

# RH és URH teljesítményerősítők tranzisztorokkal

1.

Ijjas Gábor—Molnár Béla  
okl. vill. mérnökök, BME MHT



## 1. Bevezetés

A félvezetőtechnika az utóbbi években igen sokat fejlődött. Egyre korszerűbb, megbízhatóbb eszközök kerülnek ki a gyárakból, így egyre több rádiófrekvenciás teljesítménytranzisztor, melyek mind kivethető teljesítmény, mind határfrekvencia tekintetében egyre jobb jellemzőkkel rendelkeznek.

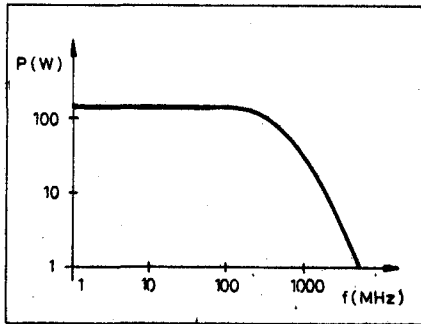
A jelenleg kapható típusokkal elérhető legnagyobb teljesítményt mutatja a frekvencia függvényében az 1.1. ábra. Az ábra adatai CW (modulálatlan folyamatos) üzemmódra vonatkoznak.

Az elméleti felső határ, a szakirodalom szerint 360 W 10 GHz-en, úgyhogy még jelentős fejlődés várható. A korszerű technológia és a nagytömegű gyártás az adótranzisztorok árát egyre kedvezőbbé teszi.

Természetesen a rádióamatőrök körében is egyre népszerűbbek a rádiófrekvenciás (a továbbiakban RF) teljesítménytranzisztorok, ezért cikk-sorozatunkban az RF teljesítményerősítők tervezésének és építésének elvi és gyakorlati problémáival foglalkozunk.

Alkalmazkodva az amatőr igényekhez, vizsgálatainkat a 3–500 MHz-es frekvenciatartományra korlátozzuk.

Célkitűzéseinknek megfelelően félvezető fizikai részleteket csak olyan mélységben tárgyalunk, amely elengedhetetlen az áramköri működés megértéséhez. Annál részletesebben foglalkozunk az építés során megol-



1.1. ábra

dandó problémákkal (pl. impedancia illesztés stb.).

A levezetéseknek általában csak a kiindulási alapját és a végeredményt közöljük, a részletes számítások ismertetésétől eltekintünk.

Néhány — a jobb megértést elősegítő — képlet kivételével csak olyan összefüggéseket írunk fel, amelyekre a gyakorlati munkában is szükség van.

## 2. RF teljesítményerősítők felosztása

Az RF teljesítményerősítők a kívánt teljesítményszintre emelik az oszcillátorból, modulátorból, sokszorozóból vagy az előző teljesítményerősítő fokozatból jövő jelet.

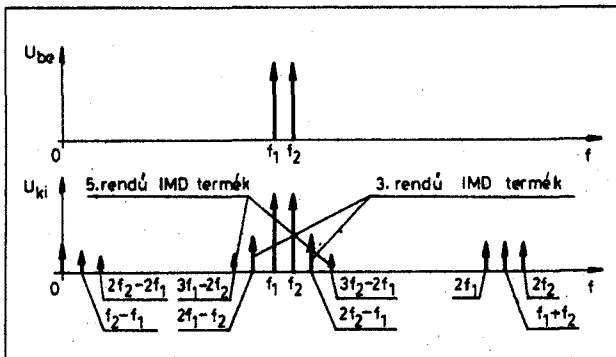
A csoportosítást három fő szempont szerint végezzük:

1. Az aktív eszköz munkapontja szerint megkülönböztetünk „A”, „AB”, „B” és „C” osztályú erősítőket. Az „A” osztály biztosítja a legjobb linearitást, a legnagyobb teljesítményerősítést a legrosszabb hatások mellett, így a disszipáció itt a legjelentősebb. A tranzisztoron vezérlés nélkül is nagy áram folyik. Az „AB”, ill. a „B” osztály jobb hatásfokot biztosít kisebb disszipáció mellett, ugyanakkor az erősítés is kisebb. A „C” osztályú beállítás adja a legjobb hatásfokot, azonban az aktív eszköz csúcsáram és csúcsteleszttség igénybevétele itt a legnagyobb. Későbbiekben még részletesen kitérünk a négy osztály jellemzőire.

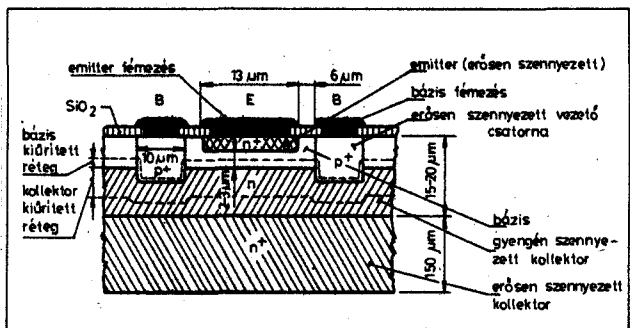
2. Az erősítő sáv szélessége szerinti felosztásban keskenysávú és széles-sávú erősítőkről beszélhetünk. A keskenysávú (vagy hangolt) erősítő sáv szélessége néhány százalék. A széles-sávú (vagy hangolatlan) erősítő sáv szélessége több oktav is lehet. (Pl. áthangolás nélkül átfoghatja a teljes rövidhullámú sávot.)

3. Az erősítő átviteli jellemzője szerint lineáris és nemlineáris erősítőkre oszthatjuk fel a teljesítményerősítőket. (Meggjegyezzük, hogy a mindennapi szóhasználatban az „RF teljesítményerősítő” kifejezés alatt a nemlineáris erősítőt értjük.)

Lineáris erősítőnél a kimenő amplitúdó konstansszorososa a bemenő amplitúdónak és az erősítő fázistolása független a jel amplitúdójától. A gyakorlatban az előbbi feltételek nem teljesülnek teljesen, és így amp-



3.1. ábra



4.1. ábra

litúdó- illetve fázistorzításról beszélünk.

Mivel a lineáris erősítő a hasznos jelnek sem az amplitúdóját, sem a fázisát nem torzítja, tehát minden üzemmód modulált jelnek erősítésére alkalmas. Azonban csak akkor célszerű alkalmazni, ha a jel amplitúdója valóban változik. A lineáris erősítőkben ugyanis az aktív eszköz „A” vagy „AB” osztályban üzemel, és így rosszabb a hatásfoka és bonyolultabb az elrendezése, mint a nemlineáris erősítőkben használt „B” vagy „C” osztályú beállításnak. Tehát a lineáris erősítőt elsősorban SSB és DSB jelek erősítésére használjuk.

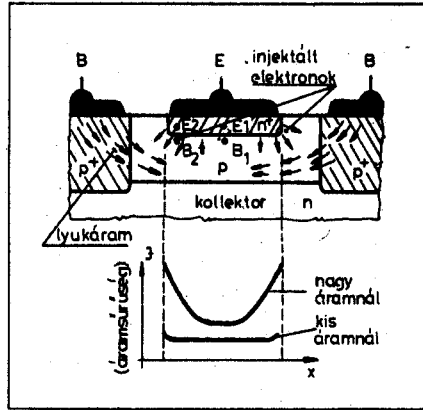
A nemlineáris erősítőnél a kimenő teljesítmény nemlineáris függvénye a bemenő teljesítménynek. Ebből következik, hogy amplitúdóban változó jelek erősítésére nem alkalmas, mivel torzítja az információt. Ezért csak modulálatlan vivő, billentyűzött vivő, fázis-, vagy frekvenciamodulált jel erősítésére alkalmas.

Különleges esetet képvisel a kétoldalsávú AM. Mivel amplitúdója változik, csak lineáris erősítővel erősíthető, ez azonban rossz hatásfokot, és kis kivethető teljesítményt eredményez. A fenti okok miatt AM jelet nem szokás erősíteni, a modulációt az utolsó teljesítményerősítő fokozatban hozzák létre, kollektormoduláció formájában. Így az RF jelet (a vivőt) jó hatásfokú nemlineáris erősítőkkel erősíthetik, amely jó eredő hatásfokot és kis disszipációt eredményez.

### 3. RF teljesítményerősítők jellemző paramétereivel

Az alábbiakban felsoroljuk a teljesítményerősítők néhány jellegzetes paramétereit:

1.  $P_{ki}$  – RF kimenő teljesítmény névleges értéke.
2.  $P_{be}$  – RF bemenő teljesítmény névleges értéke.
3.  $P_{be\ max}$  bemenő teljesítmény megengedett max. értéke.
4.  $10 \lg \frac{P_{be\ max}}{P_{be}}$  megengedett túlhajtás mértéke (dB).
5.  $G_p = 10 \lg \frac{P_{ki}}{P_{be}}$  teljesítményerősítés (dB).
6.  $f_0$  – sávközép frekvenciája.
7.  $f_b$  – sávzélesség.
8.  $\Delta G$  – erősítésingadozás az átviteli sávban (dB).
9.  $U_T$  – névleges tápfeszültség.
10.  $U_{T\ max}$  – tápfeszültség megengedett maximális értéke.
11.  $P_0$  – felvett egyteljesítmény.
12.  $\eta = \frac{P_{ki}}{P_0}$  hatásfok.
13. Kimenő- és bemenőkapcsok névleges impedanciája (gyakran 50 ohm).
14. Bemenő állóhullámarány (a továbbiakban ÁHA).
15. A terhelésen megengedett maximális ÁHA anélkül, hogy az erősítő tönkremenne.



4.2. ábra

16. A terhelésen megengedett maximális ÁHA, amely mellett az erősítő még nem gerjed.
17. A kimenőjel harmonikus tartalma.
18. Működési hőmérséklet-tartomány.

A fenti jellemzők lineáris és nemlineáris erősítőre egyaránt vonatkozhatnak.

Lineáris erősítőknél ezenkívül fontos adat az intermodulációs torzítás, az IMD (intermodulation distortion). Az IMD-t az erősítő transzfer ( $U_{ki} - U_{be}$ ) karakterisztikájának nemlinearitása, valamint a fáziskarakterisztikájának szintfüggése okozza. A nemlineáris karakterisztika miatt ugyanis a kimeneten megjelennek olyan frekvenciájú komponensek, melyek a bemeneten még nem voltak jelenek. Ezek a nemkívánatos (hamis) jelek az információt hordozó jel torzítását okozzák, valamint a szomszédos csatornákat zavarják.

Az IMD-t az ún. kéthangú jellel vizsgálják. Ez az erősítő átviteli sávjába eső, két, egymáshoz közeli frekvenciájú (pl.  $\Delta f = 1$  kHz), azonos amplitúdójú jel. A káros termékek közül csak azok okoznak IMD-t, amelyek a vizsgálójelhez közel esnek, ezért ezeket a kimenőszűrővel nem lehet kiszűrni.

A jeltorzulási folyamatot a 3.1. ábra mutatja.

Az erősítő torzítása miatt a kimeneten mindegyik kombinációs termék megjelenik. Az egyes kombi-

nációs termékek frekvenciáját a következő kifejezés adja meg:

$$n_1 \cdot f_1 + n_2 \cdot f_2$$

ahol  $n_1$  és  $n_2$  tetszőleges egész számok:

$$n_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

$$n_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

Valamely kombinációs termék rendjén  $n_1$  és  $n_2$  abszolút értékének összegét értjük (pl. a  $3f_1 - 2f_2$  frekvenciájú torzítási termék ötödrendű).

A 3.1. ábrán látható, hogy csak azok a páratlan rendű termékek esnek a vizsgálójel közelébe, amelyekre teljesül az:

$$n_1 + n_2 = 1 \quad (n_1 \neq 0, \text{ és } n_2 \neq 0)$$

feltétel.

A továbbiakban torzítási termék alatt csak az előbbi feltételeit teljesítő kombinációs terméket értjük.

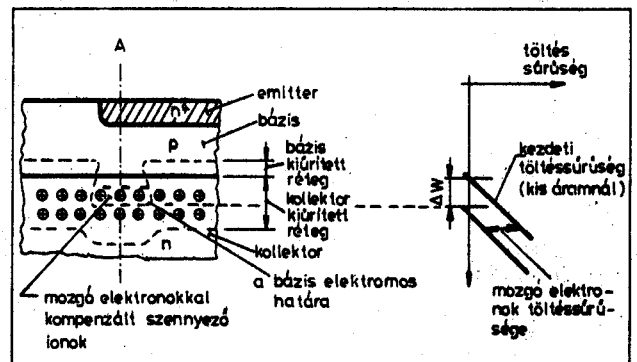
IMD számszerű értékén a legerősebb torzítási termék és az egyik vizsgálójel amplitúdójának dB-ben kifejezett viszonyszámát értjük (pl. -30 dB).

### 4. Nagy áramnál fellépő jelenségek a tranzisztorban

Nagyteljesítményű tranzisztorokban üzemszerűen nagy áramok folynak. A nagy áramok hatására fellép az ún. „áramkiszorítási” effektus, és az ún. „bázisszélesedés”. E két jelenség károsan befolyásolja a tranzisztor működését. A következőkben részletesebben megvizsgáljuk e két jelenséget, valamint azokat a technológiai megoldásokat, amelyekkel ezek a káros hatások lényegesen csökkenthetők.

Vizsgálatunkat a 4.1. ábrán látható tranzisztor modellen végezzük. Az ábrán a jellegzetes méreteket is feltüntettük.

Ez a tranzisztor-struktúra néhány kiegészítéssel a legtöbb mai nagyfrekvenciás teljesítménytranzisztorra igaz. A kétfajta kollektorréteget a konkrét technológiákban háromszoros diffúzióval vagy epitaxiális rétegnövesztéssel hozzák létre. Mint ismeretes a p-n átmenet alapvető el-



4.3. ábra

méletéből, ha az átmenetre záróirányú feszültséget kapcsolunk (p-réteg mínusz n-réteg plusz), mindkét típusú rétegben egy kiürített réteg keletkezik. A kiürített rétegben a szabad töltéshordozók száma igen kicsi, és így a kompenzálatlan szennyező ionok egyenletesen elosztott „lértöltést” alkotnak. A töltés előjele ellentétes a szennyezés típusával. A kiürített réteg vastagsága gyenge szennyezés esetén nagyobb, és a lezáró feszültség növelésével nő. A kollektor átmenet kiürített rétegeit szintén felrajzoltuk a 4.1. ábrán.

Gyakorlatilag az egész kollektor-bázis feszültség e kiürített rétegre esik, ezért az átütés elkerülése érdekében szükség van egy minimális kiürített réteg szélességre. Mivel a bázis szélességét a nagy határfrekvencia elérése érdekében kicsire kell választani, gyengén szennyezett kollektorral lehet csak biztosítani a szükséges kiürített réteg vastagságot.

További kollektorreteg elvileg nincs szükség, azonban az eddigiekhez olyan kicsi vastagság tartozik, amit gyakorlatilag nem lehet megvalósítani. Ha a gyengén szennyezett kollektorreteg adná a félvezetőlapka további részét is, túl nagy kollektorellenállást kapnánk. Ezért kell a második kollektorreteg, amely erő-

sen szennyezett, a kis ellenállás elérése érdekében.

A báziskivezetés alatti erősen szennyezett réteg csökkenti a bázis soros ellenállását és egyenletes bázisáram eloszlást biztosít.

A 4.2. ábrán felrajzoltuk a bázistartományt, abban az esetben, amikor nagy bázisáram folyik.

A bázisréteg viszonylag nagy ellenállásán folyó bázisáram feszültségesebbé hoz létre, és így az emitter-bázis átmenet belső pontjai kisebb nyitóirányú feszültséget kapnak. A p-n átmenet nyitóirányú árama jó közelítéssel exponenciálisan függ a rajtalevő feszültségtől, és a feszültség csökkentésével 4%/mV arányban csökken. Ez a csökkenési ráta azt jelenti, hogy ha az  $E_1-B_1$  pont feszültsége 18 mV-tal kisebb mint az  $E_2-B_2$  ponttá, az emitter közepén csak fele akkora lesz az áramsűrűség, mint a széleken. 60 mV-os feszültség-esés esetén az emitter széle 10-szer nagyobb áramsűrűséget injektál, mint a közepe. A 4.2. ábrán az áramsűrűség eloszlást is felrajzoltuk kis-és nagyáramú esetben.

Az eddigiekből kitűnik, hogy nagyáramú esetben gyakorlatilag csak az emitter kerülete hasznos. Nagyfrekvenciás alkalmazásban ez a jelenség még erősebben jelentkezik, mivel a csökkenő  $\beta$  miatt nagy

bázisáram szükséges. A nem injektáló felület a hasznos áram szállításában nem vesz részt, de kapacitása éppúgy jelen van, mint a hasznos felületé.

Nyilvánvaló, hogy az emitter kialakításánál nagy kerület-terület arányú geometriákat kell alkalmazni.


A most tárgyalt „áramkiszorítási” effektuson kívül egy másik tipikusan nagyáramú jelenség a „bázisszélesedés”. Ennek lényege, hogy nagy injekciós szint esetén a mozgó töltéshordozók kompenzálják a kollektor kiürített réteg kisáramú esetben kompenzálatlan szennyező atomjait. A jelenség ekvivalens azzal, mintha a bázisvastagság megnőne.

Természetesen az előbb tárgyalt két jelenség egyszerre jelentkezik. A 4.3. ábra bemutatja vázlatosan a bázisszélesedés jelenségét.

A 4.3. ábrán jobboldalt felrajzoltuk az A síkban a töltéssűrűséget, amelyből szemléletesen látható a bázisszélesedés, amit  $\Delta W$ -vel jeleltünk.

A tranzisztor nagyfrekvenciás viselkedése annál jobb, minél keskenyebb a bázis, tehát a bázisszélesedés jelensége szintén káros a nagyáramú, nagyfrekvenciás alkalmazásokban.

(Folytatjuk)



# KERVINTERN

*Villamosmérnövszervezet*

Budapest VII.,  
Landler Jenő u. 26.  
Levél cím: 1406 Bp. Pf. 18.  
Telefon: 425-932, 227-496, 429-544.

**VÖTSCH GmbH. Frommern (NSZK)**  
nagyüzemi klímaberendezések  
szervize.

Vállaljuk továbbá a hazai és import  
**ELEKTROMOS, ELEKTRONIKUS ÉS ANALITIKAI KÉSZÜLÉKEK**  
**ÉS BERENDEZÉSEK**  
javítását és karbantartását.