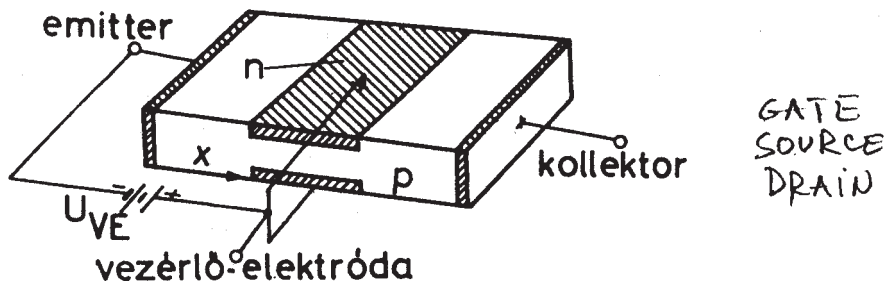


4-7.2. Tervezérlésű tranzisztor (FET)

Az előzőekben láttuk, hogy a szennyezett félvezetők fajlagos ellenállását a bennük levő szabad töltéshordozók - elsősorban a többségi töltéshordozók - koncentrációja szabja meg. A töltéshordozók koncentrációja külső behatással (például fény- vagy hőenergiával) változtatható. A félvezető átmenetek tulajdonságai azonban erre a célra egy másik lehetőséget is kínálnak. A záróirányban előfeszített pn átmenet környezetében szabad töltéshordozókban nagyon szegény, kiürített réteg jön létre, amelynek vastagsága függ a záróirányú feszültségtől. A jelenség - alkalmas módon - ellenállás változtatásra használható, és lehetőséget ad egy újfajta erősítő elem, az ún. tervezérlésű tranzisztor kidolgozására, amelyet angol nevének (Field Effect Transistor) kezdőbetűiből gyakran FET-nek is neveznek. Az elv tulajdonképpen nem új, már az 1940-as években ismertté vált, de a tervezérlésű tranzisztor tömeges gyártása csak az 1960-as években - a fejlett félvezető gyártástechnológiai módszerek kidolgozása után - indulhatott meg.

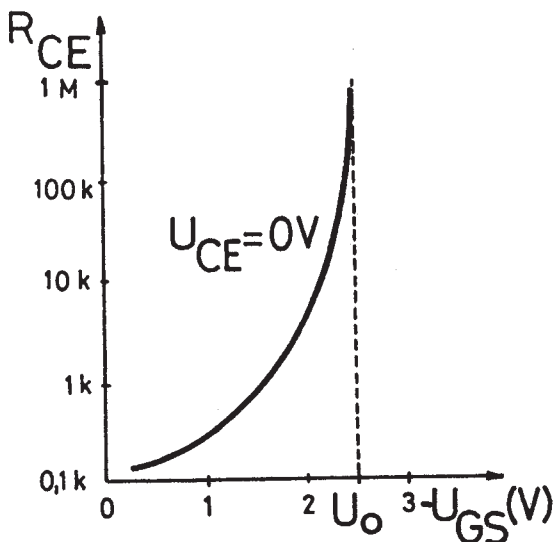
A tervezérlésű tranzisztor elvi felépítése a 4-93. ábrán látható. Egy n- vagy p-típusú félvezető lapocskából áll, amelynek szemközti oldalain pn átmeneteket hoznak létre. Az így kialakított, alapfélveze-



4-93. ábra
Tervezérlésű tranzisztor elvi felépítése

tővel ellentétes típusú rétegeket fémesen összekötik egymással. Ez képezi a tranzisztor vezérlő elektrodáját (gate). Az emittert (source) és kollektort (drain) a félvezető lapocska két végének fémes kivezetése adja. Itt az emitter és kollektor teljesen egyenértékű, egymással felcserélhető. A lapocskának a két pn átmenet közötti részét csatornának nevezzük. Ez a tervezérlésű tranzisztor aktív tartománya. Az alapfélvezető típusának megfelelően p- vagy n-csatornás FET-ről beszélhetünk.

Ha a vezérlőelektroda és az emitter közé U_{VE} záróirányú vezérlőfeszültséget kapcsolunk, megnövekszik a csatornát határoló kiürített rétegek vastagsága, csökken a hatásos csatornavastagság, ennek megfe-



4-94. ábra

n csatornás térvezérlésű tranzisztor kollektor-emitter ellenállása a vezérlő feszültség függvényében

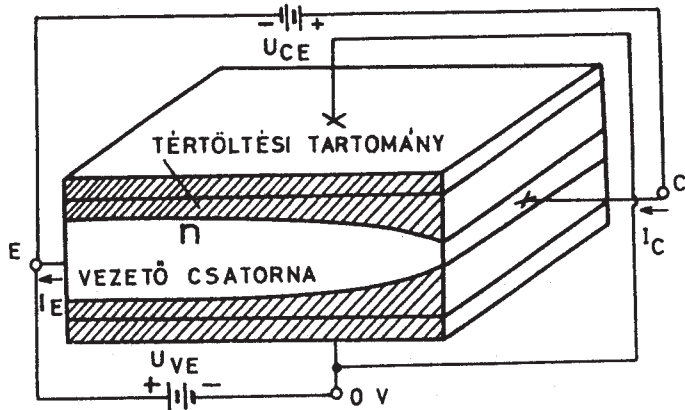
metriájától és szennyezettségétől függ, rendszerint 10...100 ohm nagyságrendű. Maximális értéke ($U_{VE} \geq U_0$ -nál) 10^{10} ohm nagyságrendbe esik.

Kössünk az emitter és kollektor közé a 4-95. ábrán jelzett polaritással U_{CE} feszültségforrást. (p csatornás FET-nél az U_{VE} és U_{CE}

előlően megnő az emitter-kollektor ellenállás is. Ilymódon a félvezetőből kiképzett vezetősatorna ellenállása a vezetési irányra merőleges elektromos térrel szabályozható. A 4-94. ábra egy n csatornás térvezérlésű tranzisztor kollektor-emitter ellenállását (R_{CE}) mutatja a vezérlőfeszültség függvényében. Az ábrán látható, hogy a csatornaellenállás a záróirányú feszültség növelésével egyre nagyobb meredekséggel növekszik. Ha U_{VE} eléri vagy meghaladja az U_0 lezárási feszültséget, R_{CE} igen nagy érté-

ket vesz fel, a csatorna teljes keresztmetszete kiüritett tartomány lesz. R_{CE} minimális értéke

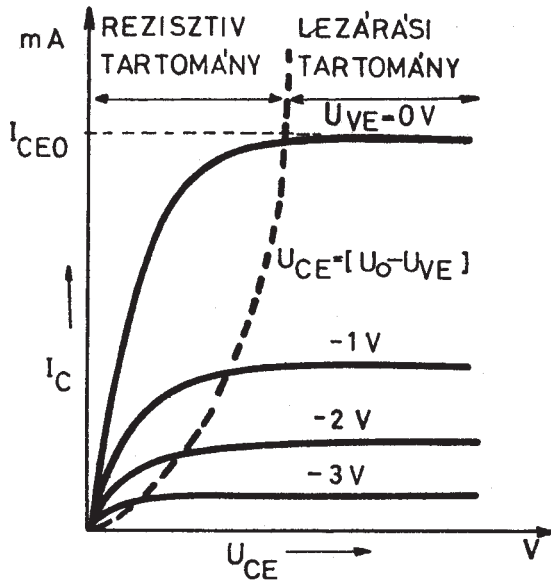
($U_{VE} = 0$ esetén) a csatorna geo-



4-95. ábra

Az aktív csatorna keresztmetszete

polaritása értelemszerűen felcserélendő.) Ekkor a csatornaáram (I_C) a vezérlőfeszültséggel változtatható. A csatornaellenállás függ a kollektor-emitter közötti feszültségtől is, emiatt adott U_{VE} mellett I_C az U_{CE} feszültségnek nem lesz lineáris függvénye. A csatornában folyó áram ui. ohmos feszültségesést hoz létre, amely befolyásolja az átmenetek záróirányu előfeszültségét, így a csatorna mentén változik a hatásoos keresztmetszet. Emiatt az emitter és kollektor közötti ellenállás nemlineáris. Ha változtatjuk a kollektor-emitter feszültséget, megváltozik a vezető csatorna geometriája és egyben az ellenállása is. A 4-96. ábrán egy n csatornás térvezérlésű tranzisztor kimeneti karakterisztikája látható.



4-96. ábra
n csatornás térvezérlésű tranzisztor
kimeneti karakterisztikája

A görbék nagyon hasonlítanak a közöséges tranzisztorok kimeneti karakterisztikájához. Itt is két tartományt különböztetünk meg. A szaggatott vonaltól balra eső tartományt lezárodásmentes vagy rezisztív tartománynak nevezzük. Ebben a tartományban a hatásoos csatorna keresztmetszete a kollektor környezetében is jelentős, és a kollektorfeszültség változása - a kiüritett rétegek nagymérvű változása miatt - erősen befolyásolja a kollektoráramot. Ha a kollektorfeszültséget növeljük, a vezető csatorna a kollektor környezetében kezd beszűkülni. Egy határon túl - amikor U_{CE} és $|U_{VE}|$ összege eléri az U_0 lezárási feszültséget - a kol-

lektoráram már alig függ a kollektorfeszültségtől [16], [32]. Ez a tartomány (a szaggatott vonaltól jobbra) az ún. lezárási tartomány.

A térvezérlésű tranzisztorokat erősítőkapcsolásokban a lezárási tartományban üzemeltetik. Ebben a tartományban a kollektoráram közelítő értéke

$$I_C \approx I_{CEO} \left(1 - \frac{U_{VE}}{U_0} \right)^2 \quad (4-43)$$

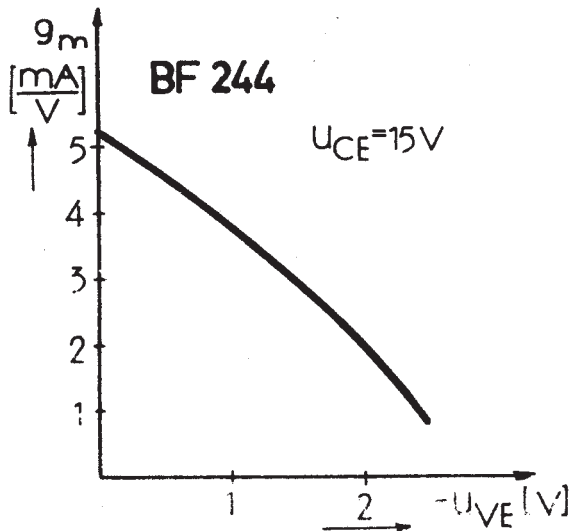
összefüggéssel határozható meg [32]. Az összefüggés szerint tehát a kollektoráram és a vezérlőfeszültség között négyzetes kapcsolat van.

A FET erősítésének jellemzésére a meredekség (g_m) szolgál, amely megmutatja, hogy a vezérlőfeszültség változása milyen mértékű kollektoráram-változást idéz elő:

$$g_m = \left. \frac{d I_C}{d U_{VE}} \right|_{U_{CE} = \text{áll.}} \quad (4-44)$$

A lezárási tartományban a (4-43) összefüggés felhasználásával

$$g_m = - \frac{2 I_{CEO}}{U_0^2} (U_0 - U_{VE}). \quad (4-45)$$



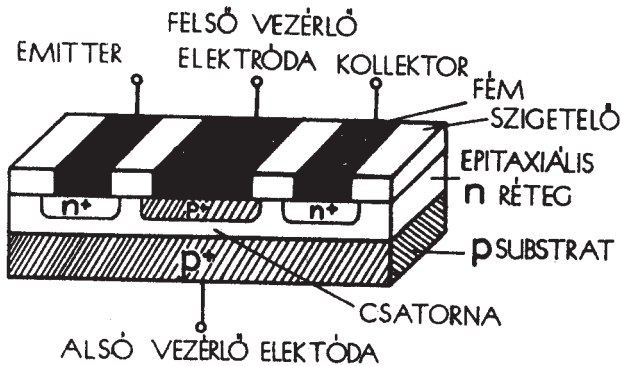
4-97. ábra

a csatornás FET meredeksége a vezérlő feszültség függvényében

Eszerint a meredekség és a vezérlőfeszültség közötti lineáris kapcsolat van (4-97. ábra). A térvezérlésű tranzisztorok ezen tulajdonságát gyakran erősítésszabályozásra használják.

A térvezérlésű tranzisztorok felépítése és fajtái

Az eddigiek során az ún. záróréteges FET (pn FET)-ről beszéltünk. Ennél a típusnál a vezérlőfeszültség csak záróirányu lehet, nyitóirányban ui. nagy vezérlőáram folyna. Az egyes rétegeket általában planáris vagy epitaxiális technológiával állítják elő. A 4-98. ábrán egy epitaxiális n-csatornás pn FET keresztmetszete látható. A p-szennyezésű szilícium kristályra vékony és kevésbé szennyezett n-réteget növesztenek,

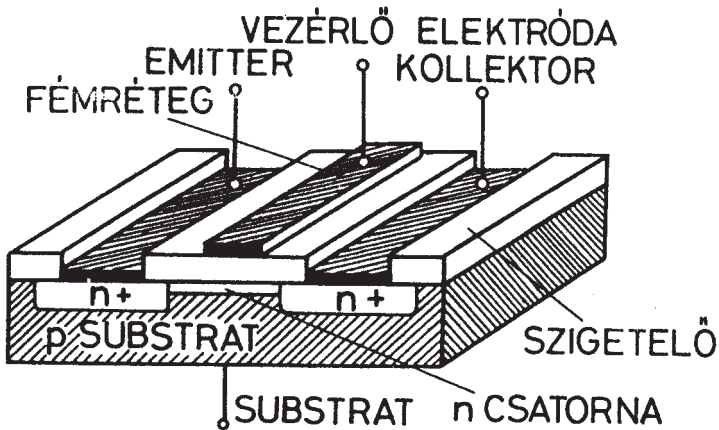


4-98. ábra

Epitaxiális eljárással készített n csatornás pn FET keresztmetszete

majd az n-rétegben diffúzióval p-zónát alakítanak ki. A két p-réteg egymással összeköttetésben van, ezek alkotják a vezérlő elektródát. A kollektor- és emitterkivezetés környezetében az epitaxiális n-réteget erősebben szennyeznek, ezáltal nagymértékben csökkenthető a kollektor- és emitterzóna ellenállása. Az egyes zónákat úgy alakítják ki (pl. gyűrűs felépítéssel), hogy a vezérlőelektróda zónája teljesen körülvegye a kollektorzónát. Enélkül a csatorna szélein jelentős söntölés lépne fel a kollektor és emitter között. A pn FET vezérlőárama a záróirányu vezérlőfeszültség miatt igen kicsiny, rendszerint 10^{-9} , 10^{-10} A nagyságrendű.

A térvezérlésű tranzisztorok másik nagy csoportja a szigetelt vezérlő elektródájú vagy szigetelt kapus FET (IG FET). Itt a vezérlő elektródát fémréteg alkotja, amelyet vékony szigetelőréteggel elválasztanak a csatornától. n-csatornás változata a 4-99. ábrán látható. A kiindulási anyag gyengén szennyezett, p-típusú félvezető kristály, amely-



4-99. ábra

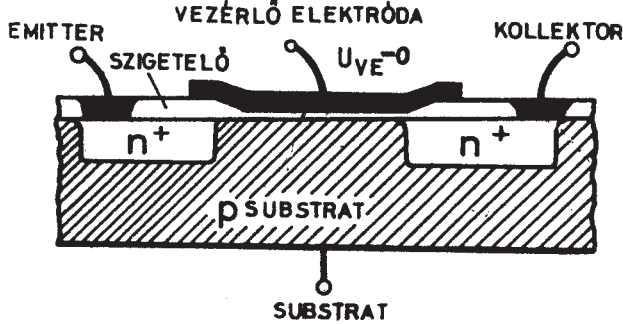
n csatornás IG FET keresztmetszete

nek felületén szennyezéssel n-típusú csatornát hoznak létre. A csatorna fölött termikus oxidációval szilíciumoxidot (SiO_2) hoznak létre, amely igen jó szigetelő. A SiO_2 -ra vékony fémréteget párologtatnak, ez a vezérlőelektroda. Az ilyen felépítésű tranzisztort igen gyakran - angol nevének kezdőbetűiből - MOS FET-nek vagy MIS FET-nek is nevezik, mivel felépítés sorrendje: fém - oxid - félvezető (metal - oxide - semiconductor) vagy fém - szigetelő - félvezető (metal - insulator - semiconductor). Az emitter és kollektor környezete itt is erősebb szennyezést kap. Az alapkristályt (substrat) külön kivezetéssel látják el. Az elektromos működés szempontjából ennek általában nincs lényeges szerepe, gyakran az emitterre kötik. Ujabban szigetelőréteggént szilíciumnitridet (Si_3N_4) vagy alumíniumoxidot (Al_2O_3) is használnak.

A szigetelt kapus FET tulajdonképpen egy kondenzátor, amelynek egyik fegyverzete fémréteg, a másik félvezető. Működése a záróréteges FET-éhez hasonló. A vezérlő feszültség a kiürített rétegen keresztül változtatja a csatorna ellenállását.

A 4-99. ábra szerint felépített n-csatornás IG FET-nél a vezérlés elsősorban a csatorna szűkítésével, azaz negatív vezérlő feszültséggel lehetséges. Az ilyen tranzisztorokat kiürítéses típusúnak nevezzük. Elvileg hasonló felépítésű p-csatornás kiürítéses FET is létrehozható. Meg kell jegyeznünk azonban, hogy p-típusú szilícium félvezetőből SiO_2 szigetelő alkalmazásával ez nem valósítható meg, mivel a p-típusú félvezető és a SiO_2 réteg között olyan hatások lépnek fel, amelyek megakadályozzák a kiürítéses üzemmódot [32].

A szigetelt kapus térvezérlésű tranzisztorok másik csoportja az ún. növekményes vagy dusicás IG FET (4-100. ábra). Ennél a típusnál a gyengén szennyezett alapfélvezetőben nem képeznek ki vezető csatornát,



4-100. ábra
n csatornás növekményes IG FET keresztmetszete

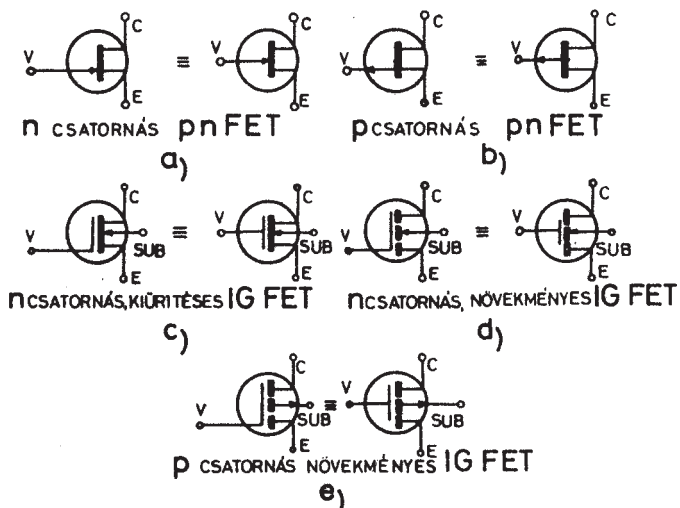
így nulla vezérlőfeszültségnél a kollektor-emitter között igen nagy ellenállás mérhető. A tranzisztor vezérlése - n csatornás típusnál - pozitív vezérlőfeszültséggel lehetséges. A vezérlőfeszültség növelésével az alapfélvezetőben egyre több elektron vándorol a szigetelőréteg felé, és egyre növekvő keresztmetszetű n-típusú csatornát hoz létre a kollektor és emitter között. Növekményes térvezérlésű tranzisztorokat elsősorban n-csatornás kivitelben készítenek a korábban említett SiO_2 és félvezető között fellépő hatások miatt, de különleges eljárásokkal p-csatornás kivitel is előállítható.

Az IG FET-ek jelleggörbéi hasonló alakúak, mint a záróréteges FET-eké, így ezekkel külön nem foglalkozunk. A 4-101. ábrán a térvezérlésű tranzisztorok szimbolikus jelölései láthatók.

Alapkapcsolások

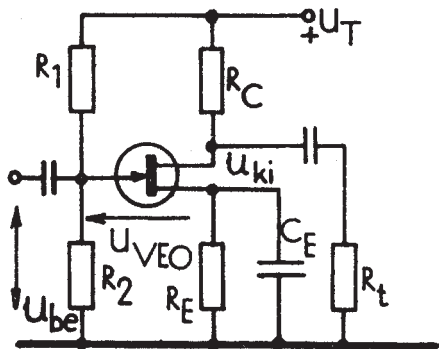
A térvezérlésű tranzisztorok a közöséges tranzisztorokhoz hasonlóan három alapkapcsolásban használhatók. A kapcsolási példákat záróréteges n-csatornás FET-re mutatjuk be

Földelt emitteres kapcsolásban (4-102. ábra), a munkapont beállításhoz szükséges egyenáramú U_{VE0} előfeszültséget az R_E emitterellenálláson eső feszültség és az R_1 , R_2 osztáspontján levő feszültség különbsége adja. Az emitter váltóáramúlag - a C_E kondenzátor alkalmazása miatt - földponton van. Az áramkör egyszerűsített kisfrekvenciás helyettesítő képe a 4-103. ábrán látható. Az erősítő fázist fordít. Beme-



4-101. ábra

A tervezérlésű tranzisztorok szimbolikus jelölései



4-102. ábra

Földelt emitteres kapcsolás n csatornás pn FET-tel

figyelembevételével a feszültségerősítés:

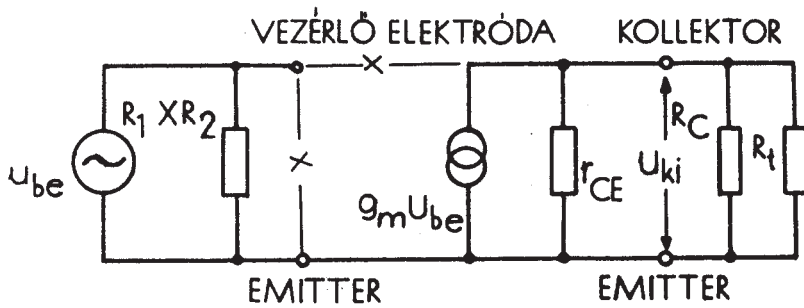
nő ellenállása kisfrekvencián igen jó közelítéssel $R_1 \times R_2$ -vel egyenlő. A FET áramgenerátorként fogható fel, amelynek árama a u_{be} bemenő feszültség és a g_m meredekség szorzata, így a kimenő feszültség:

$$u_{ki} = g_m \cdot u_{be} (r_{CE} \times R_C \times R_t).$$

A tranzisztor r_{CE} dinamikus kimenő ellenállása általában jóval nagyobb mint R_C és R_t párhuzamos eredője, ezért legtöbbször elhanyagolható. Ennek

$$A_u \approx g_m (R_C \times R_t). \quad (4-46)$$

Az r_{CE} értéke erősen munkapontfüggő. Szokásos értéke - beállítástól függően néhány kohm és néhány száz kohm között van.

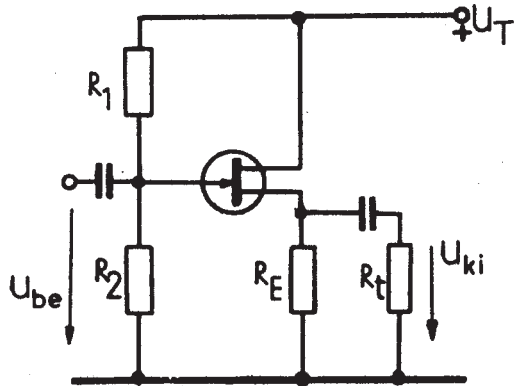


4-103. ábra

FET-es földelt emitteres kapcsolás egyszerűsített, kisfrekvenciás helyettesítő képe

A térvezérlésű tranzisztorokat leggyakrabban földelt emitteres kapcsolásban alkalmazzák. Kisfrekvencián nagy bemeneti és közepes kimeneti ellenállással rendelkeznek. Nagy terhelőellenállás esetén nagy feszültség- és teljesítményerősítés érhető el. Nagyfrekvencián azonban a tranzisztorkapacitások miatt az erősítés rohamosan csökken, különösen akkor, ha a jelgenerátor nagy belsőellenállású.

Sok esetben alkalmazzák a térvezérlésű tranzisztorokat földelt kollektoros kapcsolásban (4-104. ábra) impedanciaillesztő elemként. A munkapont beállítása az előző alapkapcsoláséhoz hasonló. A terhelés az emitterre csatlakozik, emiatt a feszültségerősítés egynél mindig kisebb. Értéke kisfrekvencián [32]:



4-104. ábra

Térvezérlésű tranzisztor földelt kollektoros kapcsolásban

$$A_u = \frac{g_m (R_E \times R_t \times r_{CE})}{1 + g_m (R_E \times R_t \times r_{CE})} \approx \frac{g_m (R_E \times R_t)}{1 + g_m (R_E \times R_t)} < 1. \quad (4-47)$$

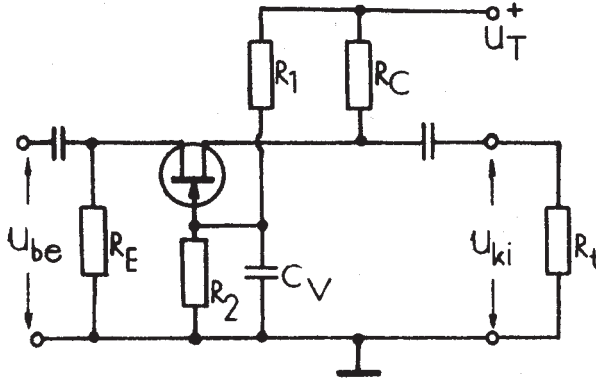
Az r_{CE} ellenállást itt is elhanyagolhatjuk.

A földelt kollektoros kapcsolás nem fordít fázist. Bemeneti ellenállása a földelt emittereséhez hasonlóan igen nagy, kimenőellenállása viszont meglehetősen kicsiny, közelítőleg a meredekség reciprokával egyenlő:

$$R_{ki} \approx 1/g_m, \quad (4-48)$$

emiat nagyon alkalmas impedanciaillesztésre. A kapcsolás nagyfrekvenciás tulajdonságai is kedvezőek. A bemeneti kapacitás hatása kevésbé érvényesül, mint a földelt emitteresnél, ezért eredményesen használható szélessávú erősítőkben is.

Földelt vezérlőelektródás alapkapsolásnál (4-105. ábra) a jelgenerátor az emitterre, a terhelés pedig a kollektorra csatlakozik. A vezérlőelektróda váltóáramulag földponton van. Az erősítő nem fordít fázist.



4-105. ábra
Tervezélrlésű tranzisztor földelt vezérlőelektródás
kapcsolása

Bemenő ellenállása kicsi, kimenőellenállása viszont elég nagy. Kizárólag nagyfrekvenciás célokra javasolható. Terhelésként párhuzamos rezgőkört alkalmazva nagy feszültségerősítés érhető el vele. Bár a földelt vezérlőelektródás erősítőknek a gyakorlatban a közönséges tranzisztorral felépített földelt bázisu kapcsolás mellett alig van jelentőségük, meg kell jegyeznünk, hogy nagyfrekvencián sok esetben eredményesebben alkalmazhatók azoknál.

A tervezélrlésű tranzisztorokat egyaránt használják erősítő- és kapcsolóáramkörökben is. Erősítőkben legtöbbször közönséges tranzisztorral együtt alkalmazzák. Integrált áramkörű erősítőkben - a nagy bemeneti ellenállás biztosítására - a bemenő fokozatot gyakran tervezélrlésű tranzisztorokból építik fel. Bonyolult felépítésű digitális integrált áramkörökben egyre nagyobb jelentőséget kapnak a komplementer MOS FET

párokból feépített egységek (CMOS rendszerek). A tervezérlésű tranzisztorok alkalmazására néhány példát a 4-8. fejezetben mutatunk be.

FET paraméterek

Tervezérlésű tranzisztoroknál a katalógusok általában nagyon sok, a széleskörű felhasználáshoz szükséges jellemző adatot közölnek. Ezek közül a legfontosabbak a következők:

- $I_{CEO}^{(I_{DSS})}$ vezérlőelektróda-emitter rövidzár, azaz $U_{VE} = 0$ esetén mérhető kollektoráram, adott kollektorfeszültségnél;
- U_0 (U_p) lezáró feszültség;
- $r_{CEbe}^{(r_{Dson})}$ dinamikus, kisfrekvenciás (1 kHz) kollektor-emitter ellenállás $U_{VE} = 0$ - és $U_{CE} = 0$ -nál;
- g_m (S_i vagy Y_{21s}) meredekség adott munkapontban;
- U_{ICVO} (U_{IDGO} vagy $U_{(BR)GS}$) letörési feszültség, az a kollektor-vezérlőelektróda közötti feszültség, amely fölött várhatóan fellép a letörés jelensége nyitott (szakadással lezárt) emitternél;
- I_V (I_{GSS}) a vezérlőelektródán átfolyó maradékáram adott U_{VE} és nulla U_{CE} feszültségnél;
- $P_{D(max)}^{(P_{tot})}$ maximális disszipációs teljesítmény adott környezeti hőmérsékleten;
- $T_j(max)$ maximális réteghőmérséklet.

A tervezérlésű tranzisztor valamennyi paramétere - a közönséges tranzisztorhoz hasonlóan - erősen munkapont- és hőmérsékletfüggő, ezért munkapont stabilizálásra legtöbbször itt is szükség van. A FET-ek különleges tulajdonsága, hogy a kollektoráram növelésével a hőmérsékletfüggés előjelet vált [32]. Kis kollektoráramoknál a hőmérsékletnövekedés növeli, nagyoknál csökkenti a kollektoráramot, emiatt hőmegűtés nem állhat elő. Az átmenet a pozitív és negatív hőmérsékletfüggés között folyamatos, ami azt jelenti, hogy a tervezérlésű tranzisztorok munkapontját meg lehet úgy is választani, hogy az hőmérsékletfüggetlen legyen. Ez igen nagy előnyt jelent a közönséges tranzisztorokhoz képest.