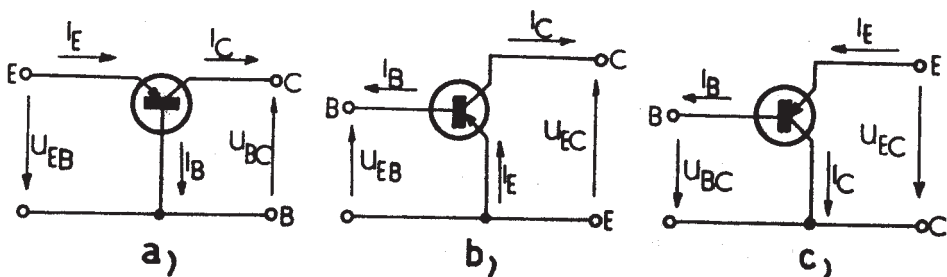
A tranzistor egyenáramai közötti kapcsolat a valóságban általában nem lineáris. Az egyenáramok viszonya nem egyezik meg az áramok kis változásainak viszonyával. Ezért a gyakorlatban megkülönböztetik az egyenáramu és váltakozó áramu áramerősítési tényezőket, amelyekre az  $\alpha$  és  $\beta$  jelöléseket használják és ezek definíció szerint:

$$\alpha = \frac{\partial I_C}{\partial I_E} \quad \text{és} \quad \beta = \frac{\partial I_C}{\partial I_B} \quad (4-21)$$

Igazolható, hogy adott munkapontban  $A \approx \alpha$  és  $B \approx \beta$  [41].

Mielőtt tovább elemeznénk a rétegztranzistor egyenáramu viselkedését, felhívjuk a figyelmet arra, hogy a tranzistorokat, mint erősítő elemeket, három különböző alapkapsolásban használják:

- Közös bázisu kapcsolásról van szó, ha a bázispont a bemenet és kimenet közös pontja és  $I_E$  a bemenő áram (4-45.a) ábra).
- Közös emitterű kapcsolásról beszélünk akkor, ha az emitter a közös pont és  $I_B$  a bemenő áram (4-45.b) ábra).
- Közös kollektoru a kapcsolás, ha a közös pont a kollektor és  $I_B$  a bemeneti áram (4-45.c) ábra).



4-45. ábra

Tranzisztorok alapkapcsolásai:

a) közös bázisu, b) közös emittertü, c) közös kollektoru

Az ábrák alapján a tranzisztort négy pólusnak tekinthetjük, amelynek működését négy paraméterrel jellemezhetjük. Két paraméter tetszőleges megválasztása már meghatározza a másik két paraméter értékét. Általában a be- és kimenetre kapcsolt feszültségeket valamint a be- és kimeneten folyó áramokat szokás paraméterként felvenni.

A későbbiek folyamán vizsgálatainkat főleg a közös emittertü kapcsolásra korlátozzuk, mivel ez a leggyakrabban használt alapkapcsolás.

A földelt vagy közös emittertü kapcsolásban az  $U_{BE}$ ,  $U_{CE}$ ,  $I_B$  és  $I_C$  mérhető mennyiségek közötti függvénykapcsolatot szokták megadni a következő csoportosításban:

$$U_{BE} = f(I_B, U_{CE})$$

$$I_C = f(I_B, U_{CE})$$
(4-22)

és ezeket karakterisztikák alakjában ábrázolják.

Az áramerősítési tényező eddigi jellemzéséhez néhány kiegészítő megjegyzést kell tennünk. A valóságban a bázisban rekombinálandó lyukakhoz szükséges elektronokat a bázisáram biztosítja. Nagyobb lyukáram esetén a bázisba beáramló elektronok száma is növekszik, azaz változik a bázisban az elektronsűrűség. Az elektronsűrűség növelése kezdetben növeli az áramerősítési tényező értékét, a további elektronkoncentráció növekedése viszont már csökkenő áramerősítést eredményez [33, 41]. Az áramerősítési tényező ( $\alpha$  és  $\beta$ ) tehát csak valamely munkapont környezetében tekinthető állandónak,  $I_E$  növelésével először növekszik, majd erőteljesen csökken.

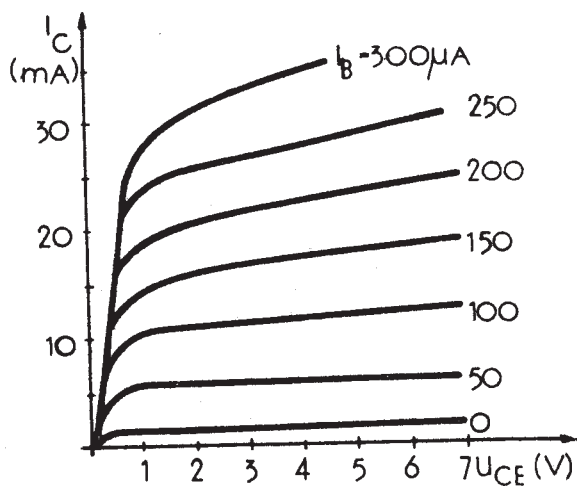
Nem lehet figyelmen kívül hagyni azt a körülményt sem, hogy a hatásos bázisréteg vastagsága kisebb, mint a tényleges, geometriai méretekkel számított bázisvastagság, mivel abból le kell vonni a bázisban ta-

lálható kiürített réteg szélességét. Elsősorban a kollektornál található záróréteg szélessége számottevő, amely a záróirányu kollektorfeszültség növelésével nő. Ez az aktív bázisréteg vastagság csökkentését eredményezi, ami egyrészt kihat a bázisréteg ellenállásának értékére, de ami ennél lényegesebb, befolyásolja az emitter- és kollektoráramot. Az aktív bázisréteg-vastagság változása észrevehetően befolyásolja az áramerősítési tényező értékét is. Például csökkenő vastagság esetén ezzel arányosan csökken a bázisrétegben lejátszódó rekombináció mértéke, ennek megfelelően több töltéshordozó juthat át a kollektorrétegbe. A fenti okok miatt érthetővé válik, hogy a kollektorfeszültség növelése miért eredményezi az áramerősítési tényező növekedését.

A részletesebb számításokat mellőzve [41] a következő megállapításokat tehetjük, amelyek összhangban vannak a mérési eredményekkel:

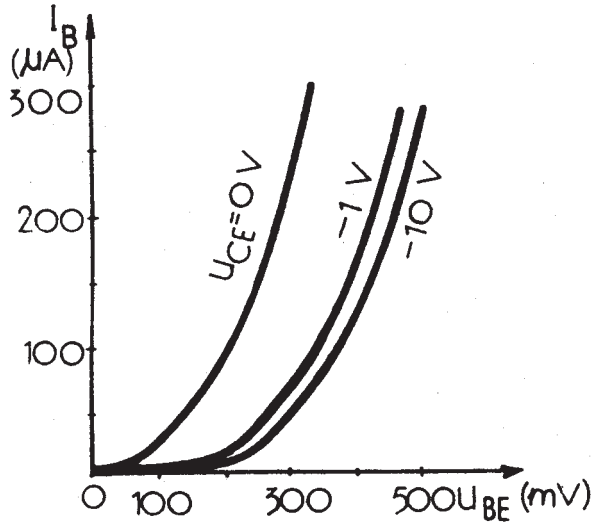
- a) a záróirányu kollektorfeszültség növelése kismértékben növeli a kollektoráramot,
- b) a kollektorfeszültség változása a nyitóirányu emitteráramot és a bázisáramot is befolyásolja, amit a bemeneti áram-feszültség görbéken a kollektorfeszültségnek paraméterként való ábrázolásával szokás ábrázolni,
- c) az áramerősítési tényező áram- és feszültségfüggése folytán az átviteli karakterisztikák nem lineárisak.

A 4-46., 4-47., 4-48. ábrákon bemutatjuk a tranzisztor közös emitterü kapcsolásához használt karakterisztikákat.



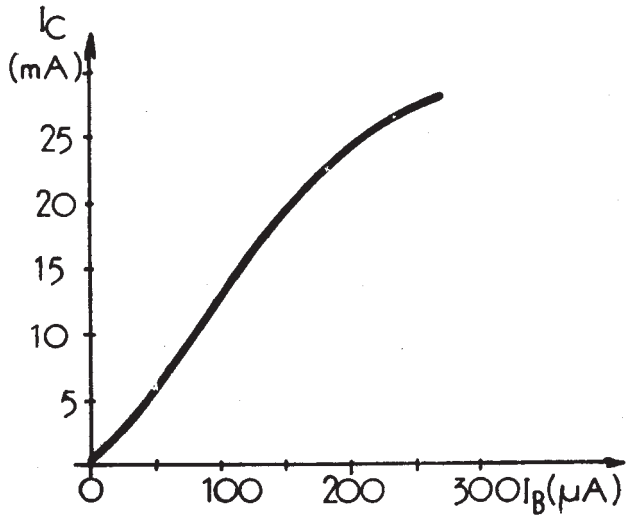
4-46. ábra

A tranzisztor kollektoráram - kollektorfeszültség (kimeneti) karakterisztikái közös emitteres kapcsolásban



4-47. ábra

A tranzisztor bázisáram-bázisfeszültség (bemeneti) karakterisztikája a kollektorfeszültség befolyásának feltüntetésével



4-48. ábra

A kollektoráram függése a bázisáramtól (átviteli karakterisztika) közös emitteres kapcsolásban

#### 4-4.2. A tranzisztor kisjelű működése és helyettesítő képe

A tranzisztor egyik alkalmazási területe - a triódához és a többbrácsos csövekhez hasonlóan - kis jelek alakhü erősítése. A kisjelű vezérlések elméletében lineárisnak tekinthetjük a vezérlés folyamatát, vagyis a vezérlő és a vezérelt mennyiség közötti összefüggést hatványsorral közelítve csak az elsőfoku tagot vesszük figyelembe. A vezérlő és vezérelt jelet az adott munkapontban fellépő kicsiny változásnak tekinthetjük, a köztük levő kapcsolat a vizsgált mennyiségek közötti függvény első differenciálhányadosa. Ebben az esetben a tranzisztor lineáris hálózatként viselkedik, a munkapont környékén a karakterisztikákat egyenes darabokkal helyettesíthetjük. A helyettesítő áramkör tehát lineáris kapcsolási elemekből építhető fel. A tranzisztor aktív eszköz, tehát a helyettesítő kör áram- vagy feszültséggenerátorokat is tartalmaz. A helyettesítő áramkör megszerkesztésekor az egyenáramu mennyiségek fel-tüntetését mellőzzük.

A gyakorlatban többféle helyettesítő képet használnak, [19], [41] az egyes helyettesítő képek paraméterei között a kapcsolat egyértelműen leírható és sok helyen, táblázatokban megtalálható.

Mivel a tranzisztor kisjelű viselkedése lineáris és alapkapcsolásai egy-egy bemenő és kimenő kapcsolárral rendelkeznek, alkalmazhatjuk a lineáris hálózatokra vonatkozó négy-pólus helyettesítő képeket. Leggyakrabban a (4-22) egyenletekhez hasonló függvénykapcsolatokból indulunk ki.

$$\begin{aligned}U_1 &= f(I_1, U_2) \\ I_2 &= g(I_1, U_2)\end{aligned}\tag{4-23}$$

Ezek a kapcsolatok két független változó függvényei és a teljes differenciált képezve a következőket kapjuk:

$$\begin{aligned}\Delta U_1 &= \frac{\partial U_1}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} \Delta U_2 \\ \Delta I_2 &= \frac{\partial I_2}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} \Delta U_2\end{aligned}\tag{4-24}$$

Az egyenleteket egyszerűbb alakra hozhatjuk, ha a differenciális mennyiségek helyébe időfüggő mennyiségeket, a parciális deriváltak helyébe pedig a  $h$  paramétereknek nevezett együtthatókat helyettesítjük. Ezáltal a (4-24) egyenletek a következő alakba írhatók:

$$u_1 = h_{11} i_1 + h_{12} u_2$$

$$i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} u_2$$
(4-25)

Az előbbi egyenletekből következnek a paraméterek jelentése:

$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0}$$

Bemenő ellenállás rövidrezárt kimenet esetén

$$h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_1=0}$$

Kimenőfeszültség visszahatása a bemenetre, nyitott bemenő kapcsok esetén;

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0}$$

Áramerősítés rövidrezárt kimenetnél;

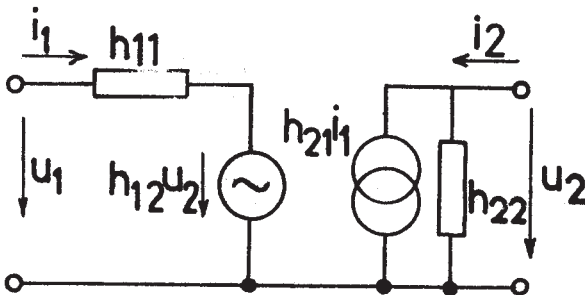
$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0}$$

Kimenő vezeték nyitott bemenetnél.

Mint a  $h$  paraméterek jelentéséből látható, közöttük egyesek szerepelnek ellenállás, vezeték dimenziójú valamint dimenziótlan mennyiségek, ezért hibrid paramétereknek is nevezzük őket.

Ha a  $h$  paramétereket a földelt- vagy közös emitteres kapcsolásra vonatkoztatjuk, akkor azt az  $e$  index segítségével jelöljük, pl.  $h_{11e}$ ,  $h_{12e}$ , stb.

A paraméterek dimenzióit is figyelembe véve felrajzolható a tranzisztor kisjelű  $h$  paraméteres helyettesítő képe (4-49. ábra).



4-49. ábra

A tranzisztor kisjelű  $h$  paraméteres helyettesítő képe



A  $h$  paraméterek tipikus adatai kisteljesítményű tranzisztorokra közös emitterű kapcsolásban:

$$h_{11e} = 0,5 \dots 3 \text{ kohm}$$

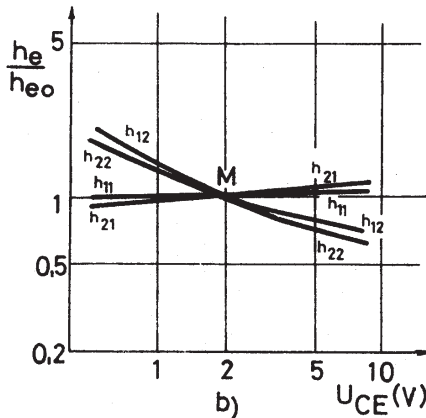
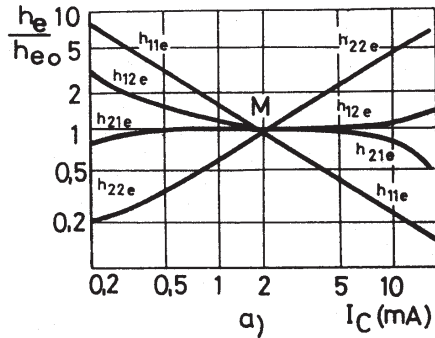
$$h_{12e} = 1 \cdot 10^{-4} \dots 50 \cdot 10^{-4}$$

$$h_{21e} = 20 \dots 250$$

$$h_{22e} = 10 \dots 200 \mu\text{S}$$

A  $h$  paraméterek értékeit a katalógusok egy javasolt munkapont-ra adják meg. Ettől eltérő munkapontban a paraméterek lényegesen más értékeket vehetnek fel. A paraméterek munkapontfüggését a gyártó cégek a 4-50. ábrán látható módon esetenként megadják [3, 30]. Az ábrákon a  $h$  paraméterek egyre normált alakjai szerepelnek. A nulla index a javasolt munkapontra érvényes paramétereket jelképezi.

A  $h$  paraméterek munkapontfüggését megfelelő fizikai modellek alapján számítani is lehet, amely számos irodalomban megtalálható [3, [41].



4-50. ábra

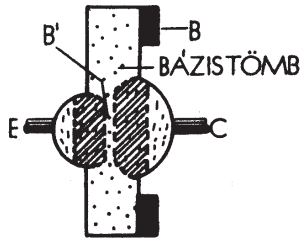
A  $h_e$  paraméterek változása:

a) kollektoráram, b) a kollektorfeszültség függvényében

#### 4-4.4. A tranzisztorok nagyfrekvenciás viselkedése

Ha a tranzisztorra nagyfrekvenciás jelet adunk, már nem hagyhatjuk figyelmen kívül a tranzisztor tulajdonságainak frekvenciafüggését. Mindezekelőtt a bázis-tömb-ellenállás hatásáról kell beszélnünk. A 4-56. ábrán bemutatott ötvözött rétegranzisztor felépítésén jól látható, hogy a bázisáramnak a B báziskivezetéstől az emitter-kollektor közötti B' aktív bázisrétegig - ahol a tényleges, tranzisztorra jellemző folyamatok lezajlanak - hosszú utat kell megtennie. Emiatt számolnunk kell a báziskivezetéstől az aktív bázisrétegig terjedő bázis-tömb-ellenállással is, amelyet legtöbb helyettesítő kapcsolásban  $r_{bb'}$ -vel jelölnek. Az  $r_{bb'}$  tulajdonképpen a tranzisztor bemeneti ellenállását növeli, de nagyfrekvencián egyéb problémát is okoz. A két pn átmenet rétegekapacitásával frekvenciafüggő osztóláncot alkot, így hátrányos hatása a frekvencia növelésével egyre jobban jelentkezik.

A rétegekapacitások mellett frekvenciafüggést okoz a töltéshordozóknak bázisrétegben történő véges áthaladási ideje, a futási idő is. Az



4-56. ábra

Ötvözött rétegranzisztor:

B bázis-fémkontaktus, C kollektor-fémkontaktus, E emitter-fémkontaktus, B' aktív bázisréteg

emitterből a bázisba jutó töltéshordozók nagy része a kollektor felé diffundál, és ez a diffúziós áramlás igen lassu. A véges futási idő következtében a bázisnak töltéstároló tulajdonságai vannak. E tulajdonságok a helyettesítő képben - korlátozott pontossággal - a diffúziós- és rétegekapacitások figyelembevételével RC tagokkal modellezhetők. Sokkal pontosabb eredményt ad azonban, ha a futási időt megfelelő késleltető művonal segítségével vesszük figyelembe. Az ötvözött tranzisztorokban a nagyfrekvenciás működést elsősorban a nagy futási idő korlátozza.

Nagyfrekvencián - ahol a bemenő jel periódusideje összemérhető a töltéshordozók véges futási idejével - a  $g_m$  merekség komplex

merekség komplex

meneti jelek között fázistolást eredményez. Ezen kívül nagymértékben lecsökken a tranzisztor erősítése is. Ennek egyik oka abban keresendő, hogy a bázis-emitter és a bázis-kollektor átmenetek általában nem párhuzamosak, ezért a töltéshordozók különböző hosszúságú pályákon jutnak el a kollektorba. Ennek következtében különböző időtartamok alatt érik el a kollektort, így csökken a kimeneti jel amplitúdója.

A gyári adatlapok, katalógusok feltüntetik azt a határfrekvenciát, ameddig a tranzisztor még aktív elemként működik.

A határfrekvenciára többféle definíció található az irodalomban:

- $f_\alpha$  az a frekvencia, amelyen a földelt bázisu kapcsolásban működtetett tranzisztor  $\alpha$  áramerősítési tényezője az 1 kHz kisfrekvencián mérhető  $\alpha_0$  értéknek a 0,707-szeresére csökken;
- $f_\beta$  (béta-határfrekvencia) az a frekvencia, amelyen a földelt emitterű kapcsolásban működő tranzisztor  $\beta$  áramerősítési tényezője az 1 kHz-en mérhető  $\beta_0$  értéknek 0,707-szeresére csökken. (Ezen a frekvencián a fázistolás  $45^\circ$ .)

Az egységnyi erősítésnek megfelelő határfrekvencián azt a frekvenciát értjük, amelyen a földelt emitteres kapcsolásban működő tranzisztor  $\beta_0$  áramerősítési tényezője 1-re csökken. Ha ezt a mennyiséget

módrással állapítják meg, akkor  $f_1$ -gyel, ha pedig extrapolációval,

akkor  $f_{1e}$ -vel jelölik.

A katalógusokban sok esetben megadják azt a legnagyobb un. maximális oszcillációs frekvenciát ( $f_{\max}$  vagy  $f_{\text{oszc}}$ ) is, amelyen a tranzistorral még csillapítatlan rezgések kelthetők. Adott tranzisztornál, valamennyi határfrekvencia-adat közül ez a legmagasabb értékü.

A határfrekvencia számítása hosszadalmas, bonyolult feladat [37], ezért csak egy - az előbbieken vázolt nagyfrekvenciás tulajdonságokból levezetett - összefüggést ismertetünk:

$$f_{\beta} \cong \frac{f_{\infty}}{\beta + 1} \quad (4-36)$$

Ebből az összefüggésből megállapítható, hogy nagyfrekvenciás alkalmazásokra a földelt emitterű kapcsolás kevésbé alkalmas, mint a földelt bázisu, mert határfrekvenciája sokkal kisebb. Ezt a hátrányt azonban részben kiegyenliti az a tény, hogy a földelt emitterű kapcsolatban a tranzisztor áramerősítési tényezője sokkal nagyobb, mint a földelt bázisu esetben. Ezért a gyakorlatban, nagyfrekvencián mindkét kapcsolást egyaránt használják.

Az alábbiakban tájékoztatásul ismertetjük, hogy az aktiv bázisréteg és a kollektor ill. emitter közötti kapacitások nagysága kisteljesítményű tranzisztoroknál milyen értéktartományba esnek [36]:

kisfrekvenciás tranzisztoroknál ( $f_{\infty} = 0,3 \dots 2$  MHz)

$$C_{b'e} = 1 \dots 10 \text{ nF}$$

$$C_{b'c} = 20 \dots 50 \text{ pF}$$

közepes frekvenciájú tranzisztoroknál ( $f_{\infty} = 2 \dots 30$  MHz)

$$C_{b'e} = 0,3 \dots 1 \text{ nF}$$

$$C_{b'c} = 5 \dots 20 \text{ pF}$$

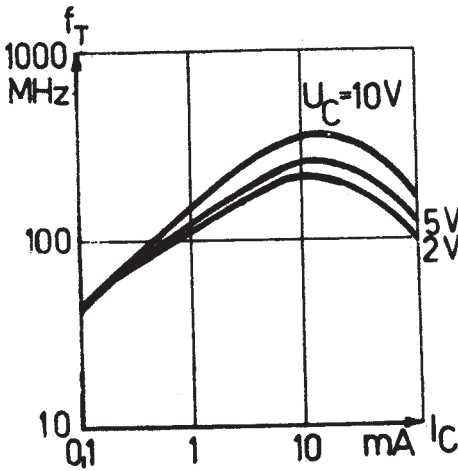
nagyfrekvenciás tranzisztoroknál ( $f_{\infty} = 30 \dots 1000$  MHz)

$$C_{b'e} = 10 \dots 100 \text{ pF}$$

$$C_{b'c} = 1 \dots 5 \text{ pF}$$

A (4-36) egyenletből - a paraméterek munkapontfüggése miatt - az is látható, hogy a határfrekvencia szintén munkapontfüggő mennyiség. A 4-57. ábrán bemutatjuk egy nagyfrekvenciás tranzisztor  $f_T$  határfrekvenciáját a kollektoráram függvényében, különböző kollektorfeszültségek mellett.

#### 4-4.5. A tranzisztor termikus tulajdonságai



4-57. ábra

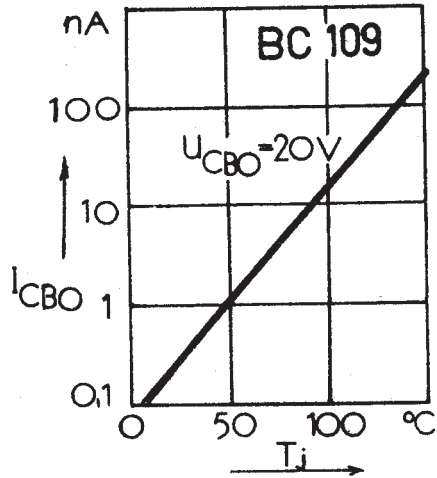
Az  $f_T$  határfrekvencia munkapontfüggése különböző kollektor-feszültségek esetében

4-5. ábrán. Látható, hogy a hőmérséklet növekedésével nő az azonos nyitóirányú feszültséghez tartozó nyitóirányú áram. Hasonló jelenségek játszódnak le a tranzisztorban is (4-58. ábra). Germánium alapú tranzisztoroknál azzal kell számolnunk, hogy a kollektor záróirányú áram  $1^\circ\text{C}$  hőmérsékletnövekedés esetén mintegy 10%-kal nő meg, míg szilícium alapú tranzisztoroknál kb. 15%-os növekedésre számíthatunk. A kollektor visszáram növekedése azért veszélyes, mert a közös emitteres kapcsolásban a (4-20) egyenlet szerint  $(1 + \beta) I_{CBo}$  szerepel a kollektoráramban, tehát  $I_{CBo}$  változásának  $(1 + \beta)$ -szeresével változik meg az  $I_C$ .

Nagy erősítésű tranzisztoroknál ez jelentős kollektoráram változást okoz. Ennek következtében a hőmérséklet növekedésével nagyobb áramok felé tolnak el a kimeneti karakterisztikák (4-59.

A tranzisztorok, mint félvezető kristályból készült eszközök, elektromos tulajdonságai jelentős mértékben függenek a kristály hőmérsékletétől. A kristály hőmérséklete viszont attól függ, hogy mekkora a tranzisztoron disszipált teljesítmény, és milyenek a hűtési viszonyok: a környezet hőmérséklete valamint a hővezetés. A kristály hőmérsékletének változásai jelentős változásokat idéznek elő a tranzisztor áramai-ban, megváltoztatják a munkapontját és erősítését.

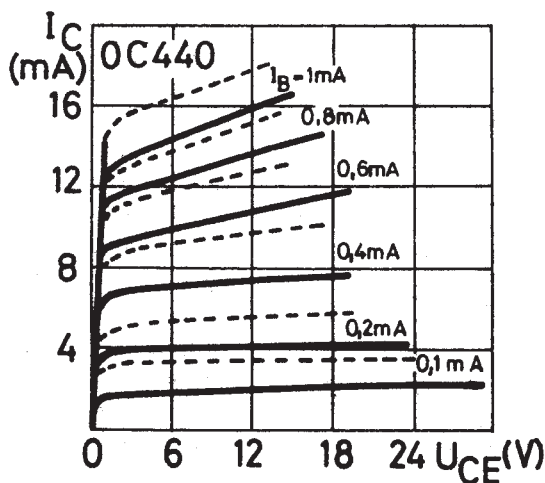
A rétegdioda záró- és nyitóirányú karakterisztikáinak hőmérsékletfüggését már bemutattuk a



4-58. ábra

Szilícium tranzisztor kollektor-bázis maradékáramának réteghőmérséklettel való függése

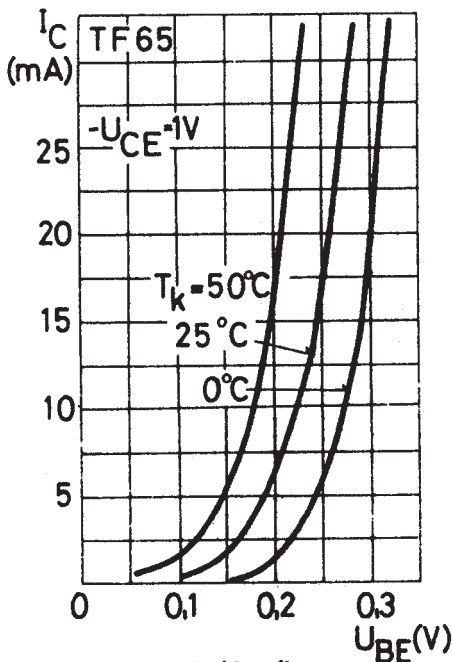
ábra). A bázis-emitter dióda nyitóirányú áramának növekedése - állandó bázis-emitter feszültség mellett - további kollektoráram növekedést eredményez (4-60. ábra).



4-59. ábra

Germánium tranzisztor kimeneti karakterisztikáinak hőmérsékletfüggése: folytonos vonal 25 °C, szaggatott vonal 75 °C környezeti hőmérsékleten

hőmérsékletnövekedés hatására egy nem kívánt pozitív visszacsatolás lép fel. A kollektoráram kismérvű növekedése ugyanis megnöveli a disszipációt, ezzel a kollektor-bázis átmenet hőmérsékletét, és a kollektor visszáramot, amely a kollektoráram további növekedését eredményezi. Állandó  $U_{BE}$  feszültség esetén a kollektoráram még jobban növekszik. Az egymást erősítő változások egy egyensúlyi állapot eléréséhez vezetnek. Egy olyan egyensúlyi hőmérséklethez, amelyen a tranzisztor a disszipációs teljesítményét hővezetés vagy hőszugárzás útján át tudja adni a környezetnek. Előfordulhat, hogy az egyensúlyi hőmérséklet magasabb, mint amekkorát a tranzisztor üzemszerűen, károsodás nélkül kibír. Ilyenkor a tranzisztor szerkezeti felépítésében maradandó változások léphetnek fel, a tranzisztor esetleg tönkre is mehet. Ezt a jelenséget szaknyelven hőmegfűtésnek nevezzük. A hőmegfűtés tranzisztoros áramkörökben a munkapont helyes megválasztásával és stabilizálásával, valamint a hűtési viszonyok javításával minden esetben elkerülhető. A katalógusok eleve megadják a tranzisztoron disszipálható legnagyobb teljesítmény ( $P_{tot}$ ) értékét valamint annak külső hőmérséklettől



4-60. ábra

Tranzisztor kollektoráramának változása a bázis-emitter feszültség függvényében különböző külső hőmérsékletek esetében

fűtés a szilícium tranzisztoroknál csak nagyon ritkán következik be.

#### 4-4.6. A tranzisztorok zaja

Az erősítendő jellel együtt zajnak nevezett, nemkívánatos zavarok, szabálytalanul ingadozó feszültségek vagy áramok is jelen vannak az elektronikus eszközökben. Ezek különösen olyankor kellemetlenek, amikor a vizsgálandó jel amplitudója nagyon kicsi, mert ilyenkor teljesen elnyomhatják, elfedhetik a hasznos jelet. A jelátvitel zajosságának jellemzésére az ún. jel/zaj viszony szolgál, amely megmutatja, hogy az erősítő kimenetén mérhető hasznos jel teljesítménye hányszorosa a zajteljesítménynek. Ezt az arányszámot legtöbbször decibel (dB)-ben adják meg. A zaj itt nem csak az erősítőből származó saját-zaj, hozzátartozik hozzá a külső zajforrások hatása is, mint pl. légköri zavarok, elekt-

való függését (4-61. ábra).

Teljesítmény-tranzisztoroknál - a teljesítmény-diódákhoz hasonlóan - hűtőbordát kell alkalmaznunk, amelynek nagysága, felületi kiképzése nagymértékben elősegíti a tranzisztoron disszipált hőmennyiség elvezetését (4-62. ábra).

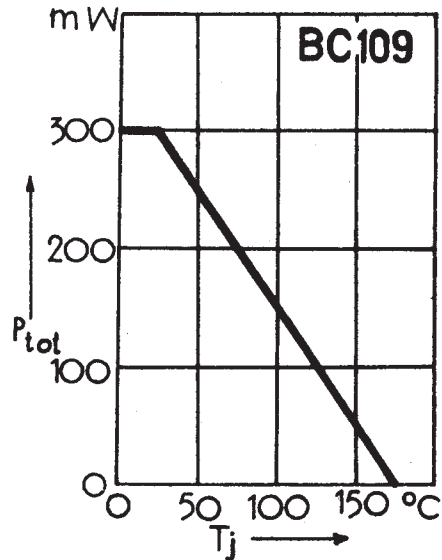
Mivel a szilícium alapú félvezető elemeknél a hőmérsékletváltozás okozta relatív visszáram-változás lényegesen nagyobb, mint germánium félvezetőknél, arra a téves következtetésre juthatnánk, hogy a szilícium tranzisztorok inkább hajlamosak hőmegfűtésre, mint a germánium tranzisztorok. A valóságban ez nem így van. A szilíciumban ugyanis a termikus gerjesztés mértéke sokkal kisebb, mint a germániumban, emiatt a visszáramok 2-3 nagyságrenddel kisebbek. Ezen kívül a szilícium félvezető megengedett réteghőmérséklete is jóval magasabb, mint a germánium félvezetőké, így hőmeg-

romos tápfeszültségek és hálózatok nemkívánatos zavaró impulzusai... stb. A jel/zaj viszony minden jel-átvitel egyik legjellemzőbb adata. Jó átvitel - a kis zaju kapcsolástechnikai megoldások alkalmazása mellett is - csak kellő nagyságu hasznos jel esetén valósítható meg. (Pl. jó minőségű rádióvétel csak akkor érhető el, ha a jel/zaj viszony legalább 40 dB, azaz  $10^4$ .)

A következőkben a tranzisztorok által keltett saját zajokkal foglalkozunk.

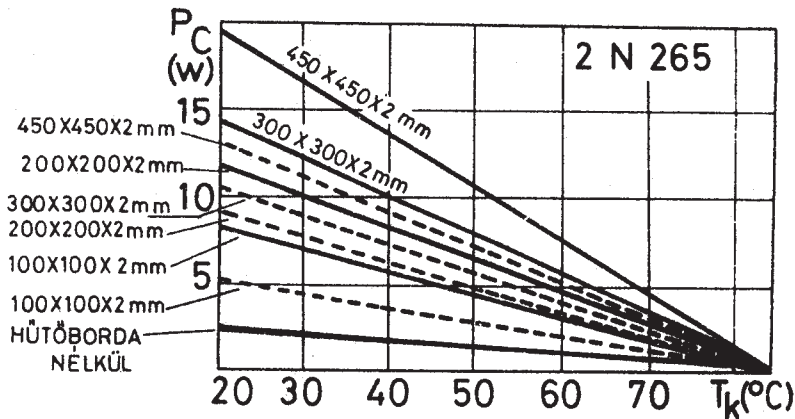
A zaj legismertebb oka az 1. fejezetben tárgyalt Johnson-féle hőzaj, amely minden vezetõben, tehát a félvezetõben is fellép.

A tranzisztor-zajnak egy másik fajtája a sörétzaj, amelynek oka az elektromos töltésû részecskék statisztikus eloszlásu rekombinációja. Olyankor figyelhetõ meg, amikor áram folyik át a félvezetõn. (A jelenség hasonló az elektroncsõvek sörétzajához.)



4-61. ábra

Szilícium tranzisztor megengedett legnagyobb disszipációs teljesítményének külsõ hőmérséklettõl való függése



4-62. ábra

A megengedett legnagyobb veszteségi teljesítmény változása a külsõ hőmérséklet függvényében, 2 mm vastag,  $100 \text{ cm}^2$  felületû hûtõlemez alkalmazása esetén. A szaggatott vonallal kihuzott egyenes arra az esetre vonatkozik, amikor a tranzisztor-tort egy 0,2 mm vastag csillám alátéttel szigetelik el a hûtõ-

A tranzisztorok zajának egy további fajtája a kollektor és bázis között véletlenszerűen változó lyukáramoknak tulajdonítható árameloszlási zaj. A kollektor- és emitteráram viszonyának van egy átlagos értéke ( $\alpha$ ) amely körül apró ingadozások jelentkeznek.

Végül gondolnunk kell az  $I_{CBo}$  kollektor visszáramra is. Ennek értéke az előbbi jelenségek következtében szintén statisztikus ingadozásokat mutat.

Fizikailag tehát legalább négy különálló zajforrást kell feltételeznünk, melyek részletes matematikai elemzése az irodalomban megtalálható [41]. Közepes frekvenciákon ezek határozzák meg a tranzisztorok frekvenciafüggétlen, un. fehér zaját.

A fentiek mellett alacsony frekvencián jelentőssé válik az ugynevezett villódzási zaj, amelynek több forrása is van. Létrehozhatják például a kristály felületén gyakran keletkező átvezető csatornák is, amelyek áthidalják az átmeneteket és a feszültségváltozás valamint a külső atmoszféra változásától függően áramigandozásokat hoznak létre. Csökkenésük érdekében a kristályfelület gondos kezelést és tisztítást igényel. Hosszabb ideig tartó ingadozásokat idéznek elő a bázisáramban a bázis felületén keletkező és megszűnő rekombinációs centrumok. Ehhez járulhatnak még a mikroszkópicusan kicsiny helyi átütések a kristály belsejében.

A tranzisztorok egy igen fontos jellemző paramétere a zajszám, amely a be- és kimeneti jel/zaj viszony arányát adja meg. A zajszám meghatározásához induljunk ki abból a feltételezésből, hogy a tranzisztor bemenetére olyan jelforrást csatlakoztatunk, amely  $P_{1, \text{jel}}$  jelteljesítményt és  $P_{1, \text{zaj}}$  zajteljesítményt szolgáltat. A külső terhelő ellenálláson  $P_{2, \text{jel}}$  jelteljesítmény és  $P_{2, \text{zaj}}$  zajteljesítmény jelenik meg. A zajszám:

$$F = \frac{P_{1, \text{jel}}/P_{1, \text{zaj}}}{P_{2, \text{jel}}/P_{2, \text{zaj}}} \quad (4-37)$$

A zajszám a tranzisztor típusától, a beállított munkaponttól, a jelforrás belső ellenállásától és a hőmérséklettől függ. Az adatlapok vagy közvetlenül a számértékét, vagy pedig a logaritmikus arányszámot kifejező decibel értékét adják meg. A 4-63. ábrán bemutatjuk egy tranzisztor zajszámának frekvenciafüggését.

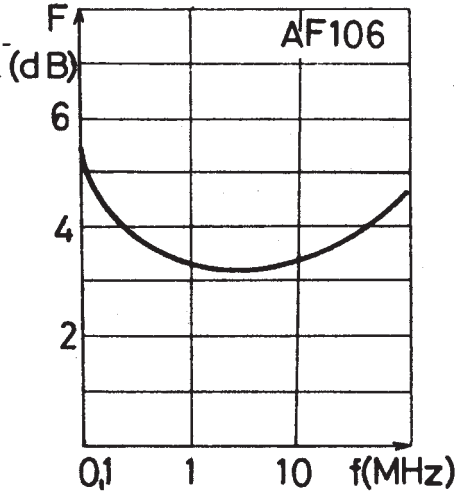


#### 4-4-7. A tranzisztort jellemző adatok

A katalógusokban szereplő tranzisztor adatokat két fő csoportba osztjuk: határadatok és dinamikus adatok.

Határadatok az adott mennyiségek maximumát jelentik, amelyet a tranzisztor károsodás nélkül kibír. Ilyen adatok:

$U_{CES}$	legnagyobb kollektor-emitter feszültség B-E rövidzár esetén;
$U_{CEO}$	legnagyobb kollektor-emitter feszültség $I_B = 0$ -nál;
$U_{EBO}$	legnagyobb emitter-bázis feszültség $I_C = 0$ -nál;
$U_{CER}$	a legnagyobb kollektor-emitter zárófeszültség a bázis és emitter közötti R ellenállással;
$I_C$	legnagyobb kollektor egyenáram;
$I_{CM}$	legnagyobb kollektor csucsáram, adott max. időtartamu és frekvenciájú impulzusok esetén;
$T_j$	legnagyobb záróréteg-hőmérséklet;
$P_{tot}$	legnagyobb megengedett teljesítmény-disszipáció;
$R_{th}$	a hőellenállás;
$I_B$	legnagyobb bázisáram.



4-63. ábra  
Tranzisztor zajtényezőjének frekvenciafüggése

A dinamikus adatok a tranzisztoros áramkörök tervezésénél figyelembe veendő paraméterek adott munkapontban, rendszerint  $25^\circ\text{C}$  környezeti hőmérsékleten. Ezek nyilván tartalmazzák az ajánlott munkapont-hoz tartozó kollektoráramot, az ezeknek megfelelő  $U_{BE}$  és  $U_{CE}$  feszültségeket valamint a várható kollektor visszáramot ( $I_{CBO}$ ), továbbá a bázis-emitter és a bázis-kollektor átmenetek kapacitásait, az  $f_\beta$  és  $f_T$  határfrekvenciákat. Ezen kívül ismertetik a kisjelű hibrid  $h$  paramétereket is.

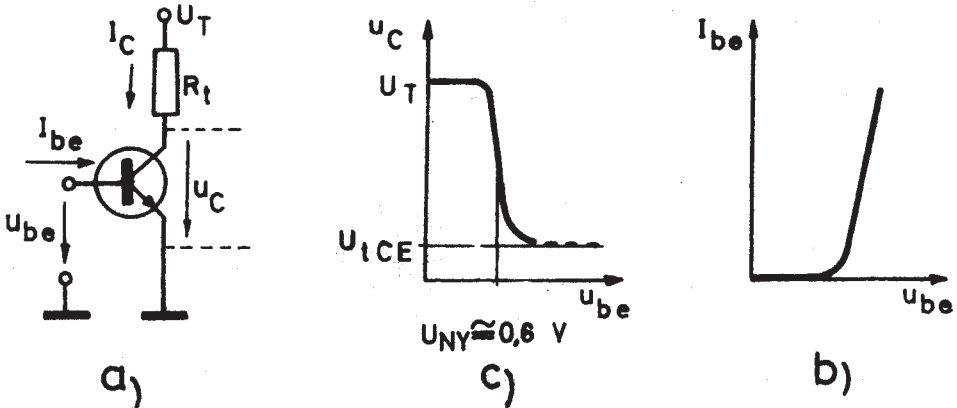
#### 4-5.4. A tranzisztor mint kapcsoló

Az ideális kapcsoló zérus idő alatt kapcsol, nem fogyaszt teljesítményt, ellenállása nyitott (kikapcsolt) állapotban végtelen nagy, zárt (bekapcsolt) állapotban pedig zérus. A valóságban a kapcsolók be- vagy kikapcsolásához némi teljesítmény szükséges. A veszteségek csökkentése miatt olyan kapcsolókat illetve kapcsoló áramköröket fejlesztettek ki, amelyek kis teljesítménnyel sokkal nagyobb teljesítményeket tudnak kapcsolni. Régebben igen elterjedten alkalmazták az elektromechanikus kapcsolókat, pl. jelfogókat, az utóbbi évtizedekben azonban a tranzisztorokkal felépített kapcsoló áramkörök sok helyen kiszorították az előbbieket. Kapcsoló üzemmódban a tranzisztor vezérlő jel hatására telítési vagy lezárási tartományba jut. A tranzisztoros kapcsoló a jelfogóhoz képest számos kedvező tulajdonsággal rendelkezik:

- nagyon kis vezérlő teljesítménnyel kapcsolható,
- kapcsolási ideje nanosecundum is lehet,
- mechanikus érintkezőket nem tartalmaz, ezért üzembiztosabb,
- élettartmát főleg a kapcsolóáramkör, egyéb elektronikus elemi szabják meg,
- nincs szikraképződés (ezért tűzveszélyes környezetben is használható) és a kapcsolás zajmentesen történik.

Hátrányként megemlíthető, hogy tranzisztorral csak egyenáramokat kapcsolhatunk, továbbá, hogy a lezárási ellenállás csak Mohm, a telítési ellenállás pedig ohm nagyságrendű, így a zérus, ill. végtelen nagy ellenállású kapcsolóállás nem valósítható meg.

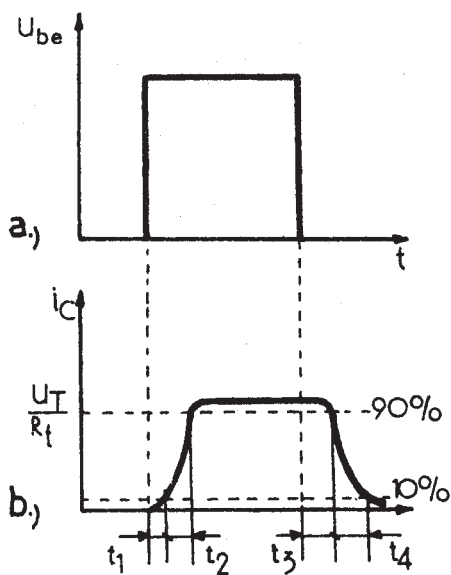
Kapcsoló üzemben a földelt emitteres kapcsolás a legkedvezőbb, mert ebben az elrendezésben érhető el a legnagyobb teljesítményerősítés. A 4-70. ábrán egy földelt emitteres kapcsolóáramkör, valamint an-



4-70. ábra

Földelt emitteres kapcsoló áramkör:

a) alapkiosolása, b) bemeneti-, c) átviteli karakterisztikái



4-71. ábra

Földelt emitteres kapcsoló áramkör jelátvittele:

a) négyszög alakú bemeneti impulzus, b) kollektoráram

vonallal helyettesíthető. Az eltéréseket elsősorban a kiüritett réteg, a pn átmenet diffúziós kapacitása, és a bázisrétegben lejátszódó diffúzió idézi elő [14].

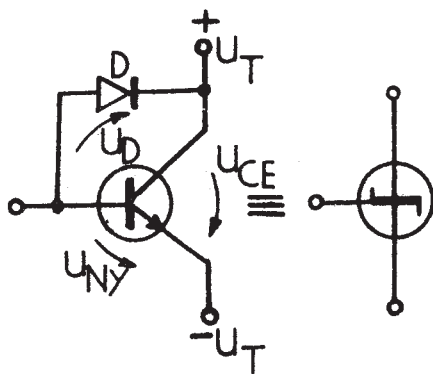
Az impulzus felfutási ideje a tranzisztor időállandóitól függ, és ezekben az időállandókban a bemeneti ellenállásnak és a bemeneti kapacitásnak van a legnagyobb szerepe [33]. A bázisrétegben lejátszódó diffúzió a töltéstároló hatás által járul hozzá a jelek eltorzulásához. A bázisrétegben nagyon sok kisebbségi töltéshordozó halmozódik fel, amíg a tranzisztor a telítési tartományban működik (a tranzisztor bekapcsolt állapotban van). Ekkor mind a bázis-emitter, mind a bázis-kollektor dióda nyitóirányú előfeszültséget kap, így az emitterből és a kollektorból egyaránt kisebbségi töltéshordozók áramlanak be a bázisrétegbe és ott felhalmozódnak. Amikor a bázisáram hirtelen zérusra csökken (kikapcsoljuk a tranzisztort) a munkapont csak akkor tolódhat el a rendezési tartományon keresztül a lezárási tartományba, amikor a bázisrétegből eltávoztak az ott felhalmozott kisebbségi töltéshordozók. Ehhez időre van szükség, ezért a kollektoron hosszabb ideig tart az áramimpulzus, mint a bázison. A kikapcsolási idő lerövidíthető, ha kikapcsoláskor a bázisra nyitóirányú feszültséggel ellentétes polaritású feszültségimpulzust adunk.

nak bemeneti ill. átviteli karakterisztikája látható. Ha a tranzisztor bázisára a nyitóirányú feszültségnél ( $U_{ny}$ ) nagyobb feszültség jut, az áramkör bekapcsol és a terhelésen csaknem az egész telepfeszültség megjelenik. A tranzisztor be- és kikapcsolási ideje - amely alatt a munkapont áttolódik a lezárási tartományból a telítési tartományba vagy fordítva - természetesen függ a bemenő jel meredekségétől, de függ a tranzisztor nagyfrekvenciás tulajdonságaitól is. A kapcsolási idők ideális négyszögimpulzusok átvitele alapján tanulmányozhatók. Ha a tranzisztoros kapcsoló bemenetére négyszögimpulzust adunk, a kimenő impulzus alakja és időtartama eltér a bemenő impulzusétól (4-71. ábra). Ezen kívül a kimenő jel késve követi a bemeneti jelet. Ennek megfelelően a tranzisztor egy egyenértékű késleltető mű-

A 4-71.b) ábrán jól látható, hogy a kollektoráram lényegében a  $t_1$  késleltetési idő elteltével indul meg. Ekkor exponenciálisan növekszik és  $t_2$  idő alatt eléri az  $U_T/R_t$  végleges érték 90%-át. Ez az úgynevezett felfutási (vagy emelkedési) idő, amely nagyjából megegyezik a  $t_4$  esési idővel. Az esési idő alatt a kollektoráram maximális értékének 90%-áról 10%-ra csökken. A  $t_3$  időtartamot tárolási időnek nevezzük.

A logikai áramkörök térhódításával a tranzisztoros kapcsolók igen nagy jelentőségre tettek szert. Itt a kapcsoló-áramköröknek legtöbbször nagy meredekségű impulzusokat kell továbbítaniuk, lehetőleg kis torzitással. Az alakhü jelátvitel szempontjából az előbbieken vázolt időtartamokat csökkenteni kell. A késleltetési és felfutási idő fordítottan arányos a tranzisztor felső határfrekvenciájával [14], így a jelátvitel jóságát elsősorban a tranzisztor előállítás technológiája és geometriai méretei szabják meg. Korszerű, 1000 MHz feletti határfrekvencia esetén, 1 mA emitteráramnál a tranzisztor okozta késleltetési idő néhány tized nanosecundum. A felfutási idő csökkenthető a bázisáram növelésével, ez azonban a bázisban tárolt töltés és ezzel a tárolási idő növekedését eredményezi. Az impulzusátvitel megfelelő kapcsolási elemek felhasználásával is javítható. A bemenő impulzus legtöbbször ellenálláson keresztül megy a tranzisztor bemenetére. Ilyen esetekben a késleltetési idő, pl. az ellenállással párhuzamosan kapcsolt gyorsító kondenzátorral csökkenthető. A bekapcsolás pillanatában ez megnöveli a bázisáramot, emiatt a kollektoráram gyorsabban éri el végleges értékét.

A tárolási idő amplitudóhatároló dióda alkalmazásával csökkenthető (4-72. ábra), ami a kikapcsolási sebesség növelését eredményezi. A bekapcsolási folyamat alatt - az előzőleg záróirányban előfeszített - dióda nagy kollektoráramnál az  $U_{tCE}$  telítési feszültség elérése előtt kinyit, és a bázis feszültségét ugrászerűen annyira lecsökkenti, hogy a tranzisztor nem tud átmenni a telítési tartományba. Így a bázisban töltések nem halmozódnak fel.



4-72. ábra

Telítésgátló dióda alkalmazása

A telítésgátló diódának kis nyitófeszültségű típusnak kell lennie, ezen kívül a benne felhalmozott töltés nem lehet jelentős. E célra leggyakrabban Schottky-diódát használnak. Ez az integrált áramkörökben

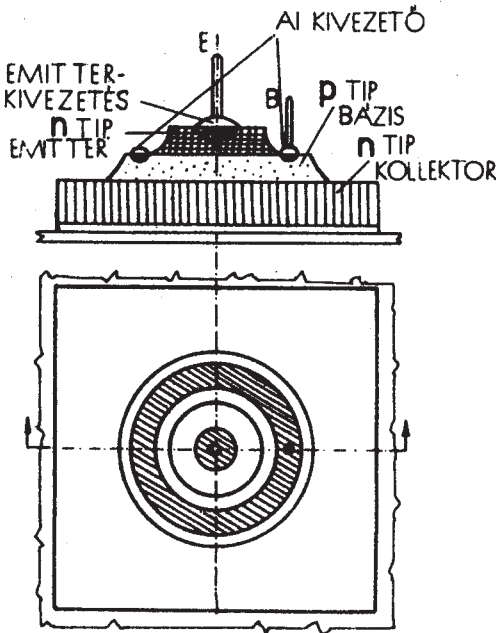
egyszerűen, a tranzisztorral egybeépített formában kialakítható. Az ilyen ún. Schottky-tranzisztorokból felépített logikai áramkörök 2-3 ns kapcsolási időt biztosítanak.

### 4-6.3. Korszerű tranzisztor típusok

#### A mezatranzisztor

A diffúziós eljárás és a vákuumpárolgatási technika a mezatechnológia alapja amely a gyártás nagyfokú automatizálását is lehetővé teszi. A nevét onnan kapta, hogy az arizonai fennsíkakra (mesakra) emlékeztető alakja van. Az ötvözött tranzisztoroktól eltérően az alapanyag-kristály itt nem a bázist, hanem a kollektortartományt képezi, ezáltal egyoldalassá válik a tranzisztor-struktúra. A kollektor bázislapja közvetlenül felforrasztható a tartóállványra, ezért disszipálóképessége előnyösen megnövekszik.

A 4-80. ábrán egy szilícium npn mezatranzisztor felülnézeti és keresztmetszeti rajzát mutatja. A kiindulási alap n típusu,  $75 \dots 100 \mu$  vastagságúra csiszolt és polírozott Si lemez. Az emitter- és bázisréteget egyaránt gőzfázisból való diffúzióval állítják elő. A diffúziók után megfelelő maszkok alkalmazásával kémiai maratással kialakítják a meza-alakot, majd újabb maszk segítségével alumíniumkontaktust párolgatnak a felületre, amely a bázis ohmikus kivezetését adja. Ezt követően kör alakú ezüst elektróda felpárolgatásával és beötvözésével állítják elő az emitterkontaktsut. A végső alakot ismételt maratással alakítják ki. A kapott kristályszelelynyt aranyforrasszal állványra forrasztják. A bázis- és emitterelektródákhoz a kivezetőül szolgáló  $10 \dots 13 \mu$  vastag aranyhuzalokat termokompressziós eljárással kötik.



4-80. ábra

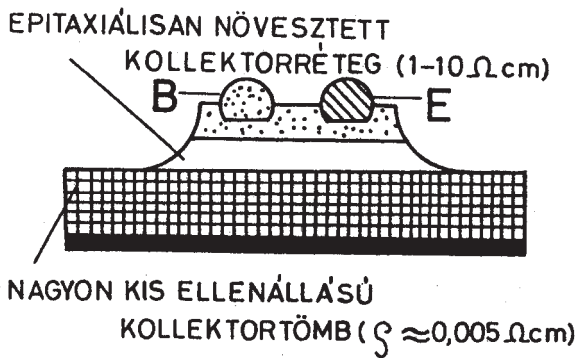
Szilícium npn mezatranzisztor

a néhány mikronos bázistartományánál és így a kollektorrest véges ellenállásértékkel rendelkezik a tranzisztor helyettesítő képében. Ez hátrányként jelentkezik a kapcsoló üzemmódban való használatánál, amihez még az is hozzájárul, hogy a széles kollektortartományban a nagy élettarta-

Ennél a technológiánál a kollektorrest jóval vastagabb

mok miatt nagy töltéstárolási idők lépnek fel, és korlátozzák a kapcsolás gyorsaságát. A kollektortartomány vastagságát nem lehet  $20\mu$  alá csökkenteni, mert igen törékennyé válik. A problémát gyakorlatilag az epitaxiális eljárással lehetett megoldani. Ha tehát a kollektor-ellenállás csökkentését tartjuk szem előtt, akkor igen kis fajlagos ellenállású ( $0,005\ \Omega\text{cm}$ ) hordozólemezről kell kiindulni, amelyre  $4\ldots 10\mu$  vastag, viszonylag nagy fajlagos ellenállású ( $1\ldots 10\ \Omega\text{cm}$ ) epitaxiális réteg kerül és most már ebben alakítjuk ki a mezatranzisztor szerkezetet (4-81. ábra).

A mezatranzisztorok  $1\text{-}2\mu$  vastagságú bázisrétege többszáz MHz működési frekvenciát enged meg. Az első ultranagyfrekvenciás tranzisztor is germánium mezatranzisztor volt.

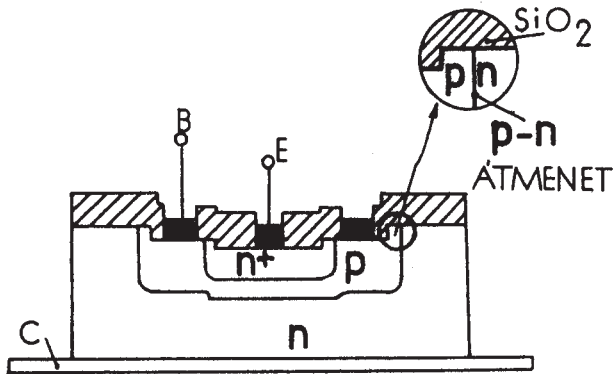


4-81. ábra  
Epitaxiális mezatranzisztor

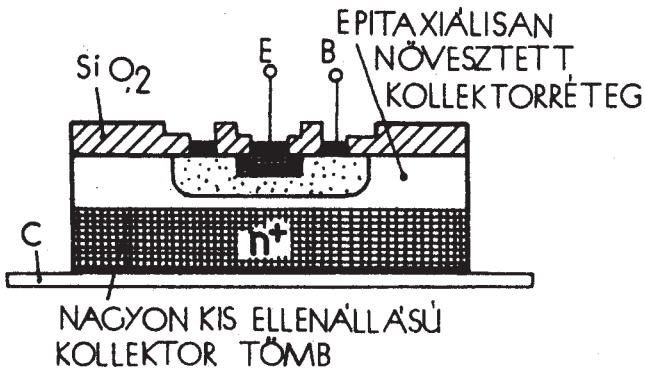
### A planártranzisztor

A korábbiakban már ismertetett planár-technológiával készülnek az un. planártranzisztorok. A 4-82. ábrán bemutatott szilícium planártranzisztor keresztmetszetén jól látható, hogy a tranzisztor átmenetei az oxidréteg alá kerülnek, amely a külső behatásokkal szemben védelmet nyújt, így stabil és megbízható pn átmeneteket lehet az eljárással előállítani. A kivezetések biztosítására fotogravírozási eljárással egy gyűrű és kör alakú ablakot maratnak az oxidrétegbe, majd a szabaddá tett felületekre alumíniumot párologtatnak. Az így kialakított és feldarabolt tranzisztorokat arany-szilícium-gallium állványra forrasztják és termokompressziós eljárással emitter- és báziskivezetést készítenek hozzájuk.

Az epitaxiális eljárás kombinációjával kialakított un. epitaxiális planártranzisztorok (4-83. ábra) előnyösen használhatók kapcsoló áramkörökben.



4-82. ábra  
Szilícium planártranszisztor



4-83. ábra  
Szilícium planártranszisztor epitaxiálisan növesztett kollektorréteggel

#### 4-7. Különleges félvezető eszközök

##### 4-7.1. A kétbázisú dióda

A kétbázisú dióda vagy másnéven egyrétegű tranzisztor (angol nevén Unijunction Transistor, rövidítve UJT) olyan, két végén ohmikus kontakttal rendelkező, félvezető hasáb vagy lemez (általában kis szennyezettségű n típusú 4...10 kohm ellenállású szilícium), amelynek a közepén erős p típusú szennyezéssel pn átmenetet képeznek ki. Az ohmikus