

## 4. Bipoláris tranzisztorok

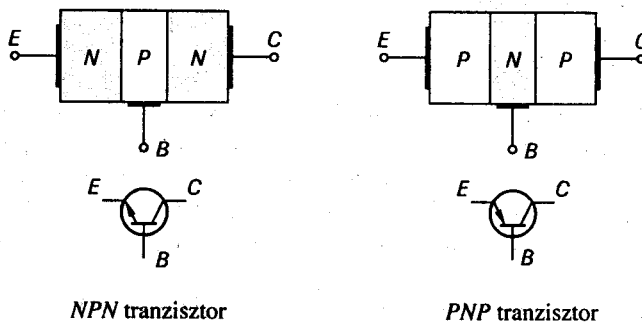
A tranzisztorok a legfontosabb félvezető eszközcsoportot képviselik, mivel az elektromos jelek erősítésére képesek. A tranzisztor (*transistor*) elnevezés az angol *transfer-resistor* szavakból képezett mozaikszó, amely a félvezető egyik fő tulajdonságára utal. Bipoláris tranzisztorokat legelőször 1949-ben állított elő az amerikai Bell laboratóriumban J.R. Haynes és W. Shockley, de jelenleg is nagyon fontos alkateleme a különböző elektronikai kapcsolásoknak és integrált áramköröknek. A bipoláris tranzisztor működése során mindkét típusú töltéshordozó (elektronok és lyukak) szerepet játszik, ami a *bipoláris* elnevezést magyarázza.

A bipoláris tranzisztorok működése a *PN*-átmenet tulajdonságain alapszik és létrehozhatók egyetlen átmenettel (*egyátmenetű tranzisztor* – UJT), vagy több átmenet (általában kettő) felhasználásával. A továbbiakban a két átmenettel rendelkező bipoláris tranzisztorok felépítésével, működésmódjával és alkalmazásával ismerkedünk meg.

### 4.1. A bipoláris tranzisztor felépítése

A bipoláris tranzisztor háromelektrodás félvezető eszköz amely három, egy kristályban kialakított, *N-P-N* vagy *P-N-P* elrendezésű, szennyezett félvezető tartományból áll (4.1.ábra). Ennek megfelelően megkülönböztetünk *NPN*, illetve *PNP* tranzisztorokat. Az egyes tartományok elnevezései:

- emitter** (E): a töltéshordozókat kibocsátó elektróda; [*emittere*; latin szó, jelentése: kibocsát]
- bázis** (B): vezérlésre szolgáló elektróda; [*basis*; görög szó, jelentése: alap]
- kollektor** (C): töltéshordozókat gyűjtő elektróda. [*collecta*; latin szó, jelentése: gyűjtés]

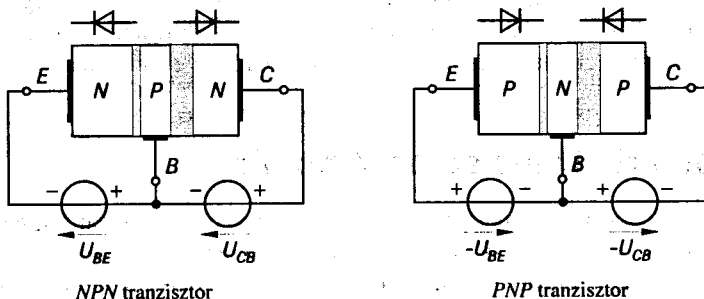


4.1. ábra. A bipoláris tranzisztorok felépítése és rajzjelei

A tranzisztorok gyártására *germániumot* (Ge), *szilíciumot* (Si) és *vegyületkristályos félvezető anyagokat* (pl. *gallium-arszenid*  $\equiv$  GaAs) használnak. Geránium-tranzisztorokat napjainkban, – *sok előnytelen tulajdonsága miatt* – csak néhány különleges alkalmazásra gyártanak.

A bipoláris tranzisztorok bázisstartományának hatásos szélessége sokkal kisebb mint a kisebbségi töltéshordozók diffúziós hossza, ezért ez a középső tartomány igen vékony félvezető réteg a kollektor- és az emittortartományhoz viszonyítva. Az emitter és kollektor megközelítőleg azonos szennyezettségű és mindkét típusú tranzisztornál erősebben szennyezett mint a bázisstartomány. A bázis kicsi hatásos szélessége és alacsony szennyezettsége miatt a szabad töltéshordozók száma kicsi. Ez a tény a bázisrétegnek kis vezetőképességet kölcsönöz a másik kettőhöz viszonyítva.

A tranzisztor szerkezetében levő két PN-átmenet külső feszültség alkalmazása nélkül megakadályozza a rétegek között a töltéshordozók áramlását. Normális (aktív) működés esetében az emitter és a bázis közötti PN-átmenet vezetési irányban, a bázis és a kollektor közötti PN-átmenet pedig záróirányban kell üzemelnie (4.2. ábra). Kis jelű szilícium-tranzisztorok esetén a bázis-emitter feszültség  $U_{BE} \approx 0,6 + 0,8 \text{ V}$ , a kollektor-emitter feszültség értéke általában  $U_{CE} \approx 5 + 18 \text{ V}$ .



NPN tranzisztor

PNP tranzisztor

4.2. ábra. A bipoláris tranzisztorok előfeszítése

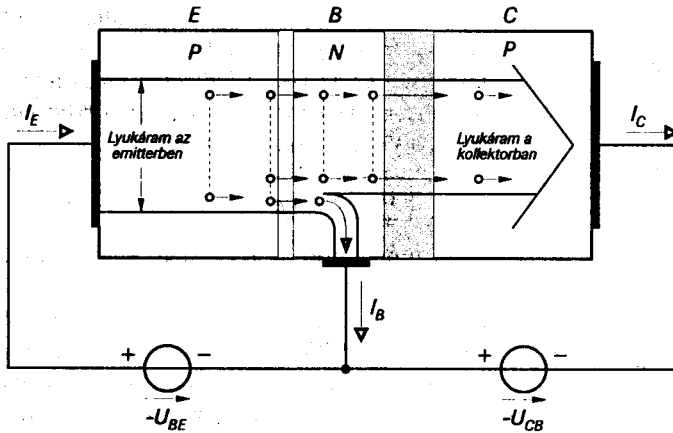
## 4.2. A bipoláris tranzisztor működése

### 4.2.1. Áramok a tranzisztorban

#### A többségi töltéshordozók áramlása

Az NPN és PNP tranzisztor elvi működése megegyezik, ezért elégséges ha az egyik típusú tranzisztort használjuk a fizikai működés bemutatására. A bipoláris tranzisztor működését a már említett két típusú töltéshordozó biztosítja. A PNP tranzisztorok többségi töltéshordozói a lyukak, kisebbségi töltéshordozói az elektronok. Az NPN tranzisztorok esetén az elektronok a többségi töltéshordozók, a lyukak pedig kisebbségi töltéshordozóként viselkednek.

A 4.3. ábra egy PNP-típusú tranzisztor többségi töltéshordozóinak áramlását szemlélteti, ha a tranzisztor polarizálása a normális működésnek felel meg. A bázis-emitter átmenet nyitó irányú előfeszítése lehetővé teszi az emitter tartományban található többségi töltéshordozó lyukak rendezett mozgását ( $I_E$ ), áthaladását a határrétegen és a bázisstartományba való kerülésüket. A bázisstartomány gyakorlatilag kiürített rétegnek tekinthető a kollektor-bázis átmenet záróirányú előfeszítése, a bázisréteg kicsi szennyezettsége és vékonysága miatt. Ennek következtében a bázisstartományba jutott lyukak elenyésző része ( $0,1 + 5\%$ -a) rekombinálódik az itt található elektronokkal és létrehozza a kis értékű bázisáramot ( $I_B$ ).



4.3. ábra. Többségi töltéshordozók áramlása PNP tranzisztorban

Mivel a lyukak a bázisrészben kisebbségi töltéshordozónak számítanak, – a bázis-kollektor (B-C) átmenet záróirányú polarizálása miatt – diffúzióval a kollektor részébe áramlanak és létrehozzák a kollektor elektródán keresztül az  $I_C$  kollektoráramot. A tranzisztor többségi töltéshordozói tehát, *áramelágazást* hoznak létre, melynek összetevői az *emitteráram*, a *bázisáram* és a *kollektoráram*. Az emitteráram a kollektor- és a bázisáram összegeként adódik:

$$I_E = I_B + I_C. \quad (4.2.1.)$$

A 4.2.1. összefüggés érvényes marad az értékek kis változása, vagy váltakozó áram esetén is:

$$\Delta I_E = \Delta I_B + \Delta I_C.$$

$$i_E = i_B + i_C.$$

A tranzisztorban létrejövő áramelágazást, *egy árameloszlási tényezővel* fejezik ki:

$$A = \frac{I_C}{I_E}, \text{ egyenáram és } \alpha = \frac{i_C}{i_E}, \text{ váltakozó áram esetén.}$$

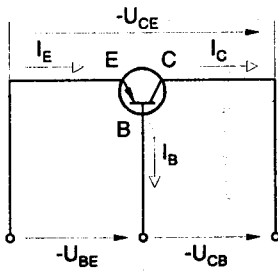
Itt  $A$  a tranzisztor *nagyjelű, vagy egyenáramú áramerősítési tényezője*,  $\alpha$  pedig a *kisjelű vagy váltakozó áramú áramerősítési tényezője*. Számértékük közelítően megegyezik és ez a legtöbb tranzisztornál 0,95 + 0,999 közé esik. A meghatározott áramerősítési tényezők figyelembevételével:

$$I_C = A \cdot I_E, \text{ egyenáram és}$$

$$i_C = \alpha \cdot i_E \text{ váltakozó áram esetén;}$$

$$I_B = (1 - A) \cdot I_E, \text{ egyenáram és}$$

$$i_B = (1 - \alpha) \cdot i_E \text{ váltakozó áram esetén.}$$



4.4. ábra. A PNP tranzisztor feszültségei és áramai

A tranzisztorokon három feszültség lép fel (4.4. ábra): az  $U_{CE}$  kollektor-emitter feszültség, az  $U_{BE}$  a bázis-emitter feszültség és az  $U_{CB}$  a kollektor-bázis feszültség. Ezekre a feszültségekre Kirchhoff második törvényének megfelelően érvényes a következő egyenlet:

$$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}.$$

A tranzisztor az  $U_{BE}$  bázis-emitter feszültség révén az  $I_B$  bázisáram vezérli. Segítségével változtatható az emitterben áramló lyukak (PNP tranzisztor), illetve elektronok (NPN tranzisztor) mennyisége, ami az emitter és végső soron a kollektoráram értékét meghatározza.

Ha  $U_{BE} = 0$  akkor,  $I_B = 0$  és  $I_C = 0$ . Ekkor a kollektor és az emitter szakasz ellenállása nagy, tipikus értéke szilícium tranzisztorok esetén  $10 + 100 \text{ M}\Omega$  közé esik. Ha a tranzisztor bázis-emitter feszültsége túllépi a bázis-emitter határreteg zárófeszültségét (szilíciumtranzisztornál kb.  $0,7 \text{ V}$ ), megindul a bázisáram. Az  $U_{BE}$  feszültség és az  $I_B$  bázisáram növelésével az  $I_C$  kollektoráram nő és a kollektor-emitter szakasz ellenállása fokozatosan csökken. Az  $U_{BE}$  és  $I_B$  adott értéken a tranzisztor teljesen kivezéreltté válik és a kollektor-emitter szakasz ellenállása eléri legkisebb értékét.

A tranzisztor felépítésétől függően, a minimális ellenállásérték kb.  $20 \text{ }\Omega$  -tól,  $200 \text{ }\Omega$  -ig változhat. A kollektoráram értéke – a fizikai működésnek megfelelően – csekély mértékben függ a záróirányú  $U_{CB}$  kollektor-bázis feszültségtől.

*A tranzisztor alkalmas tehát arra, hogy a kollektoráram nagyságát, – amely sokkal nagyobb lehet mint a bázisáram – a kis értékű bázis-emitter feszültség és bázisáram segítségével vezéreljük.*

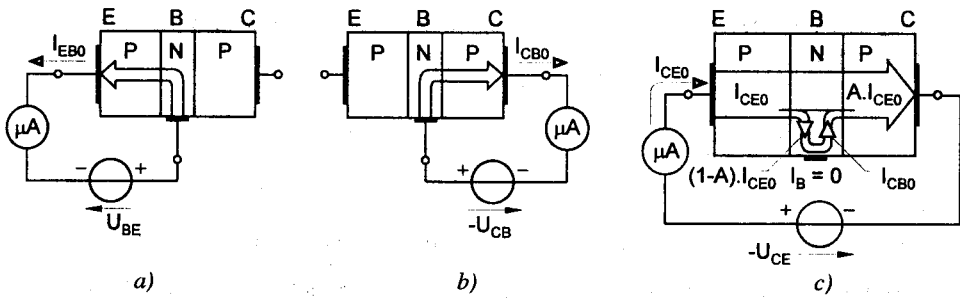
#### A kisebbségi töltéshordozók áramlása

A többségi töltéshordozók által létrehozott áramok mellett a tranzisztor működését a kisebbségi töltéshordozók által létrehozott áramok (maradékáramok vagy visszaráramok) is befolyásolják. A maradékáramok záróirányú előfeszítés esetén folynak az átmeneteken. A bipoláris tranzisztorok esetében három maradékáramot különböztetünk meg:

- $I_{EBo}$  – a lezárt bázis-emitter átmenet visszarárama; normális működésnél nem lép fel;
- $I_{CB0}$  – a lezárt kollektor-bázis átmenet visszarárama; normális működésnél is jelen van;
- $I_{CE0}$  – az  $I_B = 0$  feltétel mellett, a kollektor-emitter között folyó maradékáram; normális működés közben is folyik.

A tranzisztor három maradékáramának mérési elrendezését, a 4.5. ábra mutatja. Az  $I_{CB0}$  maradékáram zavarja a tranzisztor normális működését, mivel iránya ellentétes a vezérlő bázisárammal és értéke jelentős hőmérsékletfüggőséget mutat. Közepes teljesítményű germánium-tranzisztorok esetén az  $I_{CB0}$  maradékáram  $\mu\text{A}$  nagyságrendjében van; szilíciumtranzisztorokban két-három nagyságrenddel kisebb.

Az  $I_{CE0}$  maradékáram jelenléte normál működés közben kevés zavart okoz, mivel iránya megegyezik a többségi töltéshordozók által létrehozott kollektoráramával.



4.5. ábra. A bipoláris tranzisztor maradékáramai

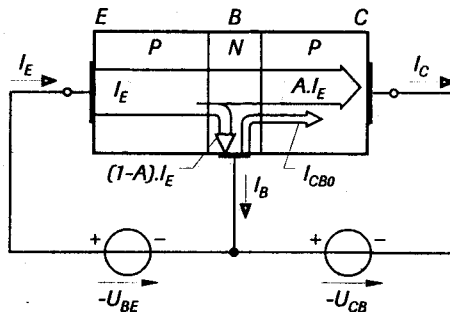
### 4.3. A bipoláris tranzisztor alapegyenletei

Összegezve ismereteinket: – a tranzisztorban normális működés közben folyó áramokra vonatkozóan a 4.6. ábra alapján a következő alapegyenleteket írhatjuk fel:

$$I_E = I_C + I_B \tag{4.3.1}$$

$$I_C = A \cdot I_E + I_{CB0} \tag{4.3.2}$$

$$I_B = (1 - A) \cdot I_E - I_{CB0} \tag{4.3.3}$$



4.6. ábra: A bipoláris tranzisztorban folyó áramok összetevői

Az egyenletek érvényesek maradnak, kis változások és kis amplitúdójú váltakozó áramok esetén is:

$$\Delta I_E = \Delta I_C + \Delta I_B$$

$$i_E = i_C + i_B$$

$$\Delta I_C = \alpha \cdot \Delta I_E$$

$$i_C = \alpha \cdot i_E$$

$$\Delta I_B = (1 - \alpha) \cdot \Delta I_E$$

$$i_B = (1 - \alpha) \cdot i_E$$

Az  $I_E$  értékét kifejezve a 4.3.3. egyenletből és behelyettesítve a 4.3.2. egyenletbe, a kollektoráramra az:

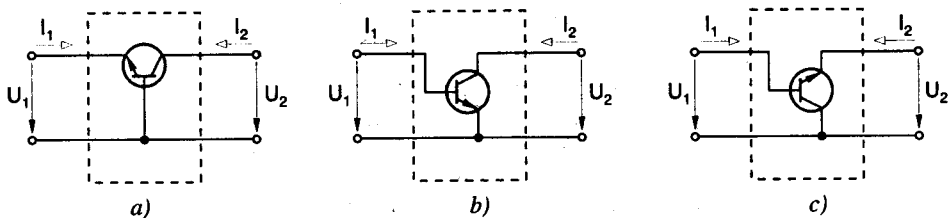
$$I_C = \frac{A}{1-A} \cdot I_B + \frac{1}{1-A} \cdot I_{CBO} = B \cdot I_B + (B + 1) \cdot I_{CBO}$$

összefüggés adódik. Itt  $B = \frac{A}{1-A}$ , a bázisáramra vonatkoztatott nagy jelű-, illetve egyenáramú áramerősítési tényező, amely egynél jóval nagyobb érték (mivel  $A \rightarrow 1$ ).

## 4.4. Alapkapcsolások

A tranzisztorok legfontosabb alkalmazási területe a kis feszültségű jelek alakuló erősítése; erősítő tulajdonságait célszerű négy-pólusú alakítva vizsgálni. Mivel a tranzisztor három elektródával rendelkezik négy-pólusú úgy alakítható, hogy egyik kivezetését közösnek tekintjük a kimenet és bemenet szempontjából. Ennek megfelelően három alapkapcsolást különböztetünk meg, amelyek elnevezése a közös elektróda nevéből származik. Ezek a következők:

- közös bázisú kapcsolás vagy báziskapcsolás (4.7.a. ábra);
- közös emitteres kapcsolás vagy emitterkapcsolás (4.7.b. ábra);
- közös kollektoros kapcsolás vagy kollektorkapcsolás (4.7.c. ábra).



4.7. ábra. A bipoláris tranzisztor alapkapcsolásai

A tranzisztor fizikai működése minden alapkapcsolásban azonos. Az egyes alapkapcsolásokban, csak a tranzisztor külső jellemzői változnak meg. A négy-pólusként ábrázolt tranzisztor egyértelműen jellemezhető a ki- és bemenetén fellépő feszültségekkel és áramokkal. A négy jellemzőt összekapcsoló függvények grafikus ábrázolása révén kapjuk a *tranzisztor karakterisztikáit* (jelleggörbéit). Ezek igen szemléletesek teszik a tranzisztor jellemzőit egy adott alapkapcsolásban.

## 4.5. A tranzisztor jelleggörbéi

A tranzisztor négy-pólusként való tárgyalása négy jelleggörbe-típus meghatározását teszi lehetővé, amelyek a következők:

**1. Bemeneti jelleggörbe:** – a bemeneti feszültség ( $U_1$ ) és bemeneti áram ( $I_1$ ) közötti kapcsolatot szemlélteti, ha a kimeneti feszültség ( $U_2$ ) állandó:

$$I_1 = f(U_1) \Big|_{U_2 = \text{konst.}}$$

**2. Kimeneti jelleggörbe:** – a kimeneti feszültség ( $U_2$ ) és kimeneti áram ( $I_2$ ) közötti összefüggést tükrözi, ha a bemeneti áram ( $I_1$ ) állandó értéken van:

$$I_2 = f(U_2) \Big|_{I_1 = \text{konst.}}$$

**3. Áramokra vonatkozó átviteli (transzfer) jelleggörbe:** – a kimeneti áram ( $I_2$ ) és a bemeneti áram ( $I_1$ ) kapcsolatát szemlélteti állandó kimeneti feszültség ( $U_2$ ) esetén:

$$I_2 = f(I_1) \Big|_{U_2 = \text{konst.}}$$

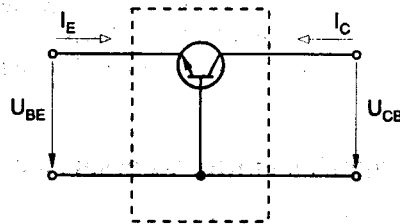
**4. Feszültségekre vonatkozó átviteli (transzfer) jelleggörbe:** – a bemeneti feszültség ( $U_1$ ) és a kimeneti feszültség ( $U_2$ ) összetartozó értékeit adja meg, ha a bemeneti áramot ( $I_1$ ) állandó értéken tartjuk:

$$U_1 = f(U_2) \Big|_{I_1 = \text{konst.}}$$

A gyakorlatban az átviteli karakterisztikákat ritkán használják, mivel az első két jelleggörbéből megszerkeszthetők és ezért nem tartalmazznak új adatokat.

#### 4.5.1. A tranzisztor jelleggörbéi báziskapcsolásban

A tranzisztor báziskapcsolásában fellépő feszültségeket és áramokat a 4.8. ábra szemlélteti.



4.8. ábra. Báziskapcsolásban fellépő feszültségek és áramok, NPN tranzisztor esetén

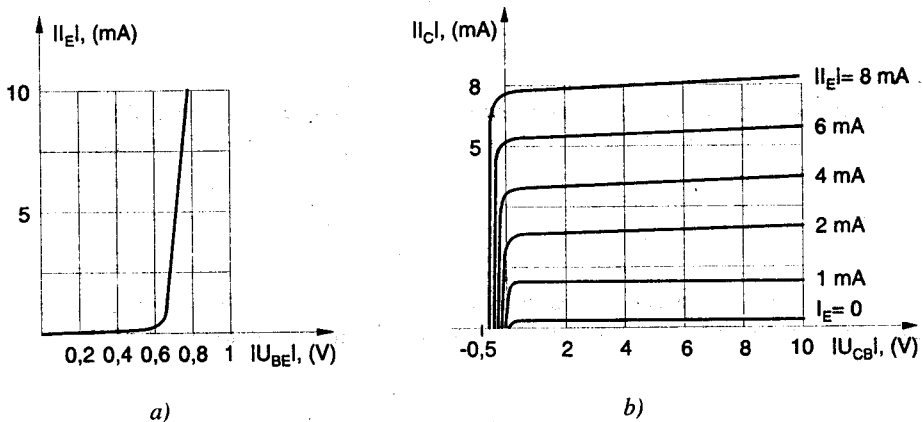
#### Bemeneti jelleggörbék

A bemeneti karakterisztika ebben az esetben az emitteráram ( $I_E$ ) és a bázis-emitter feszültség ( $U_{BE}$ ) közötti kapcsolatot tükrözi állandó kollektor-bázis feszültség ( $U_{CB}$ ) biztosítása mellett (4.8.a. ábra). A jelleggörbe – hasonlóan egy nyitóirányban működő dióda áram-feszültség jelleggörbéjéhez – exponenciális változást mutat. Ha az alkalmazott bázis-emitter feszültség túllépi a *küszöbfeszültség* értékét, az emitteráram a feszültség növelésével exponenciálisan nő.

A szilíciumtranzisztorok küszöb feszültsége a  $0,6 \pm 0,7$  V értéktartományban lehet, a ritkábban alkalmazott germániumtranzisztorok küszöb feszültsége  $0,2 \pm 0,4$  V között változik.

### Kimeneti jelleggörbék

Kimeneti mennyiségek az  $I_C$  kollektoráram és az  $U_{CB}$  kollektor-bázis feszültség. A kimeneti jelleggörbék (4.8.b. ábra), a kimeneti mennyiségek közötti összefüggést fejezik ki különböző emitteráramoknál. Minden egyes jelleggörbe meghatározott emitteráramokra érvényes.

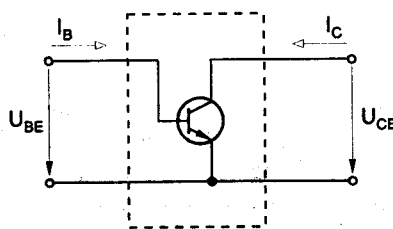


4.9. ábra. Jelleggörbék báziskapcsolásban  
 a) bemeneti jelleggörbék b) kimeneti jelleggörbék

A kimeneti jelleggörbe megközelítően vízszintes egy adott  $I_E$  értékre, tehát a kollektoráram nagyon kis mértékben függ a kollektor-bázis feszültség nagyságától. Azaz a fizikai működésnek megfelelően, a kollektoráram záró, telítési jelleggel rendelkezik.

### 4.5.2. A tranzisztor jelleggörbéi emitterkapcsolásban

Az emitterkapcsolás esetén fellépő feszültségek és áramok a 4.10. ábrán láthatók.



4.10. ábra. Emitterkapcsolásban fellépő feszültségek és áramok, NPN tranzisztor esetén



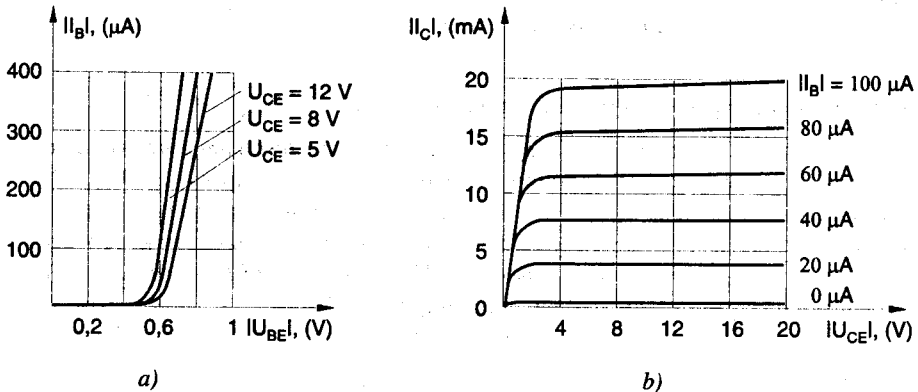
### Bemeneti jelleggörbék

Bemeneti paraméterek ebben az esetben a bázis-emitter feszültség ( $U_{BE}$ ) és a bázisáram ( $I_B$ ). A bemeneti jelleggörbét a 4.11.a. ábra szemlélteti. Hasonlóan a báziskapcsoláshoz, ez is nyitóirányú dióda jelleggörbe.

### Kimeneti jelleggörbék

Az emitterkapcsolásnak megfelelő kimeneti jelleggörbék a 4.11.b. ábrán láthatók. Kimeneti paraméterek az  $I_C$  kollektoráram és az  $U_{CE}$  kollektor-emitter feszültség. Az egyes jelleggörbék meghatározott bázisáram-értékre érvényesek, amelyet a karakterisztika felvétele során állandó értéken kell tartani. Ha  $I_B = 0$ , akkor a kollektoráramot az  $I_C = (1+B) \cdot I_{CBO}$  maradékáram alkotja. Ez szilíciumtranzisztorok esetén elhanyagolható értéket képvisel.

Tranzisztorokkal a valóságban csak megközelítően lehet lineáris erősítőt készíteni, ehhez a kimeneti- illetve bemeneti jelleggörbén szükséges egy meghatározott munkapontot kijelölni. Egyszerűsítésként a számításokhoz a munkapont közelében a jelleggörbéket érintőikkel helyettesítjük. Az érintők meredekségét *differenciális jellemzőknek* vagy *kisjelű paramétereknek* nevezzük.



4.11. ábra. Jelleggörbék emitterkapcsolásban  
a) bemeneti jelleggörbék b) kimeneti jelleggörbék

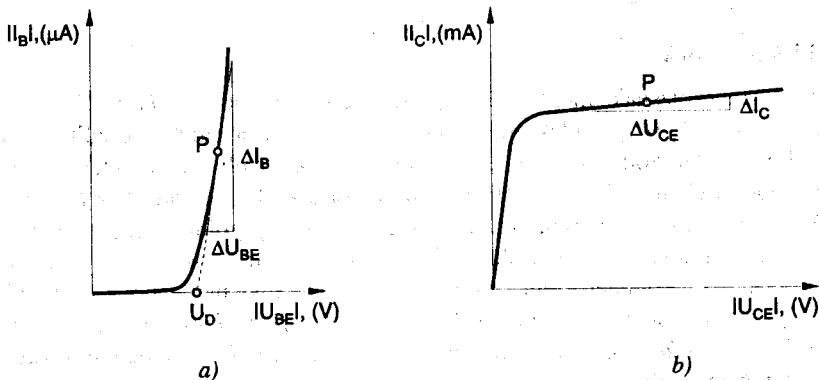
A bemeneti jelleggörbe meredeksége egy adott  $P$  pontban, az  $r_{BE}$  *differenciális bemeneti ellenállást* adja meg (4.12.a. ábra). Meghatározás szerint a differenciális bemeneti ellenállás:

$$r_{BE} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE} = \text{állandó}}$$

ahol  $\Delta U_{BE}$  a bázis-emitter feszültség változása,  $\Delta I_B$  a bázisáram változása ha  $U_{CE} = \text{állandó}$ . Az ábrán szerkesztett derékszögű háromszög, amelynek átfogója a görbéhez a  $P$  pontban húzott érintő, tetszőleges méretű lehet. A kollektoráram értékét a kollektor-emitter feszültség függvényében az  $r_{CE}$  *differenciális kimeneti ellenállás* adja meg:

$$r_{CE} = \left. \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} \right|_{U_{BE} = \text{állandó}}$$

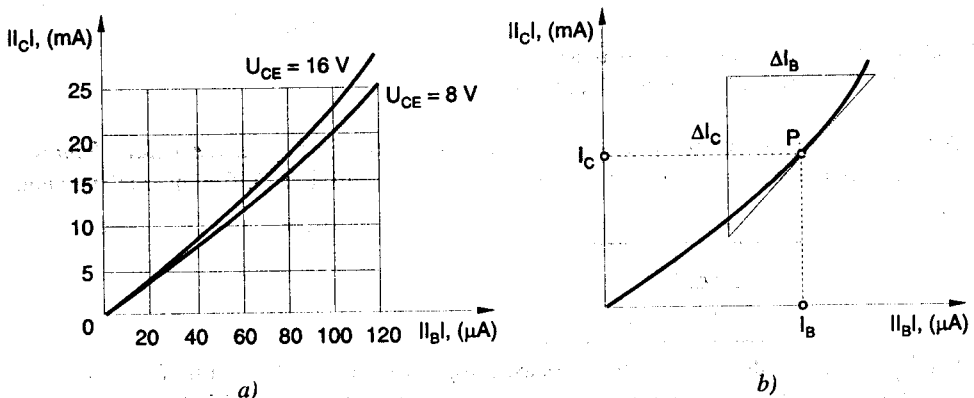
Az előbbi összefüggésben  $\Delta U_{CE}$  a kollektor-emitter feszültség változása,  $\Delta I_C$  a kollektoráram változása, ha  $U_{BE} = \text{állandó}$ . A differenciális kimeneti ellenállás tulajdonképpen, a kimeneti jelleggörbe meredeksége egy adott  $P$  munkapontban, (4.12.b. ábra).



4.11. ábra. Differenciális ellenállások grafikus meghatározása  
 a) a differenciális bemeneti ellenállás meghatározása  
 b) a differenciális kimeneti ellenállás meghatározása

**Áramokra vonatkozó átviteli (transzfer) jelleggörbék**

Az áramokra vonatkozó átviteli jelleggörbéket **áramvezérlési jelleggörbéknek** is nevezik. Ezek ebben az esetben, a kollektoráram és a bázisáram összetartozó értékeit adják meg, állandó  $U_{CE}$  feszültségnél. A 4.13.a. ábra különböző kollektor-emitter feszültségekhez tartozó áramvezérlési jelleggörbéket mutat. Jó minőségű tranzisztorok jelleggörbéje a kezdeti részen közel lineáris, majd kissé felfelé hajlik. A 4.13.b. ábra az áramerősítési tényezők meghatározását szemlélteti egy adott munkapontban.



4.13. ábra. Áramvezérlési jelleggörbék

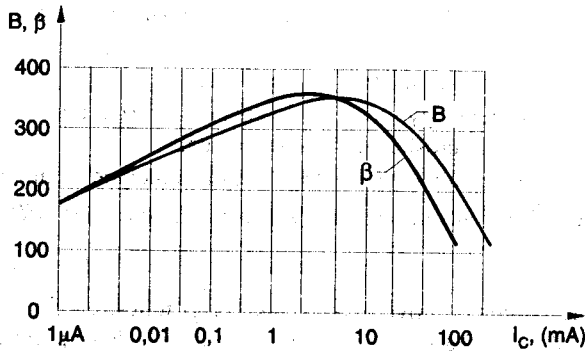
A  $P$  munkapontra vonatkozó  $B$  egyenáramú erősítés a jelleggörbéről leolvasható, mivel:

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

Az összefüggésben  $I_C$  a kollektoráram és  $I_B$  a bázisáram. Tehát az áramátviteli karakterisztikának megfelelően a kollektoráram első közelítésben arányos a bázisárammal. Az áramátviteli jelleggörbe meredeksége egy adott  $P$  munkapontban az ott érvényes  $\beta$  differenciális áramerősítő tényezőt határozza meg. Meghatározás szerint a differenciális áramerősítési tényező a  $\Delta I_C$  kollektoráram-változás és a  $\Delta I_B$  bázisáram-változás hányadosa:

$$\beta = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE} = \text{állandó}}$$

Az áramerősítési tényezők nem állandók, hanem a kollektoráram értékétől függnek (4.14. ábra). Értékük a kollektoráram növekedésével erőteljesen csökken. A teljesítménytranzisztorok áramerősítési tényezőjének maximuma amper nagyságrendű áramoknál van, de értéke lényegesen kisebb, mint a kisteljesítményű tranzisztorok esetén.



4.14. ábra. Kiszélű tranzisztor egyenáramú- és differenciális áramerősítési tényezőjének változása, a kollektoráram függvényében

## 4.6. A bipoláris tranzisztorok műszaki adatai

A műszaki adatok a tranzisztor üzemi jellemzőit adják meg. A gyártók a tranzisztorok adatlapjain különböző adatokat adnak meg, amelyek a felhasználás szempontjából elengedhetetlenül szükségesek. A tranzisztor működését egy adott munkapontban az előbbieket során már meghatározott emitterkapcsolásra érvényes jeladatok jellemzik:

- $r_{BE}$  – differenciális bemeneti ellenállás;
- $r_{CE}$  – differenciális kimeneti ellenállás;
- $\beta$  – differenciális áramerősítési tényező.

A kollektor- és bázisáram arányát kifejező  $B$  egyenáramú erősítési tényező, melyet különböző munkapontokra adnak meg, szintén fontos jellemzője a tranzisztornak:

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

További fontos, maradékáramokra vonatkozó jellemző adatok a következők:

- $I_{CB0}$  – kollektor–bázis maradékáram; nyitott emitter esetén;
- $I_{CES}$  – kollektor–emitter maradékáram; a bázis és emitter közötti rövidzárás esetén;
- $I_{CEO}$  – kollektor–emitter maradékáram; nyitott bázis esetén.

Bizonyos alkalmazások szempontjából fontos, a tranzisztor egyes zárórétegeinek a kapacitása. Ezt a záróréteg-kapacitások adják meg, amelyek adott zárófeszültségekre érvényesek:

- $C_{CB0}$  – kollektor–bázis kapacitás; nyitott emitter esetén;
- $C_{EB0}$  – emitter–bázis kapacitás; nyitott kollektor esetén.

A tranzisztorok tulajdonságai igen erős mértékben a működési frekvencia függvényei. Magasabb frekvenciákon a tranzisztorok paraméterei erőteljesen romlanak. A különböző frekvenciákon való működés jellemzésére *határfrekvenciákat* használnak

- $f_{\beta 1}$  – a  $\beta = 1$  áramerősítéshez tartozó frekvencia;
- $f_T$  – tranzitfrekvencia; egy mérési frekvencia és az ezen a frekvencián érvényes  $\beta$  differenciális áramerősítési tényező szorzata;
- $f_g$  – határfrekvencia; általában az a frekvencia, amelyen valamely mért mennyiség egy kisebb frekvencián (leggyakrabban 1 kHz-en) mért értékének  $1/\sqrt{2}$  – szeresére csökken.

A tranzisztor zárórétegeiben hővé alakult veszteségi teljesítményt a termikus egyensúly fenntartása miatt a környezetbe el kell vezetni. A hőleadás hatásfokát a *hőellenállásokkal* jellemzik, amelyek a következők:

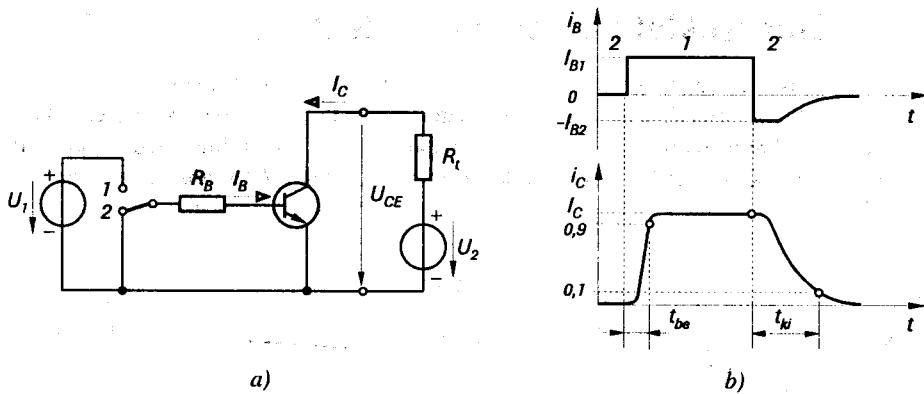
- $R_{thjc}$  – a záróréteg és a tranzisztortok közötti hőellenállás;
- $R_{thja}$  – a záróréteg és a környezeti levegő közötti hőellenállás; a hűtőfelület hőellenállásával együtt érvényes.

#### A tranzisztor kapcsolási idői

A tranzisztornak zárási állapotból vezetési állapotba való ugrásszerű vezérlésekor a kollektoráram csak egy bizonyos idő elteltével éri el maximális értékét. A nyitott tranzisztor zárása hasonló módon csak egy bizonyos idő eltelte után következik be. Az átmenetek a vezérlőmennyiséghez képest késnek. A 4.15. ábra egy NPN-típusú tranzisztor *kapcsolási időinek* mérőkapcsolását és jellemző hullámformáinak időbeni lefolyását mutatja.

$t_{be} (t_{on})$  – *bekapcsolási idő*; az az idő ami a bázisáram rákapcsolásától kezdve addig eltelik, amíg a kollektoráram maximális értékének 90 % -át eléri.

$t_{ki} (t_{off})$  – *kikapcsolási idő*; az az idő, amely a lezárójelnek a bázisra való kapcsolásától addig eltelik, amíg a kollektoráram maximális értékének 10 % -ára csökken.



4.15. ábra. A tranzisztor kapcsolási idői  
a) mérőkapcsolás b) jellemző hullámformák

## 4.7. Határértékek

Határértékeknek nevezzük azokat az adatokat, amelyeket nem szabad túllépni. A határértékek túllépése a tranzisztor meghibásodásához vezet. Az egyes határértékeket akkor sem szabad túllépni, ha más határértékek teljesen kihasználva.

### • A legnagyobb megengedett zárófeszültségek

A legnagyobb megengedett zárófeszültség túllépése, a megfelelő záróréteg átütéséhez vezet. A gyártók a tranzisztor adatlapjain legtöbbször az  $U_{CB0}$ ,  $U_{CE0}$  és  $U_{EB0}$  legnagyobb megengedhető zárófeszültségek szerepelnek.

### • A legnagyobb megengedett áramok

A legnagyobb megengedett áramok a tranzisztorok maximális áramterhelését adják meg.

- $I_{C\ max}$  – maximális kollektoráram; a legnagyobb megengedett tartós kollektoráram;
- $I_{CM}$  – kollektor-csúcsáram; az a maximális kollektoráram, amely csak véletlenszerűen és nagyon rövid ideig (leggyakrabban, 10 ms) léphet fel;
- $I_{B\ max}$  – maximális bázisáram; a legnagyobb megengedett tartós bázisáram.

### • A legnagyobb megengedett hőmérsékletek

A tranzisztorok zárórétegének hőmérséklete nem léphet túl egy meghatározott értéket, amely a  $T_j$  **maximális záróréteg-hőmérséklet**. Ennek tipikus értéke szilíciumtranzisztoroknál kb. 200 °C, germániumtranzisztoroknál viszont lényegesen alacsonyabb, 90 °C körüli érték.

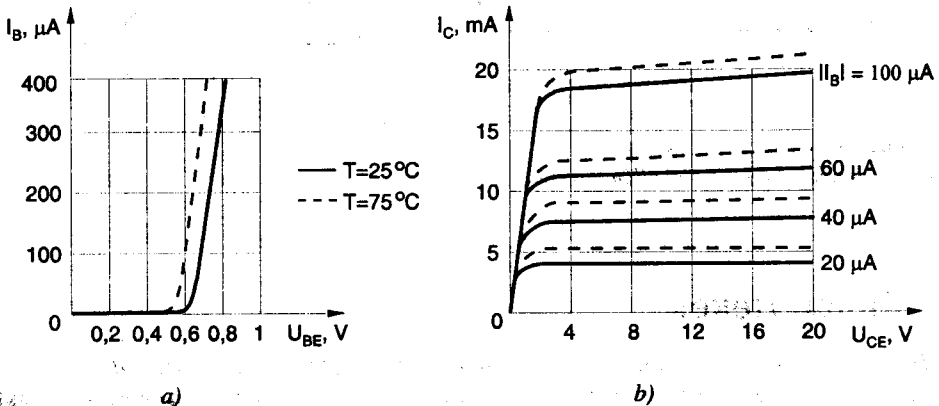
### • A legnagyobb megengedett veszteségi teljesítmény

A legnagyobb megengedett veszteségi teljesítmény ( $P_{tot\ max}$ ) a tranzisztorban hővé alakuló teljesítmény maximális értéke. A tranzisztor eredő veszteségi teljesítménye:

$$P_{tot} = U_{CE} \cdot I_C + U_{BE} \cdot I_B \approx U_{CE} \cdot I_C.$$

## 4.8. A hőmérséklet hatása a tranzisztor működésére

A hőmérséklet növekedése köztudottan a félvezetőkben megnöveli a töltéshordozók koncentrációját. Ez történik a bipoláris tranzisztor félvezető rétegeiben is. Ennek hatására a tranzisztor karakterisztikái és jellemzői megváltoznak. A felmelegedés hatására a munkaponti áramok növekednek és a karakterisztika eltolódik (4.16. ábra).



4.16. ábra. A tranzisztor hőfüggése  
a) bemeneti jelleggörbe esetén b) kimeneti jelleggörbe esetén

A bemeneti jelleggörbe tulajdonképpen egy nyitóirányban előfeszített  $PN$ -átmenet hőfüggését szemlélteti. A hőmérséklet növekedése a bázis- és emitteráram növekedéséhez és a jelleggörbe balra tolódásához vezet. A bázis-emitter feszültség  $\Delta U_{BE}$  eltolódásának nagysága a megfelelő  $\Delta T$  hőmérsékletváltozáshoz viszonyítva jellemzi az emitteráram hőfüggését. A  $\Delta U_{BE} / \Delta T$  paraméter, amely az  $U_{BE}$  feszültség hőmérsékleti tényezője  $Si$ , és  $Ge$  alapú tranzisztoroknál megközelítően azonos értékű.

$$\frac{\Delta U_{BE}}{\Delta T} \approx -2 \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}}$$

Az  $U_{BE}$  feszültség hőmérsékleti tényezőjének gyakorlati értelmezése: ha a tranzisztoron állandó  $I_E$  emitteráram halad át és a hőmérséklet  $\Delta T$  értékkel nő, a bázis-emitter átmenet feszültsége  $\Delta U_{BE}$  értékkel csökken, azaz kb. 2 mV-tal  $^\circ\text{C}$ -onként (ha  $T = 300 \text{ K}$  közelében vagyunk).

A kimeneti jelleggörbe eltolódása a hőmérsékletemelkedés következtében két tényezőnek tulajdonítható:

- a megnövekedett emitteráram növeli a kollektoráramot;
- az  $I_{CBO}$  maradékáram növekedése (bár kismértékben) szintén hozzájárul a kollektoráram növeléséhez.

A tranzisztorok paramétereinek hőfüggése a gyakorlati alkalmazások szempontjából igen kedvezőtlen jelenség. Csökkentése megfelelő munkapont-beállító kapcsolásokkal és megfelelő hűtéssel lehetséges.

## 4.9. A tranzisztorok hűtése

A bipoláris tranzisztorok egy nem kívánatos, de jellemző tulajdonsága az úgynevezett *hőmegfűtás*, amely a nem megfelelően stabil  $I_C$  és  $U_{CE}$  értékeknek tulajdonítható. Ha a környezeti hőmérséklet nő, a kollektoráram növekszik és vele együtt nő a veszteségi teljesítmény is. A záróréteg és a környezeti levegő közötti véges (nem nulla) hőellenállás miatt a veszteségi teljesítmény növekedése újabb hőmérsékletemelkedéshez vezet, ami ismét növeli a tranzisztor áramait és vele együtt a veszteségi teljesítményt, és így tovább. A folyamat amely kezdetben lassan majd egyre gyorsulva jelentkezik, a *maximális veszteségi teljesítmény túllépése miatt*, a tranzisztor tönkremenetelével végződik.

A legnagyobb megengedett veszteségi teljesítmény a tranzisztor hűtésével növelhető. Kisebb veszteségi teljesítményű vagy kisebb veszteségi teljesítménnyel üzemeltetett tranzisztoroknál általában elegendő a tok és a környezeti levegő közötti természetes hőátadás. Nagyobb veszteségi teljesítménnyel üzemelő tranzisztoroknál a hőelvezetés javítása miatt hűtőlemezt, hűtőcsillagot, vagy más különleges hűtőtestet kell alkalmazni.

Azt a hőmennyiséget, amely a záróréteg és a hűtőkörnyezet közötti hőmérséklet-különbségből adódóan időegység alatt távozik, a  $G_{th}$  *hővezetés* adja meg.

A zárórétegben keletkezett hő elsősorban a tokfelület, vagy a tok alsó része révén kerül elvezetésre. Az időegység alatt keletkező hőmennyiség megegyezik a  $P_{tot}$  veszteségi teljesítménnyel. A hővezetés reciproka az  $R_{th}$  *hőellenállás*:

$$R_{th} = \frac{T_j - T_k}{P_{tot}} \quad (\text{mértékegysége } \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \text{ vagy } \frac{\text{K}}{\text{W}});$$

ahol,  $T_j$  a záróréteg legnagyobb megengedett hőmérséklete és  $T_k$  a hűtőkörnyezet hőmérséklete. A hűtőkörnyezet hőmérséklete – ha nincs megadva – a gyakorlati számításokban  $T_k = 45^\circ\text{C}$ -nak vehető. A veszteségi teljesítmény:

$$P_{tot} = \frac{T_j - T_k}{R_{th}}$$

Mivel a hűtőkörnyezet lehet a tranzisztorok, a levegő vagy a hűtőlemez, többféle hőellenállás határozható meg (4.17.a. ábra):

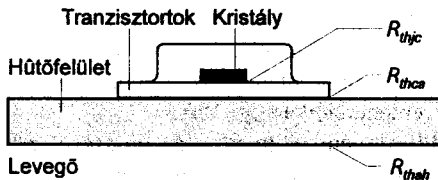
- $R_{thjc}$  – a záróréteg és a tranzisztorok közötti hőellenállás (a tranzisztor adatlapján szerepel);
- $R_{thca}$  – a tranzisztorok és a hűtőfelület közötti hőellenállás (a szerelés minősége határozza meg);
- $R_{thah}$  – a hűtőfelület és a környezeti levegő közötti hőellenállás (a hűtőlemez jellemzője).

A hőellenállás a záróréteg és a környezet levegője között ( $R_{thja}$ ):

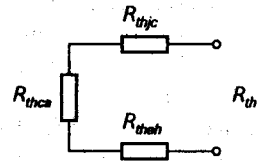
$$R_{thja} = R_{thjc} + R_{thca}$$

A teljes hőellenállás a záróréteg és a környezet levegője között ( $R_{th}$ ), hűtőlemezre szerelt tranzisztor esetén (4.17.b. ábra):

$$R_{th} = R_{thjc} + R_{thca} + R_{thah}.$$



a)



b)

4.17. ábra. Hűtőlemezre szerelt tranzisztor hőellenállásai  
a) szerelési vázlat b) az elrendezés eredő hőellenállása

Abban az esetben, ha a hűtőfelület nagyságát szeretnénk meghatározni akkor az:

$$R_{thah} = \frac{1}{\alpha \cdot F}.$$

összefüggést alkalmazzuk. Itt  $F$  a hűtőfelület nagysága  $cm^2$  mértékegységben és  $\alpha$  a hőátadási tényező, amelynek értéke a hűtőfelület jellemzőitől (anyagától, kialakításától, elhelyezésétől) függ. Az  $\alpha$  hőátadási tényező tipikus értéke  $0,5 + 3 \text{ mW/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . A hűtőfelület nagysága a veszteségi teljesítmény függvényében:

$$F = \frac{\frac{1}{\alpha}}{\frac{T_j - T_k}{P_{tot}} - R_{thja}},$$

ahol a gyakorlatban megvalósítható hűtésre:

$$\frac{1}{\alpha} \approx 500 \frac{cm^2 \cdot ^\circ C}{W}.$$

### ☞ Számítási példa:

A BD 249 C típusú NPN teljesítménytranzisztor legnagyobb záróréteg hőmérséklete  $150^\circ\text{C}$ . Adatlapján szereplő hőellenállása  $R_{thjc} = 1,5^\circ\text{C/W}$ . A tranzisztor Al hűtőlemezre szereljük, amelynek hőellenállása  $R_{thah} = 1,2^\circ\text{C/W}$ . A hűtőlemez és a tranzisztor közötti elektromos szigetelést csillámlemezzel valósítjuk meg, amelynek hőellenállása  $R_{thca} = 0,5^\circ\text{C/W}$ .

a) Mekkora lehet a maximális veszteségi teljesítmény, amelyet a tranzisztor képes elviselni? A környezeti hőmérséklet maximális értéke  $40^\circ\text{C}$  lehet.

b) Mekkora hűtőfelülettel üzemeltethető  $P_{tot} = 40 \text{ W}$  teljesítményig anélkül, hogy hőmérséklete túllépne a maximálisan megengedett záróréteg-hőmérsékletet?



**Megoldás:**

$$a) \quad R_{th} = R_{thjc} + R_{thca} + R_{thah}$$

$$R_{th} = 1,5 \text{ } ^\circ\text{C/W} + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C/W} + 1,2 \text{ } ^\circ\text{C/W} = 3,2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$P_{tot} = \frac{T_j - T_k}{R_{th}} = \frac{150 \text{ } ^\circ\text{C} - 40 \text{ } ^\circ\text{C}}{3,2 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}} = \frac{110}{3,2} \text{ W} \approx \underline{34 \text{ W}}$$

$$b) \quad R_{th} = \frac{T_j - T_k}{P_{tot}} = \frac{150 \text{ } ^\circ\text{C} - 40 \text{ } ^\circ\text{C}}{40 \text{ W}} = \frac{110}{40} \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} = 2,75 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{thah} = R_{th} - R_{thjc} - R_{thca} = 2,75 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} - 1,5 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} - 0,5 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} = 0,75 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$F = \frac{1}{\alpha \cdot R_{thah}} = 500 \cdot \frac{^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2}{\text{W}} \cdot \frac{1}{0,75} \frac{\text{W}}{^\circ\text{C}} \approx \underline{666 \text{ cm}^2}$$

**Összefoglaló kérdések:**

1. Hogy és milyen feltételek mellett alakul ki a PN-átmenet bipoláris tranzisztor esetén?
2. Hogyan feszítik elő a tranzisztort normális működés esetén?
3. Miért kisebb a bázisréteg szélessége a kollektor és az emitter réteg szélességénél?
4. Hogyan jön létre a kollektoráram?
5. Mi a tranzisztor nagyjelű és kisjelű áramerősítési tényezője?
6. Mivel változtatható a kollektoráram nagysága?
7. Mit nevezünk maradék-, vagy visszáramnak?
8. Milyen visszáram folyik normál üzemben?
9. Melyek a tranzisztor alapegyenletei?
10. Milyen alapkapcsolásokat ismerünk bipoláris tranzisztorok esetén?
11. Mit nevezünk bemeneti és kimeneti karakterisztikának?
12. Mit nevezünk differenciális áramerősítési tényezőnek?
13. Mi a különbség az üzemi és a határérték adatok között?
14. Milyen hatása van a hőmérséklet növekedésének egy bipoláris tranzisztor működésére?