

ELZ

E. AISBERG

TA

TÁNC SICS

TRANZISZTOR

E. AISBERG

EZ A TRANZISZTOR



TÁNCSEKS KÖNYVKIADÓ
BUDAPEST, 1962

AZ EREDETI MŰVET
LE TRANSISTOR?... MAIS C'EST TRÈS SIMPLE!
CÍMMEL A
SOCIETE DES EDITIONS RADIO
9, RUE JACOB, PARIS 6^e
ADTA KI

Fordította:
SZABÓ CYÖRGY

A lapszéli ábrákat
POL FERJAC
rajzolta

A fedelet
VARGA GYŐZŐ
tervezte

© E. Aisberg, Párizs, 1962

622501
Athenaeum Nyomda
Felelős vezető: Soproni Béla igazgató

A kiadásért felel Kádár István, a Táncsics Könyvkiadó igazgatója. Felelős szerkesztő:
Ponori Thewrewk Aurél. Műszaki vezető: Faragó Imre. Műszaki szerkesztő: Nagy
Péter. 24 200 példány, melyből 1500 példány a román–magyar közös könyvkiadási
egyezmény keretében készült, 16 (A/5) év, MSZ 5691-59. Budapest, 1962

Előszó

Milyen nyugodtan követhettük a rádiótechnika lassú és zavartalan fejlődését egészen 1948-ig, amikor a tranzisztor megjelenése egyszerre mindent felforgatott! Igazi forradalom volt ez... A félvezető alkatrészek néhány éven belül meghódították az elektronika fontosabb területeit. Az immár klasszikus elektroncsöves kapcsolások mellett egészen új kapcsolások alakultak ki, és a régi rádiósok keserves kínok árán barátkoztak meg a kristálytriódákra vonatkozó új fogalmakkal és elvekkel.

Hogyan könnyíthetjük meg magunknak ezeknek az új fogalmaknak a megértését?

A szakemberek részére már számos kitűnő könyvet írtak a tranzisztorokról, csak hogy az ilyen könyvek megértéséhez ismerni kell a felsőbb matematikát és a félvezetők fizikáját, ami nem olyan egyszerű dolog. Ezzel szemben ritka az olyan, közepes szintű jó könyv, amelyből a gyakorlati rádiótechnikusok megismernék a tranzisztorok világát és megérthetnék a tranzisztorokban lejátszódó fizikai jelenségeket, úgyhogy önállóan is megpróbálhatnák követni az ilyen „háromlábú pókokat” tartalmazó modern kapcsolások működését.

Nagyon érezhető az ilyen, kezdők részére írt könyvek hiánya. A szakterületeken dolgozókkal és az amatőrökkel folytatott mindennapi beszélgetésekből kitűnt, hogy a legtöbben mennyire nem ismerik a tranzisztorok elméleti alapfogalmait. Ezért megpróbáltunk könyvet írni azok részére, akik valamennyire már ismerik a rádiótechnika alapfogalmait (például az „Ilyen egyszerű a rádió!” című könyvből), és most nagyobb nehézségek nélkül akarnak megismerkedni a tranzisztorok sajátos technikájával is.

A feladat egyáltalán nem volt könnyű. A tranzisztorok sokkal nehezebb kérdéseket vetnek fel, mint az elektroncsövek. A tranzisztorparaméterek kölcsönös összefüggése, a kis értékű bemenő ellenállás, a hő hatása, mindez csak megnehezíti az új kapcsolások megértését.

Eppen ezért eredetileg a könyv kéziratára ez a cím került: „A tranzisztor? ... Hisz az nem is olyan egyszerű!” (ezt a mondatot az első fejezetből vettük). A beszélgetések megírása során azonban az Okos Ifjú és a Kis Kíváncsi megjegyzéseiből kitűnt, hogy a dolgok nem is olyan bonyolultak. Indokolttá vált tehát, hogy olyan címet válasszunk, mint amilyen a rádióról és a televízióról szóló könyvünk jelent meg.

Vajon azt akarjuk ezzel mondani, hogy az itt következő fejezetek minden nehézség nélkül megérthetők? Egyáltalán nem. Az olvasónak nagyon figyelmesen kell majd elolvasnia minden mondatot, és csak akkor szabad továbbhaladnia, amikor már alaposan megértette az alapfogalmakat. Nehogy hamis illú-

ziókba ringassa a lapszéli ábrák humora és könnyedsége. Ezek a rajzok megkönnyítik a megértést, kiegészítik a szöveget és olyan kikapcsolódást okoznak, amelynek didaktikai értékét nem lehet túlbecsülni. Az új ismeretek megszerzéséhez azonban munkára, szívós és szorgalmas, de főképpen rendszeres munkára van szükség.

Egyesek már ismert dolgokra is rábukkanhatnak ebben a könyvben; ilyen lesz talán a munkaegyes megszerkesztése, a legkedvezőbb teljesítményátvitel feltétele. Annál jobb nekik! Másoknak viszont talán minden képzelőerejüket igénybe kell majd venniük, hogy megértsék a jelleggörbék használatát, amelyről olyan sokszor lesz szó.

Ne keressük ebben a könyvben a tranzistorok teljes és szabatos elméletét, ne kívánjuk mindjárt a különböző készülékek megépítéséhez szükséges kapcsolási rajzokat, elégedjünk meg az alapfogalmak megértésével! A rohamosan fejlődő tranzisztorteknika fogalmainak és kapcsolásainak tömegéből kénytelenek vagyunk csak a lényeges dolgokra szorítkozni, és elhagyni mindazt, ami holnapra már megváltozhat.

A következő oldalakon közölt élénk párbeszédnek két főszereplője nem tudálékoskodik és nem fontoskodik. Ugyanúgy gondolkoznak, mint Montesquieu, aki szerint „a fontoskodás az ostobák kedvenc szokása”. Ezért reméljük, hogy az olvasó e könyv olvasása közben szórakozva fog tanulni. Jó szórakozást!

E. AISBERG

Megjegyzés a második kiadáshoz

Úgy látszik, valóban nagy szükség volt erre a könyvre, mert alig néhány hónap múlva az első kiadás megjelenése után már gondoskodni kellett a második kiadásról. Felhasználtuk az alkalmat, újra átnéztük és kijavítottuk a szöveget, valamint az ábrákat. Ebben a munkában nagy segítségünkre volt B. Gordon barátunk, a strasbourgi iskola tanára, aki a növendékeinek ajánlotta a könyvet és meghallgatta véleményüket. Köszönjük a hasznos hozzászólásokat!

Örömmel állapítjuk meg azt is, hogy könyvünkről számos idegen nyelvű fordítás készül a különböző országokban.

Tudnivalók

a könyv elolvasása előtt

Az egységek jelölése

m — méter	W — watt
g — gramm	F — farad
s — másodperc	H — henry
V — volt	Hz — hertz (az 1 másod- perc alatti rezgések száma)
A — amper	
Ω — ohm	

A tízes rendszer

M — mega (1 000 000)
k — kilo (1000)
m — milli (0,001)
μ — mikro (0,000 001)
n — nano (0,000 000 01)
p — piko (0,000 000 000 001)

A tízes rendszerű előképzőt az egység megnevezése elé téve megkapjuk a megfelelően nagyobb, illetve kisebb egységeket. Ezek közül példaképpen néhányat felsorolunk:

mm — milliméter	mV — millivolt	pF — pikofarad
μ s — mikroszekundum (milliomod másodperc)	μ V — mikrovolt	kHz — kilohertz
mA — milliamper	M Ω — megohm	MHz — megahertz
μ A — mikroamper	μ F — mikrofarad	mW — milliwatt

Az áram iránya

A villamos áram elektronok elmozdulásából áll. Ezek az elektronok a külső áramkörben a *negatív pólustól a pozitív pólus felé* mozognak. Ezt nevezzük a következőkben áramiránynak. (A régebbi felfogás szerint a villamos áram a pozitív pólusból a negatív pólus felé folyik.)

Ha az áram ellenálláson folyik keresztül, feszültségesés létesül. Az ellenállásnak az a vége, ahol az áram befolyik, *negatívvá* válik az ellenállás másik végéhez képest, ahol is az áram kifolyik az ellenállásból.

A könyvben alkalmazott jelölések összefoglalása

A tranzistorok különböző jellemzőinek és jelleggörbéinek ismertetése során a következő jelöléseket fogjuk használni:

I_e — emitteráram	r_{be} — bemenő ellenállás
I_b — bázisáram	r_{ki} — kimenő ellenállás
I — kollektoráram	α — az áramerősítés közös bázis esetén
U_b — bázisfeszültség	β — az áramerősítés közös emitter esetén
U_k — kollektorfeszültség	γ — az áramerősítés közös kollektor esetén
μ — a belső ellenesatolás mértéke	

A tápfeszültségeket U betűvel jelöljük. A görög Δ (delta) betű mindig az utána írt mennyiség kismértékű változását jelenti.

A felsorolt jelöléseket nem érdemes előre megtanulnunk!

Most pedig figyeljünk az Okos Ifjú és a Kis Kíváncsi beszélgetéseire...

A szereplők



Az Okos Ifjú fiatal elektronikatanár. Annak idején a nagybácsijától tanulta meg a rádiótechnika alapjait. Mindig szívesen válaszolgat kíváncsi barátja kifogyhatatlan kérdéseire.



A Kis Kíváncsi volt az első tanítványa. Beszélgetéseiket két könyv tartalmazza. („Ilyen egyszerű a rádió!” és „Most már értem a televíziót!”). Ezekből a beszélgetésekből megállapíthattuk, hogy a Kis Kíváncsi nagyon tanulékony, bár néha egyes alapfogalmakkal sincsen tisztában. A Kis Kíváncsi jelenleg egy rádiógyár technikus.

Első beszélgetés

Ahhoz, hogy könnyebben megérthessük a tranzisztorok működését, előbb ismerkedjünk meg néhány fizikai és kémiai fogalommal, az atomok szerkezetével és kapcsolataival. Ezekről lesz szó a következő beszélgetésben.

Összefoglalás: Félvezetők. — A tranzisztor működése és előnyei. — A hő hatása a tranzisztorban. — Frekvenciahatár, teljesítménykorlátozás. — Molekulák. — Atomok. — Protonok, neutronok és elektronok. — Az elektronok eloszlása az atomhéjakon. — Ionizálás. — Vegyértékek. — Kristályrács.

Az atomok élete

A tranzisztorok áldozata

OKOS IFJÚ : Örülök, hogy újra látlak, kedves barátom. Hogyan telt el a szabadságod?

KIS KÍVÁNCSI : Rosszul.

O. I. : Talán nem volt jó az idő, esett az eső és nem tudtál strandolni?

K. K. : Ó, nem, nagyon is szép időnk volt. Csakhogy nem lehetett pihenni a strandon, mindenfelől bömböltek a kis tranzisztoros rádiók. A rettenetes slágeres és a vad tánczene keresztüzében tönkrementek az idegeim. Ráadásul nagyon kíváncsi lettem, hogyan képesek ezek a tranzisztorok ilyen lármát csapni, ezért megpróbáltam olvasni valamit a tranzisztorok elméletéről és alkalmazásairól. Egy szót sem értettem meg az egészből.

O. I. : Képzem, mennyire elkeseredtél. De, hogy megvigasztaljalak, hidd el, nem is olyan egyszerű az a tranzisztor. Amikor 1959 májusában megnyitották a Nemzetközi Tranzisztorokongresszust Londonban, lord *Hailsham* ezt mondta a megnyitó beszédében : „Nem hiszem, hogy tízezer ember között legalább egy olyan akadna — akár a legfejlettebb iparú államokban is —, aki meg tudná magyarázni, mi is az a tranzisztor, vagy hogy mit nevezünk félvezetőnek.

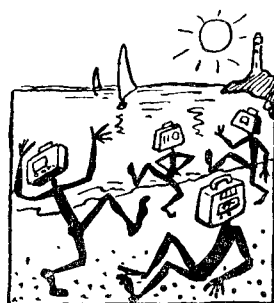
K. K. : Ez valóban vigasztaló rám nézve, annál is inkább, mivel azt hiszem, meg tudnám magyarázni, mik azok a félvezetők.

O. I. : Igazán? Na halljuk, mit tudsz róluk.

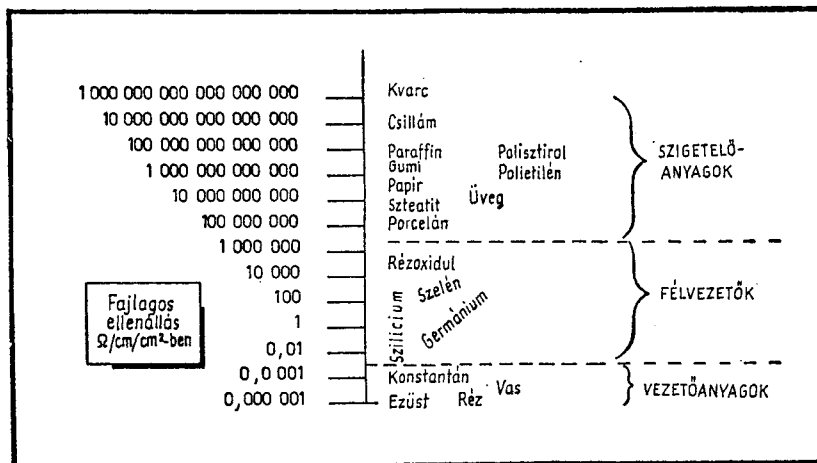
A háromlábú pókok

K. K. : Hát... a félvezetőknek sokkal nagyobb az ellenállásuk, mint a vezetőanyagoké, de sokkal kisebb, mint a szigetelőanyagoké.

O. I. : Ez tényleg így van, bár kissé bizonytalan a meghatározásod. Beszéljünk inkább konkrétan : például a germánium (ebből készül a legtöbb



tranzisztor) 300 milliószor nagyobb ellenállású, mint a réz. Ugyanakkor azonban a germánium ellenállása mindössze egy billiomodrésze az üveg ellenállásának.



1. ábra. A fontosabb vezetők, félvezetők és szigetelők eloszlása fajlagos ellenállásuk szerint. Amint látjuk, a félvezetők ellenállása nagyon tág határok között változik, úgyhogy táblázatunkon ezek az anyagok többé-kevésbé széles sávot foglalnak el



K. K. : Ezek szerint az ellenállásukat tekintve a félvezetők közelebb állnak a vezetőkhez, mint a szigetelőkhez?

O. I. : Igen. És éppen a sajátos vezetőképessége folytán lehet a germániumból „háromlábú pókokat” készíteni.

K. K. : Mi az a „háromlábú pók”?

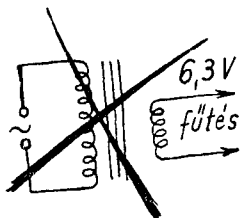
O. I. : Így is nevezhetjük a tranzisztorokat (vagyis a félvezető triódákat), ugyanis három kivezetésük van.

K. K. : Ha jól tudom, a tranzisztorokkal elektroncsöveket lehet helyettesíteni. Mondd, mindenben pótolhatja a tranzisztor az elektroncsövet? És miért volna előnyösebb?

O. I. : Nagyon sokat kérdezel egyszerre. Egyébként valóban, a tranzisztorok is, akárcsak az elektroncsövek, alkalmasak a jelek erősítésére és demodulálására, villamos rezgések előállítására, frekvencia-átalakításra és minden más olyan feladat elvégzésére, amit eddig az elektroncsövekkel végeztettünk el. Ami pedig az előnyeit illeti, nagyon sok kedvező tulajdonsága van. Kezdjük mindjárt azzal, hogy a tranzisztor nem kell fűteni.

K. K. : Ez nagyszerű! Tehát nem kell gondoskodni a fűtőáramról, mint az elektroncsöves kapcsolásokban?

O. I. : Nem hát. Éppen ezért a tranzisztoros rádió *rögtön megszólal*, amint bekapcsoljuk, míg az elektroncsöves készülék bekapcsolása után várnunk kell egy kis ideig, hogy a katódok felmelegedhessenek és elérjék a normális elektronemisszióhoz szükséges hőmérsékletet.



K. K.: Azt hiszem, a fűtőáram elhagyásával megjavul a *hatásfok*, hiszen az izzókatódos csövekben a bevezetett energia nagy része hő alakjában elvész.

O. I.: Pontosan így van. A tranzisztorok nem pazarolják el felesleges hőtermelésre a teljesítményt, mint az úgynevezett rádiócsövek. Ott, ahol az elektroncső esetleg 2 vagy 3 W-ot fogyasztana, a tranzisztor beéri körülbelül harminc milliwattal, tehát az előbbi fogyasztásnak mindössze *egy századrészevel*. Ezenkívül a vevőcsövekhez szükséges 200–300 V helyett a tranzisztor 10 V-nál kisebb feszültséggel már egészen tökéletesen működik.

K. K.: Végeredményben tehát egy vagy két zseblámpaelemmel már ki lehet elégíteni a tranzisztoros vevőkészülékek szerény étvágyát?

O. I.: Persze. Azok a hordozható rádióvevők is, amelyek elűztek téged a strandról, ilyen zseblámpaelemekkel működtek.

K. K.: Így tehát a tranzisztorok nem olyan kényesek, mint az elektroncsövek, és nyilván hosszabb ideig használhatók, hiszen nincsen bennük vékony, törékeny fűtőszál, sem pedig katód, amely lassanként elveszítheti emisszióképességét.

O. I.: Úgy van. A tranzisztorok szilárd felépítésűek (egyetlen germánium vagy szilícium kristályból, három kivezetésből és egy külső védőburából állnak), kis súlyúak, és egészen kicsi a méretük.

K. K.: Hát ez remek! Csupa előny, és semmilyen hátrány!

Az érem másik oldala

O. I.: Csak ne beszélj ilyen elhamarkodva! Van bizony a tranzisztoroknak több hátránya is. A legsúlyosabb az, hogy nem bírja a meleget. 55 °C felett már meglehetősen rohamosan romlanak a tulajdonságai, és ha egyszer 85 °C feletti hőmérsékletre melegedett fel, teljesen elveszíti eredeti képességeit, hiába hűtjük le utána¹. Legalábbis a germánium tranzisztorokkal ez a helyzet. A szilícium tranzisztorok sokkal magasabb hőmérsékletet is kibírnak, még 150 °C-on is jól működnek, ugyanis a szilíciumban a külső atomhéj elektronjai — amint később majd meglátod — szorosabb kapcsolatban vannak az atommaggal.

K. K.: Akkor hát vigyázni fogok, hogy a forrasztópákám ne jusson a tranzisztorok közelébe.

O. I.: Az bizony jó lesz. Ha pedig be akarod forrasztani a tranzisztor kivezetéseit, gondoskodnod kell arról, hogy a pákáról távozó hő ne melegítse fel magát a tranzisztorot.

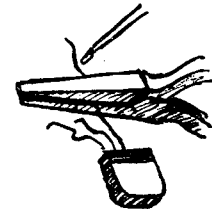
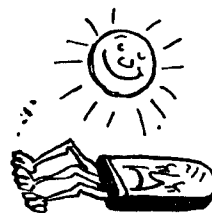
K. K.: Hogyan lehet ezt elérni?

O. I.: Úgy, hogy a kivezetőhuzalt a tranzisztor és a forrasztási hely között megfogod egy laposfogóval. Egyébként a tranzisztorgyárak olyan kivezetéseket alkalmaznak, amelyek rosszul vezetik a hőt (de természetesen jól vezetik a villamos áramot).

K. K.: Van-e valamilyen más hátránya is a tranzisztoroknak?

O. I.: Sajnos, van. Az, hogy csak bizonyos frekvenciákig és teljesítményig használható. Körülbelül száz megahertznél nagyobb frekvenciákon már nem működik.

¹ Egyes teljesítményerősítő tranzisztorok 100 °C hőmérsékletig is használhatók, amit viszonylag nagy mennyiségű szennyezőanyag bevitelével érnek el.





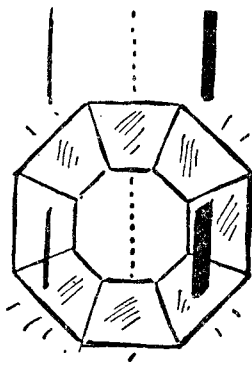
K. K.: Hát ez nem is olyan nagy baj, ha meggondoljuk, hogy a megahertz másodpercenként egymillió rezgést jelent.

O. I.: Nem működik ezenkívül nagyobb teljesítményekkel sem, mert a benne fejlődő meleg tönkreteszi.

K. K.: Gondolod, hogy ezek súlyos hátrányok?

O. I.: Egyáltalán nem. A tranzisztort, amióta a három amerikai fizikus, *Bardeen*, *Brattain* és *Shockley* 1948-ban feltalálta (Nobel-díjat kaptak ezért a találmányért), állandóan tökéletesítik. Azóta is a legtöbb esetben nagyon jól lehet helyettesíteni vele az elektroncsöveket. Azt azonban nem hiszem, hogy a tranzisztorok teljesen kiszoríthatnák a használatból az elektroncsöveket.

Kezdjük az elején



K. K.: Most, hogy már nem idegesítenek a nyaralóvendégek zsebrádiói, még kíváncsibb vagyok arra, hogyan is működik és hogyan használható fel a tranzisztor.

O. I.: Érdekes dolog, hogy amilyen egyszerűek a tranzisztoros áramkörök, olyan bonyolultak azok a jelenségek, amelyek ezekben a miniatűr félvezető triódákban lejátsszódnak.

K. K.: Ha már triódát mondtál, arra kell gondolnom, hogy a tranzisztornak is megvan a maga katódja, vezérlőrácsa és anódja.

O. I.: Valóban vannak a tranzisztorban olyan tartományok, amelyek a triódák elektródáihoz hasonlóan működnek: az egyik elektronáramot bocsát ki magából, a másik szabályozza az áram erősségét, a harmadik pedig elvezeti ezt az áramot. És ha csakugyan gyorsan akarsz előbbre jutni, röviden elmagyarázhatom a tranzisztorok alkalmazását úgy is, hogy a működési elvről nem beszélek. Ezt akarod?

K. K.: Nem, jobb volna, ha előbb megérteném, mi játszódik le bennük. Hiszen eddig is mindig azt mondtad, hogy gondolkozzam, kövessem a jelenségek belső mechanizmusát. Maradjunk csak meg továbbra is ennél az elvnel.

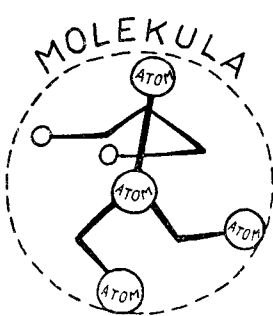
A molekulák és az atomok

O. I.: Igazad van, csak hogy most egészen az elején kell kezdenünk, azzal, hogy milyen is az anyag belső felépítése.

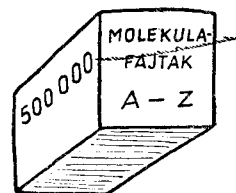
K. K.: Azt hiszem, ezt már jól ismerem. Az anyag legkisebb része, amely még megtartja az eredeti kémiai tulajdonságokat, a *molekula*, legalábbis így olvastam a fizikakönyvemben.

O. I.: Azt azonban már nem olvastad, hogy jelenleg hozzávetőlegesen egy félmillió különböző molekulát ismerünk, és ezek mind körülbelül 100 egyszerű elem atomjainak különböző társításaiból állnak.

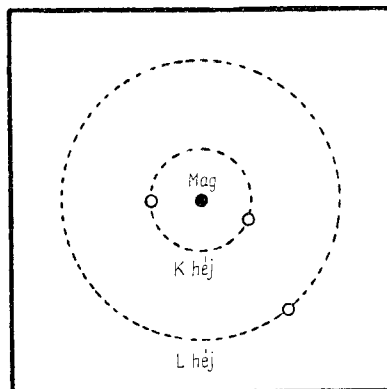
K. K.: De azt viszont olvastam a könyvemben, hogy a molekulák bizonyos távolságra vannak egymástól (ezért van az, hogy az anyagok összenyomhatók) és vonzóhatást fejtenek ki egymásra (még szerencse, mert különben minden széthullana apró porszemekre), ezenkívül folyton ide-oda mozognak, és melegítés közben növekszik a sebességük.



O. I.: Na lám, nem is vagy olyan tudatlan, mint ahogy gondoltam... Ezek a molekulák viszont atomokra bonthatók, az atomok pedig az egyszerű anyagok elemi részecskéi. Mindegyik atom, amint tudod...



2. ábra. A lítium atomban két elektron az atommagot körülvevő K héjon, egy pedig az L héjon kering



K. K.: ... egy-egy miniatúr naprendszer. Közepén van a Napnak megfelelően a *protonokból* (elemi pozitív töltésekből) és *neutronokból* álló atommag, a bolygói pedig az atommag körül keringő *elektronok*, a negatív elemi villamos töltések.

O. I.: Ezt úgy mondtad, mintha a könyvedből olvastad volna, de legyünk csak óvatosak ezekkel a hasonlatokkal. A naprendszer bolygói egyetlen meghatározott síkban keringenek, az elektronpályák viszont különböző síkokban vannak. Ezek a pályák nem véletlenszerűen alakulnak ki, az elektronok csak pontosan meghatározott helyeket foglalhatnak el az atommag körül, vagyis csak meghatározott *héjakon* tartózkodhatnak. Az ilyen elektronhéjakat a *K, L, M, N, O, P* és *Q* betűvel különböztetjük meg egymástól. A hét elektronhéj ábrázolásához koncentrikus gömböket rajzolhatunk az atommag körül oly módon, hogy a gömbök sugara arányos legyen az elektronhéj sorszámának (az úgynevezett főkvantumszám) a négyzetével.

K. K.: Várj csak egy pillanatra, ez kissé bonyolultnak tűnik nekem!

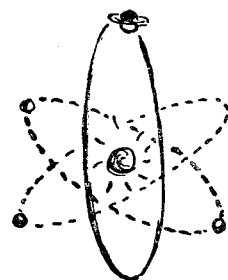
O. I.: Pedig mi sem egyszerűbb ennél. A *K* héjat jelöljük az 1 sorszámmal. Ettől kifelé haladva az *L* héj a második, ennek sugara az első elektronhéj sugarához képest $2^2 = 4$ arányban nagyobb. Az *M* héj sugarára a $3^2 = 9$ szorzószám adódik stb.

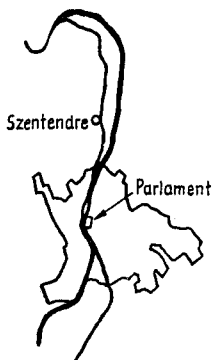
K. K.: Ezek szerint a hetedik héj, amelyet *Q* héjnak nevezel, 7^2 -szer, vagyis 49-szer nagyobb sugarú, mint a *K* héj?

O. I.: Természetesen. Egyébként pedig az egyes elektronok energiája arányos annak a héjnak a sorszámával (a kvantumszámmal), amelyen a kérdéses elektron tartózkodik.

K. K.: Mondd csak, az elektronhéjak és az atommag közötti növekvő távolságok a valóságban mekkorák?

O. I.: A legelső elektronhéj 5 ezermilliomod centiméterre van az atommagtól, bár attól félek, hogy ez a szám nem sokat mond neked. Képzeld csak el,





hogy egy tündér — ahányszor csak megérint valamit — tízszeresére képes megnövelni a méreteket. Ha ez a tündér tizennégszer érintené meg varázspálcájával az egyik szénatomot (amely hat protonból és hat neutronból álló atommagot, az atommag körül pedig összesen hat elektront tartalmaz, és a hat elektron közül kettő a *K* héjon, 4 pedig az *L* héjon tartózkodik)...

K. K.: ... a szénatom hirtelen 10^{14} -szeresére növekedne meg, és valószínűleg akkora lenne, mint az egész földgolyó, úgyhogy el sem férne sehol. Nagyon rosszul járnánk az ilyen pajkos tündérekkel!

O. I.: Egyáltalán nem. A protonok akkorák lennének, mint egy-egy közönséges alma, az elektronok pedig (bár tömegük mindössze egy 1837-ed része a protonok tömegének) elérnék a futball-labda méretét. És ha az atommag a Parlamentben volna Budapesten, a *K* héj két elektrona valahol a külső körút mentén végezné keringőmozgását 5 km-re a Parlamenttől, ami pedig a külső héj négy elektronját illeti, ezek 20 km-re volnának Budapeستől, például Szentendréen.

Szédületes dolgok

K. K.: De hát akkor mi volna az almáink és a futball-labdáink között?

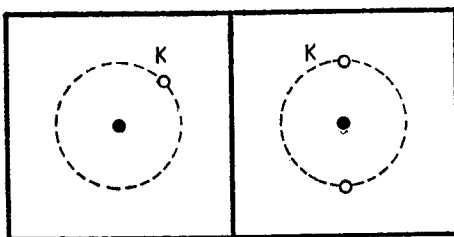
O. I.: Semmi az égvilágon, csak az üres tér. No meg a villamos, mágneses és gravitációs vonzóerők, amelyek egyensúlyban tartják az egész rendszert. Minthogy az ellentétes előjelű töltések vonzzák egymást, a centrifugális erő nem képes leszakítani az elektronokat az atommagról.

K. K.: Ijesztő dolog ez, hiszen akkor szinte teljesen üres az atom, alig van benne anyag!

O. I.: Így van bizony, ahogy mondd. És ha teljesen össze lehetne nyomnunk mindazokat az atommagokat és elektronokat, amelyekből a te tested is áll, úgyhogy semmilyen űr már ne maradjon közöttük, egy kis porszemecskévé alakulhatnál át. A 70 kg-os súlyod megmaradna ugyan, de még mikroszkópon keresztül is alig láthatnálak.

K. K.: Mindig hideg fut végig a hátamon, amikor arra emlékeztetsz, hogy én is atomokból állok. Most pedig, hogy elmondtad, milyen űr van bennem, szinte szédülök, és minden forog körülöttem.

O. I.: Akkor hát nem bántlak már, beszéljünk inkább más atomokról. Hogy könnyebben elképzelhessük őket, minden atomhéjat egy-egy körrel ábrázolhatunk. Ide nézz, a legegyszerűbb a hidrogén atomja (3. ábra), ez mindössze egyetlen protonból és a *K* héjon egyetlen elektrontól áll. A hélium atomban



3. ábra. A két legegyszerűbb atom: a hidrogén (balra) és a hélium (jobbra)

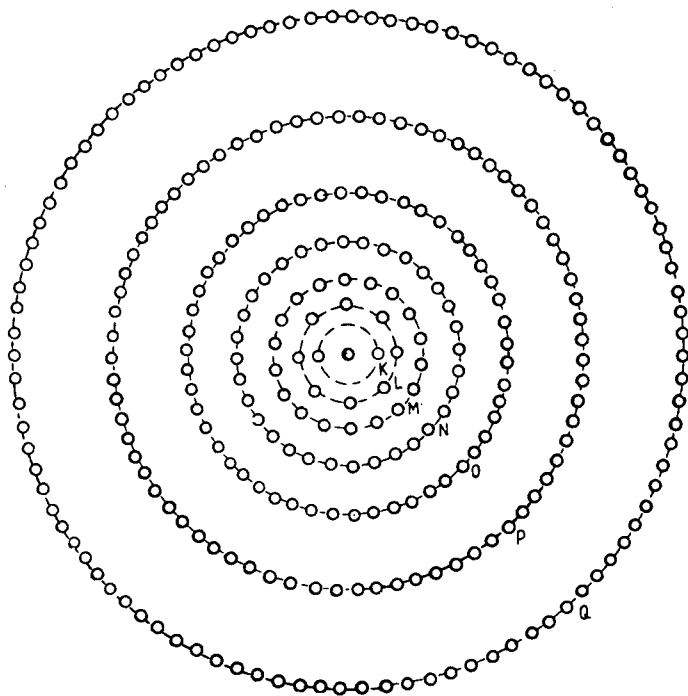
két elektron van ugyanezen a héjon, középen pedig az atommag két protonból áll.

K. K.: És melyik az az elem, amelynek három elektronja van a *K* héjon?

Korlátozott létszám

O. I.: Ilyen elem nincsen. Ezen a héjon egyszerre csak két elektron lehet. Ugyanígy az *L* héj legfeljebb 8, az *M* héj legfeljebb 18, az *N* héj legfeljebb 32, az *O* héj legfeljebb 50, a *P* héj pedig legfeljebb 72 elektront képes befogadni.

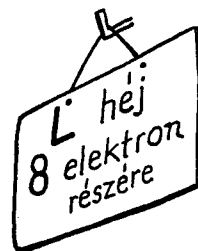
K. K.: És a *Q* héj?



4. ábra. Az elektronhéjak eloszlása az atommag körül és az egyes héjakon lehetséges elektronok legnagyobb száma. Ilyen a rádiumatom felépítése. A valóságban a pályák síkjai különbözők

O. I.: 98-at. Egyébként egy nagyon egyszerű képlettel könnyen kiszámíthatjuk, hány elektron fér el az egyes elektronhéjakon:

- A *K* héjon : $1^2 \cdot 2 = 2$
- Az *L* héjon : $2^2 \cdot 2 = 8$
- Az *M* héjon : $3^2 \cdot 2 = 18$
- Az *N* héjon : $4^2 \cdot 2 = 32$
- Az *O* héjon : $5^2 \cdot 2 = 50$
- A *P* héjon : $6^2 \cdot 2 = 72$
- A *Q* héjon : $7^2 \cdot 2 = 98$





K. K.: Ez valóban ügyes dolog, de attól félek, így nagyon belegabalyodunk az atomfizikába és a magfizikába.

O. I.: Éppen ellenkezőleg: most már elhatározhatunk valamit, amivel lényegesen egyszerűbben beszélhetjük meg a további kérdéseket. Állapodjunk meg abban, hogy a következőkben csak azokkal az elektronokkal fogunk törődni, amelyek az atom legkülső héján vannak.

K. K.: Hát ez szép dolog! Szinte kéjelegve beszélsz nekem erről a sok elektronhéjról, hogy már valamilyen hagymafajtának képzelem el az atomot, és szeretném sorra lehámozni róla a héjakat, most pedig azt mondd, hagyjuk az egészet. Talán olyan csípős, hogy könnyeznénk tőle?

Semlegesség és ionizálás

O. I.: A megállapodásunk, amit ajánlottam, nagyon indokolt. Végeredményben mi érdekel bennünket? Csakis az atomok villamos állapota. Márpedig az atomokban normális körülmények között ugyanannyi elektron van, mint proton, úgyhogy az elektronok negatív töltése éppen kiegyenlíti a protonok pozitív töltésének a hatását. Az ilyen atom *semleges*. Előfordulhat azonban, hogy külső erők hatására egy vagy több elektron leszakad az atomról. Ebben az esetben az egyensúly megszűnik, hiszen az elektronok negatív töltése most már kisebb az atommag pozitív töltésénél. Az atom ekkor pozitívvá válik, úgynevezett pozitív *ion* válik belőle.

K. K.: Ha viszont az atom valamely oknál fogva további elektronokat szerez magának, negatívvá válik. Ilyenkor, ugye, negatív ionnak nevezük?

O. I.: Igen. Csakhogy ilyen elektronvesztés vagy elektronleadás (úgynevezett *ionizációs jelenség*) csak a külső héjon következhet be, itt ugyanis már viszonylag kis mértékben érvényesül az atommag vonzóereje.

K. K.: Az ám! Így már értem, hogy miért csupán a külső héjon levő elektronok érdekelhetnek bennünket.

Házassági ügyek

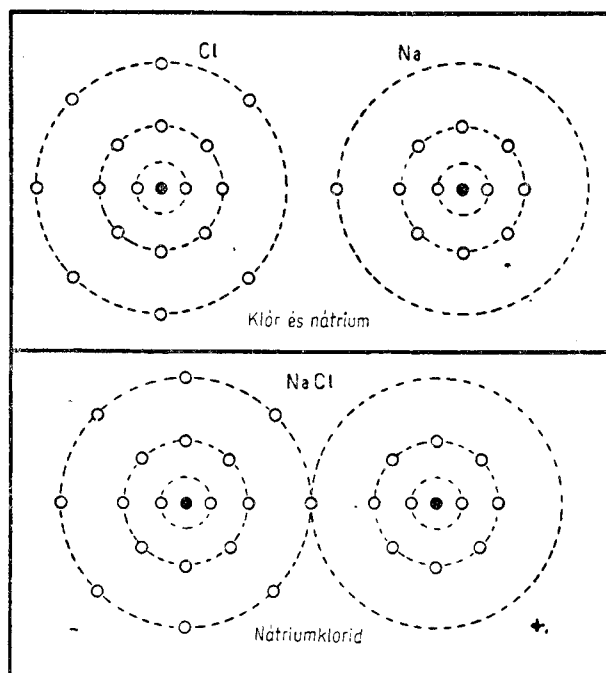
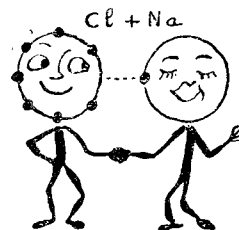
O. I.: Nemcsak ezért. Tulajdonképpen ez az elektronhéj szabja meg az elemek kémiai affinitását. Az atom csak akkor van teljesen megelégedve a sorsával, ha nyolc elektron kering a külső héján. Ilyenkor teljesen stabil, nem akar sem újabb elektronokat szerezni magának, sem elhagyni valamit a meglévő elektronjaiból. Így például a neonban nyolc elektron van a külső *L* héjon, úgyhogy ez az elem nagyon jól érzi magát egyedül is, és nem akar kapcsolatba lépni más elemekkel. A fluor azonban — amelynek a külső héján már csak hét elektron van — minden alkalmat megragad, hogy egyesülhessen olyan elemmel, amely átadhat neki egy elektront és ezzel nyolcra egészíti ki a külső héjon levő elektronok számát.

K. K.: És hogyan jönnek létre az ilyen házasságok?

O. I.: Vegyük például a klórt és a nátriumot. A klór külső, *M* héján hét elektron van, a nátriumnak viszont a *K* héján két elektronja, az *L* héján nyolc,



az *M* héján pedig mindössze egy elektronja van. Ideális pár lesz belőlük! A nátrium klórral vegyülve átadja a külső héjon levő egyetlen elektronját, és ezzel pontosan nyolc elektron lesz a klór külső elektronhéján. Ilyen módon a nátriumban most már az *L* héj lesz a külső héj, ami, tekintettel arra, hogy ezen nyolc elektron van, tökéletes stabilitást eredményez.



5. ábra. Egy klóratom (Cl) és egy nátriumatom (Na) egyesülése. Az eredmény a nátriumklorid (konyhasó) molekulája

K. K.: De hát akkor a klór a maga többlelektronjával negatív ionná válik, míg a nátrium, amely elvesztette ezt az elektront, pozitív lesz?

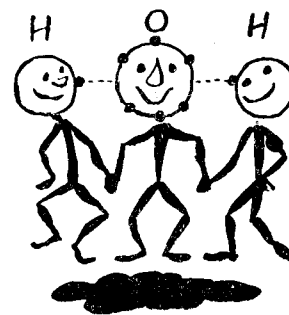
O. I.: Természetesen. E két ion kölcsönös vonzása következtében az ilyen házasságból származó molekulák stabil felépítésre tesznek szert.

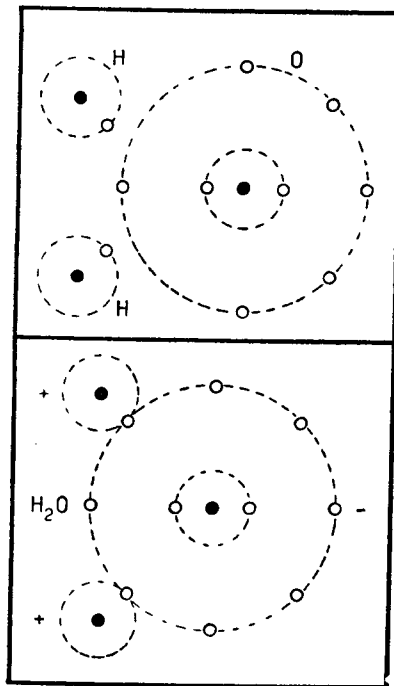
K. K.: És hogy nevezzük az így kapott anyagot?

O. I.: Nátriumkloridnak, ha a patikában akarjuk megvenni. A fűszeresnél is megvásárolhatjuk, de ott konyhasó néven ismerik.

K. K.: Sejtettem. Azt hiszem, ugyanilyen módon meg tudjuk magyarázni az atomok közötti egyéb házasságkötéseket is. Hogy állunk például a vízzel?

O. I.: Nagyon jól. Az oxigénatomban két elektron van a *K* héjon, hat pedig az *L* héjon. Az utóbbin tehát még két elektron részére van hely. Ezt a két elektront az oxigén a hidrogén két atomjától kapja kölcsön, ugyanis a hidrogén, amint már tudod, atomonként csak egy elektront tartalmaz.





6. ábra. Két hidrogénatom (H) elektronja nyolcra egészíti ki az oxigénatom (O) L héján levő elektronok számát. Az eredmény a hidrogénoxid, vagyis közönségesen a víz egy molekulája

K. K.: Most már értem, miért éppen egy oxigénatomból és két hidrogénatomból áll a vízmolekula.

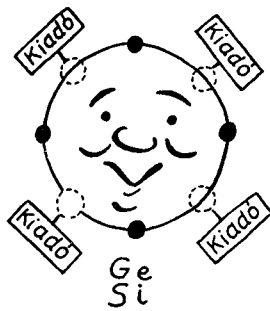
O. I.: A külső elektronhéjat vegyértékhéjnak is nevezzük, mert az itt levő elektronok száma adja meg, milyen kombinációk lehetségesek. Vegyértéknek nevezzük azoknak az elektronoknak a számát, amelyek pótlásával az atom stabilá válik, illetve amelyeket ez az atom egy másik atomnak átadhat, hogy az utóbbit stabilá tegye.

K. K.: Bocsáss meg, ezt nem egészen értem.

O. I.: Ha a külső héjon hat vagy hét elektron van, két elektron, illetve egy elektron hiányzik ahhoz, hogy mind a nyolc hely megteljen. Azt mondjuk, hogy az ilyen atomok *kétegyértékűek*, illetve *egyvegyértékűek*. Ha azonban a külső héj elektronjainak a száma csak egy, kettő vagy három, az atom inkább ezeket is elhagyja. Ilyenkor egy-, két-, illetve *háromvegyértékű* elemekkel van dolgunk.

K. K.: És ha a külső héj négy elektront tartalmaz?

O. I.: Ebben az esetben az atom szíves-örömetest egyesül egy másik atommal, amelynek külső héján szintén négy elektron van, hogy vegyértékkötés létesüljön közöttük. Az ilyen atom tehát *négyvegyértékű*. Többek között négyvegyértékű a tranzistorokban felhasznált germánium és szilícium, továbbá a szén is. Végül öt elektront tartalmazó külső héj esetén az atom *ötvegyértékű*. Minthogy pedig a tranzistorokról van szó, ezzel kapcsolatban néhány további kémiai elemet is megemlíthetek. Az alumínium, az indium és a gallium csak három



Atom- szám	Az elem megnevezése	Jele	Az egyes héjakon levő elektronok száma				
			K	L	M	N	O
13	Alumínium	Al	2	8	3		
14	Szilícium	Si	2	8	4		
31	Gallium	Ga	2	8	18	3	
32	Germánium	Ge	2	8	18	4	
33	Arzén	As	2	8	18	5	
49	Indium	In	2	8	18	18	3
51	Antimon	Sb	2	8	18	18	5

7. ábra. Az elektronok eloszlása a tranzisztorokban előforduló fontosabb elemek különböző héjain (az elektronok teljes számát „atomszámnak” nevezzük). (A vastagon szedett számok a vegyértékek)

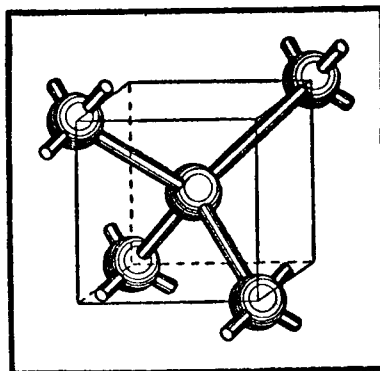
elektront tartalmaz a külső elektronhéjon, ezek tehát háromvegyértékű elemek, az arzén és az antimon viszont ötvegyértékű, mert a külső héjon itt öt elektront találunk.

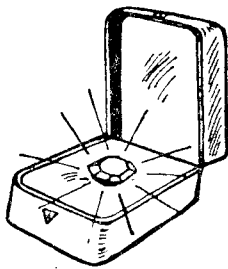
Az atomok társadalmi élete

K. K.: Csak nem akard sorravenni a kémiai elemeket?

O. I.: Ne félj, ilyesmivel nem akarok untatni. Egyébként is már megismertékdél minden olyan atommal, amelynek a tranzisztorok technológiájában lényegesebb szerepe van. Csakhogy nem elegendő az atomok egyéni életének az ismerete. Bennünket most inkább a társadalmi életük érdekel. Tudd meg, hogy az atomok társadalmi lények, csak néhány olyan van közöttük, amely a külső héján a maga nyolc elektronjával mereven visszautasít minden kapcsolatot, mint például a neon. Az atomok csoportulásai többé-kevésbé jól megszervezett egységek. A szilárd testekben (az olyanok kivételével, mint a megmerevedett folyadéknak tekinthető üveg) az atomok meghatározott rendben helyezkednek el a térben: *kristályrácsot* alkotnak.

8. ábra. A kocka közepén levő szénatom a vegyérték elektronjai révén négy további szénatomhoz kapcsolódik. (A kockát csak azért rajzoltuk be, hogy világosabban kitűnjék az atomok térbeli elhelyezkedése.) A szilícium- és a szénkristály azonos szerkezetű





K. K.: És hogyan társulnak így az atomok?

O. I.: Ez az anyagtól függ. Némelyikben (mint a már említett nátriumkloridban) az atomokban olyan elektronok is vannak, amelyekkel a másik atom pozitív ionjához csatlakoznak. A minket érdeklő anyagokban ezt a csatlakozást a legkülső héj elektronjai (a *vegyértékelektronok*) hozzák létre.

Vegyük például a germániumot vagy a szilíciumot. Ezekben minden atom négy vegyértékelektronnal kapcsolódik négy másik atomhoz, ezeknek egy-egy szélső elektronja segítségével. Csak egyetlen atomot rajzolok ide a négy szomszédjával. Ezeket az utóbbiakat képzelj egy-egy további rajz közepén álló atomnak. Ennélfogva az a helyzet, mintha minden atomnak nyolc vegyértékelektronja lenne. Ez, mint láttuk, stabil állapotot jelent. Igyekezz elképzelni a térben ilyen módon szabályosan elhelyezkedő atomokat.

K. K.: Nagyon érdekes! Mintha ezek a térben lebegő golyócskák négy karral fognák a szomszédaik kezét, akár a hindu istenek! És mondd, minden szilárd anyag képes így kristályosodni?

O. I.: Nem. Igaz, sok más elemnél találunk ilyen szabályos atom-elrendeződést, például a szénél. A nagy szénkristályok neve...

K. K.: ... gyémánt! Ezt tudom. Nyilván azért nem készítenek germánium helyett gyémántból tranzisztorokat, mert ez sokkal drágább.

O. I.: Valóban elképzelhető gyémánttranzisztor... De ne érdekeljen minket minden kristályosodási mód. Csak azokat az atomokat érdemesítjük vizsgálódásra, amelyeknek vegyértékelektronjaik vannak.

K. K.: Azt mondtad, hogy ezeket könnyű leszakítani az atomokról, mert a nagyobb távolság folytán a mag már kevésbé vonzza őket.

O. I.: Valóban ez a helyzet, de csak akkor, ha a külső héj 1, 2 vagy 3 elektront tartalmaz. Ez az eset a fémeknél. Az arany-, ezüst-, cink- és rézatomoknak csak egy vegyértékelektronjuk van. A vas-, cink- és magnéziumatomokban két, az alumíniumatomokban három vegyértékelektron van a legkülső héjon. Ezek könnyen leszakadnak az atomokról, és szabaddá válva lehetővé teszik a villamos áram létrejöttét. Ezzel ellentétben a félvezetőknek a külső héjon több elektronjuk van, amelyeknek nincs akkora csatangelési kedvük, mint a fémekben levőknek. Hát ezért nem jó vezetők a félvezetők.

K. K.: És a germánium a négy vegyértékelektronjával szintén szigetelő?

O. I.: Igen is, meg nem is, kedves barátom. A következő alkalommal majd megmagyarázom ezt a rejtélyes választomat.

Második beszélgetés

A félvezetőkben levő szennyezőanyagok még egészen csekély mennyiségben is lényegesen megváltoztatják az anyag villamos tulajdonságait. Ebben a beszélgetésben arról lesz szó, mi történik, ha idegen atomok hatására módosul a szabályos kristályszerkezet.

Összefoglalás: Saját vezetés. — Fényérzékeny ellenállások és fényelemek (fotocellák). — Szennyezések. — Donorok. — Lyukak, vagyis elektronhiányok. — Akceptorok. — P és N típusú félvezetők. — Átmenetek. — Potenciálgát. — Nyitóirányú feszültség és zárófeszültség. — Zener-feszültség. — Dióda. — Félvezető egyenirányítók.

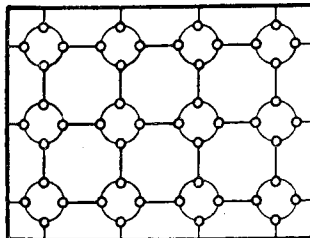
Az átmenetek

Békés családi élet

K. K.: Sokat gondolkoztam ezeken a kristályrácson, és elmentem a múzeumba is, hogy megnézzem a különböző kristályok szerkezeti modelljeit. Nagyon tetszettek azok a kis színes gömböcskék, amelyek az atomokat ábrázolják, és amelyeket a vegyérték-kötéseknek megfelelően fémrudakkal kötöttek össze.

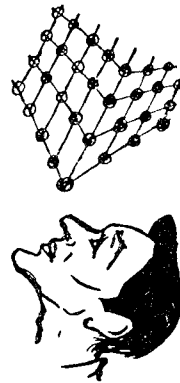
O. I.: Jobban nem is tölthetted volna el a szabadidődet. És mire jutottál elmékedeseidben?

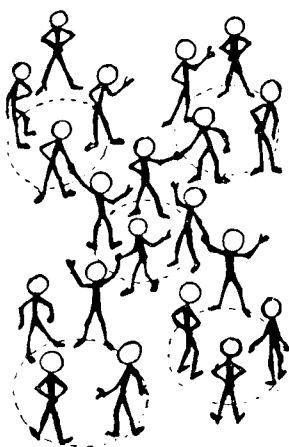
9. ábra. A germánium kristályrácsának vázlatos rajza. Az atomok kötése a valóságban nem síkbeli, hanem térbeli elrendezésű. Ezzel a síkbeli rajzzal csak azt akarjuk elérni, hogy világosabban lehessen látni a rács felépítését



K. K.: Arra a gondolatra, hogy a germánium kristály olyan, mint egy sok családból álló csoportosulás: mindegyik családban négy gyermek van, és mindegyik gyermek összeházasodik négy másik család egy-egy gyermekével. Ilyen módon a házassági kapcsolatok révén mindegyik család rokonságba kerül négy más családdal.

O. I.: Egyáltalán nem rossz a hasonlatod. Ennek alapján könnyebben megértheted majd, amit most fogok mondani. Ebben a jól kiegyensúlyozott társadalomban, amelyről most beszéltél, normális körülmények között nem lehetnek nagyobb zavarok. Ezzel azt akarom mondani, hogy a fiatal pároknak ki kell





tartaniuk egymás mellett. Ugyanígy a germánium kristályunkban is a szilárd vegyértékkötések hatására mindegyik elektronnak ragaszkodnia kell a maga atomjához.

K. K.: Igen ám, de mit kezdünk az emberi szenvedélyekkel?

Néhány válasz is lehetséges

O. I.: Látom, szentimentális regényeket is szoktál olvasni. Hát igen, az embereket izgatják a szenvedélyeik, ugyanígy az atomokat is mozgásban tartja a hőenergia. E hőmozgás hatására időnként elszakadnak azok a kötések, amelyek az elektront az atomhoz láncolják, és egy-egy elektron szabaddá válik. Márpedig tudod, hogy amennyiben szabad elektronok vannak jelen...

K. K.: ... az anyag vezetővé válik. Normális hőmérsékleten sok szabad elektron van a germániumban?

O. I.: Nagyon kevés. Alig két elektron jut 10 milliárd (vagyis 10^{10}) atomra. Olyan, mintha kétszeresére megnőne a Föld lakosainak száma, de csak egyetlen szabad ember akadna az egész világon.

K. K.: Az bizony szomorú dolog volna. De ha ez a helyzet, akkor a germánium nagyon rossz vezető, ugye?

O. I.: Igen, és éppen ezért nevezzük félvezetőnek. Jegyezd meg azonban, hogy egy gramm germánium tízezer trillió (10^{22}) atomot tartalmaz, és körülbelül kétbillió ($2 \cdot 10^{12}$) szabad elektron van benne. Ez is több mint semmi, hiszen lehetővé tesz egy egészen gyenge áramot.

K. K.: Több billió elektronnól beszélsz, és azt mondd, hogy az áram gyenge?

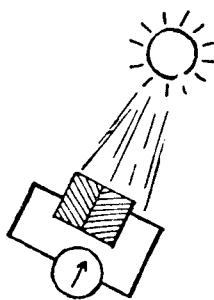
O. I.: Úgy látszik, elfelejtetted, hogy 1 amper áramerősség másodpercenként hattrillió ($6 \cdot 10^{18}$) elektron áthaladásának felel meg. Amint látod, a germánium hatalmas kristályrácsában szétszóródó kétbillió szerencsétlen szabad elektron csak jelentéktelen vezetőképességet eredményezhet. Ezt a vezetőképességet, amely (amint már mondtam) a hőmozgástól származik, saját vezetésnek nevezzük.

K. K.: Ez tehát végeredményben olyasvalami, mintha a mi rendezett társadalmunkban szórványosan egyesek elválnának, majd újra megházasodnának, vagyis az egyes családok között bizonyos eltolódások következnenek be.

O. I.: Így is lehetne mondani. És hogy továbbra is megmaradjunk a hasonlatodnál, képzeljük el, hogy fellángolnak a szenvedélyek, amint a regényekben olvashatjuk, és nagy változások következnek be.

K. K.: Tudom már, mit akarsz mondani. Ha felfelemelegítjük a germánium kristályt, a hőmozgás erősebbé válik és több elektron válik szabaddá. Ebben az esetben megnő a saját vezetés. Így a vezetőkkel ellentétben a félvezetők ellenállása a növekvő hőmérséklettel csökken.

O. I.: Úgy van. Ezért van az, hogy magasabb hőmérsékleten a germánium már rosszul működik. Ugyanis bennünket nem a saját vezetés érdekel, nem ezt hasznosítjuk. A szilícium viszont azért bírja jobban a meleget, mert a harmadik héjon levő vegyértékelektronjait nagyobb erő köti össze az atommaggal, ha megfontoljuk, hogy a germánium vegyértékelektronjai a negyedik héjon vannak. Megemlítem még mellékesen, hogy nemcsak hőenergiával lehet felszabadítani a félvezetők elektronjait, hanem úgy is, hogy fénysugarat bocsátunk rájuk.



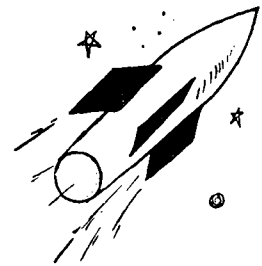
K. K.: Talán azt akard mondani, hogy a fény kis részecskéi, az úgynevezett „fotonok”, amikor a germániumatomokat bombázzák, leszakítanak elektronokat?

O. I.: Igen! Ennek alapján készülnek azok a fényérzékeny alkatrészek, amelyeknek ellenállása a megvilágítás szerint változik. A legrégebbi ezek közül a szelén-cella, amely szintén félvezetőből áll.

K. K.: Nekem is van egy ilyen megvilágításmérőm a fényképezéshez...

O. I.: Csakhogy abban ma már nem szelén van, hanem valószínűleg germánium vagy szilícium. Az utóbbiak a legújabb és legjobb fényelemek anyagai, vagyis villamos árammá alakítják át a fényenergiát.

K. K.: Ugye ilyen fényelemeket helyeznek egyes mesterséges holdakra is, hogy a napfény energiájával lehessen táplálni a berendezést?



Családi botrány

O. I.: Igen, de most hagyjuk ezt. Képzeld inkább el, hogy megzavarjuk jól megszervezett társadalmadat egy ötgyermekes család betelepítésével.

K. K.: Mit akarsz ezzel mondani?

O. I.: Azt, hogy a legtisztább germánium atomjai között is előfordulnak nagyon kis mennyiségben más elemek atomjai, úgynevezett „szennyezések”. A legtisztább germánium egy tizedmilliomod része szennyezőanyag.

K. K.: Ez bizony nem sok vizet zavarhat.

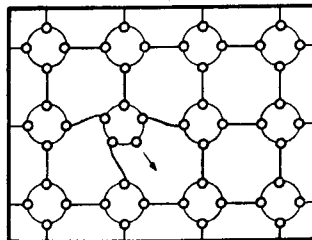
O. I.: Nagyon tévedsz. Még az ilyen kis mennyiségű szennyezés is ötvenbillió idegen atomot képvisel az úgynevezett „tisztá” germánium egy köbcentiméterében.

K. K.: Nem hittem volna, hogy ez a köbcentiméternyi térfogat ötvenbillió atomot tartalmaz. De mi van az ötgyermekes családdal? Talán olyan atomot jelent, amelynek öt elektronja van a külső héjon?

O. I.: Igen! Betelepítünk a germániumatomok nemes társaságába egy ötvegyértékű atomot, például egy arzén- vagy antimonatomot, és kitör a botrány!



10. ábra. Az ötvegyértékű szennyezőatom megbontja a kristályrács szép rendjét. Mi történik vajon e szennyezőatom ötödik elektronjával?

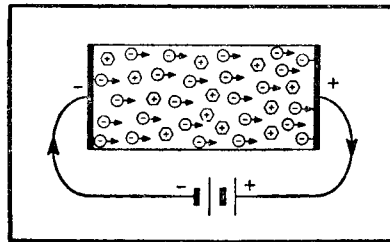


K. K.: Az ám, mert ha ennek a különös családnak a gyermekei összeházasodnak a négy szomszédos család gyermekeivel, az ötödik hoppn marad.

O. I.: Igen, barátom, miután a négy első elektron már vegyértékkötést létesített a kristályrács négy szomszédos atomjával, az ötödik elektron szabadon marad. És ha valamilyen erő ezt az elektront a kristály egyik végébe vonzza, az bizony áthatol a rácson, hogy odajusson, ahová hívták.

K. K.: Ha tehát feszültséget kapcsolunk a kristály két pontja közé, áramot létesíthetünk, mert az ötvegyértékű atomoktól származó szabad elektronok megindulnak a pozitív pólus irányába és ott kilépnek a kristályból, az áramforrás negatív sarkából viszont ugyanennyi újabb elektron lép be a kristályba.

O. I.: Igen, ez játszódik le az ötvegyértékű szennyezéseket tartalmazó, tehát többletelektronokkal ellátott félvezetőben. Azt mondjuk, hogy az ilyen



11. ábra. Áramvezetés N típusú félvezetőben. A $-$ jelzésű szabad elektronok elhagyják az ötvegyértékű atomokat, úgyhogy ezek a $+$ jelzésű atomok pozitív töltésre tesznek szert

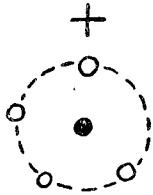
félvezető N (negatív) típusú, a szennyezéseket pedig ebben az esetben *donoroknak* is nevezzük (mert átadnak szabad elektronokat, a latin donor szó azt jelenti, hogy adó, átadó).

K. K.: Mennyi a szennyezések normális aránya?

O. I.: Legfeljebb egy szennyezőatom jut tízmillió germániumatomra, vagyis az arány az, mintha egy fővel megnövelnénk Magyarország lakosságát.

K. K.: Valójában azonban ez százszorosa a legtisztább germánium szennyeződésének. De mi lesz ekkor a szennyező atommal, például az arzénatommal, amely átadta szabad elektronját? Alighanem feladja semlegességét, és miután most már kevesebb elektronja van, mint protonja, feltétlenül pozitívvá válik.

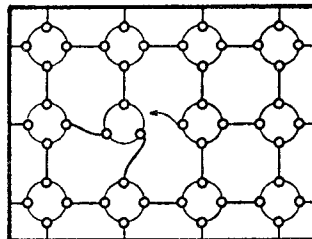
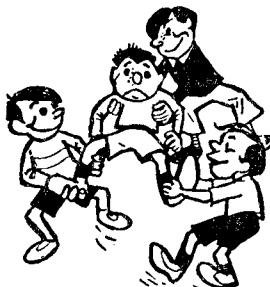
O. I.: Úgy bizony. Bármilyen hihetetlen, az N típusú germánium szennyezőatomjaiból pozitív ionok lesznek.



Gyermekrablási históriák

K. K.: De mi történik a kristálytársadalmunkban akkor, ha az egyik családnak csak három gyermeke van, vagyis ha a félvezető kristályba olyan atomokat telepítünk be, amelyek külső elektronhéján három elektron kering?

O. I.: Ekkor is éppen olyan botrány tör ki, mint a túlságosan népes családok esetében. Ez a háromvegyértékű atom három szomszédos atommal létesít



12. ábra. A félvezető kristályrácsa itt egy háromvegyértékű szennyezőatomot tartalmaz. Ez az atom igyekszik megszerezni az egyik szomszédos atom egyik elektronját

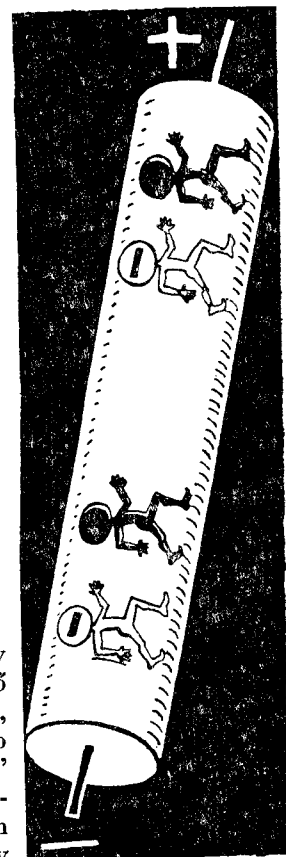
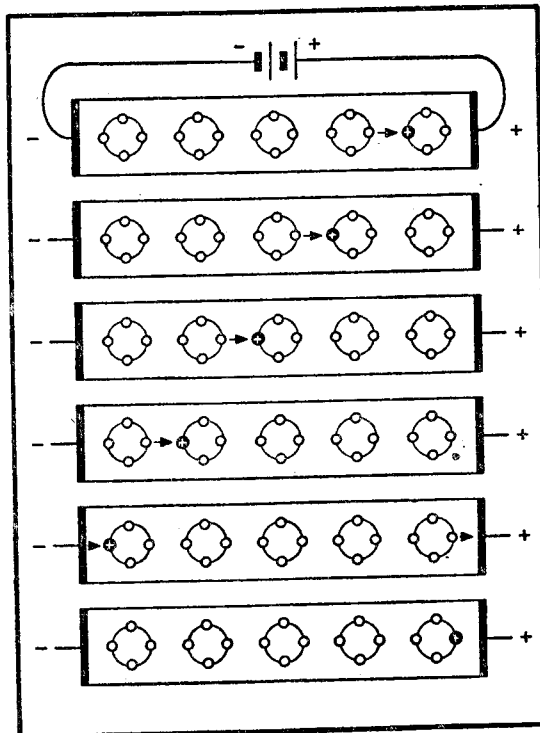
vegyértékkötéseket, tehát a negyedik üres marad. Egy „lyuk” lesz benne, akkora, hogy egy szomszédos atom éppen kitöltheti egyik elektronjával.

K. K.: Végeredményben tehát ennek a háromgyermekes családnak örökbe kellene fogadnia egy gyermeket, hogy kövesse a törzsi hagyományt, vagyis inkább hogy eleget tegyen a törzs általános szervezeti előírásainak. Ha azonban „kölsönvesz” egy gyereket az egyik szomszédos családtól, az utóbbi lesz csonka.

O. I.: Persze. De ez a kölcsönzési, vagyis gyermekrablási mozgalom továbbterjedhet a kristály egyik végétől a másik végéig.

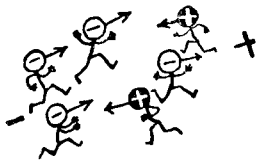
K. K.: Ha feszültséget kapcsolunk a kristályra, ugye?

13. ábra. Az áramvezetés P típusú félvezetőben. Az egyik háromvegyértékű szennyezőatomban levő lyukat megtölti az áramforrás negatív sarkából kilépett elektron, és ezáltal egy újabb lyuk keletkezik, ezt a lyukat viszont az egyik szomszédos atom elektronja tölti ki, és a játék így folytatódik. A rajzon ennek a vezetési folyamatnak egymást követő fázisai láthatók; a pozitív töltést képviselő lyuk ennek során fokozatosan eltolódik az áramforrás pozitív sarkának irányából a negatív pólus felé. Az utolsó fázisban az áramforrásból kilépő elektron éppen kitöltötte a negatív pólushoz legközelebb levő lyukat, és ugyanakkor egy másik elektron elhagyta a pozitív pólushoz legközelebb levő atomot, úgyhogy a helyén egy újabb lyuk keletkezett. Az egész folyamat kezdődhet előlről!



O. I.: Nyilván. De figyelj csak, mi történik most. Az áramforrás negatív sarkának irányából jövő elektron megtölti a háromvegyértékű atomban levő „lyukat”, tehát ez az elektron közelebb került az áramforrás pozitív sarkához, ugyanakkor azonban egy újabb „lyuk” keletkezett a negatív pólushoz közelebb eső szomszédos atomban. Ezután a jelenség megismétlődik. Az új „lyukat” megtöltő elektron közeledik a pozitív pólushoz, a most keletkező „lyuk” pedig még közelebb van a negatív pólushoz. És amikor végül egy elektron ilyen módon eljut a pozitív pólusra, ahonnan átléphet az áramforrásba, a kristály másik végén egy „lyuk” eléri a negatív pólust, ahol már közvetlenül az áramforrásból kilépő elektron fogja megtölteni.

A két „fluidum”



K. K.: Amíg tehát az elektronok illedelmesen haladnak az őket vonzó pozitív pólus felé, a „lyukak” a negatív pólus felé vándorolnak, mintha pozitív töltések volnának.

O. I.: Valóban minden úgy történik, mintha a háromvegyértékű atomokkal szennyezett félvezetőben pozitív töltések — vagyis az elektronok töltésével ellentétes töltések — haladnának a pozitív pólus irányából a negatív pólus irányába.

K. K.: Így tehát a „lyukak” követik a szokásos áramirányt — amelynek nyílja a pozitív pólustól a negatív felé mutat —, az elektronok viszont ugyanakkor az ellenkező irányban haladnak. De mondhatjuk azt, hogy a pozitív töltések itt áramot alkotnak?

O. I.: Miért ne? Valamikor egy *Syoner* nevű fizikusnak az volt az elképzelése, hogy a villamos áram két ellentétes irányban áramló „fluidumból” áll. Ne felejtse el azonban, hogy a „lyukak” elektronnal megtölthető üres helyek.

K. K.: A háromvegyértékű atomokkal szennyezett félvezető, gondolom, *P* (pozitív) típusú?

O. I.: Így szoktuk mondani. De ha már ilyen okos vagy, meg tudnád mondani, mi történik a szennyezőatomokkal, amikor a szomszédos atomokról jövő elektronok megtöltik a bennük levő „lyukat”?

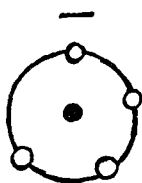
K. K.: Bizonyára negatív ionokká válnak, hiszen elektronjaik száma most már nagyobb lesz a protonjaik számánál. Különös dolog, hogy az *N* típusú félvezetőben pozitív, a *P* típusúban pedig negatív ionokká alakulnak át a szennyezések.

O. I.: Meg kell még mondanom, hogy ezeket a *P* típusú szennyezőatomokat, például az alumínium, a gallium és az indium atomjait *akceptoroknak* is nevezzük, mert átvesznek elektronokat (acceptor = átvevő), az *N* típusúak szerepe viszont az elektronok átadása.

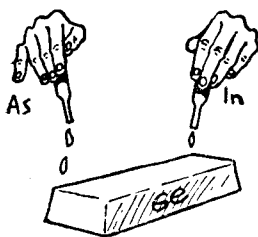
K. K.: Félek, hogy nehezen fogom magamnak megjegyezni, mit is csinálnak ezek a donorok és akceptorok.

O. I.: Figyeld csak meg: a *donor* „szó középső betűje *N*, viszont az „akceptor” szóban *P* betű van középen.

K. K.: Nagyszerű! Így már könnyebben a fejemben tartom.



Az átmenet, mint akadály

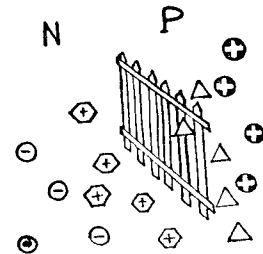


O. I.: Miután már megismerkedtél ezeknek a kristálytársadalmaknak az erkölceivel, és tudod, mennyire megzavarja nyugalmukat a különködő donorok és akceptorok megjelenése, megbeszélhetjük, mi történik, ha egy *N* típusú félvezetőt egyesítünk egy *P* típusúval. Képzeld el, hogy veszek két ellentétes típusú germánium darabot és valahogyan egyesítem őket. Gondolj talán inkább arra, hogy van egy tiszta germánium rudam, és ennek egyik felét „mégmérgezem” donoratomokkal (például arzénnel), a másik felét pedig akceptorokkal (ha úgy tetszik, például indiummal) szennyezem. A két különböző típusú félvezető közötti határrejteget *N–P átmenetnek* nevezzük. Ez csodálatos dolgokat produkál.

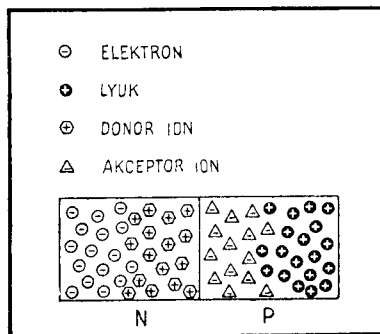
K. K.: Nem látok ebben semmi csodálatosat. A rúd két felében az elektronok tovább folytatják megszokott sétáikat, és nem törődnek azzal, mi történik a rúd másik felében.

O. I.: Tévedés! A normális hőmozgás most egy másik jelenséggel társul. A *P* tartományban levő negatív ionok most messze eltávolítják az *N* tartomány szabad elektronjait az átmenettől, mert tisztítóhatást fejtenek ki rájuk.

K. K.: Ez igaz, elfelejtkeztem az egynemű töltések közötti tisztítóhatásról. Csakhogy akkor az *N* tartomány pozitív ionjai viszont messzire elűzik az átmenettől a *P* tartományban levő lyukakat.



14. ábra. *N-P* átmenet. A *P* zónában levő lyukak az átmenet környezetében feltöltődnek, a távolabbi részekben azonban továbbra is üresek maradnak. Ugyanígy az *N* zónában levő szabad elektronok is távolodnak az átmenettől, ezek az elektronok a közelben levő szennyezőatomokból kerülnek ki. (Jól figyeljük meg a négyféle jelölést, a következő ábrákon is találkozunk velük)



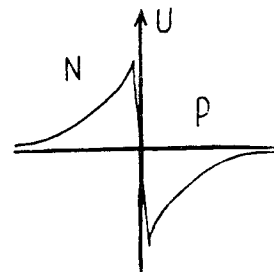
O. I.: Az igaz, hogy ezekre a lyukakra (amelyeket elemi pozitív töltéseknek tekinthetünk) taszítóerők hatnak. A valóságban az *N* tartomány pozitív ionjai az átmenet felé vonzzák a *P* tartomány elektronjait és arra kényszerítik őket, hogy kitöltsék a szomszédos lyukakat. Az ilyen módon elragadott elektronok lyukakat hagynak maguk mögött az átmenettől távoli atomokban. Mindez azonban úgy játszódik le, mintha a lyukak a *P* tartomány távoli vége felé vándoroltak volna.

K. K.: Az átmenethez közeli részben pedig a *P* zóna szennyezőatomjai, a negatív ionok, természetesen helyben maradnak. Ugyanígy az *N* zónában az átmenet közelében maradnak az ötvegyértékű atomokból keletkezett pozitív ionok. Mindez nagyon érdekes: az átmenet mintegy gátat alkot a két tartomány között, és az egyik oldalán negatív, a másik oldalán pedig pozitív lesz a potenciál.

O. I.: Úgy van, jól okoskodtál, az átmenet valóban *potenciálgát*. Ebben a vékony félvezető hártában a potenciál az *N* zónában elért pozitív értékről hirtelen negatív értékre megy át (amikor a *P* zónába jutunk, ezt ne felejtse el!). Csakhogy a teljes töltés végeredményben nulla, mert a két tartományban a pozitív és a negatív töltések egyensúlyban vannak, tehát kiegyenlítik egymás hatását. Amikor a *P* típusú félvezetőt egyesítettük az *N* típusú félvezetővel, egyszerűen csak eltoltuk a töltéseket az egyes tartományok túlsó végébe, míg eredetileg ezek a töltések nagyjából egyenletes eloszlásúak voltak.

K. K.: Mindez mintha most már egészen világos volna. De mire jó ez az átmenet a potenciálgáttal?

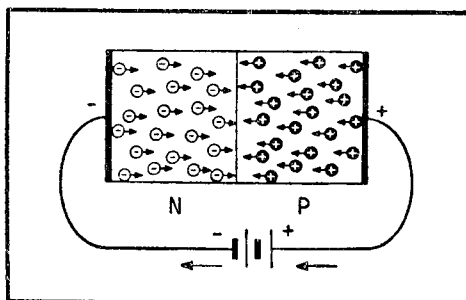
O. I.: Rögtön megtudod, ha feszültséget kapsz a gátunk két oldala közé.



Útrakelnek az elektronok és a lyukak

K. K. : Azt hiszem, áramot kapunk, mert egyrészt az *N* tartományban levő szabad elektronok, másrészt a *P* tartományban levő lyukak útrakelnek a két ellentétes irányban.

O. I. : Amit mondasz, igaz is lehet, de kissé elhamarkodva válaszoltál. Mindegyelőtt gondoljuk meg, milyen legyen a bekapcsolt feszültség polaritása. Előbb képzeljük el, hogy az áramforrás pozitív sarkát a *P* zónával, negatív sarkát pedig az *N* zónával kötjük össze.

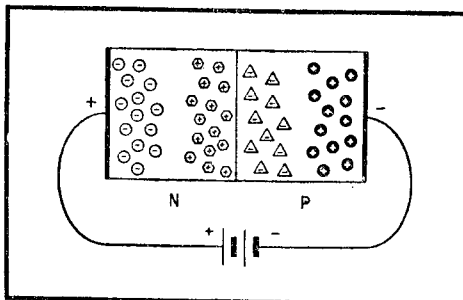


15. ábra. Az áram folyása *N-P* átmeneten keresztül. A rajzon csak a töltéshordozókat, úgymint a (- jelzésű) elektronokat és a (+ jelzésű) lyukakat tüntettük fel; az *N* zóna donorjait és a *P* zóna akceptorait azért nem rajzoltuk be, hogy az ábra áttekinthetőbb legyen

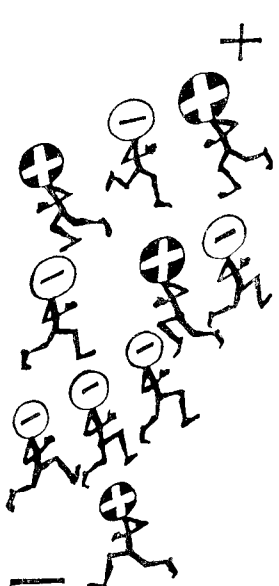
K. K. : Ám legyen. Az *N* zónában az történik, hogy a félvezető szabad elektronjait az áramforrásból jövő szabad elektronok eltaszítják az átmenet felé. Így tehát a félvezető szabad elektronjai keresztül haladnak az átmeneten, és sorra eltűntetik az áramforrás pozitív potenciáljának hatására errefelé áramló lyukakat.

O. I. : Beszéljünk inkább szabatosabban, és mondjuk úgy, hogy az áramforrás pozitív sarka magához vonz egy-egy elektront, valahányszor egy másik elektron átlép az átmeneten, vagyis az *N* zónából a *P* zónába jut. Az áramforrással elragadott elektron viszont egy lyukat hagy maga mögött, és ezt a lyukat egy olyan elektron fogja megtölteni, amely eredetileg közelebb volt az átmenethez, és amelynek helyén most szintén egy lyuk marad. Ilyen módon a lyuk mintegy eltolódik az átmenet felé, és amikor eléri az átmenetet, az *N* zóna egyik elektronja fogja megszüntetni.

K. K. : Tehát teljesen igazam volt, amikor azt mondtam, hogy az elektronok és a lyukak egymással ellentétes irányban vándorolva villamos áramot eredményeznek.

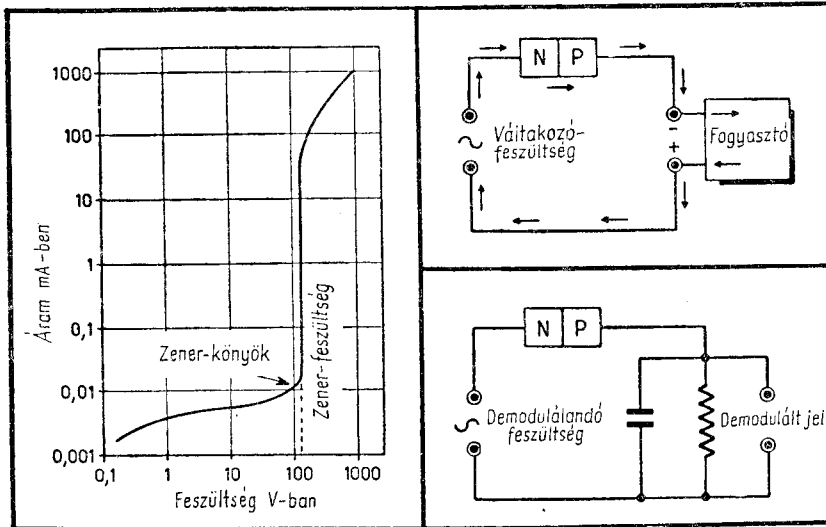
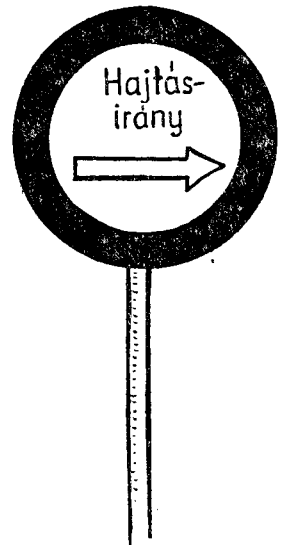


16. ábra. Ha az *N-P* átmeneten záróirányú a feszültség, a töltéshordozók beleütköznek a „potenciál-gátba”, úgyhogy áram nem indulhat meg. Az átmeneten most nagyobb a feszültség, mint az előző kapcsolásban



O. I.: Igen, ez pontosan így van, ha az átvezetésnek megfelelő irányban (nyitóirányban) kapcsoljuk be a feszültséget, vagyis ha az áramforrás pozitív sarkát a P zónához, negatív sarkát pedig az N zónához csatlakoztatjuk, mint ahogyan most tettük. Ha azonban ezzel ellentétes irányú, úgynevezett záró-feszültséget alkalmazunk, a viszonyok nem lesznek ilyen kedvezőek.

K. K.: Miért nem? Az áramforrás negatív sarkának elektronjai közelebb hozzák a P zónában levő lyukakat a rúd végéhez. A rúd másik végén viszont az áramforrás pozitív potenciálja magához vonzza a szabad elektronokat. Ejnye! Ezáltal csak erősebb lesz a potenciálgát..., valóban nem folyhat áram!



17. ábra (balra). Az átmeneten keresztülfolyó áram a záróirányban bekapcsolt feszültség függvényében. Figyeljük meg: a két skála nem lineáris (hanem logaritmikus)

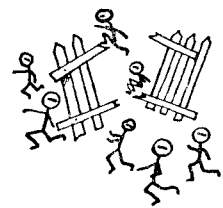
18. ábra (fent jobbra). Az $N-P$ átmenet egyenirányításra is használható, akár csak a vákuumdióda, de nem igényel fűtőfeszültséget. Az ábrán egyutas egyenirányító kapcsolási rajza látható

19. ábra (lent jobbra). Az $N-P$ átmenetből álló dióda mint demodulátor. A demodulálással kapott feszültség egy ellenállásról vehető le. A kondenzátor a nagyfrekvenciás összetevő kiszűrésére szolgál

O. I.: Ugye? Amint látod, csak akkor folyik áram, ha nyitóirányú a feszültség, vagyis ha a P zónára a pozitív pólust, az N zónára pedig a negatív pólust kapcsoljuk. Amennyiben felcseréljük a polaritást, már nem kapunk áramot, illetve csak egy egészen gyenge visszáram fog folyni.

K. K.: Akkor is, ha megnöveljük a feszültséget?

O. I.: Igen, de csak egy bizonyos feszültséghatárig. Ha túllépjük ezt a határértéket, a potenciálgát átszakad, és lavinaszerűen megindulnak az elektronok, egyszerre megnő az áramerősség. Ezt a jelenséget Zener ismertette, és a megfelelő záró-feszültséget *Zener-feszültségnek* nevezzük. Bizonyos elektronikus

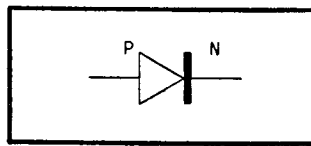


áramkörök működése ezen a jelenségen alapul, mi azonban nem foglalkozunk vele. A mi esetünkben az átmenet mindig csak a nyitóirányban vezet, a záróirányban pedig gyakorlatilag tökéletesen szigetel.

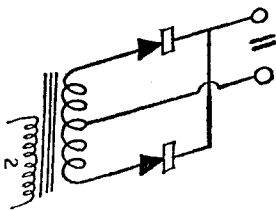
Egyirányú közlekedés

K. K. : Akkor hát ez az átmenet, amennyiben csak az egyik irányban vezet, valóságos egyenirányító?

O. I. : Persze hogy az, nagyon is az. Ugyanis, ha váltakozó feszültséget kapcsolunk rá, az áram csak a nyitóiránynak megfelelő félperiódusokban fog átfolyni, a másik félperiódusban nem kaphatunk áramot.



20. ábra. A félvezető dióda rajzjele. A nyíl a közösleges áramirányt (a pozitív töltéshordozók irányát) jelzi, az elektronok éppen az ellenkező irányban haladnak



K. K. : Úgy, mint a diódákban?

O. I. : Pontosan úgy. Éppen ezért a $P-N$ átmenetet félvezető-diódának is nevezzük. Ez is, mint minden dióda, demodulálásra is felhasználható. Tökéletesen látja el ezt a feladatot. Sőt, ha nagyon nagy a frekvencia, még jobb is, mint a vákuumdióda.

K. K. : És a viszonylag nagy erősségű váltakozó áramok egyenirányítására is alkalmas, például az anódfeszültséget előállító hálózati tápegységben?

O. I. : Igen, fel is használják erre a célra. A szilícium, a rézoxidul és a szelén egyenirányítók nagyon jól helyettesítik az egyenirányító diódákat. Sokkal kevésbé kényesek a mechanikai behatásokra, és sokkal hosszabb az élettartamuk.

K. K. : Akkor hát nyugodtan mondhatjuk : „Éljenek a félvezetők !”

Harmadik beszélgetés

Két barátunk, miután a legutóbbi beszélgetés során részletesen megtárgyalta a félvezetők tulajdonságait, most a tranzisztorokra tereli a szót. Kiderül, hogy a tranzisztorok már az első tekintetre nagyon hasonlítanak az elektroncsövekre, ugyanakkor azonban sok szempontból lényegesen eltérnek tőlük. Barátaink megbeszélik a tranzisztoros erősítés mechanizmusát, és érdekes dolgokat állapítanak meg a tranzisztorok bemenő és kimenő impedanciájáról.

Összefoglalás: P–N–P és N–P–N típusú tranzisztorok. — Nyugalmi áram. — Bázisáram. — A tranzisztorhatás. — Áramerősítés. — Az elektroncsövek és a tranzisztorok közötti hasonlatosság. — Bemenő és kimenő ellenállás. — Feszültségerősítés. — A tranzisztorok táplálása.

Megérkeztünk a tranzisztorokhoz!

Utcái csintalankodás

O. I.: Szervusz, öregem. Hogyhogy ilyen későn jössz, és még hozzá ilyen dühösen?

K. K.: Van rá okom. Tudod-e, hogy az utcákba már nem hajthatnak be a gépkocsik?

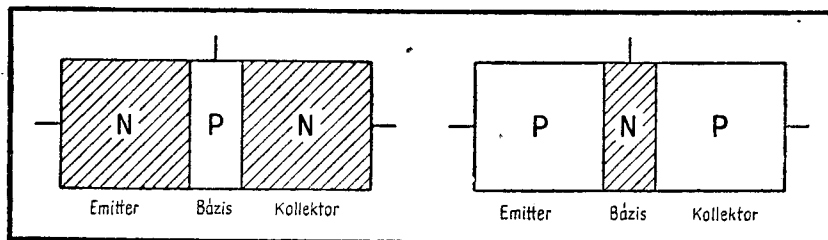
O. I.: Csak az egyik irányban közlekedhetnek. A másik irányból tehát...

K. K.: Nincs másik irány! Az utcakölykök bizonyára szellemeskedni akartak, és az utca másik végére is kitétték a „Behajtani tilos” táblát, úgyhogy most már egyik irányból sem lehet bejönni járművekkel.

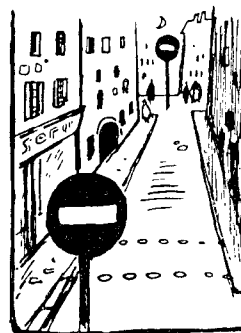
O. I.: Bizonyára valaki már megelegette a gépkocsik lármáját... Örülj neki, most legalább végre nyugodtan beszélgethetünk a tranzisztorok működési elvéről.

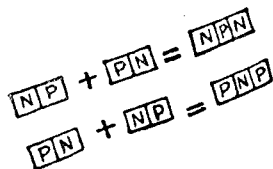
K. K.: Mondd csak, miből áll tulajdonképpén ez a „háromlábú pók”?

O. I.: Nincs benne semmi különös. A tranzisztor két ellentétes irányú átmenetből áll. Ha például egy N–P és egy P–N átmenetet egymáshoz illesztünk úgy, hogy P részük közös legyen, N–P–N típusú tranzisztorot kapunk.



21. ábra. A tranzisztorok két típusa; N–P–N és P–N–P tranzisztor





K. K.: Na várj csak... És a $P-N$ és $N-P$ átmenetből $P-N-P$ tranzisztort csinálhatunk?

O. I.: Magától értetődik. Hozzá kell még tennem, hogy az egyik külső zónát *emitternek*, a másikat pedig *kollektornak* nevezzük, a középső réteg viszont (ennek nagyon vékonynak kell lennie) a *bázis*.

K. K.: Végeredményben tehát a tranzisztor valamilyen szendvicsfajta, amelyben két vastag szelet kenyér között egy egészen vékony sonkaszelet van.

O. I.: Ahogy akarod.

K. K.: Akkor hát hadd mondjam meg, hogy ez a szendvics éppen olyan ehetetlen, mint amilyen hozzáférhetetlen az utcátok.

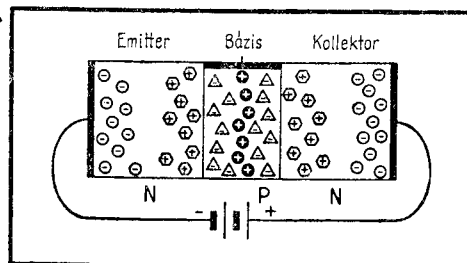
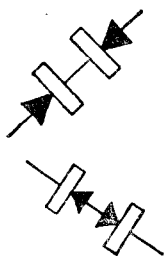
Az átharaphatatlan szendvics

O. I.: Mit akarsz ezzel mondani?

K. K.: Egyszerűen csak azt, hogy a két egymással szemben levő átmeneti réteg mindkét irányban megakadályozza az áramot, mint ahogyan a két „Behajtani tilos” táblával is megtiltották az utcátokban a behajtást, bármelyik irányból próbálkoznánk is bejutni hozzátok.

O. I.: Nem is olyan rossz az okoskodás. Még a végén azt fogod hinni, hogy én követtem el ezt a csintalanságot csupán azért, hogy megkönnyítsem neked a tranzisztorok megértését. A helyzet az, hogy bármilyen polaritású feszültséget kapcsolunk a tranzisztor emitterére és kollektorára, az egyik átmeneti réteg mindig megfelelő irányban lesz és átvezetné az áramot, csakhogy a másik réteg záróirányú feszültséget kap és megakadályozza az áram átfolyását.

K. K.: Ha például $N-P-N$ tranzisztorunk van, és ennek bal oldalához csatlakoztatjuk a negatív pólust, jobb oldalához pedig a pozitívot, az első ($N-P$) átmenet balról jobbra könnyen átterjeszti az elektronokat, csakhogy a második ($P-N$) átmenet feltétlenül elzárja az utat. Vagy talán akadnak olyan ügyes elektronok is, amelyeknek ennek ellenére sikerül az átkelés?



22. ábra. A tranzisztorban levő potenciálgátak. Ezek mentén rendeződnek az elektronok, a lyukak, továbbá a donorok pozitív és az akceptorok negatív ionjai

O. I.: Mindig vannak ilyenek is. Ezek a hőmozgás felhasználásával vágnak maguknak utat, ugyanis a hőmozgás lehetővé teszi, hogy keresztül hatoljanak a $P-N$ átmenet potenciálgátján. Ebből az elektronmozgásból alakul ki az úgynevezett *kezdeti áram* vagy más néven *telítési áram*.

K. K.: Nem értem azt az utóbbi kifejezést. Hát olyan nagy ennek az áramnak az erőssége?

O. I.: Éppen ellenkezőleg: nagyon is kicsi. Csakhogy egyáltalán nem függ

a feszültség nagyságától. Hiába növeled meg a feszültséget, az áramerősség gyakorlatilag változatlan marad. A „telítés” szó itt azt jelenti, hogy mindazok a szabad elektronok, amelyek a kérdéses hőmérsékleten átjuthatnak a potenciálgáton, részt vesznek ebben az áramban.

K. K.: De ha melegíteni kezdjük a tranzisztort?

O. I.: A telítési áram növekszik. Előfordulhat az is, hogy amennyiben elég nagy a feszültség, ez az áram egy bizonyos érték elérése után már melegíteni kezdi az átmeneti rétegeket, aminek következtében az áramerősség tovább nő...

K. K.: ... úgyhogy a melegedés is tovább folytatódik, megint visszahat az áramra, és a folyamatot már nem lehet megállítani.

O. I.: Igen. Ilyenkor a tranzisztor „megszalad”, és teljesen tönkremehet. Ezért nem szabad a tranzisztort túlságosan nagy feszültségre kapcsolni, és ezenkívül gondoskodni kell a hő elvezetéséről.

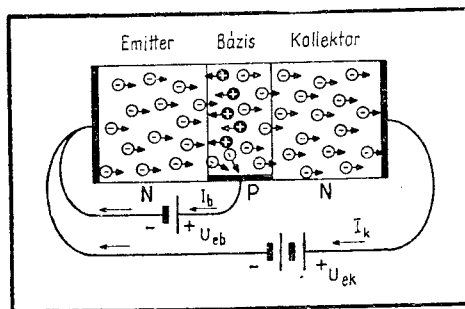
K. K.: Ígérem, hogy ventilátorokat fogok szerelni a tranzisztoros vevőimbe. Csakhogy még mindig nem látom, mire jök ezek a szendvicsszerű félvezetők.



Mindennek a bázisa : a bázis

O. I.: Mert még nem tudod, milyen a sonka..., akarom mondani az a vékony középső réteg a két átmenet között, amelyet bázisnak neveztünk el. Kapcsoljunk most egy kisebb feszültséget áteresztőirányban az emitter és a bázis közé.

23. ábra. Az U_{eb} feszültség hatására az emitter elektronjai megindulnak a bázis felé és továbbjuthatnak a kollektorba

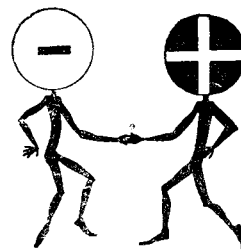


K. K.: Azt akard mondani, hogy például ha $N-P-N$ tranzisztorunk van, az emittert a bázishoz képest negatív potenciálra kapcsoljuk?

O. I.: Igen. Vajon mi történik ekkor, mit gondolsz?

K. K.: Semmi különös. Minthogy a feszültséget „jó irányban” kapcsoljuk a tranzisztorra, áram indul meg az emitter és a bázis közötti átmeneten keresztül. Ennyi az egész.

O. I.: Na nem, nemcsak ennyi az egész. Ugyanis ez az áram szabad elektronokat visz be az N típusú emitterből a P típusú bázisba. Mivel pedig a bázis egészen vékony, egy nagyon kevés ilyen elektron már elég ahhoz, hogy a P zónában szétszórtan jelen levő lyukak megteljenek, és ezek az elektronok ilyen módon létrehozzák az I_b bázisáramot, úgy ahogyan legutóbb megbeszéltük, amikor az $N-P$ átmenetről volt szó. A bázisba behatoló elektronok nagy részét saját mozgásuk hajtja, így behatolnak a kollektorba, onnan az U_{ek} feszültség-



forrás pozitív potenciálja vonzza magához. Ezek az elektronok tehát keresztüljutnak a második átmenet potenciálgátján, majd a kollektoron és az U_{ek} feszültségforráson keresztül visszakérülnek az emitterbe.

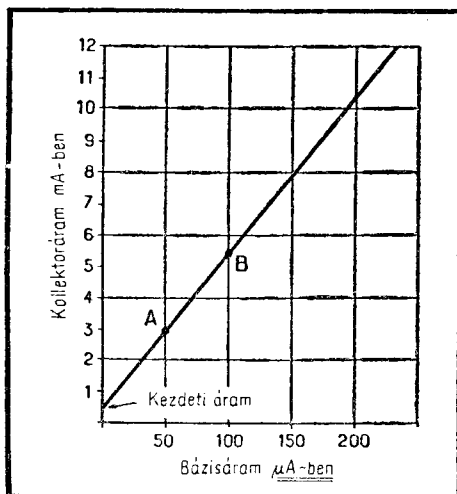
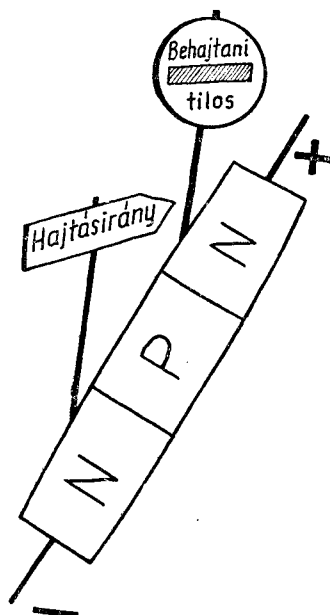
K. K.: Óriási! Ezek szerint csak egy kis feszültséget kell kapcsolnunk a bázis és az emitter közé, és az elektronok máris keresztüljutnak a bázis és a kollektor közötti második átmeneti rétegen, amely egyébként elállná az útjukat.

O. I.: Úgy bizony. És ennek a második átmeneten záróirányban meginduló áramnak az előidézését nevezzük tranzisztorhatásnak. Ez a tranzisztorhatás elve.

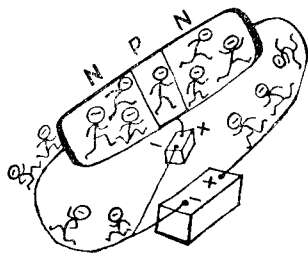
K. K.: Azt hiszem, világosabban látnám a dolgokat, ha megmondanád, milyen nagyságrendűek ezek a feszültségek és ezek az áramok.

Mikroamperes bázisáram és milliamperes kollektoráram

O. I.: A közönséges tranzisztorok bázisa és emittere közé 0,1 és 0,2 V közötti feszültséget szokás kapcsolni. Ez a feszültség 50–200 μA nagyságú bázisáramot hoz létre. Ami a kollektor és az emitter közé kapcsolt feszültséget illeti, ez 4,5–9 V lehet. A kollektoráram nagyságrendben 2–10 μA .

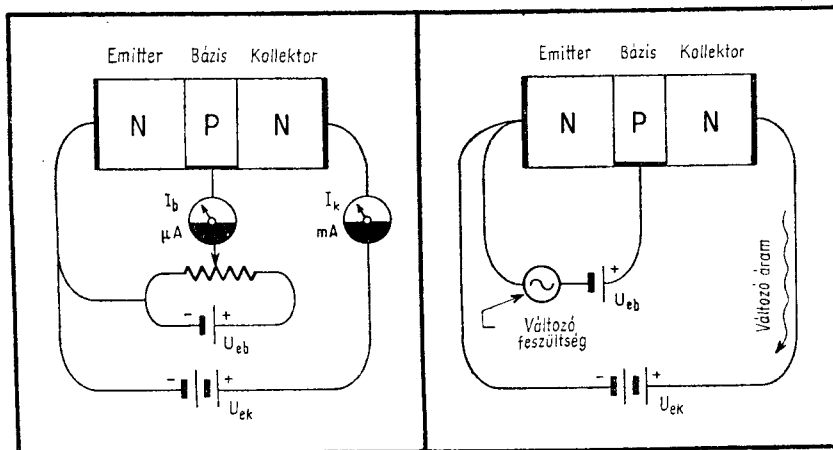


24. ábra. A milliamperben kifejezett I_k kollektoráram változása a mikroamperben kifejezett I_b bázisáram változtatásakor. Az A és a B pont között a bázisáram 50 μA -ról 100 μA -re növekszik, vagyis 50 μA -rel, azaz 0,05 mA-rel növekszik meg. A kollektoráram ugyancsak az A és a B pont között 3 mA-ról 5,5 mA-re növekszik, ez a növekmény 2,5 mA. Eszerint a tranzisztor áramerősítése $2,5 : 0,05 = 50$ -szeres



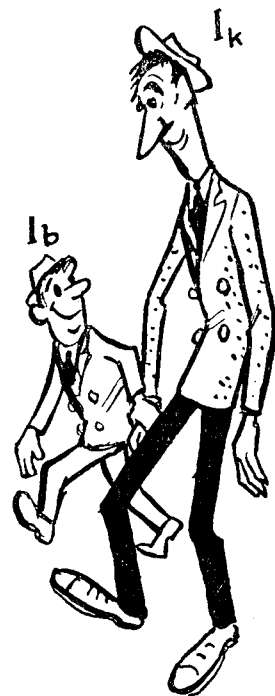
K. K.: Végeredményben tehát az emitter bizonyos számú elektront bocsát ki a bázisba, és ezeknek az elektronoknak egy kis része azonnal vissza is tér az U_{eb} feszültségforráson keresztül az emitterbe. Ezek azok az elektronok, amelyek a bázisban megtett rövid útjuk alatt szerencsétlenségükre összetalálnak az ott levő lyukakkal. Az elektronok nagy része azonban továbbfolytatja útját, áthalad a második átmeneten, és miután bejutott a kollektorba, az U_{ek} feszültségforráson keresztül érkezik vissza az emitterbe. A tranzisztorok erősíthetősége ezek szerint nyilván abból áll, hogy a kollektoráram sokkal nagyobb, mint a bázis árama.

O. I.: Kissé gyorsan akarsz előbbre jutni, de jól okoskodtál. A valóság az, hogy a kollektoráram lényegében a bázisáramtól függ és ezzel arányosan változik. Általában több mint tízszerese az utóbbinak. Itt van például ez a görbe (24. ábra), amelyen leolvashatod, hogyan változik egy bizonyos mintájú tranzisztorban a kollektoráram a bázisárammal. Vigyázz! A bázisáramot *mikroamperben* kell leolvasni, a kollektoráramot viszont *milliamperben* tüntettem fel. Amint látod, a kollektoráram itt mindenhol ötvenszerese a bázisáramnak (kivéve a gyenge kezdeti áramot, amely akkor is megvan, amikor a bázisban nem folyik áram). Azt mondjuk ilyenkor, hogy az *áramerősítés* ötvenszeres.



25. ábra. A 24. ábrán látható görbe felvételéhez összeállított kapcsolás. A potenciométer minden helyzetében megmérjük a bázis és a kollektor áramát

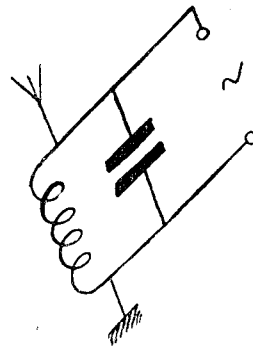
26. ábra. Változtatható feszültség a bázis és az emitter között. Ebben az esetben a kollektoráram is változtathatóvá válik



K. K.: És minek alapján rajzolhatjuk meg ezt a görbét?

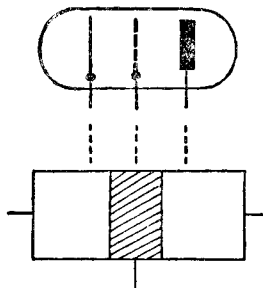
O. I.: A bázis és az emitter közé változtatható feszültséget vezetünk például úgy, hogy beiktatunk egy feszültségosztót, vagyis — a közönségesebb kifejezést használva — egy potenciométert. A bázisáramot mikroampermérővel, a kollektoráramot pedig milliampermérővel mérjük.

K. K.: Eszembe jutott valami. Ha a potenciométer karjának elforgatása helyett úgy változtatjuk az emitter és a bázis közötti feszültséget, hogy az egyenfeszültségű áramforrással sorosan beiktatunk egy változó amplitudójú jelet, például az antennáról kapott nagyfrekvenciás feszültséget vagy esetleg a demodulátor hangfrekvenciás kimenő feszültségét... így kis változások következnek be a bázisáramban, aminek eredményeképpen nagy változásokat kapunk a kollektoráramban.



Hasonlatosságok és eltérések

O. I.: Jól van, öregem, megkímélsz sok magyarázkodástól. De hogy jöttél erre az okos gondolatra?



K. K.: Már egy idő óta sejtem a tranzisztor és az elektroncső közötti hasonlatosságot. Ez a bázis nagyonis olyan, mint a vezérlőrács, hiszen akárcsak a rács, egy emitter, vagyis katód (elektronkibocsátó, elektronemittáló) és egy kollektor, vagyis anód (elektrongyűjtő) között van elhelyezve. Minthogy pedig a rács kis potenciálváltozásai nagy anódáramváltozásokat vonnak maguk után, itt a bázis kis potenciálváltozásai nagy kollektoráram-ingadozásokat eredményeznek. Éljen! Most már értem a tranzisztort! Mondd, hát nem vagyok rettenetesen okos?

O. I.: Mindig is ilyen szerény voltál. Nem akarom ugyan lehűteni fiatalos lelkesedésedet, de meg kell mondanom, hogy az elektroncső és a tranzisztor közötti hasonlatosság — bár nagyon megkönnyíti egyes dolgok megértését — csak bizonyos határokon belül érvényes, és erről nem szabad soha megfeledkeznünk.

K. K.: Nem látok semmilyen lényeges eltérést közöttük.

O. I.: Először is egy mennyiségi eltérést jelent a bázisáram. Emlékezz csak vissza! Ha elektroncsöveket használunk, gondosan megakadályozunk minden rácsáramot.

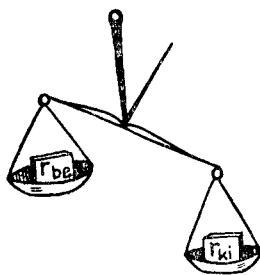
K. K.: Igen, tudom. Negatív előfeszültséget vezetünk a rácsra, nehogy pozitívvá válják a váltakozó jelfeszültség pozitív félperiódusaiban, mert egyébként elkapdosná az anód elől az elektronokat.

O. I.: Tehát az elektroncső bemenő jele olyan feszültség, amelynek nem kell áramot létesítenie, vagyis teljesítményt leadnia. A tranzisztorban viszont a bemenő jelfeszültség bázisáramot hoz létre. Itt tehát teljesítményről van szó.

K. K.: Ezek szerint a tranzisztor *bemenő ellenállása*, vagyis az emitter és a bázis közötti ellenállás kicsi?

O. I.: Természetesen. Mindössze néhány száz ohm, míg az elektroncsőben a katód és a rács között végtelen nagy az ellenállás. Ezenkívül a teljesítménytranzisztorban ez az ellenállás csak néhány ohm vagy néhányszor tíz ohm. Ugyanakkor a *kimenő ellenállás* meglehetősen nagy, eléri a tízezer ohm sokszorosát is.²

K. K.: Ez érthető, hiszen a tranzisztorra kapcsolt feszültség az emitter és a bázis közötti átmeneten áteresztőirányú, úgyhogy itt csökken az ellenállás,



² A szóbanforgó ellenállásértékeket mindig úgy kapjuk meg, hogy egy kisebb mértékű feszültségváltozást osztunk a megfelelő áramváltozással. Így például a *bemenő ellenállás* értéke

$$r_{be} = \frac{\Delta U_b}{\Delta I_b},$$

ahol ΔU_b az emitter és bázis közötti feszültség kismértékű változása, ΔI_b pedig a bázisáramban ennek hatására kapott változás. Ugyanígy a *kimenő ellenállás*

$$r_{ki} = \frac{\Delta U_k}{\Delta I_k},$$

ahol ΔU_k a kollektor és emitter közé kapcsolt feszültség kismértékű változása, amikor a kollektoráram megfelelő változása ΔI_k . Mérés közben vagy a bázisáramot, vagy a bázisfeszültséget állandó értéken tartjuk. E kérdések részletesebb ismertetése az irodalomban megtalálható.

viszont a bázis és a kollektor közötti átmeneten már záróirányban hat, tehát igen nagy ellenállást kell kapnunk. Az utóbbi esetben azonban a nagyságrendek ugyanolyanok, mint bizonyos elektroncsövekben, mégpedig a triódákban, amelyeknek viszonylag kicsi a kimenő ellenállásuk.

O. I.: Amint látod, nem szabad minden feltétel nélkül hivatkozni az elektromos és a tranzisztor közötti hasonlatosságra. Mivel pedig már megbeszéltük ezt az alapvető kérdést, a bemenő és a kimenő ellenállás (vagy inkább impedancia) kérdését, most már könnyen meg fogod érteni, hogyan jön létre a tranzisztorban a feszültségerősítés.

Feszültségerősítés

K. K.: Úgy képzelem el a dolgokat, hogy a bázis és az emitter közé kapcsolt kisamplitudójú váltakozó feszültség, amint már megállapítottuk, változásokat idéz elő a bázisáramban.

O. I.: Ezek a változások pedig annál nagyobbak, mennél kisebb a bemenő ellenállás (feltéve, hogy magában a feszültségforrásban kicsi a belső ellenállás).

K. K.: Értem, hiszen jól megjegyeztem magamnak az Ohm-törvényt, amely szerint az áramerősség annál nagyobb, mennél kisebb az ellenállás.

O. I.: Mármost a kollektoráram a bázisárammal arányosan változik, tehát nagy értékűek lesznek ennek az áramnak a változásai. Mivel pedig a tranzisztorban nagy a kimenő ellenállása, ezt az áramot minden nehézség nélkül átvezethetjük egy igen nagy terhelő ellenálláson...

K. K.: ... amelyről levesszük a felerősített váltakozó feszültséget. Ha jól emlékszem, az elektroncsövekkel kapcsolatban *meredekségnek* nevezzük az anódáramban kapott változásnak és a rácsfeszültség változásának az arányát. Előfordul a tranzisztorok világában is ez a fogalom? Itt a kollektoráram változásának és a bázisfeszültség változásának az arányát lehetne meredekségnek neveznünk.

O. I.: Úgy van. A tranzisztor meredeksége egészen közönséges fogalom. Lesz még alkalmunk ezzel a fogalommal közelebbről is megismerkedni. Annyit már megmondhatok, hogy a 30 mA/V meredekség szokásos érték (ezt a mennyiséget 1 mA-es kollektoráramra vonatkoztatjuk, ugyanis a meredekség értéke a kollektoráram függvénye).

K. K.: Dehát ez nagyszerű! Ilyen meredekséggel óriási erősítést lehet elérni.

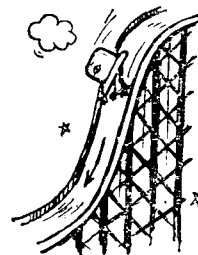
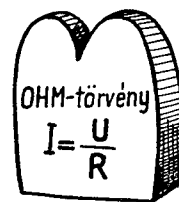
O. I.: Sajnos, nem. Majd meglátod, a kis bemenő ellenállás miatt elveszítjük a nagy meredekségből származó előny egy részét. De egyébként is korlátoznunk kell ezeknek a váltakozó feszültségeknek az amplitudóját.

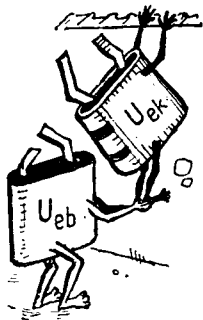
K. K.: Az elektroncső esetében vigyáznunk kell arra, nehogy pozitívvá váljék a rács. Itt, azt hiszem, arra kell ügyelnünk, hogy a pozitív csúcsok hatására az emitter ne lehessen pozitívabb a bázisnál.

O. I.: Itt inkább az a helyzet, hogy a terhelő ellenálláson kapott negatív csúcsoknak nem szabad meghaladniok a kollektorra vezetett pozitív feszültséget, nehogy a kollektor negatív potenciálra kerüljön.

K. K.: Ezeknek a veszélyeknek az elkerülésére nem lehetne megnövelni a két tápfeszültséget?

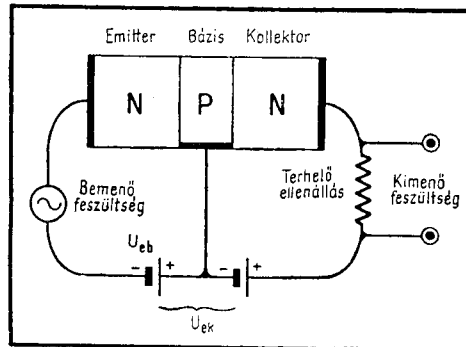
O. I.: Itt ez könnyelműség volna, mert a tranzisztorok minden egyes típusára



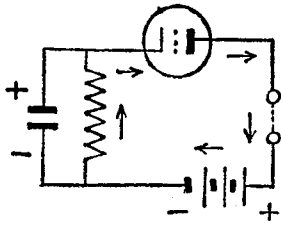


előírják azokat a legnagyobb értékeket, amelyeket az egyenfeszültségekkel nem szabad túllépni. Ezzel kapcsolatban elárulom még, hogy a két feszültségforrást célszerűen sorbakapcsolhatjuk, mert a kollektorra olyan feszültséget kell vezetnünk, amely pozitívabb, mint a bázisnak az emitterhez viszonyított feszültsége.

K. K.: Mintha csak a vállára emelné az U_e telep az U_{ek} telepet.



27. ábra. A bázis és a kollektor tápfeszültsége egyetlen teleppel is előállítható. Ebben az esetben ezen a közös telepen egy közbelső leágazásra (mint az ábrán) vagy feszültségosztóra van szükség. Az ábrán az is jól látható, hogyan helyezük el a munkaellenállást, amelyről a kimenő feszültséget levesszük



O. I.: A valóságban teljesen elhagyjuk az első telepet, és a bázis előfeszültségét úgy állítjuk elő, hogy az emitter és a kollektor közötti árammal feszültségesztést létesítünk egy megfelelő ellenálláson.

K. K.: Akárcsak az elektroncsöves fokozatokban, amikor a feszültségejtő ellenálláson keresztülvetjük az anódáramot.

O. I.: Ezzel a kérdéssel azonban később fogunk foglalkozni. Most pedig megkérlek arra, hogy addig is, amíg legközelebb újra találkozunk, gyakorlásképpen gondolkodj azon, hogyan viselkednek a másik típusnak megfelelő tranzisztorok, a $P-N-P$ típusúak, ezek ugyanis sokkal gyakoribbak.

K. K.: Jaj nekem! Milyen álmatlan éjszakáim lesznek.

Negyedik beszélgetés

A három előző beszélgetésben a tranzisztorok fizikai alapelveiről volt szó. Két barátunk először az atom belső szerkezetét, magánéletét, majd a kristályrácsban levő atomok társadalmi viselkedését tárta fel. Látjuk, milyen zavarokat idéz elő ezekben az atomtársadalmakban a szennyezések megjelenése. Végül az ellentétes tulajdonságú szennyezéseket tartalmazó félvezetők összeillesztésével barátaink összeállították a diódát és a tranzisztort.

Mindennek a teljes megértéséhez nem árt még egy kis ismétlés. Ez a célja a következő beszélgetésnek.

Összefoglalás: A töltések mozgása. — Többségi töltéshordozók. — A P–N–P tranzisztor működése. — Fémekből álló vegyületek. — A kivezetések felismerése. — A tranzisztorok rajzjelei. — Az alapfogalmak összefoglalása.

A tranzisztorok fizikája

A töltéssel ellátott részecskék négy fajtája

K. K.: Ezek a félvezetők nem hagynak aludni, annyira érdekelnek. Csak-hogy... rettenetesen bonyolult itt minden.

O. I.: Adjak talán valamilyen altatószert, vagy inkább azt akarod, hogy megmagyarázzam azt, ami olyan zavarosnak tűnik neked?

K. K.: Elsősorban azt szeretném, hogy válaszolj nekem azokra a kérdésekre, amelyek annyira megzavarnak. Tudod, egyes jelenségek nagyon homályosak előttem, mégpedig azért, mert a félvezetőkben négyféle, töltéssel ellátott részecskével van dolgunk. Ezek, ugye, a következők:

1. Az *ionizált donoratomok*, amelyek — miután elvesztették külső elektronhéjuk ötödik elektronját — pozitív ionokká válnak.

2. Az ilyen módon szabaddá váló, természetesen *negatív töltésű elektronok*.

3. Az *akceptorok ionizált atomjai*, amelyek magukhoz ragadnak az egyik szomszédos atomról egy elektront, ezzel négyre egészítik ki a külső héjukon levő elektronok számát és ugyanakkor *negatívvá* válnak.

4. Végül itt vannak az elektronok elragadása után megmaradó *lyukak*, amelyek az elektron hiánya miatt *pozitív* töltéseknek felelnek meg.

O. I.: Nagyon jól összefoglaltad, mi a helyzet a félvezetők belsejében. Mi hát az, ami annyira megzavar?

K. K.: A töltések mozgása. Azt mondtad, hogy a félvezetőkben folyó áram elektronok és „lyukak” egyidejű mozgásából áll, mégpedig úgy, hogy az elektronok a negatív pólustól a pozitív pólus felé haladnak, ugyanakkor pedig a „lyukak” ezzel ellentétes irányban, a pozitív pólustól a negatív felé nyomulnak előre. Ebből a szempontból a félvezetők különböznek a fémektől, mert az utóbbiakban a vezetés kizárólagosan csak az elektronok mozgásának tulajdonítható.



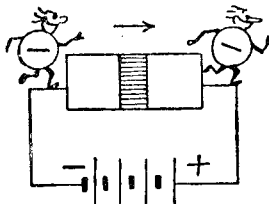


O. I.: Ha egészen szabatosak akarunk lenni, hozzá kell tennünk, hogy a „lyukak” mozgása végeredményben szintén elektronok elmozdulásából áll.

K. K.: Csakhogy nem értem, hogy az ionizált atomok, vagyis a donorok és az akceptorok ionjai miért nem vesznek részt maguk is a villamos töltések mozgásában.

O. I.: Látom már, mi nem tetszik neked. És igazad van, hogy feltetted a kérdést. A dolog egészen egyszerű: ezek az atomok nem mozdulhatnak el, mert kristályrácsot alkotnak, és ennek folytán szigorúan és mereven meg van szabva a helyük. Amíg az anyag szilárd halmazállapotban van, ezeket az atomokat mint foglyokat láthatatlan kötelékek tartják a helyükön. A folyadékokban azonban szabadon elmozdulhatnak az ionizált atomok, és ionvezetés folytán megindulhat az elektrolízissel kapcsolatos áram, amelyről már bizonyára hallottál a fizikaórákon.

K. K.: Így már nagyon szép minden. Most már nem fogok törődni az ionizált atomokkal, és beérem azzal, hogy az elektronok és a lyukak mozgását kövessem.



O. I.: Nagyon helyes. Egyébként nagy szerencsénk, hogy az ionok nem mozdulhatnak el a félvezetőkben. Ha elmozoghatnának, lassanként elfogyna az anyag, ami megrövidítené a tranzisztorok élettartamát. Ugyanakkor az elektronkészlet állandóan felújul, mert a feszültségforrás egyik oldalán pótolja azokat az elektronokat, amelyeket a félvezető másik végén elnyel (és ezzel újabb lyukakat hoz létre). Amint látod, semmi sem korlátozza a tranzisztorok életét.

Igaza volt Einsteinnak

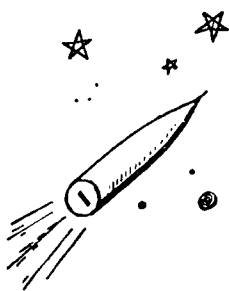
K. K.: Ez csodálatos... De térjünk vissza az elektronokra és a lyukakra. Azt szeretném tudni, hogyan lehetnek meg ezek egymás mellett anélkül, hogy semlegesítenék egymást. Hiszen az ellentétes előjelű töltések vonzzák egymást.

O. I.: Gondold csak meg, öregem, milyen hatalmas a távolság (természetesen az atomok léptékében) a legtöbb ilyen részecske között. Az elektron többszázszorosát teszi meg az atomok közötti távolságnak. A mi mértékünkben ez átlagosan mindössze egy tizedmilliméter, de az elektron részére éppen olyan kalandos vállalkozás, mint nekünk a csillagok közötti utazás egy jövődéli úrhajón. Beláthatod, hogy ilyen körülmények között nem sok esélye van az elektronnak a lyukkal való találkozásra. A valóságban mindig vannak elektronok és lyukak egymás mellett.

K. K.: Igen, már elmagyaráztad, hogy szobahőmérsékleten is van bizonyos hőmozgás, amelynek hatására egyes elektronok leszakadnak az atomokról és kirepülnek az atomok közötti űrbe.

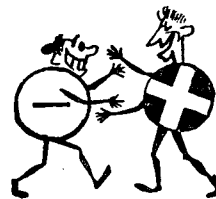
O. I.: Egy köbcéntiméternyi „tisztá” germániumban mindig van körülbelül huszonötmillió szabad elektron, és természetesen ugyanennyi lyuk is, hiszen az elektronok eltávozásával egy-egy lyuk keletkezik. Ezek a töltéshordozó-párok bizonyos idő múlva rekombinálódnak, ugyanakkor azonban újabb párok jönnek létre, úgyhogy valamilyen statisztikai egyensúlyi állapot létesül.

K. K.: És ha a germánium nem „tisztá”? Ha például *N* típusú szennyezőanyagot viszünk be a germániumba?



O. I.: Akkor több lesz a szabad elektron, mint a lyuk. Ezek az elektronok lesznek a *többségi töltéshordozók*.

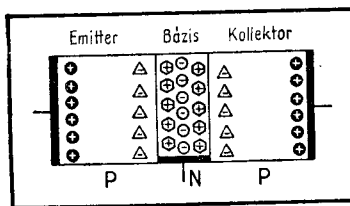
K. K.: Így tehát a *P* típusú félvezetőekben a lyukak vannak többségben, úgyhogy itt ezeket nevezzük többségi töltéshordozóknak. Határozottan igaz volt Einsteinnak. Minden relatív, minden csak az arányokon múlik.



Mi történik a *P-N-P* tranzisztorban?

O. I.: Most, hogy már kielégítettem kíváncsiságodat, volnál szíves végre válaszolni a legutóbbi beszélgetésünk végén feltett kérdésemre: hogyan működik a *P-N-P* tranzisztor?

28. ábra. A töltéshordozók (az elektronok és a lyukak) és az ionizált atomok eloszlása a *P-N-P* tranzisztorban a tápfeszültségek bekapcsolása előtt. Az ellentétes előjelű ionok potenciálgátakat alkotnak

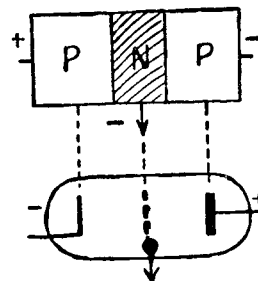


K. K.: Gondolkoztam ezen a kérdésen, és azt hiszem, tudok rá válaszolni. Az ilyen tranzisztorban minden a fordítottja annak, ami az *N-P-N* tranzisztorban játszódik le, a kollektort az emitterhez képest negatív potenciálra kell kapcsolni. Bevallom, nekem ez nagyon kellemetlen.

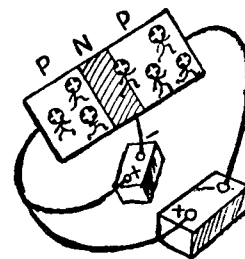
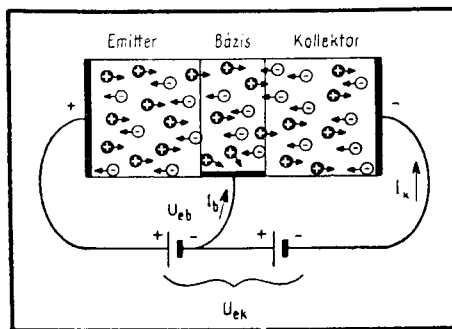
O. I.: Ugyan miért?

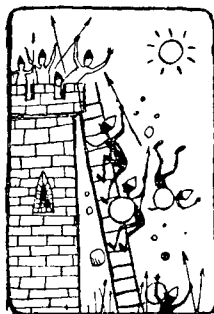
K. K.: Mert mindig triódának tekintem a tranzisztort. Ha azonban arra gondolok, hogy az anód negatív potenciálon legyen a katódhoz képest — ugyanis a kollektor anódnak, az emitter pedig katódnak felel meg —, ez bizony kissé megvadít. Ha viszont arra gondolok, hogy a bázisnak szintén negatív potenciálon kell lennie az emitterhez képest, kissé megvigasztalódom, mert természetesen a vezérlőrácsra gondolok.

O. I.: Mondtam már neked, hogy óvakodni kell az ilyen hasonlatoktól.



29. ábra. A töltéshordozók mozgása a bekapcsolt *P-N-P* tranzisztorban. Az áttekinthetőség kedvéért az ionokat nem tüntettük fel





K. K.: Na jó, majd vigyázni fogok. Ha tehát a feszültségeket így kapcsoljuk be, az emitter és a bázis közötti átmenet áteresztőirányban kapja a feszültséget. Eszerint az emitterben levő lyukak a tápforrás pozitív pólusának taszító hatására áthatolnak a $P-N$ átmeneten a bázis felé. Olyan nagy lendülettel mozognak, hogy a bázisra kapcsolt U_{eb} telep negatív pólusának vonzó hatása ellenére nagy részük keresztülhalad ezen a vékony rétegen és bejut a kollektorba.

O. I.: Ez valóban így van. Csakhogy mi lesz azzal a néhány „lyukkal”, amely nem képes ellenállni az U_{eb} telep negatív pólusával létesített vonzó hatásnak?

K. K.: Ezek megszűnnek, amint rekombinálódik a negatív pólusból kilépő elektronokkal. Ilyen módon a bázis irányából egy gyenge I_b áram indul meg az emitter felé (természetesen az elektronok irányát véve alapul).

O. I.: És mi lesz a lyukak többségének a sorsa, ezek ugyanis elérik a kollektort.

K. K.: Itt is ugyanez történik. Ezeket a lyukakat az U_{ek} telep negatív pólusából kibocsátott elektronok semlegesítik. Valahányszor egy-egy elektron átlép a telepből a kollektorba, hogy megszüntessen egy lyukat, az emitter egyik atomjából egy másik elektron lép ki és tűnik el az U_{ek} telep pozitív sarkán. Amikor azonban ez az utóbbi elektron elhagyja a kérdéses atomot, egy újabb „lyukat” hagy maga után. Így tehát az áramot egyrészt az emitterből a kollektor felé vándorló „lyukak” (vagy hézagok), másrészt pedig az ezzel egyidejűleg ellentétes irányban haladó elektronok tartják fenn. Így van?

O. I.: Örömmel állapíthatom meg, hogy tökéletesen megértetted a dolgokat. Valóban minden úgy történik, mint amikor egy hadsereg ostromol egy várat. Az ostromlók feljutnak a bástyára és ellenállhatatlan lendülettel visszaszorítják az ellenük felvonuló védőket.

K. K.: Hasonlatod a bázist jelképező bástyával és a kollektort jelképező várral még meggyőzőbb lenne, ha a várórség ellentámadást kísérelne meg, amint az elektronok is kirohannak a támadó „lyukak” feltartóztatására, viszont az utóbbiak ellenállhatatlan pozitív töltése megsemmisíti őket. De mondd csak, az elektronok és a lyukak egyenlő sebességgel mozognak?

Különös összepárosítások

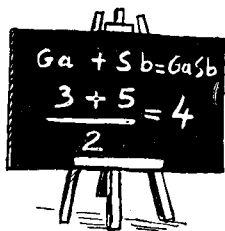
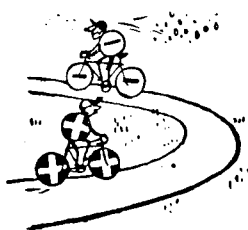
O. I.: Nem. A tiszta germániumban 1 V/cm villamos térerősség hatására körülbelül 40 méternyi utat tesznek meg másodpercenként az elektronok, míg a lyukak által megtett út a fele ennek. Ugyanilyen körülmények között a szilíciumban 12 m/sec az elektronok sebessége, a lyukaké pedig mindössze $2,5 \text{ m/sec}$. Egyes intermetallikus vegyületekben viszont az elektronok $0,5 \text{ km/sec}$ -nél nagyobb sebességet is elérhetnek.

K. K.: Mik ezek az intermetallikus vegyületek? Sohasem hallottam róluk.

O. I.: Ezek olyan félvezető vegyületek, amelyeket egy három vegyértékű és egy ötvegyértékű elem összepárosításával állíthatunk elő.

K. K.: Így tehát három és öt középértékét véve négy vegyértéket kapunk, mint ahogyan a germánium és a szilícium is négyvegyértékű. Fel tudnál nekem sorolni néhány ilyen intermetallikus vegyületet?

O. I.: Persze. Ilyen például a háromvegyértékű gallium és az ötvegyértékű



antimon vegyülete, amelynek felhasználásával tranzisztorok készíthetők. Ugyanígy a háromvegyértékű indiumot ötvegyértékű foszforral párosítva bizonyos diódákban felhasznált félvezetőt kapunk. Hasonlóképpen a kétvegyértékű kadmium és a hatvegyértékű szelén vegyületét is előállították; ebből fényelemeket készítenek. Az intermetallikus félvezetők területén élénk kutatómunka folyik, és itt még érdekes eredmények várhatók.

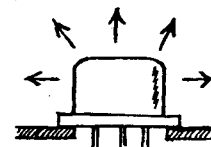
K. K.: Úgy beszélsz, mint valami professzor. De térjünk csak vissza a jelenhez, a háromlábú báránykáinkhoz. Azt mondd meg nekem, miben különbözik az emitter és a kollektor. A $P-N-P$ típusú tranzisztorokban mind a kettő P típusú, az $N-P-N$ típusúban pedig egyformán N típusúak ezek a rétegek. Nem lehet ezeket felcserélni?

O. I.: De nem ám! Ezt mindjárt magad is belátod. Az emitterből a bázisba, majd onnan a kollektorba folyó áram lényegileg ugyanaz mind a két rétegben, de a feszültségek meglehetősen eltérőek. A kollektor és a bázis közé sokkal nagyobb feszültséget kapcsolunk, mint a bázis és az emitter közé.

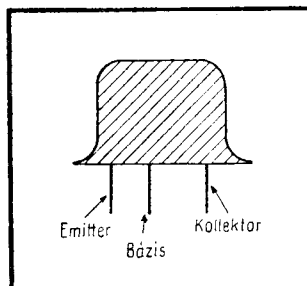
K. K.: Tudom már! Minthogy az áram és a feszültség szorzata teljesítményt jelent, a kollektor sokkal nagyobb teljesítményt vesz fel, mint az emitter és a bázis.

O. I.: Eltaláltad. A kollektorból éppen ezért nagyobb mennyiségű hőt kell elvezetni, úgyhogy a kollektor nagyobb felületű, mint az emitter. A teljesítménytranzisztorokban a kollektort hozzáforsztatják a fémburához, így a hő vezetés útján átadódik a szerelvénylapra, és szétsugárzódik a környezetbe.

K. K.: Most már értem, miben különböznek a tranzisztor „elektrodái”. De hogyan ismerhetjük fel őket? Hogyan állapíthatjuk meg, hogy a tranzisztoron melyik az emitter kivezetése, melyik tartozik a bázishoz vagy a kollektorhoz?



30. ábra. A tranzisztor három „lábának” elrendezése. Ennek alapján könnyen felismerhető, melyik az emitter, a bázis és a kollektor kivezetése (a kollektorkivezetés van a legtávolabb a másik kettőtől)

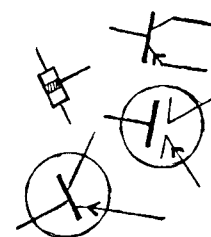


Lábak és pontok

O. I.: A kivezetések könnyen felismerhetők. A három kivezetőhuzal egyvonalban van (a kisméretű tranzisztoroknak nincsen foglalata). Ezek közül kettő közel van egymáshoz: az emitteré és a bázisé. A tőlük távolabb levő harmadik kivezetés a kollektorhoz tartozik. (Ezt az utóbbit esetleg egy színes ponttal is megjelölik).

K. K.: Ez valóban egyszerű is, logikus is, akárcsak a tranzisztornak ez a rajzjele, itt a papíron, ez a három részre osztott kis rudacska.

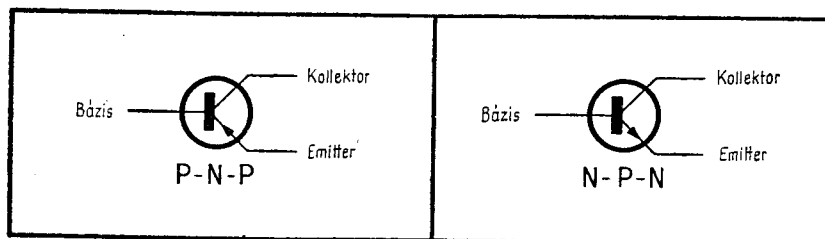
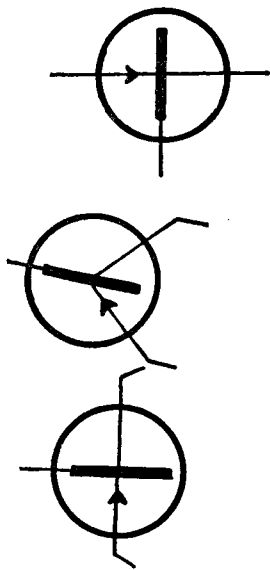
O. I.: Ez a rajzjel valóban logikus, és ezenkívül teljesen megfelel a tranzisz-



tor tényleges felépítésének, csakhogy a kapcsolási rajzokon, sajnos, nem így szokás jelölni a tranzisztorokat.

K. K.: Kár! Akkor hát milyen a tranzisztor „hivatalos” rajzjele?

O. I.: Nemzetközi megállapodások nincsenek, a rajzjelek országonként, sőt, szerzőnként is változnak. Többnyire azonban így rajzolják: egy vastagabb vonal, és ennek középpontjából két másik vonal indul ki. A vastagabb vonal a bázis, az pedig, amelyik ennek közepébe fut be és egy nyíllal van megjelölve, az emitter. A harmadik a kollektor. És jól jegyezd meg, ha a nyíl a bázis felé mutat, a tranzisztor $P-N-P$ típusú. Ha a nyíl a bázistól távolodó irányba mutat, $N-P-N$ típusú tranzisztorral van dolgod.



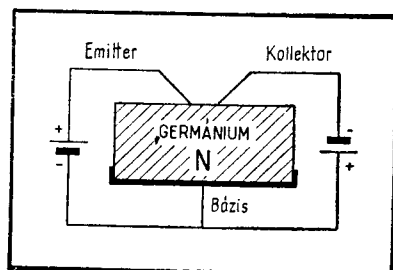
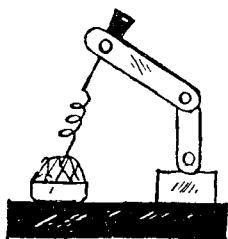
31. ábra. A $P-N-P$ és az $N-P-N$ típusú tranzisztorok rajzjelének egyik szokásos megkülönböztetése

K. K.: Micsoda dolog ez, hogy ilyen értelmetlen jelet használjak, hiszen ez nem felel meg a valóságnak. A tranzisztor emittere és kollektora a valóságban a bázis két különböző oldalán van elhelyezve!

O. I.: Ez még a régi időkből, 1948-ból származik. Az első tranzisztorok akkor jelentek meg a világon, és még úgynevezett „tüérintkezősek” voltak. Egy N típusú germánium kristályból álltak, ez volt a bázis, és erre egymás közelében két fémcúscot szorítottak.

K. K.: Csak nem akartak visszatérni a jó öreg kristálydetektorhoz?

O. I.: Majdnem. Csakhogy nem egy, hanem két fémcúscot érintkezett a kristállyal. Az ilyen tranzisztorokat ugyanúgy kellett bekötni, mint a jelenlegi $P-N-P$ típusúakat. A tüérintkezős tranzisztorok hátránya, hogy nem stabilak, akárcsak ősük, a kristálydetektor. Ezenkívül csak kis teljesítményre használhatók. Éppen ezért ma már nem használatosak (míg a tüérintkezős

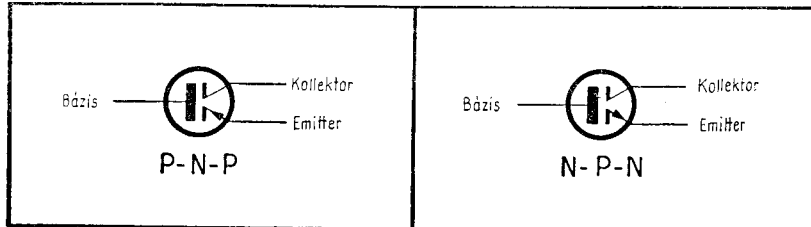


32. ábra. A tüérintkezős tranzisztor felépítése

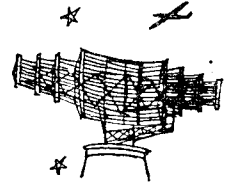
diódát most is alkalmazzák, különösen az egész rövid hullámokon, például a rádiólokátorokban, mert itt nagyon fontos, hogy kicsi legyen a kapacitás).

K. K.: Végeredményben tehát a jelenlegi rajzzel egy letűnt korszak emléke?

O. I.: Úgy van. Jegyezd meg azonban, hogy amikor meg akarják különböztetni a túérintkezős tranzisztorokat a jelenlegi rétegtranzisztoroktól, sok szerző az utóbbiakat más rajzzel ábrázolja.



33. ábra. A rétegtranzisztorok egyik lehetséges megkülönböztető rajzjele



K. K.: Mielőtt továbbmennék, légy szíves röviden összefoglalni részemre — lehetőleg írásban — mindannak a lényegét, amit eddig nekem elmagyaráztál, és amire szükségem lesz ahhoz, hogy megértsem a további magyarázataidat. Így jobban megemészténém a következő találkozásunkra.

O. I.: Nagyon szívesen. Majd megírom az összefoglalást, postán megkapod. Addig is szép álmokat!

Az Okos Ifjú levele kíváncsi barátjának

Kedves barátom!

A következő dolgokat kell jól emlékezetedbe vésned:

A tranzisztor három rétegből, úgy mint emitterből, bázisból és kollektorból áll. Ezek a rétegek bizonyos szennyezőanyagokat tartalmaznak oly módon, hogy az emitter és a kollektor (pozitív, P vagy negatív, N jellegű) villamos tulajdonságai ellentétesek a bázis villamos tulajdonságaival.

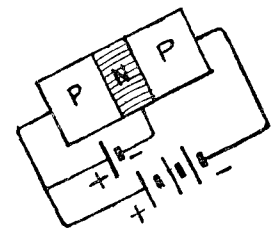
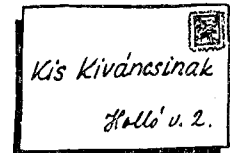
Ennek megfelelően a tranzisztorok P-N-P vagy N-P-N típusúak lehetnek. A P-N-P típusúak — legalábbis a germánium tranzisztorok esetében — a legszokásosabbak. (Technológiai okok miatt a legtöbb szilícium tranzisztor N-P-N típusú.)

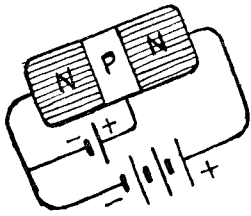
A P-N-P típusú tranzisztor bázisát az emitterhez képest negatív potenciálra kell kapcsolni, a kollektornak viszont még negatívabb feszültséget kell kapnia, mint a bázisnak.

Az N-P-N tranzisztor esetében a bázis pozitívabb, mint az emitter, a kollektor pedig még pozitívabb, mint a bázis.

A tápfeszültségek mind a két esetben áteresztőirányban táplálják az emitter és a bázis közötti átmenetet.

A bázisáram erőssége nagyon kicsi (mikroamper, nagyságrendű). A kollektoráram sokkal nagyobb (milliamperes).





A bázisáram kis változásai nagy változásokat idéznek elő a kollektoráramban. A kollektoráram és a bázisáram változásának arányát áramerősítésnek nevezzük.

A tranzisztor bemenetén (a bázis és az emitter között) viszonylag kicsi az ellenállás. Ezért a bemenetre vezetett jeleknek bizonyos teljesítményt kell szolgáltatniok.

A tranzisztor kimenetén (a kollektor és az emitter között) nagy az ellenállás.

A bázis és az emitter közé kapcsolt feszültség megváltozásakor megváltozik a bázisáram, ennek hatására viszont ennél nagyobb mértékű változás következik be a kollektoráramban. Ha a kollektor áramkörébe terhelő ellenállást iktatunk be, az utóbbinak a sarkain felerősített feszültségváltozásokat kapunk.

Röviden összefoglalva ezek azok az eredmények, amelyeket eddigi beszélgetéseinkből leszűrhetünk.

Üdvözl baráto

Okos Ifjú

Ötödik beszélgetés

Az biztos, hogy kíváncsi kisbarátunk sohasem fog otthon tranzisztorokat gyártani. Ennek ellenére nagyon érdekli, milyen eljárásokkal készülnek ezek a „háromlábú pókok”, ahogyan ők mondják, és be kell vallanunk, hogy a tranzisztorgyártás meglehetősen különleges eljárásokból áll. A beszélgetés során megállapítja, hogy a különböző feladatoknak megfelelően különböző változatokban készülnek a tranzisztorok. Így például az egyre nagyobb frekvenciákkal és teljesítményekkel kapcsolatban sajátos megoldásokhoz kell folyamodni.

Összefoglalás: Zónás olvasztásos tisztítás. — Elektronikus melegítés. — Az egykristály növesztése. — Felszeletelése. — Az átmenetek növesztésének módszerei. — Ötvözött tranzisztorok. — A nagyteljesítményű tranzisztorokkal kapcsolatos problémák. — Diffúziós eljárás. — Átfutási idő. — Az emitter és kollektor közötti kapacitás szerepe. — Tranzisztor-tetróda. — Felületi záróréteges tranzisztorok. — Kétszeres diffúzió. — A driftranzisztor. — P-N-I-P típus. — Mesa-tranzisztor. — Térhatású tranzisztor.

Egy kis technológia

Előzetes tisztítás

K. K.: Tudod, sohasem próbáltam meg elektroncsöveket készíteni. Az üvegburában vákuumot kell előállítani, ami számomra mindig legyőzhetetlen akadályt jelentett, hiszen a biciklipumpám nem megfelelő szerszám erre a célra. Most viszont úgy érzem, nincsen semmi akadálya annak, hogy tranzisztort gyártsak magamnak. Ugye, megkapom a patikában a szükséges anyagokat, a tiszta germániumot, az *N* rétegben szükséges antimont és az indiumot, amellyel előállíthatom a *P* réteget?

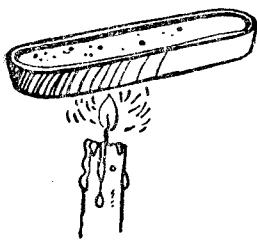
O. I.: Szegény barátom, komolyan beszélsz?

K. K.: Persze. Vagy talán olyan ördögös mesterség volna ez?

O. I.: De még mennyire! Mindenekelőtt alaposan meg kell tisztítani a germániumot, mert amit mint „tisztá” germániumot kaphatnál, egyáltalán nem volna elég tiszta nekünk. Ezután át kell alakítani úgynevezett *egykristályú*, vagyis egyetlen kristályból álló darabbá, hogy szabályos kristályszerkezetet kapjon. A két átmenettel különválasztott három réteg előállításához be kell vinni a megfelelő *P* és *N* típusú szennyezőanyagokat. Ha az megvan, kivezetéseket kell készíteni a tranzisztor három rétegéhez, az egészet merev, szilárd egységgé össze kell szerelni, majd légmentesen lezárható burába téve meg kell védeni a külső hatásoktól. Csak a tökéletesen felszerelt nagy gyárakban lehet ezeket a különböző műveleteket kifogástalanul elvégezni.

K. K.: Egészen elveszed a kedvemet a dologtól. Valóban olyan nehéz munka volna a germánium tisztítása?

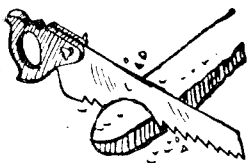




O. I.: Ne felejtse el, hogy valóban tiszta germániumra van szükségünk, vagyis egy milliárd atom között legfeljebb 10 szennyezőatom lehet, bizonyos esetekben azonban még ennyi szennyezést sem engedhetünk meg.

K. K.: Akkor hát bizonyára vegyi eljárásokkal szabadítják meg a germániumot a benne levő szennyezőanyagoktól, ugye?

O. I.: Vegyi eljárásokkal el lehet érni bizonyos tisztaságot, de ez nem elég. Utána egy fizikai eljárást is alkalmaznak, az úgynevezett *zónás olvasztást*, amikor is már az elektronika is érvényesül. A megtisztítandó germániumot egy nagyon tiszta kvarctégelybe vagy grafittegelybe teszik, és az egészet hidrogénnel vagy nitrogénnel veszik körül (nehogy az anyag oxidálódjék), majd egy keskeny sávban (zónában) a germániumot annyira felmelegítik, hogy megolvad. Ezt a keskeny zónát most lassan eltolják a tegely egyik végétől a másik végéig.



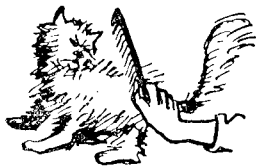
K. K.: Persze azért, hogy a szennyezőanyagok elégjenek benne.

O. I.: Nagyon tévedsz. Az eljárás azon alapul, hogy a szennyezések megmaradnak a megömlesztett zónában, vagyis végigvándorolnak az egész anyagon, miközben mögöttük a germánium lassan lehűl és megdermed. Ilyen módon a szennyezőanyagokat lassan átáramoltatják a germánium tömbön, ennek egyik végétől a másik végéig, és miután ezt a műveletet már többször elvégezték, levágják a germániumnak azt a végét, ahova a szennyezéseket átseperték.

K. K.: Ezt a levágott darabot persze eldobják.

O. I.: Dehogyan dobják el, hiszen a germánium nagyon drága anyag. Újra felhasználják egy másik tisztítótegelyben.

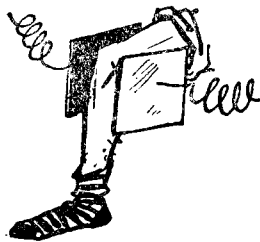
K. K.: Erről eszembe jut az a zónás olvasztás, amit tegnap végeztünk el Górában.



O. I.: Ki az a Góra, és már megint milyen rossz viccet akarsz nekem elmondani?

K. K.: Góra a macskánk, azért nevezzük így, mert félig angóra. Általában nagyon tiszta állat, de úgy látszik, rossz társaságba keveredett, mert bolhákat találtunk rajta. Néhányszor végigfésültük a fejétől a farkáig, hogy kiűzzük belőle a szennyezőit. De milyen lehet az a fésű, amellyel a germániumot fésülgetik, vagyis hogyan érik el, hogy csak egy keskeny zónában olvadjon meg az anyag?

Elektronikus melegítés



O. I.: Nagyfrekvenciás indukciós fűtéssel. A megolvasztandó zónát néhány menetből álló tekercssel veszik körül. A tekercsbe nagyerősségű nagyfrekvenciás áramot vezetnek, ez viszont örvényáramokat indukál a germániumban. Az örvényáramok hatására az anyag annyira felmelegszik, hogy megolvad.

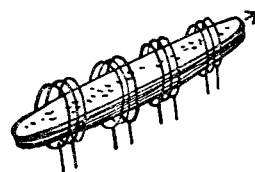
K. K.: Hiszen ugyanezt csinálták Gyula bácsival is!

O. I.: Mit akarsz most a nagybácsiddal? Talán neki is bolhái voltak?

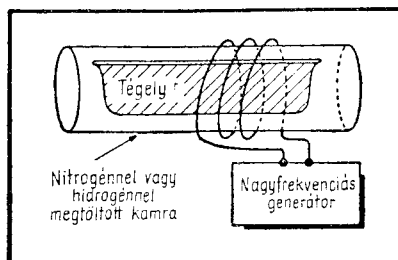
K. K.: Nem, csak szerencsétlenül esett, és ízületi fájdalmai voltak a térdében. Nagyfrekvenciás diatermiás kezelést kapott.

O. I.: Értem már! Két szigetelt elektróda közé tették a térdét, és nagyfrekvenciás feszültséget kapcsoltak az elektródákra. Az így előállított *villamos* tér magában a beteg testrészen fejleszt meleget a dielektromos veszteségek

révén. Csakhogy a zónás olvasztáshoz alkalmazott indukciós melegítés esetében az áram *mágneses* tere indukál áramokat a félvezető belsejében. A nagyfrekvenciás melegítőhatás érdekessége az, hogy a szigetelőanyagok felmelegítésére alkalmazott villamos tér, illetve a vezetőanyagokat felmelegítő mágneses tér a felmelegítendő anyag *egész tömegében* meleget fejleszt, tehát a melegítőhatást nem a hővezetés folytán kívülről befelé áramló hő fejt ki, mint a rostonsültben.



34. ábra. A tégelybe helyezett germánium zónasolvastása nagyfrekvenciás tekercsel. A tekercset lassan eltolják a tégely mentén



K. K.: Értem. Tehát, hogy visszatérjünk a germániumra, a tekercs lassan végighalad a tégely mentén...

O. I.: ... vagy esetleg a tégely mozog el lassan a rögzített helyzetű tekercs tengelyében, ugyanis a hatás mind a két esetben ugyanaz. A valóságban egymástól bizonyos távolságokban több tekercset helyeznek el, úgyhogy egyetlen menetben váltakozva több olvasztási zóna és dermedési zóna követi egymást a germániumban. Ezzel ugyanolyan eredményt érnek el, mintha egyetlen olvasztási zónát többször végigvándoroltattak volna a tégely mentén. Még azt is elárulom, hogy a mozgás nagyon lassú: percenként 1 milliméter.

K. K.: És a szilíciummal mit csinálnak?

O. I.: Az eljárás ugyanaz, csakhogy a hőmérséklet magasabb, mert a szilícium olvadáspontja $1420\text{ }^{\circ}\text{C}$ felett van, míg a germánium már $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on megolvad.

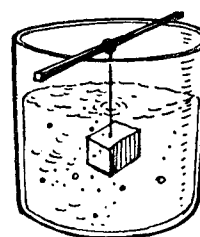


A tisztítást követő kristályosítás

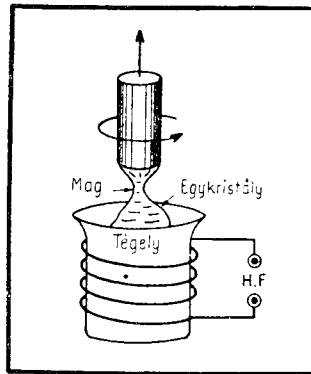
K. K.: Miért nem lehet az így megtisztított félvezetőt közvetlenül felhasználni a tranzistorban? Talán még nem kristályos szerkezetű?

O. I.: De igen, de nem úgy, ahogy mi szeretnénk. Rendetlenül elhelyezkedő kristályokból áll. Márpedig nekünk teljesen szabályos kristályrácsra van szükségünk, és ismernünk kell a kristály irányát. Ezt úgy érjük el, hogy egy kis kristálymagot létesítünk, és köréje egyetlen kristályból álló, úgynevezett *egyikristályt* növesztünk.

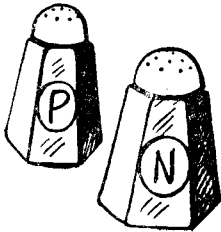
K. K.: Én is csináltam már így szép kristályokat magamnak, egy üveg-edénybe sóvizet öntöttem, felülről egy madzagot eresztettem a vízbe, és a madzag végére egy apró kis sókristályt ragasztottam. Körülbelül egy hét alatt szép, átlátszó sókocka képződött a madzag vége körül. Ugyanígy kristályosítják a félvezetőket is?



O. I.: Az elv ugyanaz, de az anyagot nem oldják fel, hanem csak megolvastják. A kristálymagot egy rúd alsó végére erősítik és bemelegítik az ömledékbe. A rúd forog a tengelye körül és ezzel egyidejűleg nagyon lassan emelkedik is. Ilyen módon a kristályrács szerkezetének megfelelően rendeződnek a germániumatomok (illetve szilíciumatomok) a mag körül. Az anyag körülvézi a magot és lassanként megdermed. Így néhány órán belül egy több centiméter átmérőjű, 20–30 cm hosszúságú és néhány kilogramm súlyú rudat kapnak. Ebből a rúdból ezer tranzisztor készül.



35. ábra. Egykristály növesztése húzással. A tégelyben levő félvezető anyagot a nagyfrekvenciás áram indukció útján olvasztja meg



K. K.: Ez az egykristály tehát egészen tiszta félvezető?

O. I.: Nem. Elfelejtettem még azt is megmondani, hogy ebbe az ömledékbe, amelyből az egykristályt húzzák, P vagy N típusú szennyezőanyagokat is adagolnak aszerint, hogy a bázist milyen típusúra akarják elkészíteni. Ugyanis a gyártás utolsó fázisaiban általában a bázis az, amely végig megőrizte az egykristály jellegét.

Most pedig egy kis mechanika következik

K. K.: Azt mondtad, hogy egyetlen egykristályból több ezer tranzisztor készül. Eszerint feldarabolják ezt a kristályt apró szeletekre?

O. I.: Természetesen. Először — mint a hentes a kolbászt — vékony szeletekre vágják. Egy-egy szelet vastagsága 0,1–2 mm. Ezt a pontos munkát gyémánthegyű körfűrészszel végzik el. „Szalagfűrész” is használnak, ez csiszolóanyaggal bevont wolframszálakból áll. Ezután minden egyes kis szeletet néhány milliméteres oldalméretű négyzetekre vágnak. Egy-egy ilyen lapocska alapmérete 2×2 mm, vastagsága 0,5 mm, súlya pedig mindössze egy század gramm. Erre persze azt mondhatnád, hogy az 5 kg-os egykristályból elméletileg egy fél millió lapocska is levágható. A valóságban meglehetősen sok a megmunkálási veszteség, és a selejt miatt is csökken a végeredményben felhasználható darabok száma.



A váltakozó mérgezések módszere

K. K.: Nem megvetendő mennyiség így sem, még ha a fele is elvész. De hogy lesz ezekből a bázisokból tranzisztor?

O. I.: Úgy, hogy a lapocska két oldalát „megmérgezik” a bázisanyaggal ellentétes típusú szennyezőanyagokkal. Így például amennyiben a bázis N típusú, mindkét lapján P típusú szennyezést visznek be, vagyis emitter és kollektor kialakításával $P-N-P$ tranzisztort kapnak.

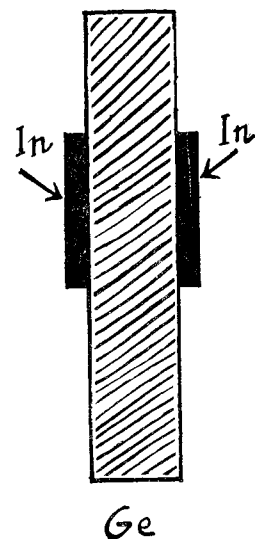
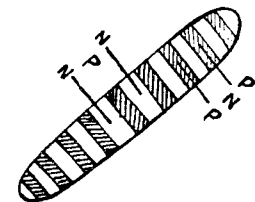
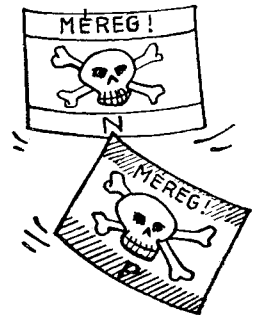
K. K.: Volna egy jobb ötletem. Miért nem lehet mindjárt az egykristály húzásakor teljesen kész tranzisztorokat készíteni? A kristályhúzás kezdetén például P típusú szennyezést, mondjuk indiumot dobunk a megömlesztett félvezetőbe. Miután így kialakítanám és kihúznám az ömledékből a P zónát, N típusú szennyezőanyagot, például arzént adagolnék. Megkapnám az N zónát. Ezt követően annyi indiumot adagolnék, hogy az akceptorokból többségi töltéshordozók legyenek, aminek következtében egy újabb P zóna alakulna ki, és ezt így folytatnám. Végeredményben olyan germánium rudat kapnék, amely váltakozva P és N zónákból tevődik össze. Ha $P-N-P$ tranzisztorokra volna szükség, nem kellene mást tenni, mint a P zónák közepén felszeletelni a rudat, ha pedig $N-P-N$ tranzisztort akarunk, az N zónák közepén lehetne elvégezni a szeletelést. Ugye milyen zseniális az ötletem?

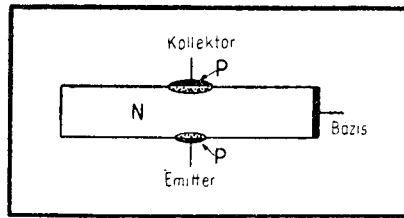
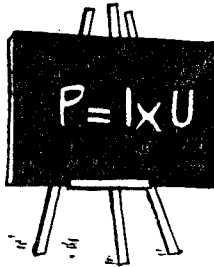
O. I.: Igazán csodálom a szerénységedet. Sajnos, elkéstél ezzel az ötlettel, az így előállított kristályokat *húzott átmeneteknek* nevezik. A módszer nem gazdaságos, mert a zónák túlságosan vastagok lesznek. Ezenkívül azért, hogy minden egyes alkalommal beadagoljunk hol ilyen, hol meg olyan szennyezőanyagot, fokozatosan megnöveljük az egymás után kialakított zónákban levő idegen anyagok mennyiségét, aminek hátrányos következményei is vannak. Egyébként ezt az eljárást ennek ellenére még ma is alkalmazzák, főképpen a szilíciumra.

K. K.: Tehát megint csak megállapíthatom, hogy túlságosan későn születtem... Na de térjünk vissza a kis pasztilláinkra, és magyarázd meg nekem, hogyan alakítják ki rajtuk az emittert és a kollektort.

Ötvözött tranzisztorok

O. I.: Erre a célra a gyártandó tranzisztorok típusától függően különböző módszereket alkalmaznak. Mindig az a helyzet, hogy a bázis anyagát „megmérgezik” a másik típusú anyagok egyikével, vagyis vele ellentétes típusú szennyezőatomokat visznek be az anyagba. A legegyszerűbb és a leggyakrabban alkalmazott eljárás szerint az N típusú bázis két oldalán egy-egy indium pasztillát helyeznek el, majd az egészet körülbelül $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra felmelegítik. Ezen a hőmérsékleten az indium megolvad, és az indiumatomok behatolnak a germániumba. Az utóbbi csak $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on olvadna meg, de a fokozódó hőmozgás következményeként most már lehetővé teszi a szennyezőatomok behatolását. Ilyen módon $P-N-P$ tranzisztor alakul ki. Figyeld meg (36. ábra), a kollektort kialakító pasztilla nagyobb, mint az, amelyből az emitter lesz, mert — amint már említettem — a kollektor nagyobb teljesítményt vesz fel. Ha a művelet során a melegítés üteme és időtartama megfelelő, a szennyezőanyagok





36. ábra. Az ötvözött P—
—N—P tranzisztor met-
szeti rajza

behatolása közben egyhuzad milliméterre csökken a bázis vastagsága. Az ilyen módon, vagyis *ötvözettel* (beolvasztással) kapott tranzisztorok majdnem minden célra megfelelnek, de a nagyobb frekvenciájú áramkörökben nem használhatók.

K. K. : Már előzőleg is mondtad, hogy a nagyobb teljesítmények és a nagyobb frekvenciák nehézségeket okoznak a félvezetőkben. Volnál szíves ezt nekem kissé részletesebben is megmagyarázni?

Gőzfürdő és diffúzió



O. I. : Kezdjük talán a teljesítménnyel. A watt kalóriát termel. Ha a félvezetőkre kapcsolt kisértékű feszültségeken elegendő teljesítményt akarunk elérni, nagy erősségű áramokra van szükségünk.

K. K. : Ezt tudom ; a teljesítmény a feszültség és az áramerősség szorzata.

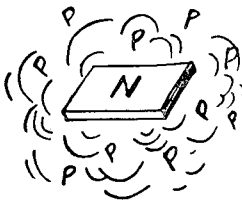
O. I. : Helyes. Csakhogy ezek az áramok hőt fejlesztenek az átmenetekben, amikor keresztülfolyanak rajtuk. Azt azonban tudod, hogy a félvezetők nem bírják a magasabb hőmérsékletet.

K. K. : Mit tehetünk tehát?

O. I. : Mindenekelőtt meg kell növelni a félvezető keresztmetszetét, vagyis viszonylag nagy felületű tranzisztorokra van szükség, hogy kisebb legyen az ellenállásuk. Ezenkívül a hőelvezetés megkönnyítésére egy nagy fémlemezre szerelik a kollektort, úgyhogy ez a lemez szétsugározza a hőt. Rendszerint rézlemez alkalmaznak, mert a réz kitűnő hővezető.

K. K. : Tehát a tranzisztorok ésszerű felhasználásához ismerni kell a termodinamika törvényeit is. Úgy látom, még ezt a tudományt is meg kell tanulnom. Szegény fejem !

O. I. : Ne félj, a hőterjedés számításában ugyanazokat a szabályokat alkalmazhatjuk, mint amelyek alapján a vezetékekben folyó villamos áramokat számítjuk, az eredmények így is egészen helytállóak. De hogy visszatérjünk a nagy teljesítményű tranzisztorokra, elárulom, hogy ezeket sokszor *diffúziós* eljárással készítik. A félvezető pasztillákat olyan gázközegbe helyezik, amely az emitter és a kollektor kialakításához szükséges szennyezések gőzét tartalmazza, majd annyira felmelegítik, hogy hőmérsékletük megközelíti az anyag olvadáspontját. A szennyezőatomok fokozatosan behatolnak a félvezetőbe. A művelet több órát igényel. A gázban levő szennyezőanyag mennyiségének megfelelő adagolásával és a diffúzió időtartamának kellő szabályozásával pontosan meghatározható az idegen atomok behatolásának mélysége, vagyis a



bázis vastagsága. Ez az eljárás ezenkívül nagyon alkalmas a teljesítmény-tranzisztorokban szükséges nagyfelületű emitter és kollektor előállítására.

K. K.: Ez így rendben volna. De mi akadályozza a tranzisztorok működését a nagyobb frekvenciákon?

A két akadály

O. I.: Két dolog: az átfutási idő és a kapacitás.

K. K.: Miféle átfutásról beszélsz?

O. I.: A töltéshordozóknak keresztül kell haladniuk a bázison, hogy az emitterből a kollektorba jussanak. Az ehhez szükséges idő nem hanyagolható el, ugyanis amint már említettem, az elektronok és a lyukak meglehetősen lassan mozognak. Gondoljunk csak az elektronokra, amelyek másodpercenként 40 métert tesznek meg. Képzeldük el, hogy a bázis vastagságát 1/10 milliméterre sikerült lecsökkenteni. Ennek átfutásához az elektronnak 2,5 milliomod másodpercre van szüksége.

K. K.: Na hát ez igazán nem olyan hosszú idő.

O. I.: De ha a jel frekvenciája 1 megahertz (amint tudod, 1 MHz = 1 000 000 Hz), bizony elég hosszú, mert ilyenkor egy-egy periódus mindössze egy milliomod másodpercig tart, tehát amíg nehézkes elektronunk kényelmesen átsétálna a bázison, több mint kétszer változik meg az áramirány. Ezért van az, hogy a tranzisztorral legfeljebb néhány száz kilohertz frekvenciájú áramokat lehet felerősíteni.

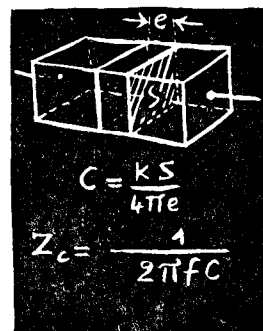
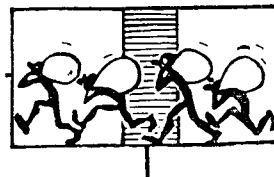
K. K.: Milyen tragédia! Itt csak egy kiutat látok: csökkenteni kell a bázis vastagságát. Van valami akadály ennek?

O. I.: Nincs, és majd meg is mondom, hogyan érhető el. Ekkor azonban előtérbe kerül a másik veszélyes tényező: az emitter és a kollektor közötti kapacitás. Minél vékonyabb a bázis, annál nagyobb ez a kapacitás.

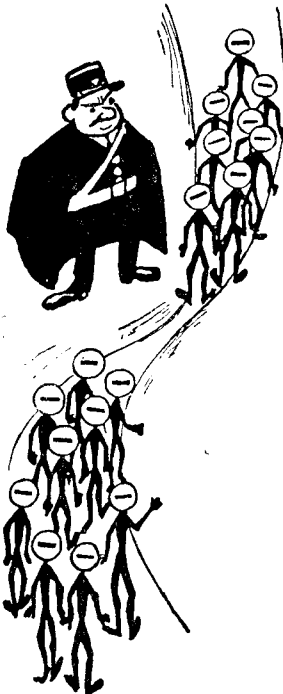
K. K.: És miért zavar ez bennünket?

O. I.: Hát nem emlékszel már, mennyi zavart okoznak az elektroncsöves kapcsolásokban a szórt kapacitások? Itt is ugyanaz a helyzet. A kapacitás egy kapacitív reaktanciát (kapacitív ellenállást) jelent az áram útjában, viszont ez az ellenállás annál kisebb, mennél nagyobb az áram frekvenciája. Ezért a nagyfrekvenciás áramok nem követik a részükre kijelölt utakat, hanem ehelyett a szórt kapacitásokon folynak keresztül.

K. K.: Valóban, ezek a kapacitások olyanok, mint a kis lyukak a zsákon. Diót még csak tarthatunk ilyen zsákban, de a kis mogyoró már kigurulna belőle. Hogyan segíthetünk a bajon? Ha az átfutási idő csökkentésére vékony bázist alkalmazunk, megnő az emitter és a kollektor közötti kapacitás. Fontos viszont, hogy ez a kapacitás minél kisebb legyen.

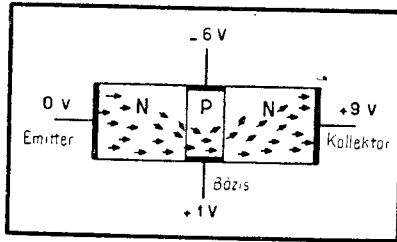


Egy tetróda, amelyet tulajdonképpen nem volna szabad tetródának nevezni



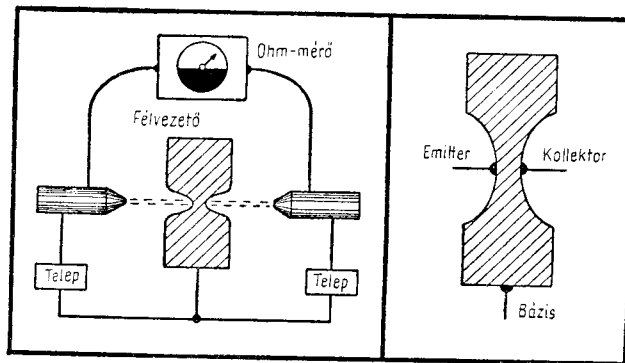
O. I.: Próbáljuk meg, hátha magad is rájössz a megoldásra. Gondolkozz csak, a lemezek közötti távolságon kívül még mitől függ a kondenzátor kapacitása?

K. K.: Megvan! Csökkenteni kell a kondenzátorlemezek felületét. Ha tehát olyan tranzisztort akarunk, amely a nagyobb frekvenciákon is működjék, sokkal kisebb felületű emittort és kollektort kell kialakítanunk.



37. ábra. A tranzisztor-tetróda elve. A báziskivezetéssel ellentétes oldalon levő elektróda -6 V -os potenciálja tisztítóhatást fejt ki az elektronokra és ezáltal csökkenti a bázis effektív keresztmetszetét

O. I.: Ez az! Egyébként azonban a hatásos kapacitást közvetve is csökkenthetjük, anélkül hogy túlságosan kicsire vennők az átmenetek felületét (amivel lényegesen korlátozódna a megengedhető veszteségi teljesítmény). Ez a helyzet a *tranzisztor-tetródákban*. Meg kell mondanom, hogy működése szempontjából ennek a tetródának semmi köze a közösleges tetródákhoz. A negyedik elektródát a bázisra helyezik, a normális báziskivezetéssel ellentétes oldalon,



38. ábra. A felületi záróréteges tranzisztor gyártási módja és keresztmetszeti rajza

és olyan potenciálra kapcsolják, amely ellentétes előjelű a báziskivezetésre kapcsolt potenciállal az emitter potenciáljához viszonyítva. Ilyen körülmények között a bázisnak csak az a része engedi át potenciáljánál fogva a töltéshordozókat, amely szomszédos a normális kivezetéssel, tehát ennek az eljárásnak eredményeként lényegesen csökken a tranzisztor effektív keresztmetszete.

A bázis vékonyítása

K. K.: Nem rossz gondolat így összeszűkíteni az elektronok, illetve a lyukak áramlását. De hogyan tudják a „klasszikus” tranzisztorokban csökkenteni a bázis vastagságát?

O. I.: Egy-egy krátterszerű bemélyedést vájnak ki a bázis két oldalán. A két kráterfenék körülbelül 0,002 mm-re közelíti meg egymást. Ezután a két bemélyedésbe egy kevés indiumot tesznek, és a dolog ezzel el van intézve.

K. K.: Úgy beszélsz, mintha mindez nagyon egyszerű volna. Nem hiszem, hogy olyan könnyű volna előteremteni a szükséges pontosságú szerszámokat.

O. I.: Ezek a szerszámok egészen vékony folyadéksugarak, amelyekkel egyen-áramot vezetnek át a germániumon. Így elektrolízis útján atomonként lehet vékonyítani a félvezetőt. A művelet befejezése után megváltoztatják az áram irányát, úgyhogy az elektrolízissel most lecsapatják az indiumatomokat az előbb létesített kráterekben.

K. K.: Csodálatos! De honnan tudják olyan pontosan, hogy mikor lesz már elég vékony a bázis?

O. I.: Méri a két folyadéksugár közötti villamos ellenállást. Az így előállított tranzisztorok 100 MHz-ig használhatók (ami hullámhosszban $\lambda = 3$ méternek felel meg). Felületi záróréteges tranzisztoroknak nevezik őket.

K. K.: De ez a záróréteg természetesen nem a nagyobb frekvenciájú áramok útját zárja el.

O. I.: A bázis vastagságának csökkentésére egy másik módszer a *kettős diffúzió*. *P-N-P* típusú tranzisztor előállításához egy *P* típusú félvezető lapocskát vesznek...

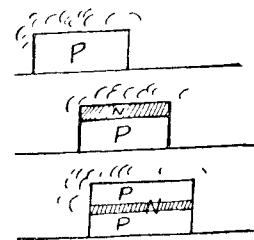
K. K.: Nem tévedsz?

O. I.: Egyáltalán nem. Mindjárt meglátod, mi történik. A lapocskának csak az egyik oldalát helyezik a gőzfürdőbe. Ez a gőz egyidejűleg mindkét típusú szennyezést tartalmazza, de a donatoromok valamivel gyorsabban hatolnak be az alapanyagba, mint az akceptorok, az utóbbiakból viszont több van. Ennek eredményeképpen a *P* réteg előtt egy vékony *N* réteg alakul ki. Így tehát olyan *P-N-P* tranzisztorunk kapunk, amelynek bázisa mindössze egy ezred milliméter vastagságú, tehát amelyet 400 MHz frekvenciáig, vagyis $\lambda = 75$ cm hullámhosszig lehet használni.

K. K.: Ez valóban szellemes eljárás.

O. I.: Nem kevésbé szellemes az *N-P-N* típusú úgynevezett drifttranzisztor sem, amelynek bázisa az emitterhez legközelebb levő rétegben nagyobb mennyiségű szennyezőatomokat (ebben az esetben akceptorokat) tartalmaz, úgyhogy itt megnő a vezetőképesség. Ilyen módon a bázisba behatoló elektronok abban lényegesen felgyorsulnak, aminek következtében 1000 MHz-re (vagyis $\lambda = 30$ cm-re) tolódik ki a frekvenciahatár (illetve a hullámhossz-határ).

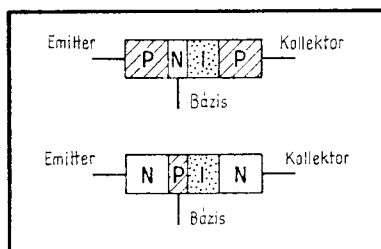
K. K.: Ez egyre szebb lesz. De még tovább menve okoskodásainkban, nem lehetne az emitter és a kollektor közötti kapacitás csökkentése végett távolabb vinni egymástól ezt a két elektródát, ugyanakkor azonban valahogyan megakadályozni a bázis vastagságának megnövekedését?



Hátrább a bázissal !

O. I. : Mit ajánlanál ennek elérésére?

K. K. : Betennék a bázis és a kollektor közé egy semleges germánium réteget, amely nem volna sem *P*, sem *N* típusú, és amely csupán azért volna ott, hogy a töltéshordozók átvezetésén kívül egyúttal megnövelje a távolságot.

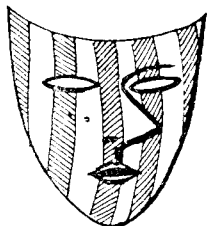


39. ábra. A bázis és kollektor között sajátvezetési réteget tartalmazó tranzisztorok két lehetséges típusa: a *P-N-I-P* és az *N-P-I-N* tranzisztor

O. I. : Egyáltalán nem rossz elgondolás. Van is már ilyen tranzisztor, az úgynevezett *P-N-I-P* típusú, amelynek elnevezésében az *I* betű a tiszta, szennyezésmentes (idegen szóval intrinszikus) germánium réteget jelenti.

K. K. : De bosszantó, hogy már megint megelőztek !

Meredek oldalú fensíkok a tranzisztorban

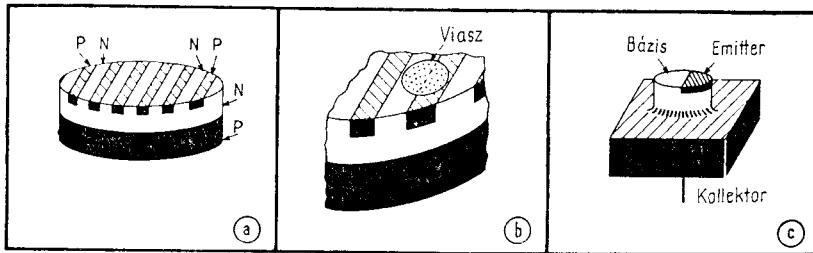


O. I. : Ne búsulj, megtörtént már ez másokkal is ... De hogy befejezzük a dolgot, megemlítek még egy kétszeres diffúzióval készített nagyfrekvenciás tranzisztor. Egy *P* típusú felvezetéből indulnak ki, ez lesz a kollektor, és ebbe vékony rétegben *N* típusú szennyezőatomokat diffundálnak, hogy megkapják a bázist. Most ugyanezen az oldalon diffúzió útján *P* típusú szennyezést visznek be, amivel körülbelül 0,002 mm-re csökkentik a bázis vastagságát és kialakítják az emittert. A ravaszság abból áll, hogy ez az utóbbi diffúzió egy maszkon keresztül történik, úgyhogy a lapocska felülete mentén csak keskeny sávokban alakulnak ki diffúziós rétegek. A lapocskán tehát váltakozva *P* típusú (emitter-) és *N* típusú (bázis-) sávok lesznek. Ezután viaszcseppeket visznek fel erre a felületre úgy, hogy egy-egy ilyen viaszcsepp egyidejűleg *P* és *N* típusú felületrészt is eltakarjon. A cseppek átmérője nem nagyobb egy-negyed milliméternél. A lapocskát bemártják egy maró oldatba, amely megtámadja a viasszal nem védett felületrészeket. Ilyen módon a viaszal védett felületek sértetlenek maradnak, máshol viszont csökken a vastagság, és a viasz eltávolítása után a felületből kis hegyecskek állnak ki, ami lehetővé teszi a bázis és az emitter kivezetését. A kivezetőhuzalok 0,025 mm vastagságú aranyszálak.

K. K. : Hogyan lehet dolgozni ilyen vékony szálakkal?

O. I. : Binokuláris mikroszkóp alá helyezik a munkadarabokat. A lapocskát előzőleg természetesen feldarabolják annyi részre, ahány kis hegyecske emelkedik ki a felületből, és minden ilyen részből egy-egy tranzisztor lesz. Ezeket mesa-tranzisztoroknak nevezik; a „mesa” szó Dél-Amerikában meredek oldalú





40. ábra. A mesa-tranzisztor gyártásának egyes fázisai

kis fennsíkokat jelent, innen van az elnevezés. A mesa-tranzisztorok a 100 MHz-es frekvenciákon túl, tehát a 3 m-esnél rövidebb hullámokon is használhatók.

K. K.: Milyen nagy gondosságot, milyen aprólékosságot igényelhet ezeknek a mikroszkopikus hegycskéknek az előállítását!

A gyártás utolsó fázisai

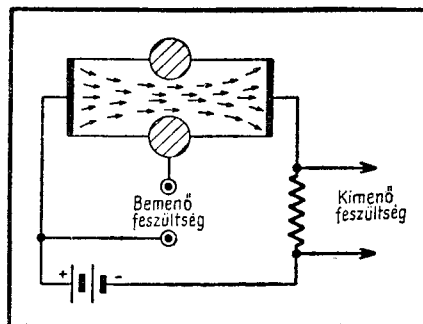
O. I.: Ne hidd, hogy amikor ötvözéssel, elektrolízissel vagy diffúzióval már kialakították az emittert, a bázist és a kollektort, ezzel a munka be is fejeződött. Mellékesen szólva megfigyelheted, hogy ez a három eljárás szilárd, folyékony, illetve gáz alakú anyagokra vonatkozik.

K. K.: Mit kell még tenni ahhoz, hogy a tranzisztor teljesen elkészüljön és megkezdhesse viszontagságos életét?

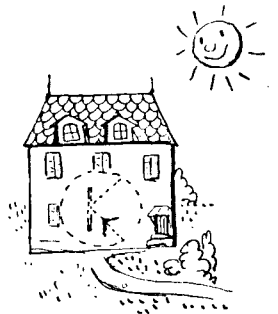
O. I.: Savas folyadékkal le kell mosni a felületét, majd hosszú élettartamának biztosítására szilárdan össze kell szerelni, hogy ellenálljon az ütéseknek és a rázásnak. Ezután be kell helyezni egy légmentesen lezárható, átlátszatlan burába, hogy védve legyen a félvezetők halálos ellensége, a nedvesség és a fény ellen.

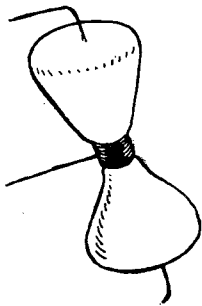
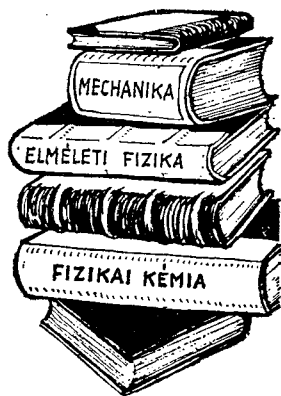
K. K.: Ugyan miért?

O. I.: Mert — amint egyébként már említettem neked — a fénysugarak megváltoztathatják a félvezetők vezetőképességét vagy elektronemissziót indíthatnak meg. Ezeket a jelenségeket a fotodiódákban és a fototranzisztorok-



41. ábra. Térhatású tranzisztor





ban hasznosítják. A közönséges tranzisztorokat óvni kell a fénytől. Ezért műanyag burkolatba helyezik őket vagy pedig fémburát alkalmaznak, és a fémbura alatt vákuumot létesítenek vagy valamilyen semleges gázt, például nitrogént vezetnek be. A kivezetések szintén nehézségeket okozhatnak, mert a tranzisztor három rétege és a kivezetések között tiszta ohmos érintkezésre van szükség, a káros átmeneti rétegeket feltétlenül kerülni kell.

K. K.: Látom már, hogy a tranzisztorok gyártásához fizikai, kémiai és gépészeti ismeretek is szükségesek. Ez túlságosan sok nekem, akkor már inkább kész tranzisztorokat veszek magamnak. Csakhogy...

Az erőterek hatása

O. I.: Mi jutott már megint az eszedbe?

K. K.: Arra gondolok, hogy bázis, emitter és kollektor nélküli tranzisztorokat is lehetne készíteni. Egy egyszerű germánium vagy szilícium pálcikát vehetnénk, és ezt középen egy gyűrűvel lehetne körülvenni. A felerősítendő feszültséget a gyűrűre kellene vezetni. Az így előállított villamos tér többé-kevésbé összeszűkítené a pálcika két vége között áramló töltéshordozók útját. Ezáltal az áramot ugyanúgy lehetne modulálni, mint a vákuumtriódákban a rácásra kapcsolt vezérlőfeszültséggel.

O. I.: Szegény barátom!

K. K.: Mi nem jó az okoskodásomban?

O. I.: Nagyon is igazad van mindenben, és annyira jól okoskodtál, hogy ez a tranzisztor, amelyet most akartál feltalálni, már régóta megvan. *Térhatású* tranzisztornak vagy fildisztoroknak nevezik. Hasonló az *S. Teszner* francia mérnök által feltalált *tecnatron* is, amely egyetlen alkatrészben egyesíti a tranzisztorok és az elektroncsövek minden előnyét. Csakhogy ezek az alkatrészek már aligha tartoznak a tranzisztorok közé.

Hatodik beszélgetés

A félvezető triódák felhasználásához ismernünk kell lényegesebb jellemző értékeiket. Ezeket a jellemzőket — mint az elektroncsövek esetében is — a főparaméterek számszerű értékével, vagy pedig bizonyos változó mennyiségek összefüggését ábrázoló görbékkel lehet kifejezni. A tranzisztorok esetében egy-egy változó mennyiség megváltozása maga után vonja majdnem minden más változó változását, ezért különösen értékesnek bizonyul a jellemzők grafikus ábrázolása.

Mindennek figyelembevételével két barátunk most igen hasznos munkába kezd: megismerkedünk a tranzisztorok különböző numerikus és grafikus jellemzőivel.

Összefoglalás: A jelleggörbék felvételéhez szükséges kapcsolás összeállítása. — Az $I_b = f(U_b)$ és az $I_k = f(U_b)$ jelleggörbe. — Meredekség. — Áramerősítés. — Bemelő ellenállás. — A meredekség, a belső ellenállás és az áramerősítés közötti összefüggés. — Telítés. — Jelleggörbeseregélyek. — A pentódára emlékeztető tulajdonságok. — Határteljesítmény. — Kimenő ellenállás. — A paraméterek meghatározása a jelleggörbék alapján.

A diagramok világa

Kezdeményező lépések

O. I.: Mi történt itt, mit csináltál? Mi ez a nagy rendetlenség itt az asztalodon ezekkel a mérőműszerekkel, száraztelepekkel és potencióméterekkel?

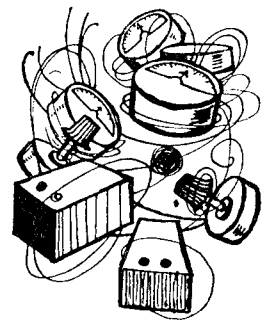
K. K.: Persze, a lényegét nem veszed észre. Érthető is, hiszen a voltmérőim és a milliampermérőim között egészen eltűnik a kis tranzisztor. Pedig éppen ezért van az egész felfordulás.

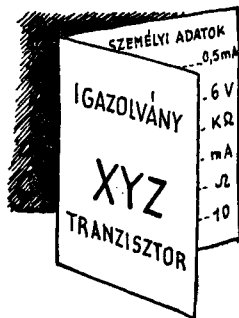
O. I.: Tulajdonképpen miért szedted elő ezt a sok műszert?

K. K.: Emlékszel még, annak idején segítettél nekem felvenni az elektroncsövek jelleggörbéit, az anódáram változását a rácsheszültség vagy az anód-heszültség függvényében? Most szeretnék ilyen méréseket végezni a tranzisztoromon is.

O. I.: Nagyon dicsérendő kezdeményezés. És sikerült már valamit elérned?

K. K.: Igen is és nem is. Ne csodálkozz a válaszon, nem akartam ezzel semmi különösét mondani. Ami megzavar, az, hogy az elektroncsövek esetében csak három mennyiséget kellett figyelembe vennünk, míg itt négy mennyiségről van szó:





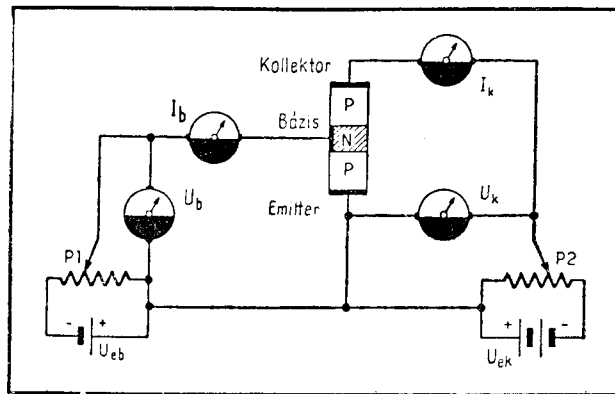
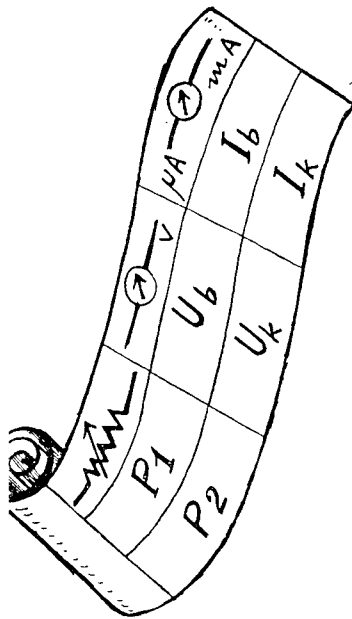
I_a anódáram,
az anód és katód közötti
 U_a anódfeszültség,
a rác és a katód közötti
 U_r rácfszfültség

I_k kollektoráram,
a kollektor és az emitter közötti
 U_k kollektorfszfültség,
a bázis és emitter közötti
 U_b bázisfszfültség,
 I_b bázisáram.

O. I.: Igen, ez valóban így van. Az elektroncsövek általában rácáram nélkül működnek, csak kivételes esetekben folyik áram a rácskörben. A tranzisztorokkal más a helyzet, ezeknek működésében jelentős szerepet játszik a bázisáram.

Egy ügyes kapcsolási rajz

K. K.: Itt van a kapcsolási rajzom, így akartam mérni a négy mennyiséget.



42. ábra. A tranzisztor jelleggörbéinek felvétele



O. I.: Amint látom, a P_1 potenciométerrel akarod tetszés szerint változtatni a bázis és az emitter közötti feszültséget, amelynek értékét az U_b voltmérővel mérnéd. Itt van még egy potenciométer, P_2 , a kollektor és az emitter közötti feszültség előállítására; ezt a feszültséget az U_k voltmérővel mérheted. A bázisáram mérésére beiktattad az I_b mikroampermérőt, a kollektoráram értékét viszont az I_k milliampermérőről olvashatod le. Gratulálok, öregem, ezzel a kapcsolással ügyesen mérhetsz. Nem értem, mi az, ami itt megzavart.

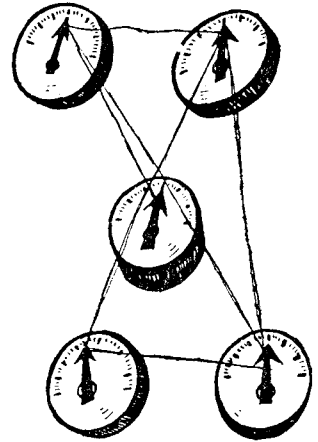
K. K.: Az a benyomásom, hogy ugyanúgy jártam, mint a mi derék szakácsnőnk, akit egyszer gyerekkoromban olyan jól megtréfáltam.

O. I.: Mi köze lehet éretlen csínytevésid áldozatának a félvezetőkhez?

K. K.: Egy este összekötöttem egy egészen vékony huzallal a polcon levő edényeket, úgyhogy amikor a jóasszony le akarta venni az egyiket, az egész a fejére esett.

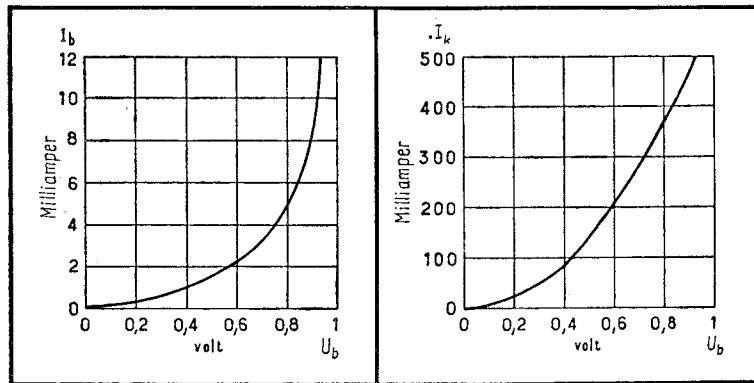
O. I.: Ez is a nagy fantáziádra vall, bár jóérzetedet nem dicséri. De még mindig nem látom be

K. K.: Pedig világos. Az az érzésem, hogy műszereimen a mutatók mind össze vannak kötve láthatatlan szálakkal, mint azok az edények voltak a konyhában. Ha az egyik kissé elmozdul, rögtön mozgásba jön még kettő. Ha például elforgatom a P_1 potenciométer gombját, hogy megváltoztassam az U_b bázisfeszültséget, ugyanakkor megváltozik az I_b bázisáram és az I_k kollektoráram is.



Két jelleggörbe

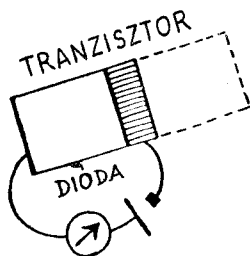
O. I.: És ez nincsen rendben szerinted? Hiszen ezzel csak igazoltad a tranzisztorok működési elvét! Ha a bázis és az emitter közé növekvő feszültséget kapcsolsz, megnöveked az emitterből a bázis felé folyó áram erősségét, aminek következtében megnő az az áram is, amely az emitterből a bázison keresztül a kollektorba folyik.



43. ábra. Az I_b bázisáram változása a bázis és emitter közötti U_b feszültség változtatásakor. Ezen az ábrán és általában a jelleggörbék ábráin a bázis és a kollektor feszültségének előjelét nem tüntettük fel. Ezek a feszültségek az $N-P-N$ tranzisztorokon pozitív, a $P-N-P$ tranzisztorokon negatív előjelűek

44. ábra. Az I_k kollektoráram változása a bázis és emitter közötti U_b feszültség változtatásakor. (Ezt a két görbét közepes teljesítményű tranzisztoron vettük fel úgy, hogy a kollektorfeszültséget állandó értéken tartottuk)

K. K.: Értem. Ugyanígy befolyásolja az elektroncsőben a rács az anódáramot. Egyébként ezt a két görbét vettem fel, amikor a P_1 potenciométer változtatása közben az U_b feszültség minden egyes értékéhez feljegyeztem egyrészt az I_b , másrészt pedig az I_k áramerősséget.



O. I.: Nagyon jó munkát végeztél. Úgy látom, egy közepes teljesítményű tranzisztorról van szó, ugyanis a kollektoráram itt tekintélyes értéket, 0,5 ampert ér el. Az első görbével ábrázolt jelenségek mind az emitter és a bázis között játszódnak le, és erről a görbéről leolvasható, hogyan függ a bázisáram a bázis és az emitter közötti potenciáltól. Egyébként ez a görbe tulajdonképpen nem más, mint az emitterből és bázisból álló dióda jelleggörbéje.

K. K.: Az ám! Az áram először lassan, majd egyre rohamosabban növekszik. Belátom, ez a görbe nem sokat mond, a másik azonban, amelyből kitűnik, hogyan változik a kollektoráram a bázisfeszültséggel, rendkívül fontos lehet.

Meredek emelkedő

O. I.: Azért nem kell úgy eltúlozni a dolgokat. Ez a második görbe tényleg nagyon tanulságos, amennyiben elárulja, hogy a tranzisztor meredeksége egyáltalán nem állandó, hanem a bázisfeszültség szerint változik.

K. K.: Hogyan, hát a tranzisztornak is van meredeksége? Az elektroncsövek esetében ez a mennyiség megmondja, hogyan aránylik az anódáram változása ahhoz a kis változáshoz, amely a rácshfeszültségben ezt az áramváltást előidézte.

O. I.: Ám legyen, analógia alapján azt mondhatjuk, hogy a meredekség ΔI_k és ΔU_b aránya, ha ΔI_k -val jelöljük a kollektoráram változását, U_b pedig a bázisfeszültségnek az a változása, amely ilyen áramváltozást idéz elő, miközben a kollektorfeszültség állandó értékű marad. Ha a meredekséget S betűvel jelöljük, meghatározásunk szerint

$$S = \frac{\Delta I_k}{\Delta U_b}$$

és ennek értékét, akárcsak az elektroncsövek esetében, mA/V-ban fejezzük ki.

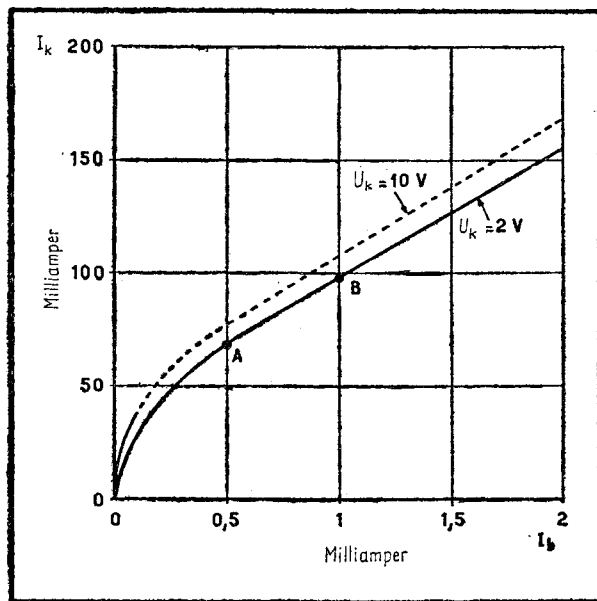
K. K.: Valóban, a bázisfeszültség növelése közben növekszik a tranzisztorunk meredeksége. 0,2 és 0,4 között az áram növekedése mindössze 50 mA, amikor azonban a bázisfeszültséget 0,6 V-ról 0,8 V-ra növeltem, a kollektoráram körülbelül 180 mA-rel nőtt meg. Ezek szerint a meredekség az első esetben $50 : (0,4 - 0,2) = 250$ mA/V, a második esetben viszont $180 : (0,8 - 0,6) = 900$ mA/V. Hát ez csodálatos! Csővel sosem lehet elérni ilyen nagy meredekséget.

O. I.: Nehogy azonban ebből elhamarkodva arra következtess, hogy a tranzisztor erősítése is ilyen csodálatosan nagy. A meredekségnek itt nincs olyan döntő szerepe, mert végső fokon csak az számít, hogy a bázisáram változása hogyan befolyásolja a kollektoráram változását.

Vigyázat! Teljesítménykorlátozás!

K. K.: Ezt is megállapítottam úgy, hogy az U_k kollektorfeszültséget először 2 V-ra, majd 10 V-ra állítottam, majd mind a két esetben az I_b bázisáram függvényében felvettem az I_k kollektoráram görbéjét.





45. ábra. Az I_k kollektoráram változása az I_b bázisáram változtatásakor. A két görbe két különböző U_k kollektor feszültségre vonatkozik



O. I.: És az utóbbi, $U_k = 10\text{ V}$ feszültségre vonatkozó görbének egy részét miért szaggatott vonallal rajzoltad meg?

K. K.: Mert azt csak érzésből húztam meg. Nem mertem a kollektoráramot 35 mA-nél nagyobb értékre növelni, mert az én tranzisztorom csak 350 mW-ig használható (a gyár nagyon határozottan figyelmeztet erre). Ha a 35 mA-t 10 V-tal megszorozzuk, éppen ezt a határértéket kapjuk. Nem akartam túllépni, nehogy a lyukak és az elektronok lavinaszerű szaporodásával „megszaladjon” a tranzisztorom, és ezzel tönkretegyem azt, amit megtakarított pénzemem végre megvásárolhattam.

O. I.: Nagyon okosan jártál el, gratulálok bölcsességedhez. Figyeld csak meg, ezek a görbék, amelyek I_b függvényében I_k változását adják meg, többnyire egy egyenesbe mennek át. Egyébként egy ilyen görbét már a 24. ábrán is láhattunk.

K. K.: Valóban. Arra is emlékszem, hogy ezeknek a görbéknek az alapján meghatározhatjuk a β áramerősítési tényezőt, amely megadja, hányszor nagyobb a kollektoráram változása a bázisáram változásánál.

O. I.: Meg tudnád ezt határozni például az $U_k = 2\text{ V}$ kollektorfeszültségre vonatkozó görbe alapján is?

K. K.: Nagyon könnyen. Amikor a bázisáramot például 0,5 mA-ról 1 mA-re növeljük (az A pontból a B pontba visszük át), a kollektoráram 70 mA-ról 97,5 mA-re növekszik. Ezek szerint a bázisáram 0,5 mA-es változása 27,5 mA-es változást idéz elő a kollektoráramban, tehát az áramerősítés $\beta = 27,5 : 0,5 = 55$ -szörös.

O. I.: Helyes. Általában azt mondhatjuk, hogy

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b},$$

ahol ΔI_k és ΔI_b a kollektoráram, illetve a bázisáram megfelelő változása.

Egy ellenállás, amely eddig még hiányzott



K. K.: Várj csak egy pillanatra! Ezekkel az áram- és feszültségváltozásokkal kapcsolatban valami eszembe jutott, mint valami régi fiatalkori emlék. A meredekség és az erősítési tényező mellől még hiányzik a belső ellenállás... Ha ezt még pótoljuk, megkapjuk ugyanazokat az alapparamétereket, amelyekkel az elektroncsöveket jellemezzük.

O. I.: Csak ne olyan hevesen. Már megint elhamarkodva ilyen hasonlóságokból akarsz kiindulni. Az elektroncsövek erősítési tényezője két feszültség aránya, a tranzisztorok esetében viszont két áram hányadosáról van szó. Ugyanígy, amikor a csövek belső ellenállásáról beszélünk, a *kimenő ellenállásra* gondolunk. A tranzisztorokkal kapcsolatban már alkalmunk volt megismerni a bemenő ellenállásokkal, vagyis az emitter és a bázis közötti ellenállással. Mint minden ellenállás, ez is egy feszültségnek és egy áramnak a hányadosa, ahogyan annak idején már Ohm fizikus megállapította.

K. K.: Tehát — hogy én is olyan szabatosan fejezzem ki magam, mint te — a tranzisztor bemenő ellenállása a bázisfeszültség kismértékű változásának és az ezzel előidézett kismértékű bázisáram-változásnak a hányadosa. És ha a kismértékű változásokat továbbra is ezekkel a „deltákkal” akarjuk jelölni, felírhatjuk, hogy ez a bemenő ellenállás

$$r_{be} = \frac{\Delta U_b}{\Delta I_b},$$



amennyiben a kollektorfeszültség állandó marad.

O. I.: Mondd csak, lenyeinél egy hatalmas halat, hogy friss foszforral töltsd meg koponyádat? Vagy anélkül is meg tudnád mondani valamelyik jelleggörbe alapján, mekkora a tranzisztorod bemenő ellenállása?

K. K.: Mi sem könnyebb ennél. Előveszem ezt a görbét, amely U_b függvényében megadja az I_b áram változásait (43. ábra), és ebből a görbéből rögtön megállapíthatom, hogy 0,5 V-ról 0,6 V-ra növelve a feszültséget az áram körülbelül 1 mA-t változik. Ha tehát elosztom 0,1-et 1-gyel, r_{be} értékére 0,1 ohmot kapok.

O. I.: Nem szégyelled magad? Felnőtt fiatalember létedre összetévesztet a milliamperet az amperekkel?

K. K.: Ezer bocsánat! A 0,1 V-ot 0,001 A-rel kell osztanom, tehát az eredmény: $r_{be} = 100$ ohm.

Egy igen hasznos összefüggés

O. I.: Így már mindjárt más. És hogy megbüntesselek az előbbi csúnya tévedésedért, feladok neked egy kis számolástechnikai leckét: az előbbi meghatározások figyelembevételével szorozd meg a meredekséget a bemenő ellenállással.

K. K.: A feladat egyszerű:

$$S \cdot r_{be} = \frac{\Delta I_k}{\Delta U_b} \cdot \frac{\Delta U_b}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} = \beta$$

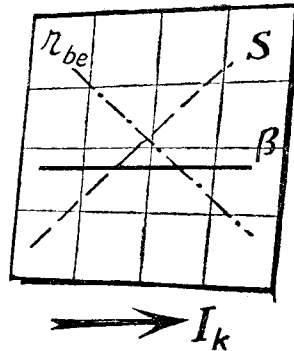
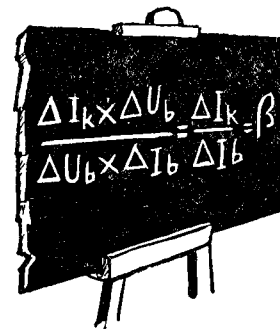
Sejtettem, hogy ilyesfajta eredményt fogok kapni. Eszerint az áramerősítés egyenlő a meredekség és a bemenő ellenállás szorzatával. Hasonló összefüggést kaptunk annakidején az elektroncsövekre is, $K = S \cdot \rho$, csak hogy itt ρ a kimenő ellenállást jelenti.

O. I.: Be tudnád bizonyítani, hogy ez az egyenlőség azokra a paraméterértékekre is fennáll, amelyeket a tranzisztorodra kiszámítottál?

K. K.: 0,5 V környezetében a meredekség a 44. ábra szerinti görbe alapján 500 vagy 600 mA/V, tehát középértékben 0,55 A/V. Ha most ezt megszorozom a belső ellenállással, amelyre ugyanebben a pontban 100 Ω -ot kaptunk, az eredmény 55, tehát pontosan megegyezik az áramerősítésre kapott értékkel.

O. I.: Akárcsak a mesékben. De jegyezd meg úgy mellékesen, hogy az erősítési tényező általában semmit sem változik meg, ha a kollektoráramot megnöveljük. A meredekség viszont — amint tapasztalhattuk — növekszik az I_k árammal.

K. K.: Amiből megállapíthatjuk, hogy az $S \cdot r_{be} = \beta$ összefüggésünk csak akkor lehet érvényes, ha a bemenő ellenállás csökken, amikor megnöveljük a kollektoráramot.



Minden jelleggörbe egy diagramon

O. I.: Lám, a gyerekek kimondják az igazságot... Most pedig el kell árulnom, hogy mindazokat az adatokat, amelyeket szétszórtan kapunk meg az általad felvett görbéken, könnyebben használhatjuk fel, ha méréseid alapján összeállítasz egy közös diagramot. Ezen azt kell megadni, hogy a kollektorfeszültség változtatása közben hogyan változik a kollektoráram.

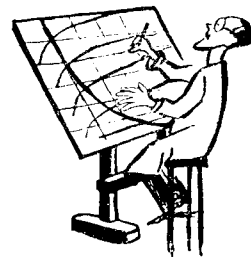
K. K.: Ha jól értem, olyasféle görbékről van szó, mint amelyekről az anód-feszültség függvényében az anódáramot olvashatjuk le.

O. I.: Úgy van.

K. K.: Igen ám, de milyen bázisfeszültséggel vegyem fel ezt a görbét?

O. I.: Egy egész görbesereget kell rajzolnod úgy, hogy a bázisfeszültséget különböző értékekre állítod, és minden egyes értékhez felveszed a megfelelő görbét. Kezdd például a 0,2 V-tal. Miután a bázisfeszültséget már beállítottad erre az értékre, nullától kezdve fokozatosan növelj a kollektorfeszültséget, és közben jegyezd fel a megfelelő I_k áramerőségeket.

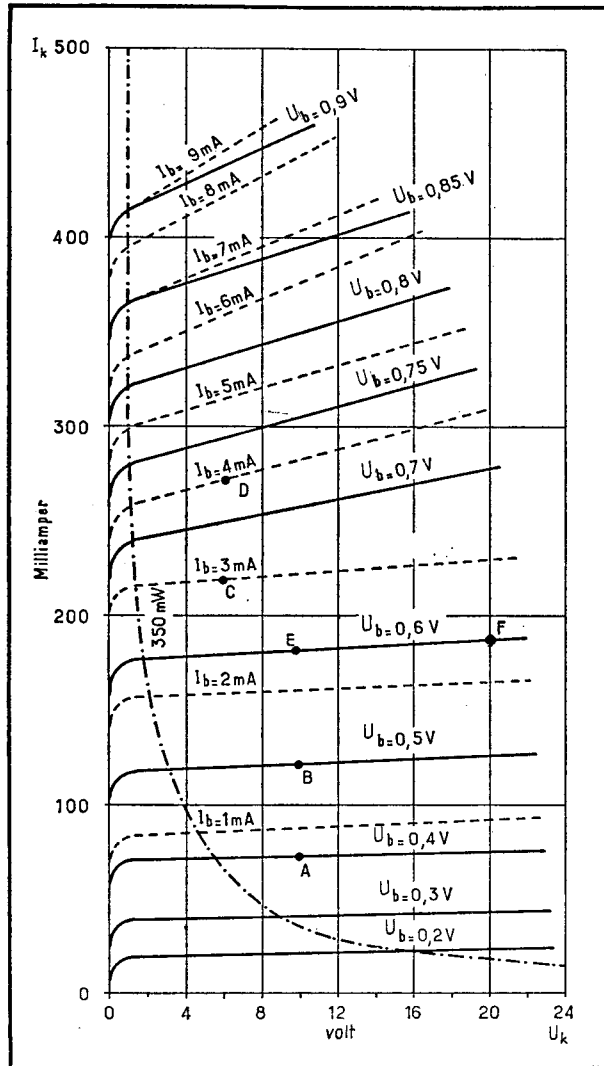
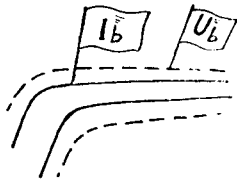
K. K.: Nagyon érdekes. Az áramerősség először nulla, majd nem egészen



2 V-nál már eléri a 20 mA-t, és innen kezdve változatlan marad még akkor is, ha a kollektorfeszültséget 24 V-ra növelem. Vajon miért?

O. I.: Mert elérted a telítődést. Miután azok a töltéshordozók, amelyeket a bázis és emitter közé kapcsolt feszültség létrehozott, mind résztvesznek a kollektoráramban, hiába növeled tovább a kollektorfeszültséget...

K. K.: ... mert senki sem adhat többet, mint amennyije van.

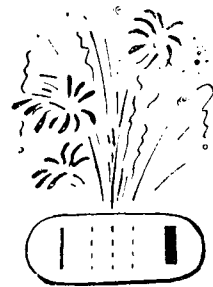


46. ábra. Az U_k kollektorfeszültség függvényében mért I_k kollektoráram az U_b bázisfeszültség és I_b bázisáram különböző értékeire. Továbbra is ugyanarról a közepes teljesítményű tranzisztorról van szó, amelyre a 43–45. ábrák vonatkoznak

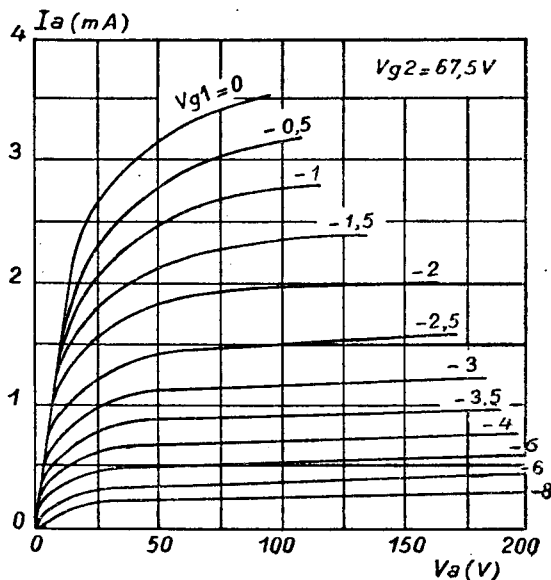
O. I.: Most, hogy már felvetted az $U_b = 0,2$ V bázisfeszültségnek megfelelő görbét, áttérhetsz az $U_b = 0,3$ V feszültséghez tartozó görbére, majd ugyanígy további feszültségekkel folytathatod a méréseket. Egyébként a bázisfeszültség beállításai helyett az I_b bázisáramra is felvehetsz meghatározott értékeket, ebben az esetben is ugyanilyen görbéket fogsz kapni. Amint látod, ez a két görbesereg a bázisfeszültség, illetve a bázisáram különböző értékeire megadja, hogyan függ a kollektoráram a kollektorfeszültségtől. A bázisfeszültség és a bázisáram beállított értékeit a görbék paramétereinek nevezzük.

Hasonlatosságok és eltérések

K. K.: Ezek a görbeseregek nagyon hasonlítanak az elektroncsövek anódáramának a görbéire, amikor is az anódfeszültséget változtatjuk, paraméternek pedig a rácsheszültséget választjuk. A hasonlatosság különösképpen feltűnő, ha a pentódák görbéit figyeljük meg.



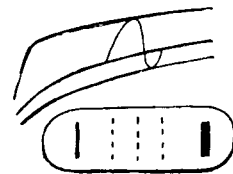
47. ábra. A pentóda anódáramának és anódfeszültségének összefüggése különböző előfeszültségek esetén

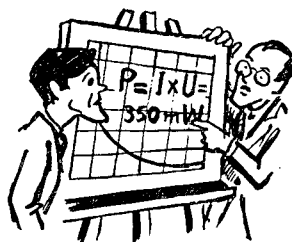
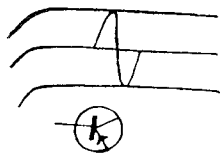


O. I.: Igen, de két lényeges eltérést is láthatunk. Először is, a pentóda görbéi mind egy közös pontból indulnak ki, és csak később válnak szét...

K. K.... mint a tűzijáték fénysugarai.

O. I.: Úgy is mondhatjuk. Ami viszont a tranzisztor jelleggörbéit illeti, ezek rohamosan emelkednek, majd a könyökpont elérése után majdnem vízszintesen haladnak tovább. A legszembeötlőbb ez akkor, ha kisebb teljesítményű tranzisztorról van szó. Másodszor pedig a pentóda jelleggörbéi, amíg kicsi a rácsheszültség (vagyis amíg nagy előfeszültséget adunk a rácstra), szorosan összezsúfolódnak, majd növekedni kezd a szomszédos görbék közötti távolság.





A tranzisztor esetében lényegileg egyenlő távolságokra vannak egymástól a különböző bázisáramoknak megfelelő (szaggatott vonallal kihúzott) görbék. Ezek az eltérések mind előnyére válnak derék tranzisztorunknak.

K. K.: Hogy-hogy?

O. I.: Hát nem látod, hogy a tranzisztor pontosabban erősít, mint a pentóda, különösen ha nagy amplitudójú jelekről van szó? Amíg a bázisáram pozitív és negatív irányban azonos mértékben változik, a kollektoráramban is egyenlő nagyságú változásokat kapunk. A pentóda esetében a rácsheszültség pozitív és negatív félperiódusai különböző nagyságú változásokat idéznek elő az anódáramban.

K. K.: Aminek következménye az a csúnya alakváltozás, amit nemlineáris torzításnak nevezünk. Ezek szerint a pentódákhoz képest a tranzisztoroknak megvan az az előnyük, hogy lineárisabbak. Éljen!

A görbékben levő kincsek kibányászása

O. I.: Most térjünk vissza a 46. ábrán kapott görbeseregre, hogy lássuk, hogyan állapítjuk meg ebből a tranzisztor fontosabb tulajdonságait. Először is leolvashatjuk róla a bázisheszültség bármelyik pontjában a meredekséget.

K. K.: Valóban, ha például a 0,4 és a 0,5 V (az A és B pont) közötti feszültségnövekedést vesszük, az áram 75 mA-ról 125 mA-re növekszik meg, vagyis a növekmény 50 mA. Eszerint a meredekség $50 : 0,1 = 500 \text{ mA/V}$.

O. I.: Ugyanilyen könnyen az áramerősítést is leolvashatod a diagramunkról.

K. K.: Azt hiszem, most az I_b áram egyik görbéről kell áttérni a másikra. Vegyük például a C és D pontot, a bázisáramban itt 1 mA különbség mutatkozik, míg a kollektoráram 220 mA-ról 275 mA-re változik, tehát a növekedése 55 mA. Így hát az áramerősítésünk: $\beta = 55 : 1 = 55$. Mi sem egyszerűbb ennél. De mi ez a különös görbe itt, amelyet balról lefelé ereszkedve jobbra kanyarodik, és amelyet 350 mW-tal jelöltél meg?

O. I.: Ez adja meg a tranzisztor határteljesítményét. Minden egyes pontjában a kollektorfeszültség és a kollektoráram szorzata éppen 350.

K. K.: Valóban, 10 V-on 35 mA, 5 V-on pedig 70 mA az áram. Ez tehát az a határvonal, amelyet nem szabad átlépniük?

Újra megjelennek a delták

O. I.: Igen. Ez a görbe hiperbola. Lesz még alkalmunk találkozni vele. Addig is ismerkedjél meg még egy rendkívül fontos jellemzővel, a tranzisztor *kimenő ellenállásával*. Ugye gondolod, miről van szó?

K. K.: Azzal a kevés foszforral, ami még megmaradt agyamban, megpróbálom kitalálni. Azt hiszem, ez az az ellenállás, amelyet a kollektoráramnak le kell győznie, amikor a kollektorfeszültség változtatásával meg akarjuk változtatni az értékét. Eltaláltam?

O. I.: Igen, de ne felejtse el, hogy e változások közben a bázis változatlan potenciálon marad. Most pedig gondolj mesterünkre, Ohmra, és próbálj tovább okoskodni.

K. K.: Megvan! Ez a kimenő ellenállás illendő módon a kollektorfeszültség és a kollektoráram hányadosa.

O. I.: Még nem egészen pontos a meghatározásod. Hiányzik belőle néhány kis delta.

K. K.: Ha ennyi sokat segítesz, persze hogy rájövök mindenre. Figyeld csak, olyan meghatározást vágok ki, hogy öreg matematikatanárom is megirigyelné. A tranzisztor kimenő ellenállása az a mennyiség, amely megadja, hogyan aránylik a kollektorfeszültség kis változása ahhoz a változáshoz, amelyet ez a feszültségváltozás a kollektoráramban előidéz, ha a bázisfeszültség közben állandó értékű marad. Vagyis

$$r_{ki} = \frac{\Delta U_k}{\Delta I_k}$$

(ami az elektroncsövek esetében a $\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \rho$ összefüggésnek felel meg).

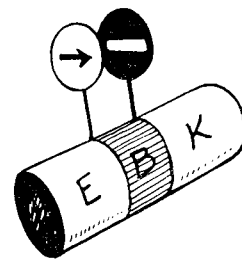
O. I.: Tényleg büszke lehetsz erre a definícióra. Úgy látszik, annak az óriás-halnak a foszfortartalma továbbra is kedvezően befolyásolja értelmi képességeidet. Meg tudnád most már határozni, továbbra is a 46. ábrán megrajzolt görbék alapján, a mi tranzisztorunk kimenő ellenállását például az $U_b = 0,6$ V bázisfeszültségre?

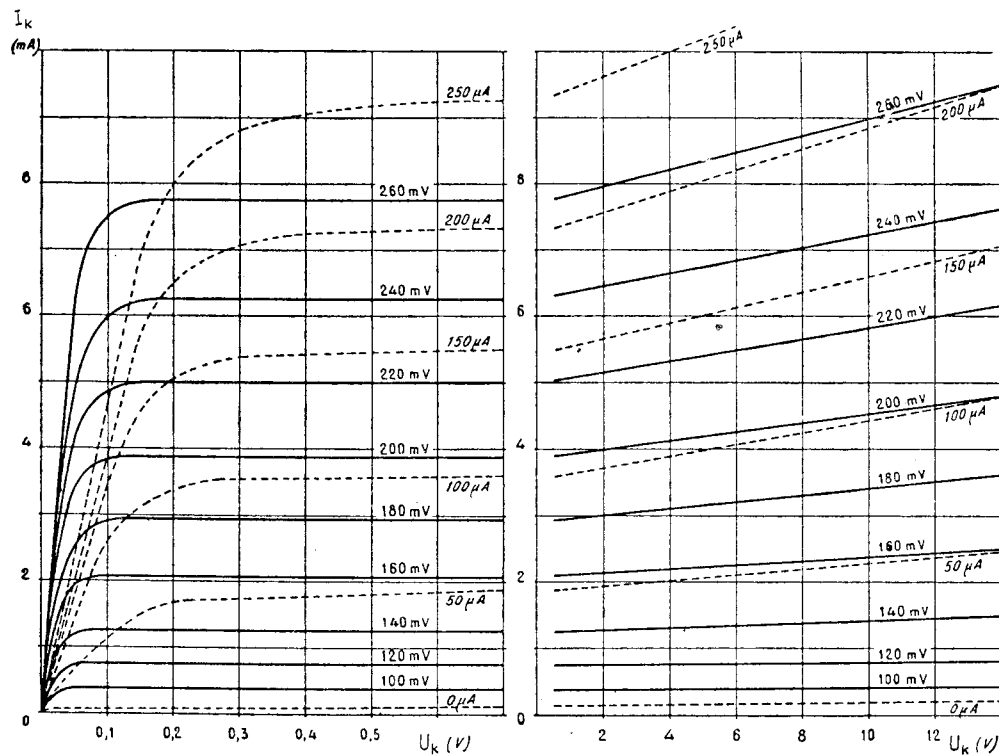
K. K.: Nagyon könnyen. Kiválasztok két pontot, legyen ez például a 10 és a 20 V-os kollektorfeszültségnek, tehát a 10 V-os feszültségkülönbségnek megfelelő E és F pont. Úgy látom, a kollektoráram itt 180 mA-ról körülbelül 182 mA-re növekszik, vagyis a növekedése 2 mA, azaz 0,002 A. Következésképpen a kimenő ellenállás $10 : 0,002 = 5000 \Omega$.

O. I.: Nagyon jó. Ha nagyobb áramerősségekre számítottad volna ki, még kisebb értékeket kaptál volna. De ne felejtse el, most közepes teljesítményű tranzisztorral van dolgunk. Ha egy kisebb teljesítményű tranzisztort veszünk, például olyant, amelynek a jelleggörbéi a 48. ábrán láthatók, sokkal nagyobb kimenő ellenállást kapnánk. Ezek a görbék valóban majdnem vízszintes irányúak. Az U_k feszültség nagyobb változására is csak jelentéktelen mértékben növekszik meg az I_k áram, a két változás hányadosa néhányszor tízezer ohmnak felel meg.

K. K.: Furcsa egy jószág ez a tranzisztor, hogy a bemenő ellenállása ilyen kicsi, a kimenő ellenállása pedig ilyen nagy. Állítólag szándékosan csinálták így, hogy kigúnyolják az elektroncsöveket... De talán azért kicsi a bemenő ellenállás, mert az emitter és a bázis közötti átmeneten áteresztő irányban folyik át az áram. Ugyanakkor a bázis és a kollektor közötti átmenet kellemtelen akadály a záróirányban folyó áram útjában, aminek következtében nagy a kimenő ellenállás.

O. I.: Így is elképzelhetők a dolgok. De attól félek, hogy mára már kifogytál a foszforkészletedből... éppen ezért nagyon megnőhetett a bemenő ellenállásod.





48. ábra. A kisteljesítményű tranzisztorok I_k kollektorárama és U_k kollektorfeszültsége közötti összefüggés görbéi. A baloldali diagramon kinagyítva ábrázoljuk az U_k kollektorfeszültség kisebb értékeinek megfelelő szakaszt, hogy világosabban lehessen látni, mi történik a 0 és 0,7 V közötti tartományban. Amikor a kollektorfeszültség még kicsi, a bázisáram nem arányos a bázisfeszültséggel

Hetedik beszélgetés

A legutóbbi beszélgetés során a tranzisztorok legfontosabb jellemzőiről volt szó. Ezek a jellemző adatok, amint láttuk, különböző hányadosok számszerű értékeivel fejezhetők ki, vagy pedig — még célszerűbben — görbeseregekkel is ábrázolhatók, és ezekről az úgynevezett jeleggörbékről leolvashatjuk, hogyan változnak egyes mennyiségek, amikor más mennyiségeket megváltoztatunk. A grafikus ábrázolás teljesebb képet nyújt a tranzisztorok tulajdonságairól mint a jellemző adatok számszerű kifejezése, mert a szám adatok csak meghatározott viszonyokra érvényesek. Márpedig a tranzisztorokban — mit tagadjuk — minden függ mindentől.

A most következő beszélgetésük során két barátunk értékes következtetéseket von le a görbeseregek alapján arra vonatkozólag, hogyan viselkedik a terhelőimpedanciát tartalmazó erősítőkapcsolásban alkalmazott tényleges tranzisztor. Ezzel kapcsolatban megismerkedünk az előfeszültség kérdésével és ennek gyakorlati megoldásaival is.

Összefoglalás: Sztatikus és dinamikus jeleggörbék. — A munkagyenyes berajzolása. — Munkapont. — Áramerősítés, feszültségerősítés és teljesítményerősítés. — A váltakozóáramú összetevő legnagyobb értékei. — Meddőfeszültség. — A terhelőimpedancia megválasztása. — Dinamikus meredekség. — A bázis előfeszítése.

Egyenesek és görbék

A tranzisztor áramköri társai

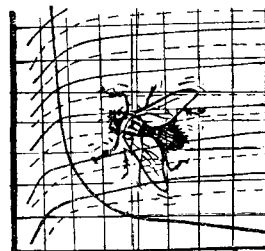
K. K.: Legutóbbi találkozásunk óta rettenetes álmaim vannak. Azt álmodom, hogy légy alakjában egy hatalmas pókhálóba kerültem, és a pókháló nem más, mint a tranzisztorok görbeserege. Hasztalan kínlódom, nem tudok kiszabadulni belőle. Hát nem borzalmas?

O. I.: Le vagyok sújtva, hogy ennyire megzavartam éjszakáidat. Jobb lesz talán, ha nem beszélgetünk többet ezekről a csúnya görbékről.

K. K.: Épp ellenkezőleg. Nagyon örülnék, ha elmondanád, hogyan használhatjuk fel a jeleggörbéket, amikor össze akarunk állítani tranzisztoros áramköröket.

O. I.: Mit akarsz ezzel mondani?

K. K.: Ezeket a görbéket úgy vettük fel, hogy változtatgattuk a kollektor és az emitter közé kapcsolt U_k feszültséget. Ugyanekkor az I_b bázisáramot (vagy — ha úgy tetszik — az U_b bázisfeszültséget) különböző értékekre állítottuk be. A valóságban azonban a tranzisztor soha sincs egyedül, és nem pusztán kedvtelésből változtatgatja feszültségeit és áramait. Társai is vannak a kapcsolásokban, és például az a feladata, hogy valamilyen feszültséget vagy áramot szolgáltatson a következő fokozatban levő tranzisztor részére. Ha

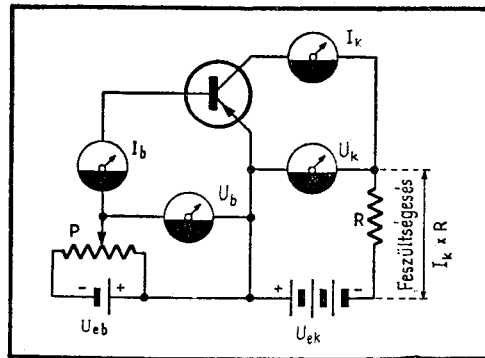
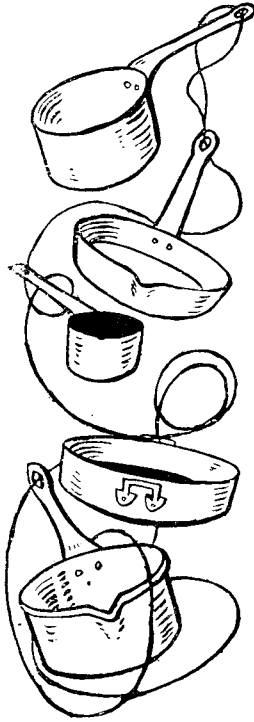


pedig az utolsó fokozatban alkalmazzuk, teljesítménnyel kell táplálnia a hangszórót. Mindenesetre valamilyen terhelőimpedancia is van a kollektor-körében. Ha például egy másik erősítőfokozat követi, és egy ellenálláson és kapacitáson keresztül csatoljuk ehhez a következő fokozathoz, egy R ellenállást kell beiktatni a kollektor és az U_{ek} telep közé.

O. I.: Ez valóban így van, de mi az, ami nem tetszik itt neked?

Újra előbukkannak az összekötött edények

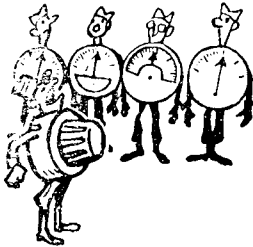
K. K.: Az nem tetszik, hogy a kollektoron levő feszültségek most már attól függenek, mekkora a kollektoráram erőssége. A kollektor és emitter közötti tényleges U_k feszültség kisebb, mint az U_{ek} telep feszültsége, mert az utóbbiból le kell vonnunk azt a feszültségesést, amelyet az I_k kollektoráram létesít az R terhelőellenálláson. Ha tehát a bázisáram megváltozása következtében megnő a kollektoráram, az R ellenálláson létesülő feszültségesés is nagyobb lesz, aminek következtében ennyivel kevesebb feszültség marad a kollektoron.



49. ábra. A tranzisztor valóságos működésének megfelelő jelleggörbék felvételéhez egy munkaellenállást (R) is be kell iktatni a 42. ábra szerinti kapcsolás kollektorkörébe. (Ezen és a következő ábrákon a tranzisztort már a szokásos rajzzel ábrázoljuk)

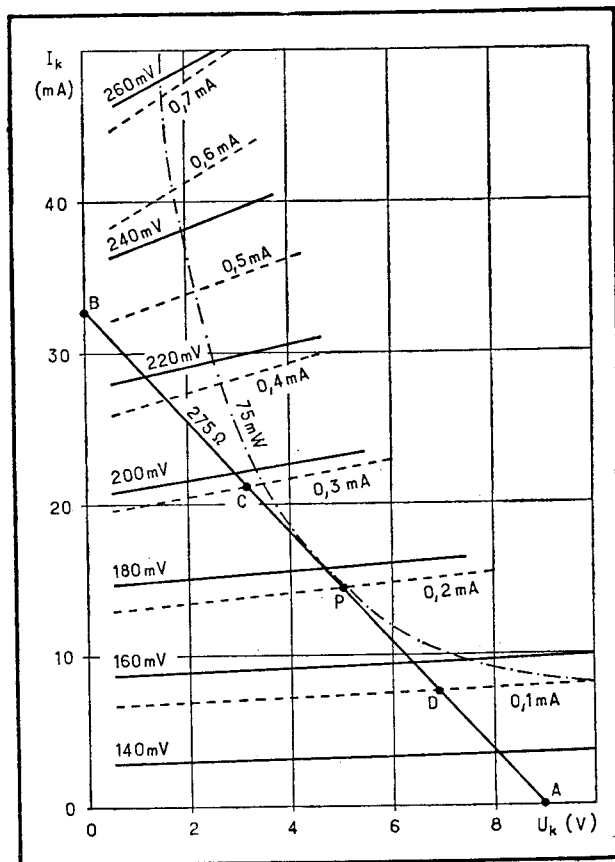
O. I.: Helyesen okoskodszt, és most már értem, mi zavart meg: görbeseregeinken ezek a jelenségek nyilvánvalóan nem mutatkoznak meg.

K. K.: Egyre csak azokra a konyhai edényekre gondolok, amelyeket annak idején egymáshoz kötöttem. A terhelő ellenállás hatására is ilyen kapcsolat létesül az áramok és a feszültségek között. Ha elmozgatom a P potenciométer karját, mind a négy műszeremen egyszerre megmozdulnak a mutatók, akár csak a gyakorlatozó katonák, amikor meghallják a vezényszót.



Egyenes vonal a görbék között

O. I.: Próbáljunk meg hát itt egy kis rendet csinálni. Képzeljünk el egy kisteljesítményű, például 75 mW-os tranzisztort, amelynek ezek itt a jelleggörbéi (50. ábra); eredményvonallal berajzoltam azt a határteljesítményt is, amelyet nem szabad túllépni. Tételezzük fel, hogy az U_{ek} telep 9 V-tal táplálja



50. ábra. A kisteljesítményű tranzisztorok jelleggörbéi

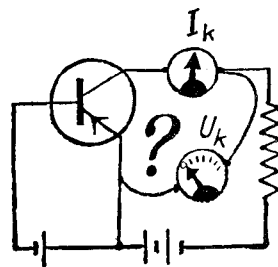
a kollektort. Mondd csak, milyen körülmények között kapjuk meg ezt a teljes feszültséget a kollektoron?

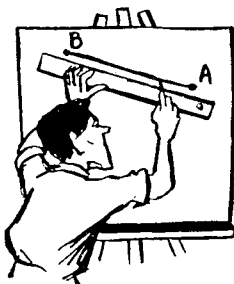
K. K.: Ha az R ellenálláson nincsen feszültségesés, vagyis ha az I_k áram nulla.

O. I.: Jelöljük meg tehát a diagramunkon ezt az A pontot, amelyben $U_k = 9 \text{ V}$ és $I_k = 0$. Most pedig képzeljük el, hogy az R ellenállás 275Ω nagyságú. Ki tudnád számítani, mekkora kollektoráramra van szükség ahhoz, hogy kollektorunkon ne maradjon semmilyen feszültség?

K. K.: Persze. Ohm törvényét alkalmazva kiszámítom azt az I_k áramot, amely a 275Ω -os ellenálláson pontosan $U = 9 \text{ V}$ feszültségesést hoz létre, tehát amellyel az U_{ek} telepfeszültség teljes egészében az ellenállásra kerül:

$$I_k = \frac{U}{R} = \frac{9}{275} = 0,0327 \text{ A} = 32,7 \text{ mA}.$$





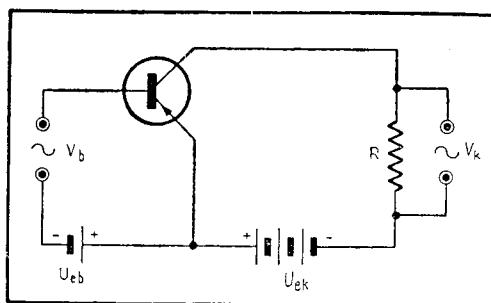
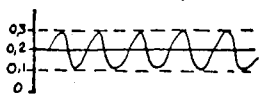
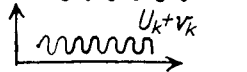
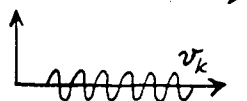
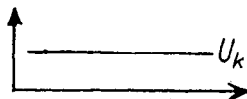
O. I.: Nagyon jó. Ezzel megkaptuk ezt a második, B pontot, amelyben $U_k = 0$ és $I_k = 32,7$ mA. Most már nincs más hátra, mint hogy veszünk egy vonalzót és meghúzzunk egy egyenest az A ponttól a B pontig. Ez lesz a 275Ω -nak megfelelő munkaegyenes.

K. K.: Sokra mentünk vele! Nem látom be, minek felelne meg ez a „munkaegyenes”. Először is, hogyan érné el a kollektoráram ezt a $32,7$ mA-es értéket, ha itt már nincsen semmilyen feszültség a kollektoron?

O. I.: Az zavar meg, hogy nem teszel különbséget a *sztatikus* és a *dinamikus jelleggörbék* között. A sztatikus jelleggörbék arra az esetre adják meg a feszültségek és az áramok változásait, amikor nincsen terhelés a kollektorkörben. Erről az esetről volt szó a legutóbbi beszélgetésünkön. Most arra vagyunk kíváncsiak, mi történik, ha terhelő ellenállást iktatunk be a kollektor áramkörébe és — amiről eddig még nem beszéltünk — valamilyen v_b váltakozó feszültséget vezetünk a bemenetre, vagyis a bázis és az emitter közé. Ekkor már a dinamikus jelleggörbék adják meg a tranzisztor működését. Ezeket azzal a munkaegyenessel határozhatjuk meg, amelyet az előbb megrajzoltunk.

A két összetevő

K. K.: Amint a kapcsolási rajzodon látom (51. ábra), a bemenetre kapcsolt v_b váltakozó feszültség hatására v_k váltakozó feszültséget kapunk a kimeneten. Kezdem már érteni a dolgokat. Itt a kollektorkörben ugyanaz történik, mint az elektroncsövek anódkörében: egyidejűleg kétféle áram folyik, itt is két áram békés együttéléséről van szó. Az egyik az egyenáramú összetevő, vagyis az a



51. ábra. A tranzisztoros fokozat bemenetére, a bázis és az emitter közé v_b váltakozó feszültséget vezetünk. A kimeneten az R munkaellenállásról vesszük le a v_k váltakozó feszültséget

közepes áram, amelynek nagyságát a munkapont helyzete (illetve a rácslőfeszültsége) szabja meg. A másik a rácslő és a katód közötti potenciálkülönbség változásaival előidézett váltakozó áramú összetevő. Ez az utóbbi hol hozzáadódik az egyenáramú összetevőhöz (amikor a két összetevő azonos előjelű), hol meg kivonódik belőle.

O. I.: Látom, már dereng valami benned. Valóban ugyanez a helyzet a tranzisztorral is. Az U_{eb} telep megszabja a munkapont helyzetét. Ezt a munkapontot úgy kell beállítanunk, hogy a kimeneten kapott v_k váltakozó feszültség a lehető legnagyobb amplitudójú legyen.

K. K.: A mi esetünkben tehát arra kell törekedni, hogy a kollektoron meg-

maradó U_k közepes feszültség éppen a fele legyen az U_{ek} tápfeszültségnek. Ez az érték itt 9 V-nak a fele, vagyis 4,5 V.

O. I.: Jelöljük meg tehát a terhelésegyenesünkön egy P pontot itt az $U_k = 5$ V helyén. Ez a pont nagyjából az egyenes közepén van. Mindjárt meglatod, hogy U_{ek} felénél kissé nagyobb értéket vehetünk. Ha most a bázis és emitter közötti feszültség (vagyis a bázisáram) megváltozása következtében megváltozik a kollektor I_k árama és U_k feszültsége, ez a két mennyiség mindig az egyenesünkkel kifejezett összefüggésnek megfelelő kapcsolatban áll egymással.

K. K.: Mindez nagyon bölcsen hangzik, de jobban örülnék valamilyen konkrét példának.

Hintázó áramok és feszültségek

O. I.: Ahogy akard. Képzeld el, hogy körülbelül 20 mV-os váltakozó feszültséget kapsz a bázis és az emitter közé, és ennek hatására a bázisáram 0,1 mA-rel hol nagyobb, hol meg kisebb lesz a közepes áramnál, tehát a P pontnak megfelelő 0,2 mA-nél.

K. K.: Úgyhogy a bázisáram értéke

$$0,2 + 0,1 = 0,3 \text{ mA és } 0,2 - 0,1 = 0,1 \text{ mA}$$

között fog ingadozni.

O. I.: Igen. A nagyobbik értékkel elérjük a munkaegyenesen a C pontot (ahol ez az egyenes metszi az $I_b = 0,3$ mA-es görbét), a kisebbik értékkel pedig a D pontba jutunk (az $I_b = 0,1$ mA-es görbe metszéspontjába).

K. K.: Tehát U_k és I_k pillanatnyi értékei a munkaegyenes mentén C és D pont között ingadoznak, mintha csak hintáznának a P egyensúlyi pont körül?

O. I.: Pontosan úgy. Amint látod, a kollektorfeszültség 3,2 és 6,8 V közötti rezgéseket végez az 5 V-nak megfelelő P pont körül.

K. K.: Ami 1,8 V amplitudót jelent. Minthogy pedig ez a bázison 20 mV = 0,02 V amplitudónak felel meg, ebből talán arra lehet következtetni, hogy a feszültségerősítésünk $1,8 : 0,02 = 90$ -szeres?

O. I.: Egészen bátran. És mennyi lesz az áramerősítés?

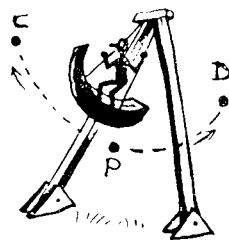
K. K.: Ezt is könnyen megállapíthatjuk. A P pontból kiindulva az I_k kollektoráram a C , illetve a D pontig 7 mA-rel változik meg. Ezt a változást a bázisáram 0,1 mA-es változásai idézik elő, tehát az áramerősítés $7 : 0,1 = 70$ -szeres.

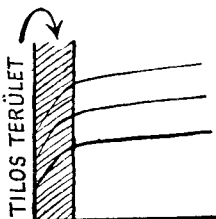
O. I.: Szinte kezdem már azt hinni, hogy megint jól bevásároltál a halpíacon, és felfrissítetted foszforral agyadat... Így legalább beláthatod azt is, hogy a teljesítményerősítés — miután a teljesítmény a feszültség és az áram szorzata — ...

K. K.: ... $90 \cdot 70 = 6300$ -szoros. Bámulatos!

Vigyázat! Torzítás!

O. I.: Nincsen ebben semmi rendkívüli. Most csak azt akartam megértetni veled, hogy a kollektoron levő v_k váltakozó feszültségnek nem szabad túllépnie a 4,5 V-os amplitudót. Ezzel az amplitudóval U_k és I_k értéke A és B között





sétálgat fel és alá a munkaegyenesen. Egyébként, ha a munkapontot pontosan AB közepére állítjuk be, az egyik félperiódusban az A pontba, a másik félperiódusban pedig a B pontba jutunk.

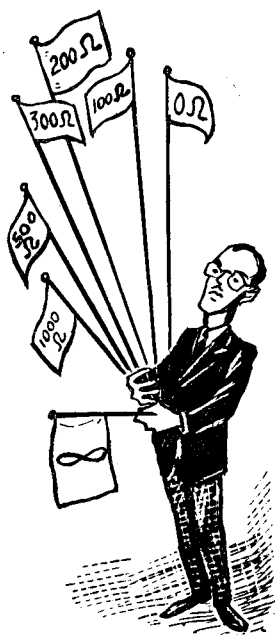
K. K.: Végeredményben tehát ezek a pontok az U_k kollektorfeszültség pillanatnyi értékeinek határai?

O. I.: Igen. A valóságban ügyelni kell arra, hogy ez a feszültség ne csökkenhessen nullára, tehát ne érhesse el a B pontot. Itt ugyanis a jelleggörbék már nem egyenesek. A 46. ábrán, és még inkább a 48. ábrán jól látható, hogy U_k kisebb értékeinek tartományában a görbék lefelé hajlanak. Ez a néhány tizedvoltos tartomány, az úgynevezett meddőfeszültség tartománya, tilos terület, itt torzításokat kapnánk.

K. K.: Ezért van tehát az, hogy a P pontot nem az U_{ek} telepfeszültség közepén, hanem ettől valamivel feljebb választjuk meg?

O. I.: Igen, ha nagyon pontosak akarunk lenni. Ezért vettem itt az 5 V-nak megfelelő pontot.³

K. K.: Az a benyomásom, hogy nem véletlenül vetted 275 Ω -ra az R terhelőellenállást. Mit kaptunk volna más értékkel?



Az egyenesekből álló köteg

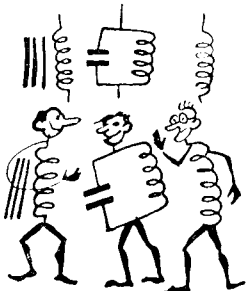
O. I.: Rajzoljunk hát meg néhány munkaegyeneset nagyobb és kisebb értékekre is. 1000 Ω -mal kisebb teljesítményeket kapunk, és kisebb amplitudóval változhat a bemeneten (a bázison) és a kimeneten (a kollektoron) is az áram. Ha viszont 275 Ω -nál kisebb értékeket veszünk, az amplitudók és a teljesítmények nagyobbak lesznek, csakhogy így már betévedünk a 75 mW-nál nagyobb teljesítmények tiltott sávjába.

K. K.: Lám csak, milyen ravasz voltál, azért vetted ezt a 275 Ω -os értéket, mert így a munkaegyenes éppen érinti a határteljesítmény hiperboláját. De látom, meghúztad az $R = 0$ terheléshez tartozó egyenest is.

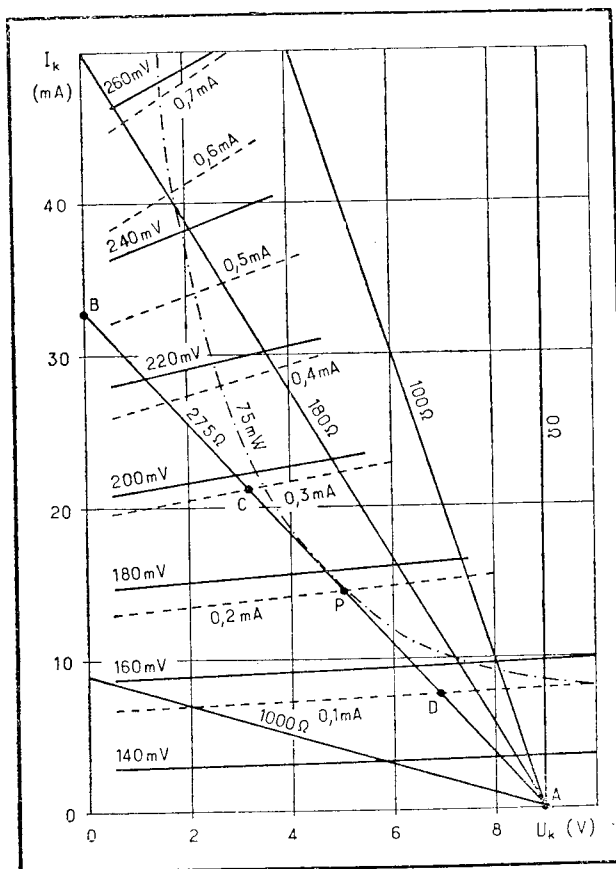
O. I.: De meg ám! Ez a gyönyörű, pontosan függőleges egyenes az egyetlensztatikus jelleggörbe a sok dinamikus jelleggörbe között. Hiszen ha nincsen terhelő ellenállás, a kollektorfeszültség nemde változatlanul megmarad egy állandó értéken?

K. K.: Ez kétségtelen. De úgy emlékszem, annak idején nemcsak közönséges ohmos ellenállásokról, hanem egyéb terhelő impedanciákról is beszélgettünk. Még nem felejtettem el azt a szép impedanciacsaládot, amellyel megismer-tettél, és amelynek tagjai az induktivitások és a rezgőkörök.

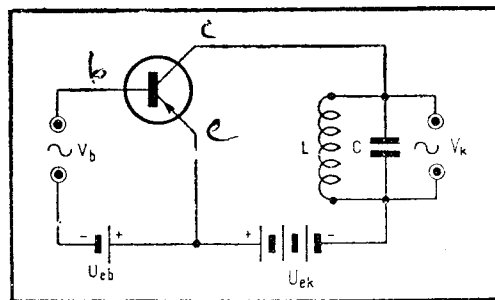
O. I.: Jó, hogy említéd. Ilyen impedanciák esetén természetesen elhanyagolhatjuk az egyenárammal tapasztalható ohmos ellenállást. Ekkor a kollektor feszültsége megegyezik a telepből kapott U_{ek} tápfeszültséggel, és a kollektor polaritása nem változik meg még abban az esetben sem, ha az impedanciánkon levő feszültség amplitudója eléri az U_{ek} értékét. Az A pont pedig (tehát az a pont, ahol a munkaegyenes metszi az U_k vízszintes tengelyt) ebben az esetben



³ Az Okos Ifjú kissé ravaszkodott: csak azért mondott 5 V-ot, mert így a P pont az $\beta = 0,2$ mA-es görbére került, úgyhogy könnyen leolvashatta a különböző feszültségek és áramok értékét. (A szerző megjegyzése.)



52. ábra. A munkaegyenesek különböző R ellenállásokra. Az egyenesek annál meredekebbek, mennél kisebb az R ellenállás, és $R = 0$ esetén függőleges egyenest kapunk

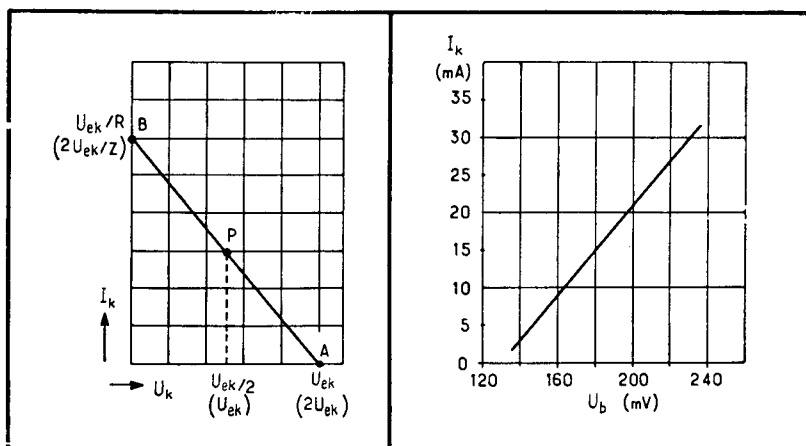


53. ábra. A terhelés nemcsak ohmos ellenállásból állhat. Itt például a jel frekvenciájára hangolt rezgőkörből áll

az U_{ek} telepfeszültség kétszeresére állítható: Ha tehát a telepfeszültség 9 V, az A pont a 18 V-nak megfelelő helyre kerül.

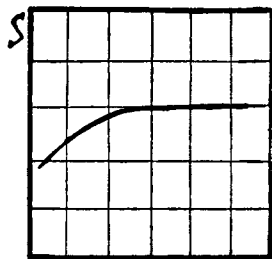
K. K.: Eszerint a munkaegyenes meghúzásához a vízszintes tengelyen levő A pontot U_{ek} -nál vagy ennek kétszeresénél veszem fel attól függően, hogy a terhelés egyszerű ohmos ellenállás-e vagy valamilyen más impedancia, majd a függőleges tengelyen a terhelő impedancia jellegétől függően U_{ek} (R vagy $I_k = 2 U_{ek}$) Z értéknél jelölöm meg a B pontot.

O. I.: Nagyon jól megfogalmaztad a szabályt, és remélem, most már minden nehézség nélkül meg tudsz szerkeszteni bármilyen munkaegyenest. Ebből az egyenesből már nagyon sok mindent megállapíthatsz. Így például a munkaegyenes alapján nagyon könnyen megrajzolható az U_b bázisfeszültség függvényében az I_k kollektoráram görbét is. Mindössze azt kell tenned, hogy ezen az



54. ábra. A munkaegyenes megszerkesztése. A zárójelbe tett értékek a Z impedancia kis ohmos ellenállása esetére vonatkoznak

55. ábra. Ezt a görbét, amelyen az I_k kollektoráram és az U_b kollektorfeszültség közötti összefüggés látható, az 50. ábrán bemutatott munkaegyenesből kapott értékek alapján szerkesztettük meg



egyenesen megfigyeled, hol vannak metszéspontok az U_b görbékkel, mind-ezekre a metszéspontokra meghatározod I_k megfelelő értékét, és az így kapott értékeket grafikusan ábrázolod. Amint látod, ebben az esetben egy egyenest kaptunk, ami azt jelenti, hogy amennyiben a kollektoráram nagy, a meredekség alig változik. Ilyenkor a tranzisztor eléggé lineárisan erősít.

K. K.: Azt is látom, hogy a meredekség itt 300 mA/V.

O. I.: Úgy van. Ez a *dinamikus meredekség*. Ugyanilyen egyszerűen azt a görbét is megrajzolható, amely megadja, hogyan változik az I_b bázisárammal az I_k kollektoráram.

Egyetlen telepből minden feszültséget

K. K.: Feltétlenül meg tudnám rajzolni. De mint a pókhálóba akadt légy, éppen úgy én is szeretnék már kiszabadulni ezekből a görbeseregekből, mert még nappal is végigszalad a hideg a hátamon, amikor visszagondolok azokra a lidércálmokra. Az előbb eszembe jutott valami, amit meg akartam kérdezni, de még nem volt rá alkalmam. Kapcsolási rajzaidon mindenhol két telepet látok: az egyik, U_{ek} , a kollektorfeszültséget szolgáltatja, a másik, U_{eb} , a bázis megfelelő előfeszítéséről gondoskodik. Csakhogy én felbontottam barátaim tranzisztoros vevőit, és egyikben sem találtam egynél több telepet. Ez a telep mindegyik készülékben 4, 5, 6 vagy 9 V-os, tehát nyilvánvalóan a kollektort táplálja. Honnan kapják ezek a készülékek a bázis előfeszültségét?

O. I.: Ugyanerről a telepről. Hát nem így van az elektroncsöves készülékekben is?

K. K.: Valóban, az anódkör tápforrása hozza létre a rács előfeszültségét is: az anódáram feszültségesést létesít egy ellenálláson a rács és a katód közötti áramkörben, és ennek hatására a katód pozitívabb lesz, mint a rács, vagy — ha úgy tetszik — a rács negatívabb lesz, mint a katód. Tehát a tranzisztoros vevőkben is hasonló megoldást alkalmaznak? Valószínűleg egy ellenállást iktatnak be a kollektorkörbe, és az ezen létesülő feszültségesés szolgáltatja az előfeszültséget.

O. I.: Nem, barátom, a tranzisztoros készülékben ebből a szempontból egyszerűbbek a viszonyok. Az elektroncsőben az anód pozitívabb, a rács pedig negatívabb, mint a katód, a $P-N-P$ típusú tranzisztorban viszont az emitterhez képest negatív potenciálon van a kollektor is és a bázis is.

K. K.: Mint ahogyan az $N-P-N$ típusúban a kollektor és a bázis egyaránt pozitívabb feszültségre kapcsolandó, mint az emitter. Már látom, mit kell tenni: a telep kapcsaira két ellenállásból, R_1 -ből és R_2 -ből álló feszültségesztőt kapcsolunk, és erről az utóbbról vesszük le a bázison szükséges feszültséget.

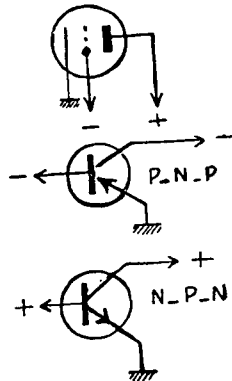
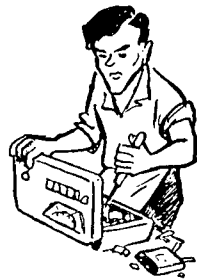
O. I.: Úgy van. A bemenő váltakozó feszültséget viszont a C csatolókonkondenzátoron keresztül vezetjük a bázisra. Ennél egyszerűbben is elő lehet állítani a bázis előfeszültségét, mégpedig egyetlen R_{el} ellenállással úgy, hogy ezt az ellenállást a telepnek a kollektoroldali sarkához csatlakoztatjuk. $P-N-P$ tranzisztor esetén ez a telep negatív sarka (az $N-P-N$ tranzisztorok áramköreiben a pozitív kapocsról van szó).

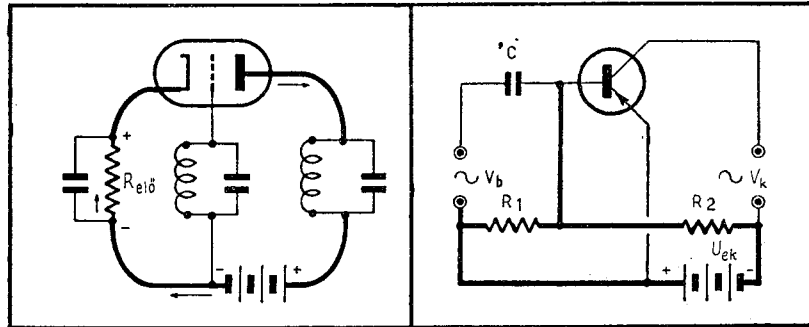
K. K.: Értem már, mi történik itt. Ezen az R_{el} ellenálláson keresztül áram indul meg a bázisból az emitter felé.

O. I.: Ezt az áramot *előfeszítő áramnak* nevezzük. Ezzel az árammal állíthatjuk be a munkapontot. Az 50. ábrán feltüntetett P pontban 0,2 mA, vagyis 0,0002 A az áram. Ha tehát a telep 9 V-os, a bázis és emitter közötti átmenet ellenállását pedig elhanyagoljuk (minthogy vezetőirányban mérve ez az érték kicsi), mekkorára kell vennünk R_{el} értékét?

K. K.: Ha továbbra is megbízunk Ohm törvényében, R_{el} értékét úgy kapjuk meg, hogy a 9-et osztjuk 0,0002-vel. Az eredmény 45 000 Ω .

O. I.: Amint látod, minden számításunk legfeljebb csak egyszerű szorzásokból és osztásokból áll.

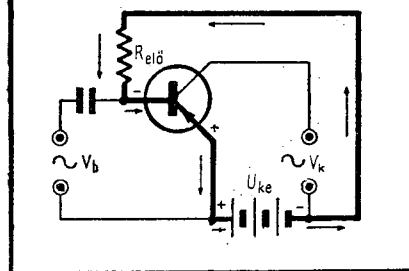




56. ábra (fent). Az elektroncsöves fokozatban a rácseleőfeszültséget azzal a feszültségeséssel állítjuk elő, amelyet az anódáram létesít az R_{ei0} ellenálláson

57. ábra (fent jobbra). A bázis előfeszültségének előállítására feszültségosztóval

58. ábra (lent). Az előfeszültséget sokszor úgy állítjuk elő, hogy egy R_{ei0} ellenállást iktatunk be a bázis és emitter közötti átmenet áramkörébe



K. K.: Ennek ellenére már csak úgy zúg a fejem ezektől a görbétől, egyenesektől és a különböző villamos mennyiségektől. De majd csak kitisztul a következő alkalomra.

Nyolcadik beszélgetés

Az elektroncsöves kapcsolásokban előszeretettel alkalmazzuk a negatív visszacsatolást, hogy csökkentsük a torzításokat, és hogy enyhítsük a tápfeszültségek ingadozásainak hatását. Ugyanilyen célokra a tranzistoros fokozatokban is alkalmazható negatív visszacsatolás. Ismeretes, hogy a félvezetők nagyon érzékenyek a hőmérsékleti ingadozásokra: a negatív visszacsatolással bizonyos mértékben az ilyen ingadozások hatása is semlegesíthető.

A negatív visszacsatolás különböző alkalmazásairól beszélve fiatal barátaink egyúttal azt is megállapítják, hogy a tranzistor már jellegénél fogva is tartalmaz egy bizonyos belső negatív visszacsatolást. Ez is igazolja azt, hogy itt minden függ mindentől.

Összefoglalás: *A negatív visszacsatolás előnyei. — Negatív áram és negatív feszültség-visszacsatolás. — Elektroncsöves és tranzistoros kapcsolások. — A negatív visszacsatolás hatása a bemenő és a kimenő ellenállásra. — A tranzistorokkal előidézett fázistorzítás. — Belső negatív visszacsatolás. — A torzításban megmutatkozó hőmérsékleti hatások. — E hatások kiegyenlítése negatív visszacsatolással. — A termisztorok alkalmazása.*

Visszahatások

A valóság felülmúlja a képzetet

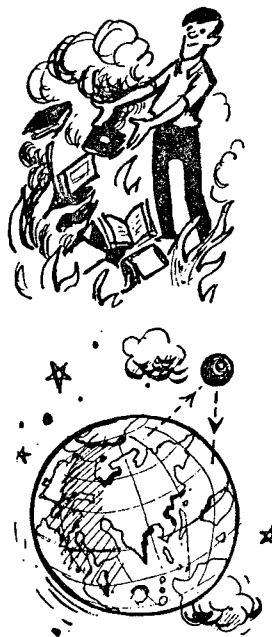
O. I.: Hát veled mi történt? Miért akarsz elégetni azt a sok könyvet? Mit akarsz ezzel a nagy máglyával?

K. K.: Elégetem a fantasztikus regényeimet. Minek őrizzem meg őket, amikor a valóság már annyira túlszárnyalta szerzőik képzeletét. Ezzel kapcsolatban szeretnék tőled valamit megkérdezni azokról az óriás ballonokról, amelyek 35 000 kilométer magasságban keringenek a Föld körül, és keringési idejük 24 óra, úgyhogy a Földünknek mindig ugyanaz a pontja van alattuk.

O. I.: Jól tudod, hogy ezeknek felhasználásával nagytávolságú rádióösszeköttetést lehet létesíteni, minthogy a rádióhullámok visszaverődnek fémezett burkolatukon. Ilyen módon a televízióműsor is nagyobb távolságra közvetíthető.

K. K.: Ezt tudom. Ezeknek a mesterséges holdaknak a históriájában azt nem értem, hogy az ilyen ballonokat miért csak akkor fújják fel hatalmas gömbbé, amikor már a pályájukra kerültek. Azt hiszem, ez nagyon megnehezíti a dolgokat.

O. I.: Várj csak, várj. Hát nem tudod elképzelni, hogy az ilyen nagy átmérőjű ballonokat lehetetlen volna 11 km/sec-nál is nagyobb sebességgel keresztülröpíteni a földi légkörön? Abban a magasságban viszont, ahol keringenek, már légüres tér van, tehát semmi sem akadályozza mozgásukat.





K. K. : Igazán szégyellem, hogy erre nem jöttem rá eddig, annyira magától értetődő. Hiszen ismerem a régi jó Newton-törvényt, amely szerint minden hatásnak megvan a maga ellentétes értelmű, de azonos nagyságú ellenhatása. Tulajdonképpen ez az az ellenhatás, amelyről annak idején még a rádióval kapcsolatban beszélgettünk.

Kedvező visszahatások

O. I. : Nem egészen így van. A rádióban negatív visszacsatolást alkalmazunk, és ez kétségtelenül olyan visszahatás, amely valamilyen eredeti hatás ellen működik (más szóval : ellentétes fázisú). Csakhogy ne felejtse el, hogy a negatív visszacsatolás megvalósításához a kimeneti energia egy részét visszavezetjük az erősítő bemenetére. Olyasféle, mint a . . .

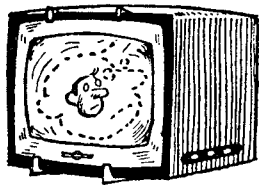


K. K. : . . . visszarúgás. Amikor valamilyen hülyeséget követek el, én is szeretném helyrehozni a hibámat, és jól megrúgni magamat hátul, egy bizonyos testrészemen . . .

O. I. : Valóban, itt is bizonyos hibák kijavításáról van szó. A negatív visszacsatolás olyan, mint valami csodaszer ; enyhít minden torzítást : a lineáris (frekvenciafüggő) torzításokat, a nemlineáris torzításokat (ezek az amplitúdótól függenek, és nem kívánatos felharmonikusokat idéznek elő), valamint a fázistorzításokat is.

K. K. : Igen, emlékszem már. A javulás azért következik be, mert a kimenő feszültség, amelynek egy részét ellentétes fázisban visszavezetjük a bemenetre, mindezeket a torzításokat magában foglalja. A bemeneten tehát ezek a torzítások most már ellentétes irányban hatnak, úgyhogy végeredményben kiegyenlítik az erősítőben létrejövő káros hatásokat.

O. I. : Helyes, látom nem felejtettél el semmit. Tudod-e azonban, hogy a negatív visszacsatolás azokat a zavaró hatásokat is csökkenti, amelyek a tápfeszültségek ingadozásaiból származhatnak ?



K. K. : Ez bizony nagyon jó dolog. Vidéki nyaralónkban is jó volna negatív visszacsatolást alkalmaznom a televíziókészülékünk egyes fokozataiban. Ott vidéken nagyon bizonytalan a hálózati feszültség. Ennek következtében az ernyőn nagyon különös változások tapasztalhatók : a kép hol túlságosan sötét, hol meg túlságosan világos. Még a méretek is változnak : a szereplők feje időnként megdagad vagy összezsugorodik, amin néha még mulatni is tudunk.

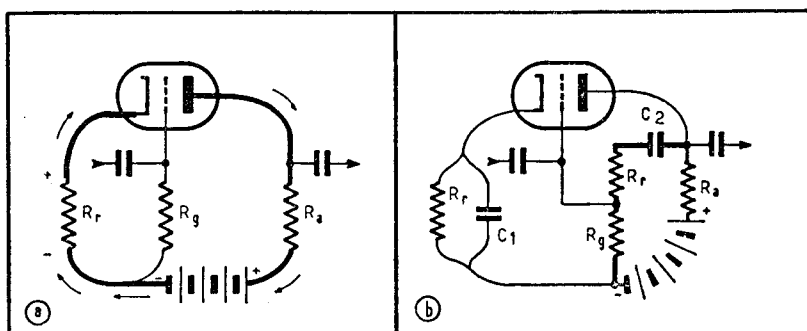
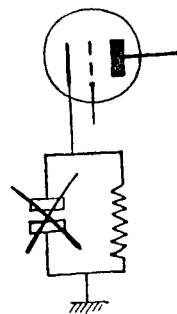
O. I. : Szóval a negatív visszacsatolás jó segítséget nyújt ilyenkor, mert a bemenetre vezetett torz jellel kijavítja a kimenőjel eltorzulásából származó zavarokat. Csakhogy a te esetében jobb volna, ha inkább egy feszültségstabilizátort iktatnál be a hálózat és a televízióvevő közé.

K. K. : Miért ? Hiszen a negatív visszacsatolás csak előnyös lehet !

Visszatérünk az elektroncsövekhez

O. I.: Nagyon fiatal vagy még, kedves barátom, nem tudod még, hogy ezen a világon mindenért meg kell fizetni. A negatív visszacsatolás csökkenti ugyan a torzításokat, ugyanakkor azonban csökkenti az erősítést is. Ezért csak olyankor alkalmazhatjuk, amikor megfelelő tartalékunk van az erősítésben. Ha már erről beszélünk, fel tudnád nekem rajzolni az elektroncsöves erősítőkből szokásos negatív visszacsatolás legfontosabb megoldásait?

K. K.: Negatív visszacsatolást létesíthetünk például úgy, hogy az anódköri tápfeszültség forrásának negatív sarka és a katód közé minden csatolásmentesítő kondenzátor nélkül beiktatunk egy R_r ellenállást. A kapcsolás ugyanaz, mint a katódköri előfeszültségejtő ellenállással, amint a legutóbbi beszél-

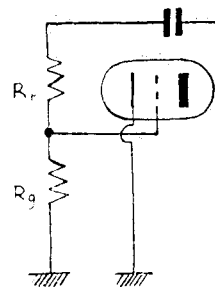


59. ábra. Negatív visszacsatolás az elektroncsöves fokozatban. Az a) ábrán a rác és az anód áramkörében levő közös R_r ellenállás hozza létre a negatív áramvisszacsatolást. A b) ábrán negatív feszültség visszacsatolást kapunk azáltal, hogy az R munkaellenálláson levő váltakozó feszültség egy részét a C_2 kondenzátoron keresztül és az R_r — R_g feszültségosztó felhasználásával a rácra vezetjük. Az ábrákon eltértünk a szokásos rajzolás módtól, hogy világosabban kitűnjék a negatív visszacsatolás mechanizmusa

getésünk alkalmával már megrajzoltam (56. ábra), csak hogy most elhagyjuk a párhuzamosan kapcsolt kondenzátort. Ennek a kondenzátornak az elvételével egyszerre minden megváltozik. Most az a helyzet, hogy amikor a bemenő feszültség hatására a rác pozitívabbá válik, az anódaáram megnő, és az R_r ellenálláson keresztül folyva megnöveli a feszültséget, úgyhogy ez negatívabb potenciálra viszi a rácot, tehát gátolni igyekszik az eredeti jel hatását.

O. I.: Hát ez csodálatos, kedves barátom. Lassanként már olyan világosan meg tudod magyarázni a dolgokat, mint ahogyan az én kedves nagybácsim magyarázta nekem annak idején a rádió alapelemeit. Valóban, az első kapcsolási rajzod szerint az anódaáram hatására jön létre a negatív visszacsatolás. Éppen ezért *negatív soros áramvisszacsatolásnak* nevezzük.

K. K.: Itt viszont *negatív párhuzamos feszültség-visszacsatolásnak* lehetne nevezni azt, ami ebben a második kapcsolásban történik. Ebben az esetben ugyanis az R_a kimeneti ellenálláson kapott váltakozó feszültséget vezetem vissza a rácra. A visszacsatolás az R_r ellenálláson keresztül jön létre. Az egyenfeszültség leválasztására természetesen be kell iktatnunk ezt a C_2 kondenzátort is.



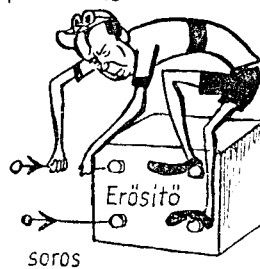
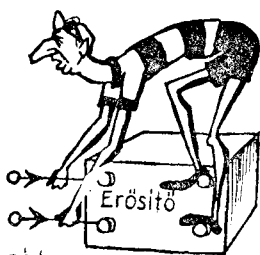
O. I. : Helyes. A teljes kimenőfeszültséget vezetted vissza a rácsra?

K. K. : Dehogy, ez túlságosan sok volna. Az R_r és az R_g ellenállás tulajdonképpen feszültségosztót alkot, úgyhogy a kimenőfeszültségből csupán az R_g ellenállásra eső rész jut a rácsra. Minthogy pedig R_r értékét R_g -nél sokkal nagyobbra vesszük, a kimenőfeszültségnek csak jelentéktelen részét fogja megkapni a rács.⁴

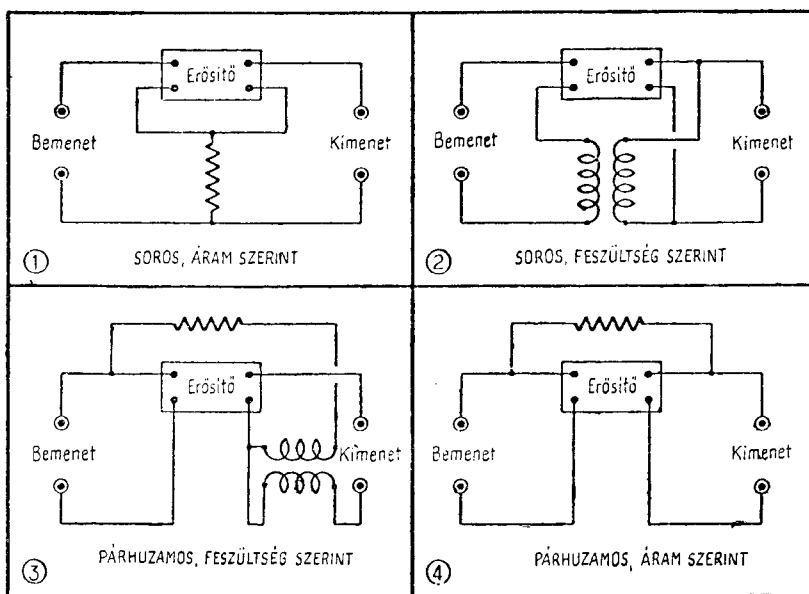
Lássuk most már a tranzisztorokat is !

O. I. : Ragyogó magyarázataiddal nagyon megkönnyítetted munkámat. Ugyanis — lám, milyen a véletlen — éppen a tranzisztoros kapcsolások negatív visszacsatolásáról akartam beszélni. Nézd, így alkalmazzuk a negatív áram- és feszültség-visszacsatolást a tranzisztoros áramkörökben. Ezeket egyébként *soros*, illetve *párhuzamos negatív visszacsatolásnak* is nevezzük.

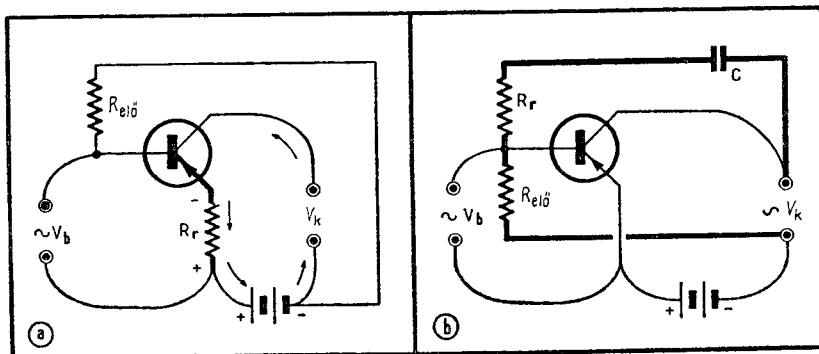
K. K. : Várj csak, hadd ismerjem ki itt magamat. Ezen az első kapcsolási rajzon az R_r ellenállás a bázis és a kollektor áramkörében is benne van. Ugyan-



⁴ A negatív visszacsatolás az itt látható ábráknak megfelelően négyféleképpen érhető el. A negatív visszacsatolást a kezdeti jellel *sorosan* vagy *párhuzamosan* vezethetjük az erősítő bemenetére, és erre a célra a kimenő áramot vagy a kimenő impedancián megjelenő feszültséget használhatjuk fel. Az első esetben *áram szerinti* visszacsatolást, a második esetben pedig *feszültség szerinti* visszacsatolást kapunk.



Ha csak egyetlen fokozatról van szó, az 1. és a 4. kapcsolás a leggyakoribb. A 2. és a 3. kapcsolás olyankor fordul elő, amikor a fokozat kimenete transzformátorhoz csatlakozik, és amikor a negatív visszacsatolást két fokozatra terjesztjük ki (mint például a 61. ábrán), amikor is feszültség szerinti soros visszacsatolást alkalmazunk.



60. ábra. Az 59. ábrán látható negatív visszacsatolások alkalmazása tranzisztorokra. Az a) ábrán negatív áramvisszacsatolást (soros negatív visszacsatolást) létesít a bázis és a kollektor áramkörében közös R_r ellenállás. A b) ábrán a negatív feszültségvisszacsatolást (párhuzamos negatív visszacsatolást) úgy kapjuk meg, hogy a kollektorfeszültség egy részét az R_r - R_{e10} feszültségosztót tápláló C kondenzátoron keresztül visszavezetjük a bázisra

ilyen megoldás volt az elektroncsöves kapcsolásban is, ahol a visszacsatoló ellenállás a rácskör és az anódkör közös ellenállása volt. Ezek szerint a hatás is ugyanaz. Ha azonban megengeded, bevált polaritásmódszerünk szerint fogok eljárni.

O. I.: Nincs semmi kifogásom ellene.

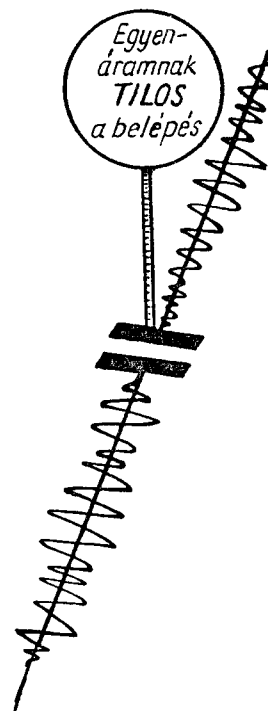
K. K.: Tétélezzük fel, hogy a bemenőjel egyik félperiódusában a bázis negatívabbá válik. Ennek hatására a kollektoráram megnő. Az R_r ellenálláson létesülő feszültségésés miatt az emitter a bázishoz képest negatívabb potenciálra kerül, vagyis — ami egyébként ugyanazt jelenti — a bázison pozitívabb lesz a potenciál, mint az emitteren. Látom már! Itt is negatív visszacsatolás van, mert az eredeti hatáshoz képest ellentétes visszahatás jött létre.

O. I.: Nagyon jól kibogoztad. De most térjünk át a másik kapcsolásra.

K. K.: Ebben az esetben egészen feltűnő a hasonlatosság az elektroncsöves kapcsolással. A bázisköri R_{e10} előfeszültségejtő ellenállást a szokásos módon alkalmaztad, hogy az R_r ellenállással együtt egy feszültségosztót kapjal a kimenő impedanciával párhuzamosan. Ilyen módon a v_k kimenőfeszültség egy tört része a bázis és az emitter közé kerül, vagyis visszajut a tranzisztor bemenetére, de persze ellentétes fázisban. A C kondenzátor viszont akadálytalanul átvezeti a váltakozó feszültséget, ugyanakkor azonban megakadályozza az egyenfeszültség átjutását, úgyhogy a bázison levő egyenfeszültség csupán az R_{e10} ellenállástól függ.

O. I.: Nagyon jó. Mellékesen megjegyezve, amennyiben a C kondenzátor kapacitása nem elég nagy, a kisebb frekvenciájú rezgések nehezebben jutnak át, úgyhogy a negatív visszacsatolás hatása a nagyobb frekvenciákon jobban érvényesül.

K. K.: Más szavakkal ez azt jelenti, hogy a mély hangokra kevésbé csökken az erősítés, vagyis kiemeljük ezzel a mély hangokat. Ilyen módon a hangszínt befolyásoljuk, de véleményem szerint nem egészen helyesen, mert a torzításokat kevésbé fogjuk kiegyenlíteni. Ha azonban azokra a rikácsoló tranziszto-





ros vevőkre gondolok, nagyon is hasznosnak tűnik a hangszín befolyásolásának ez a módja.

O. I.: Látom, hogy agysejtjeid friss foszfortöltéssel működnek. Így hát talán nem okozok nagy szellemi megerőltetést neked, ha megkérek, mondd meg, hogy a soros negatív visszacsatolás hatására mi történik a tranzisztor bemenő és kimenő ellenállásával.

Még egy kis „deltázás”

K. K.: Vegyük elő újra azokat a „deltákat”. A bemenő ellenállás a bázis-feszültség kis változásának és az ezzel előidézett kis bázisáram-változásnak a hányadosa. Itt a negatív visszacsatolás következtében a bemenő feszültség ugyanakkora változásai most már kisebb mértékben befolyásolják a bázisáramot. Más szavakkal kifejezve ugyanahhoz a ΔE_b feszültségváltozáshoz kisebb, ΔI_b áramváltozás tartozik. Ezek szerint a kettő hányadosa, ami nem más, mint a bemenő ellenállás, megnő.

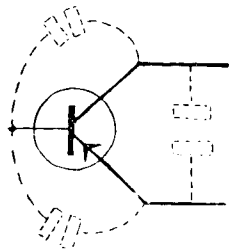
$$r_{bc} = \frac{\Delta U_b}{\Delta I_b}$$

$$r_{ki} = \frac{\Delta U_k}{\Delta I_k}$$

O. I.: Helyesen okoskodtál. De nem akarom teljesen kimeríteni agysejtjeidet, ezért inkább megmondom, hogy ez a negatív visszacsatolás a kimenő ellenállást is megnöveli, amiről az előbbi okoskodásodat tovább folytatva magad is meggyőződhetsz. Ami viszont a párhuzamos negatív visszacsatolást illeti, ennek a hatására a bemenő ellenállás csökken, és a kimenő ellenállás szintén valamivel kisebb lesz.

K. K.: Egyre ijesztőbbé válik a tranzisztor és a konyhai összekötözött edényeink közötti hasonlatosság. Mihelyt hozzányúlunk valamihez, minden mozgásba jön. Valóban szükség van erre a negatív visszacsatolásra, hiszen ezzel csak még jobban összezavarjuk a dolgokat?

O. I.: Nehogy azt hidd, csupán azért foglalkozunk vele, hogy megkeserítsük az életedet. A negatív visszacsatolással csökkentjük a torzításokat, ez viszont a tranzisztoros áramkörökben is éppen olyan fontos, mint az elektroncsöves kapcsolásainkban. Ami pedig a fázistorzítást illeti, ezeknek a csökkentése itt még fontosabb, mert az ilyen torzítások a tranzisztorokban sokkal veszélyesebbek. A hangfrekvenciás erősítők tranzisztoraiban ugyanis az emitter, bázis és kollektor közötti kapacitások viszonylag nagy értékűek. Ennek következtében erősítés közben megváltozik a jelek fázisa. Másrészt viszont a tranzisztoros áramköröket tápláló telepek — legalábbis egy bizonyos ideig — tovább használhatók, miután már csökkenni is kezd feszültségük, mert itt is kedvezően érvényesül a negatív visszacsatolás szabályozó hatása.

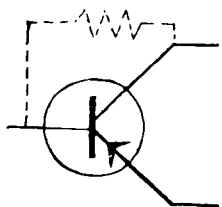


Még egy negatív visszacsatolás!

K. K.: Ez nyilvánvalóan nagyon értékes tulajdonság, és lényeges megtakarításokat eredményezhet.

O. I.: Látom, ezek a piszkos anyagi érdekek kibékítettek a negatív visszacsatolással. Jegyezd meg azonban, hogy akár akarod, akár nem, mindig számíthatsz egy láthatatlan negatív visszacsatolásra.

K. K.: Miféle rejtély ez már megint?



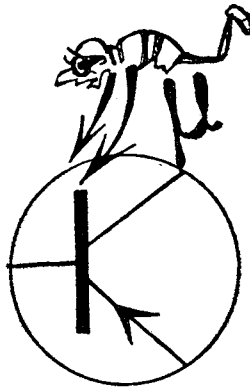
O. I.: A tranzisztornak belső *negatív visszacsatolása* is van, amit az elektrocsoncsövekről már sokkal kevésbé mondhatunk el. Ennek a belső negatív visszacsatolásnak az oka a bázis és kollektor közötti átmenet belső ellenállása, amelynek értéke néhány száz kilohm lehet.

K. K.: Miben nyilvánul meg ennek a belső negatív visszacsatolásnak a hatása?

O. I.: Abban, hogy a kimenő váltakozó feszültség egy csekély töredéke a bázisra kerül. Meg is mérhetjük, mégpedig úgy, hogy terhelés nélkül változtatjuk a kollektoron levő feszültséget, és mérjük közben a bázisfeszültségben kapott változást. U_b változása általában csak néhány tízezredrésze U_k változásának, vagyis a belső negatív visszacsatolás mértéke átlagosan 0,05 % nagyságrendű. Jele μ .

K. K.: Az a halvány sejtelmem, hogy nagylelkű voltál, és nem akartál idegesíteni a $\mu = \Delta U_b : \Delta U_k$ meghatározással, amit nagyon köszönök neked... De ha ez a μ ilyen kicsi, a belső negatív visszacsatolás csak elhanyagolható hatást válthat ki.

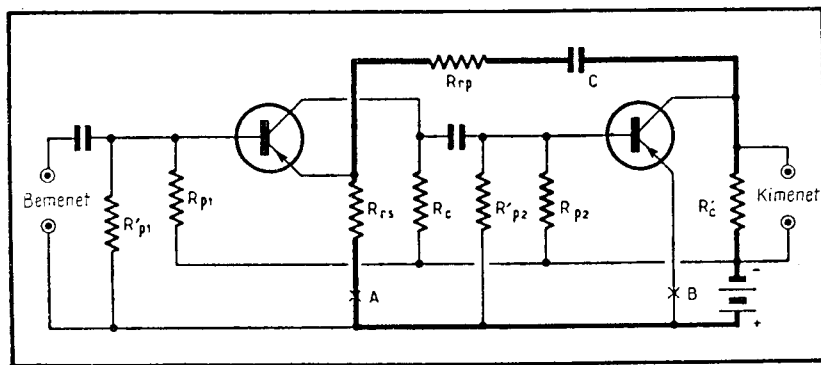
O. I.: Igen, ha a terhelő ellenállás sokkal kisebb, mint a kimenő ellenállás, ami a valóságban többnyire teljesül is.



Fázisproblémák

K. K.: Tudod, alig várom, hogy már áttérhessek a gyakorlati dolgokra. Egyébként is megígértem a nagybácsimnak, hogy összeállítok részére egy tökéletesített tranzisztoros vevőt, hadd szórakozzék vele Dakarbán, ahol a tűző napsütésben reumáját akarja gyógyíttatni. Ebbe a vevőbe egy kétfokozatú hangfrekvenciás erősítőt akarok beépíteni. Ha a kimenő feszültség egy részét visszavezetem a bemenetre, elérhetek-e vele mind a két fokozatra kiterjedő negatív visszacsatolást?

O. I.: Igen. Tudnunk kell azonban, hogy a tranzisztoros készülékekben nem szokás kettőnél több fokozatra terjeszteni ki a negatív visszacsatolást,



61. ábra. Sorosan és párhuzamosan létesített vegyes negatív visszacsatolás egy kisfrekvenciás erősítő két fokozatában

ugyanis az előbb említett belső kapacitások miatt minden egyes fokozatban megváltozik a fázis. Márpedig kettőnél több fokozattal már nem tudhatjuk, hogy is állunk tulajdonképpen.

K. K.: Vagyis előfordulhat, hogy negatív visszacsatolás helyett pozitívot kapunk?

O. I.: Bizony könnyen meglehet. De nézd meg ezt a kapcsolást, remélem elnyeri tetszésedet. Itt is kétfokozatú hangfrekvenciás erősítőt láthatsz, a két fokozat között ellenállással és kapacitással létesítünk csatolást. A kimenő feszültséget megcsapoltam, hogy a C kondenzátoron keresztül és az R_p és R_s ellenállás felhasználásával visszavezethessem egy részét az első tranzisztor emitterére.

K. K.: Hogyan? Miért nem a bázisra, mint ahogy az egyfokozatú erősítőben csináltad?

O. I.: Mert mindegyik fokozatban megfordul a fázis. Két fokozat után visszkapjuk a bemenetre vezetett feszültség fázisát, tehát nem szabad a bázisra kapcsolnunk ezt a feszültséget (pozitív visszacsatolás, vagyis rettenetes begerjedés következne be). Ha viszont az emitterre vezetjük feszültségünket, jó negatív visszacsatolást kapunk, ezenkívül az R_s ellenállással egy további soros negatív visszacsatolást is létesítünk az első fokozatban.

K. K.: Nagyszerű, így minden világos. Ez a kapcsolás éppen jó lesz nagybácsim részére.



A meleg csak a reumára jó

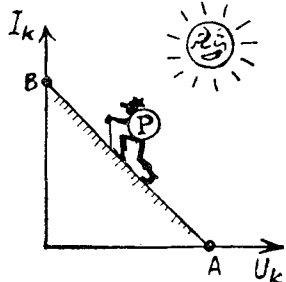
O. I.: Félek, hogy nem. A trópusi napsütés csak a nagybácsidnak lesz előnyös, a készüléknek annál kevésbé.

K. K.: Persze, persze, a félvezetőkre hátrányos a meleg. Talán mondjam meg neki, hogy rakjon egy jeges tömlőt a vevőre? Egyébként azonban mennyiben változna meg a vevő működése, ha a melegedés következtében megnő az áramerősség?

O. I.: Megígértem, hogy ma már nem beszélünk jelleggörbékről, annyira telítődöttél tőlük. De képzeld csak el, a kezdeti kollektoráram megkétszereződik, valahányszor a hőmérséklet 8° -kal emelkedik. Amikor tehát a tranzisztor 0° -ról $+40^\circ$ -ra melegszik fel, az áram értékének harminckétszeresére nő meg. A melegedés hatására megnövekedő kollektoráram miatt minden I_k -görbénk feljebb emelkedik. 20° -ról 40° -ig a kollektoráram könnyen megkétszereződhet. Így tehát a munkapont (amely, amint már megbeszéltük, ott van, ahol a terhelésgyenes metszi az adott bázisfeszültségnek vagy bázisáramnak megfelelő jelleggörbét) már nem marad meg a terhelésgyenes közepén, hanem egyszerűen eltolódik balra, mégpedig olyan mértékben, amilyen meredek általában a jelleggörbe. Vége a szép szimmetriánknak! Oda a tökéletesen lineáris erősítésünk!

K. K.: Rettenetes! Le vagyok sújtva... na de nem egészen. Ismerem már a módszeredet: először rám ijesztesz, hogy utána — mint a bűvész a cilindereből elővarázsolt nyulacskájával — eláruld a titkot, amivel minden rendbejön. Gyerünk, mutasd meg már azt a nyusztit.

O. I.: Már megmutattam. Most is a negatív visszacsatolás segít a bajon.



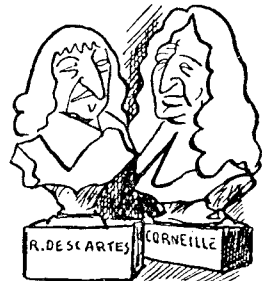
A torzításokon kívül a hőmérséklet-ingadozásoktól származó lassú változások hatásának megszüntetésére is felhasználható.

K. K.: Így tehát a már megbeszélte negatív visszacsatoló áramkörökkel egyúttal a hőmérsékleti hatásokat is kiegyenlíthetjük?

O. I.: Igen, legalábbis egy bizonyos mértékben, és amikor egyenáramokról van szó (tehát a 60/b és a 61. ábra szerinti kapcsolásban nem). Általában azonban ilyenkor valamilyen hatásosabb negatív visszacsatolásról kell gondoskodnunk.

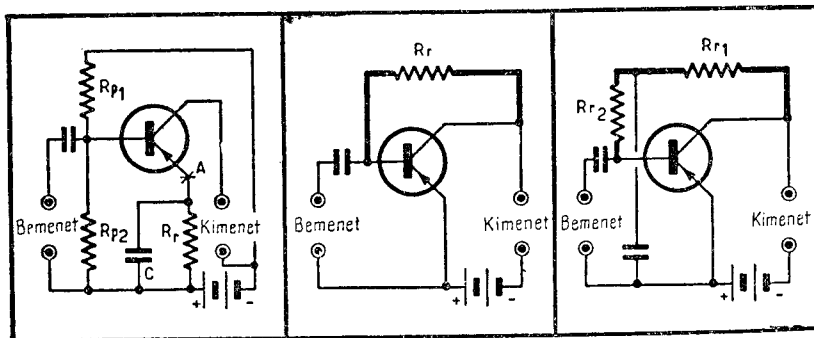
K. K.: Csakhogy akkor túlságosan megviseli felerősítendő jeleinket, és a kellenél nagyobb mértékben csökkenti az erősítést. Hogyan jutunk ki ebből a Corneille-féle csávából?

O. I.: Úgy, hogy Descartes módszerét követjük, és különválasztjuk a nehézségeket és a ténykedéseket. Hagyjuk hát a felerősítendő jeleket helyesbítő negatív visszacsatolás ellenállásait, és foglalkozunk azokkal az ellenállásokkal, amelyek kiegyenlítik majd a hőmérsékleti hatásokat. Itt soros negatív visszacsatolást is alkalmazhatunk.



Még egy kis „apróság”

K. K.: Nem látom be, miért volna ez más, mint a váltakozó feszültségű soros negatív visszacsatolás kapcsolása. Csupán a C kondenzátor jelent valami eltérést.

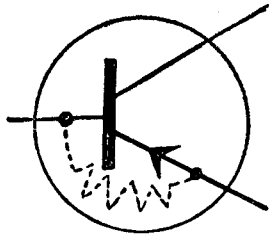
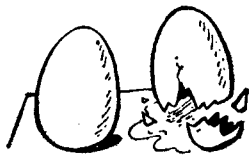


62. ábra. A hőmérsékletváltozások hatásának kiegyenlítése soros negatív visszacsatolással. A bázis előfeszültsége az R_{p1} – R_{p2} feszültségosztóval állítható be

63. ábra. A hőmérsékletváltozások hatásának kiegyenlítése párhuzamos negatív visszacsatolással

64. ábra. A 63. ábrához hasonló séma a váltakozó áramú összetevő levágásával

O. I.: Éppen ez a kis „apróság” változtat meg mindent. Ennek a kondenzátornak ugyanis nagy a kapacitása (általában elektrolit kondenzátorról van szó), tehát a váltakozó áramok útjában sokkal kisebb impedanciát okoz, mint az R_r ellenállás. Ezért az utóbbin csak az egyenáram folyik keresztül, tehát csak az egyenáramban érvényesül a negatív visszacsatolás hatása.



K. K.: Tényleg! Olyan egyszerű és szellemes, mint a Kolumbusz tojása. De mit tegyek, ha egyidejűleg váltakozó áramú negatív visszacsatolást is el akarok érni?

O. I.: Ebben az esetben az A pontban sorba kapcsolhatsz az R_1 ellenállással egy másik visszacsatoló ellenállást, de most már kondenzátor nélkül.

K. K.: Világos. Lehetne itt is alkalmazni a párhuzamos negatív feszültség-visszacsatolás elvét?

O. I.: Miért ne. Ekkor azonban el kell hagyni a kondenzátort, amelynek éppen az egyenáram leválasztása volt a feladata. Ilyen módon a kollektor egyenfeszültségének és váltakozó feszültségének egy részét vezetjük a bázisra.

K. K.: Csakhogy nem látom, hol van az ehhez szükséges feszültségosztó másik ága.

O. I.: Persze, hogy nem látod, hiszen ez a másik ág a tranzisztor bázisa és emittre közötti ellenállás. És ha még tovább akarsz tökéletesíteni a kapcsolást — amire minden okod meglehet —, a C csatolásmentesítő kondenzátorral megszüntetheted a visszacsatoló ellenállás egy részén a váltakozó áramú összetevőt. Ebben az esetben a visszacsatoló ellenállást a sorba kapcsolt R_{11} és R_{12} alkotja. Ez egyben kitűnő csatolásmentesítést biztosít.

K. K.: De ne felejtsük meg szegény nagybácsimról; ha jól értem, a hőmérsékleti hatásokat úgy szüntethetem meg, hogy ellenállást iktatok be az A és a B pontban (61. ábra).

O. I.: Igen, de az első ellenállást egy nagy kapacitású kondenzátorral csatolásmentesíteni kell, nehogy túlságosan nagy mértékűvé váljék a visszacsatolás. De még nem említettem meg neked az egyik igen elegáns eljárást, amelylyel védekezni lehet a félvezetők hőmérsékletfüggésének kellemetlen következményei ellen. Ennek lényege éppen ennek a hőmérsékletfüggésnek a hasznosítása.

A hátrányok hasznosítása

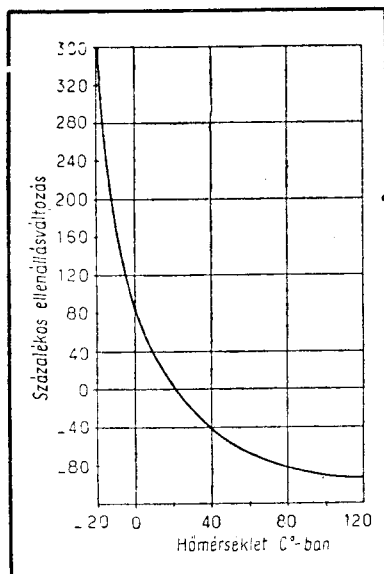
K. K.: Komolyan beszélsz? Az ebmarást kutyaszőrrel akarsz meggyógyítani?

O. I.: Pontosan erről van szó. A melegítés hatására megnő a félvezetőkben folyó áram, ami azt jelenti, hogy a hőmérséklet emelkedésekor csökken az ellenállásuk. Ennek alapján P vagy N típusú félvezetők közül olyan ellenállások készíthetők, amelyeknek ellenállásértéke a hőmérséklet emelkedése közben igen rohamosan csökken. Itt láthatod egy ilyen hőmérsékletfüggő ellenállás, úgynevezett *termisztor* jellegű görbét. A termisztorok negatív hőmérsékleti tényezőjű ellenállások. Amikor a hőmérsékletet 20° -ról 40° -ra növeljük, ennek a termisztornak az ellenállása a görbe szerint körülbelül 45% -kal csökken. 60° -on az eredeti érték felét sem éri el.

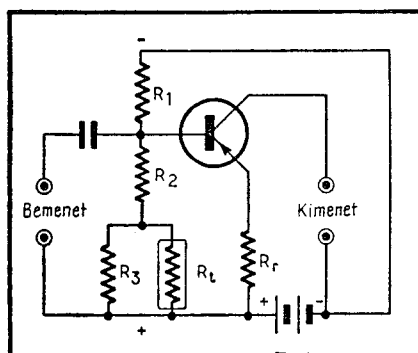
K. K.: Ez az ellenállás tehát nem bírja a meleget. Kíváncsi vagyok, hogyan akarsz felhasználni éppen a meleg káros hatásának kiegyenlítésére.

O. I.: Nagyon egyszerűen úgy, hogy beiktatom a bázis előfeszültségét szolgáltató feszültségosztóba. Ennek egyik ága az R_1 ellenállás. A másik ág már bonyolultabb: az R_1 termisztorral párhuzamosan kapcsoltam az R_3 ellenál-

65. ábra. A termisztor ellenállásának hőmérsékletfüggése. A görbén a 20 C° hőmérsékleten mért ellenállásra vonatkozó százalékos értékeket tüntettük fel



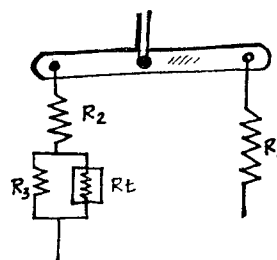
66. ábra. A hőmérsékletváltozások hatásának kiegyenlítése a bázispotenciált változtató R_t termisztorral



lást, és mind a kettővel sorosan beiktattam az R_2 ellenállást is. Mármost vajon mi történik a melegedéskor?

K. K.: Csökken a termisztor ellenállása, tehát csökkeni fog az R_2 , R_3 és R_t ellenállásokból álló ág eredő ellenállása is. Minthogy azonban R_1 nem csökken (de az is lehet, hogy kissé megnő a hőmérséklettel), a bázis potenciálja eltolódik a kevésbé negatív értékek felé. Ennek hatására viszont csökken a kollektoráram. Hát ez óriási!

O. I.: Amint látod, az életművészet abból áll, hogy a hibákat erénnyé változtassuk. Ezt csináltuk itt is.



K. K.: De miért kellett bonyolultabbá tenni a kapcsolást ezzel az R_2 és R_3 ellenállással?

O. I.: Hogy pontos kiegyenlítést érhessek el. Ezeket az ellenállásértékeket pontosan ki kell számítani. Ha azonban a termisztor jelleggörbéje pontosan megfelel kívánságainknak, az egyik vagy a másik ellenállást esetleg el lehet hagyni.

K. K.: Úgy érzem, bennem is csökken az ellenállás, nagyon felmelegedett az agyam.

O. I.: Akkor hát hagyjuk, hadd pihenjen.

Kilencedik beszélgetés

Az előző beszélgetés során megismerkedhettünk az erősítésre használt tranzisztorok viselkedésével. Részletesen megvizsgáltuk a legszokásosabb kapcsolást, amelyben az erősítendő jeleket a bázis és az emitter közé kapcsoljuk, erősítés után pedig a kollektorról és az emitterről vesszük le. Ez a megoldás a klasszikus elektroncsöves kapcsolásoknak felel meg. Ezenkívül azonban, akár csak az elektroncsövekkel, bizonyos esetekben célszerűen felhasználhatók más kapcsolások is. Érdekes lesz ezeknek a felépítését és működését is tisztázni, mielőtt rátérnénk a gyakorlati kapcsolásokra, amelyekről a későbbi beszélgetések során lesz szó.

Összefoglalás: Elektroncsöves kapcsolások földelt katóddal, földelt ráccsal vagy földelt anóddal. — Közös emitteres, közös bázisú és közös kollektoros tranzisztoros kapcsolások. — A három alapkapsolás áramerősítése és feszültségerősítése. — Bemenő és kimenő ellenállásuk. — A jellemző adatok áttekintő táblázata.

Közös emitter. Közös bázis. Közös kollektor

A véletlen szerepe a találmányok történetében

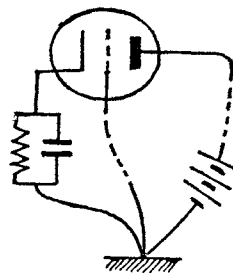
K. K.: Vajon hogyan lehetséges az, hogy a tranzisztort több mint negyven évvel később találták fel, mint az elektroncsövet? Az első tekintetben egyszerűbbnek tűnik néhány szennyezést bevinni a félvezetőbe, mint vákuumot létesíteni az üvegbura alatt, izzítani a katódot, amely majd elektronokat bocsát ki magából egy rácson keresztül az anód felé.

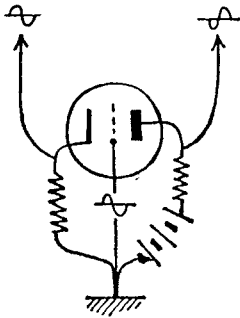
O. I.: A találmányok történetében a véletlen is szerepet játszik. Előfordulhatott volna, hogy a tranzisztort hamarabb találják fel, mint az elektroncsövet. A cinkitkristályos detektorokkal kísérletező Loszevnek, egy orosz technikusként már 1922-ben sikerült készülékével villamos rezgéseket előállítania és felerősítenie. Ebből a találmányból azonban (az úgynevezett kristáldinből) nem lett semmi. Ha viszont a tranzisztort korábban találták volna fel, mint az elektroncsövet, a rádiócsövek feltalálását kétségtelenül nagy tökéletessítésnek tekintették volna... A különböző tranzisztoros alapkapsolásokat alkalmazták volna a triódákra is, és kidolgozták volna a földelt katódos, földelt rácós és földelt anódos kapcsolást.

K. K.: Mit jelent ez a sok földelés?

Az elektroncsövek három alapkapsolása

O. I.: Bizonyára jól tudod, hogy a „föld”, vagyis a „test” itt a rögzített potenciálú pontot jelenti. Az elektroncsöves kapcsolásokban ez az a pont, ahol a rác és az anód áramköre végződik.

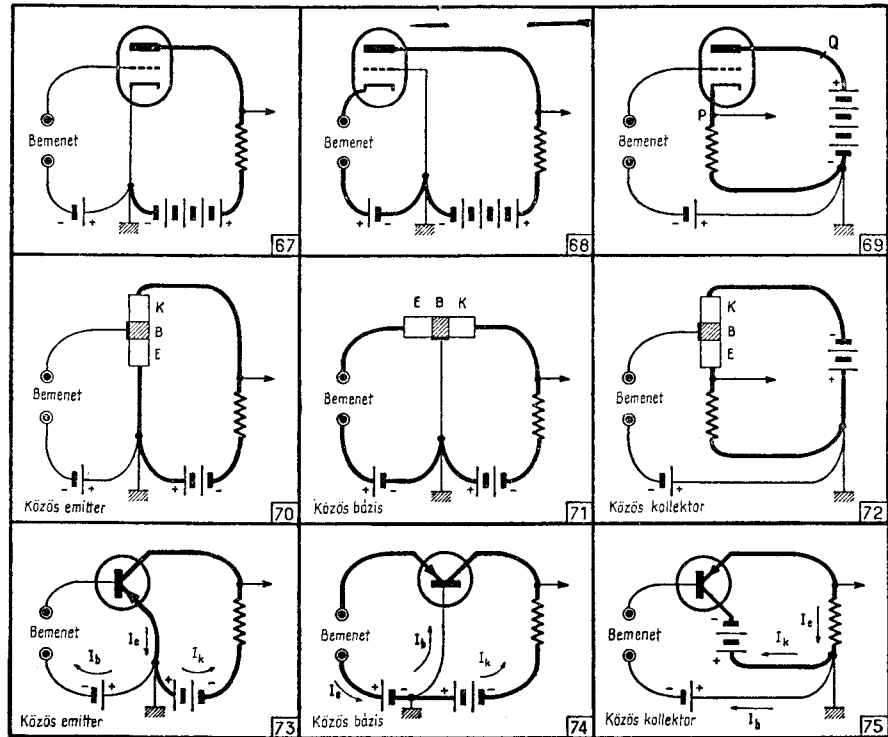




K. K.: Nekem úgy rémlik, hogy ezt a két áramkört mindig a katódhoz csatlakoztatjuk.

O. I.: A leggyakoribb esetben, az úgynevezett földelt katódos kapcsolásban valóban ez a helyzet (még akkor is, ha a katód és a föld közé beiktatunk egy előfeszültségejtő ellenállást, mert az utóbbit a váltakozó áram szempontjából mindig rövidre zárja egy kondenzátor). De a földelt rácós kapcsolásról talán elfelejtkeztél?

K. K.: Valóban, erről is beszélgettünk, amikor a frekvenciamodulációról



67. ábra. A három alapkapsolás legközönségesebbike : a földelt katódos kapcsolás

68. ábra. Földelt rácós kapcsolás

69. ábra. Földelt anódos kapcsolás, a katódkövető

70. ábra. A leggyakoribb alapkapsolás ; a közös emitteres kapcsolás

71. ábra. A közös bázisú kapcsolás. Ez a legrégebb

72. ábra. Közös kollektoros kapcsolás

73–74–75. ábra. A tranzisztorok három alapkapsolását így ábrázolva jól látható, hogy a közös pontban az I_e emitteráram két részre oszlik ; az egyik rész az I_b bázisáram, a másik az I_k kollektoráram

volt szó. A nagyobb frekvenciájú jelek erősítésére használatos, így jobban lehet választani a bemeneti áramkört a kimeneti áramkörtől, ugyanis a rács ilyenkor a védő árnyékolás szerepét tölti be. Ebben a kapcsolásban a katódot használjuk vezérlő elektródának.

O. I.: Van egy harmadik lehetőség is, mégpedig az, hogy az anódot kötjük össze a testtel (természetesen az anódköri tápforráson keresztül), vagyis az anódpotenciált rögzítjük, a bemenőjelet a rács és a test közé kapcsoljuk, a felerősített feszültséget pedig a katód és a test közé beiktatott terhelő ellenálláson kapjuk meg.

K. K.: Furcsa egy kapcsolat. A terhelő ellenálláson persze itt is az anódiáram folyik keresztül, úgyhogy feltétlenül megkapjuk rajta a felerősített feszültséget.

O. I.: Nem volt helyes erősítésről beszélnem, ugyanis ennek az úgynevezett katódkövető fokozatnak az erősítése kisebb 1-nél. A terhelő ellenállás negatív visszacsatolást idéz elő, úgyhogy erősítés helyett inkább gyengül a jel.

K. K.: Így hát ennek a kapcsolásnak nincsen semmi értelme?

O. I.: Dehogy nincs! Mindenekelőtt jegyezd meg magadnak, hogy a terhelő ellenálláson megjelenő feszültség ebben a P pontban azonos fázisú a rácsra vezetett feszültséggel.

K. K.: Persze éppen ez az oka a nagy negatív visszacsatolásnak.

O. I.: Igen. Ha viszont beiktatunk egy második terhelő ellenállást a Q pontban, vagyis ugyanúgy, ahogyan a földelt katódos kapcsolásokban szokásos...

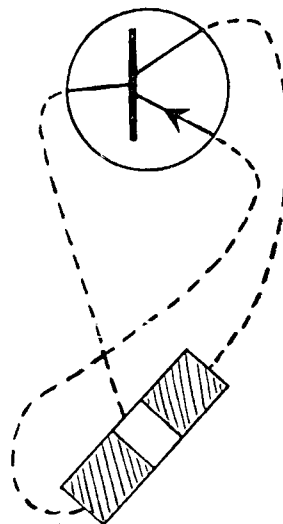
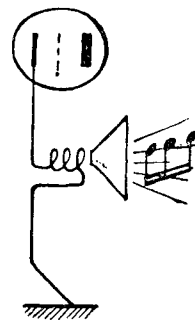
K. K.: ... ebben a pontban olyan feszültséget kapunk, amely ellentétes fázisú a bemeneti jellel. Így tehát egyetlen csővel két, egymással ellentétes fázisú feszültséget állíthatunk elő. Milyen praktikus lehet ez a kapcsolat olyankor, amikor ellenütemű fokozatban két csövet akarunk vezérelni!

O. I.: Ez csak az egyik felhasználási módja. Olyankor is használatos azonban, amikor kis kimenő ellenállásra van szükség. Képzeld csak el, a katódkörbe helyezett terhelő ellenállást sokkal kisebbre kell venni, mint az anódkört. Ilyen módon például a végerősítő csövet közvetlenül csatlakoztathatjuk a hangszóró lengőtekercséhez, nem kell impedanciaillesztő transzformátort beiktatnunk, amivel jelentős torzításoktól szabadulunk meg.

K. K.: Teljesen meggyőztél a katódkövető kapcsolásod előnyeiről. De kiismerlek már, és látom, hová akarsz kilyukadni ezekkel a dolgokkal. Ha már olyan hévvel meséltél nekem az elektroncsövek e három alapkötéséről, ezt bizonyára azért tetted, hogy rátérhess a megfelelő tranzistoros kapcsolásokra.

Tranzistoros változatok

O. I.: Nem lehet semmit eltitkolni előtted. Jól gondoltad, e három kötés mindegyikének a tranzistorok egy-egy meghatározott felhasználási módja felel meg. Hogy jobban lásd a dolgokat, a megfelelő kapcsolásokat kétféleképpen rajzolom meg. Először egy kis rudacskaival ábrázolom a tranzisztort, mint ahogyan kezdetben tettük. Így jobban láthatod az áram útját a tranzistor három rétegében; néha szinte sajnálom, hogy nem ez lett a tranzistor álta-



lános rajzjele. Utána ugyanazokat a kapcsolásokat a szokásos módon rajzolom meg. Itt is azonban, ahelyett, hogy gondosan ügyelnék a szokásos kapcsolási rajzok vízszintes és függőleges vonalvezetésére, inkább igyekszem jól kidomborítani a báziskört és a kollektorkört. Hogy még világosabb legyen minden, az elektroncsövek *anódkörét* és a tranzisztorok *kollektorkörét* vastag vonallal ábrázolom.

K. K.: Ezek a rajzok valóban egyáltalán nem hasonlítanak a szokásos kapcsolási rajzokra. Na de legalább egyszerűbbnek látszanak. Amint látom, itt is három lehetőség van: vagy az emittert, vagy a bázist, vagy a kollektort földeljük.

O. I.: Úgy van. Minthogy azonban végeredményben nem a földelésen van a hangsúly, ezt a három kapcsolást *közös emitteres, közös bázisú, illetve közös kollektoros kapcsolásnak* is nevezzük.

K. K.: Ezekben a kapcsolásokban a lényeg persze az, hogy a tranzisztor valamelyik rétege közös a bemeneti és a kimeneti körre. Úgy vagyok vele, mint az a jámbor atyafi, aki nem tudta, hogy prózában beszél, mert fogalma sem volt róla, mi a próza. A közös emitteres kapcsolásról már eddig is beszélünk, de nem tudtam, hogy ezt így nevezik.

O. I.: Valóban már sok szó volt erről a kapcsolásról, ugyanis ez a leggyakoribb.

K. K.: Ugyanúgy nyilván, mint az elektroncsöves fokozatok közül a földelt katódos kapcsolás.

O. I.: Magától értetődik. Tudod, ha ezt a kapcsolást helyesen alkalmazzuk, mind az áramban, mind pedig a feszültségben, tehát egyúttal a teljesítményben is igen nagy erősítést érhetünk el. Emlékszel ugye, hogy ebben a közös emitteres kapcsolásban a kimenő feszültség ellentétes fázisú a bemenő feszültséggel, és hogy a bemeneti ellenállás néhány száz ohm, míg a kimenő ellenállás néhány-szor tíz kiloohm lehet.



Erősítő volna?

K. K.: Mindez már jól bevésődött az agyamba. De engedd meg, hogy neki-vágjak ennek az ismeretlen vidéknek, és megpróbáljam magamtól kibogozni most a közös bázisú kapcsolás működését. A bemenő feszültséget itt is az emittter és a bázis közé kapcsoljuk. Csakhogy most az emittter lesz a vezérlő elektroda, a bázis passzív marad. Ha a bemenetre kerülő jel pozitívabb potenciálra viszi az emitttert, a bázisáram és ezzel együtt a kollektoráram is megnő. Ennek hatására megnő a terhelő ellenálláson létesülő feszültségesés, tehát a kimenő potenciál pozitívabbá válik. Kétségtelen, hogy a kimenő feszültség itt fázisban van a bemenő feszültséggel.

O. I.: Okoskodásod mindenben helyes, csak kissé hiányos. Azon ugyanis nem gondolkodtál, hogy mekkora itt az áramerősítés.

K. K.: Valami itt megzavar. A bemenő áramkörben az I_e emittteráram folyik, a kimenő körben azonban csak az I_k kollektoráramot kapom meg, és ez valamivel kisebb, mert az emittteráram (amint a kapcsolási rajzon jól látható) két részre oszlik: az I_b bázisáramra és az I_k kollektoráramra. Ami pedig fennáll az áramokra, kis változásaikra is igaz marad. Így hát az áramerősítés.

vagyis a kimenő áram kis mértékű ΔI_k változásának és a bemenő áram kis mértékű ΔI_e változásának az aránya kisebb lesz 1-nél, ugyanis I_e nagyobb, mint I_k . Erősítés helyett inkább csillapítást kapunk.⁵

O. I.: Igen. Ezt α betűvel jelöljük, míg a közös emitteres kapcsolásra vonatkozó áramerősítés jele β .

K. K.: Nem logikus, hogy a görög ábécé első betűjét éppen a kevésbé használatos kapcsolásra alkalmazzuk.

O. I.: Ennek történeti oka van. Először csak a tüérintkezős tranzisztorokat ismerték, az ilyen tranzisztorok viszont csak közös bázisú kapcsolásban működtek stabilan. Időben tehát ez a kapcsolat a legelső, és ezért a gyárak gyakran megadják erre a — már elavult — tranzisztoros kapcsolásra is a jellemző adatokat.

K. K.: Végeredményben tehát ez a közös bázisú kapcsolat — bár tisztelni kell az öregeket — nem nyújt semmi előnyt, hiszen erősítés helyett csak csillapít.

Nemcsak történeti kuriózum

O. I.: Lám, az új nemzedékre jellemző elhamarkodott, de azért határozottan levont következtetések milyen veszélyesek lehetnek! A közös bázisú kapcsolat igen sok esetben nagyon is előnyös. Nagyobb frekvenciákat érhetünk el vele, mint más kapcsolásokkal. Egyébként azonban kitűnő erősítést is adhat.

K. K.: Csak nem akarsz ugratni? Erősítésnek nevezed azt is, ami csillapítás?

O. I.: Ne csak az áramerősítésre gondolj. Ennél fontosabb lehet esetleg a feszültségerősítés, de még inkább a teljesítményerősítés. Már pedig ebből a szempontból a helyzet kedvezőbb. Hogy ezt magadtól is belásd, elárulom, hogy a közös bázisú kapcsolat bemenő ellenállása nagyon kicsi: a tranzisztortípustól függően 30 és 500 ohm között van.

K. K.: Ebben nincs semmi meglepő, hiszen a bemenő ellenállás a bemenő feszültség kis mértékű változásának és az ezzel előidézett áramváltozásnak

⁵ Ezt az „erősítést”, amelyet α betűvel jelölünk, könnyen kifejezhetjük, ha megfigyeljük, hogy

$$\alpha = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_e} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_k + \Delta I_b},$$

ugyanis $\Delta I_e = \Delta I_k + \Delta I_b$.

Ha a számlálót és a nevezőt is ΔI_b -vel osztjuk, azt kapjuk, hogy

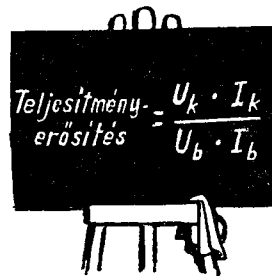
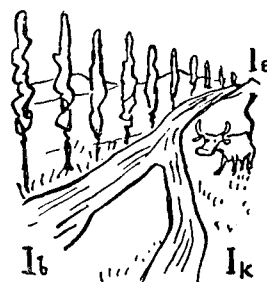
$$\alpha = \frac{\Delta I_k / \Delta I_b}{\Delta I_k / \Delta I_b + 1}.$$

Amint látjuk, α kisebb 1-nél. Tudjuk azonban, hogy $\Delta I_k / \Delta I_b$ nem más, mint a közös emitteres kapcsolat β áramerősítése. Eszerint

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}.$$

Ha a tranzisztor β áramerősítése igen nagy, α értéke közel 1, vagyis ebben az esetben a kimenő áram nagyjából ugyanolyan mértékben változik, mint a bemenetre vezetett áram.

⁷ Ez a tranzisztor





az aránya. Itt az emitteráramról van szó, ez viszont nagymértékben változik. Következésképpen a hányados nagyon kicsi.

O. I.: Úgy van. Ugyanakkor azonban a kimenő ellenállás megohm nagyságrendű, igen nagy értéket érhet el.

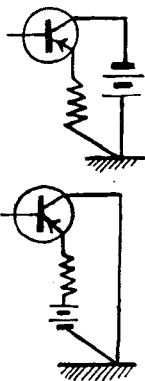
K. K.: Ez igen! Így már értem, hogy az a kimenő áramváltozás, amely lényegileg megegyezik a bemenő áram változásával, sokkal nagyobb feszültséget hoz létre ezen a nagy kimenő ellenálláson, mint amekkora a bemeneten keletkezik. Így valóban nagy feszültségerősítést kell kapnunk.

O. I.: Meg is kapjuk. Esetleg több ezerszereset. Éppen ezért a teljesítményerősítés is nagy lehet. A baj csak az, hogy nem tudjuk kellőképpen kihasználni.

K. K.: Mintha csak a forróvizet zuhany után hirtelen hideg vizet zúdítottál volna a nyakamba! Már éppen megváltoztattam a véleményemet a közös bázisú kapcsolásról, amikor most ilyen mondasz róla. Miért?

O. I.: Mert a közös bázisú fokozatot aligha követhetik további fokozatok, hiszen ezek bemenő ellenállása sokkal kisebb volna kapcsolásunk kimenő ellenállásánál. Ilyen módon elvesz a nagy kimenő ellenállásnak köszönhető erősítés minden előnye.

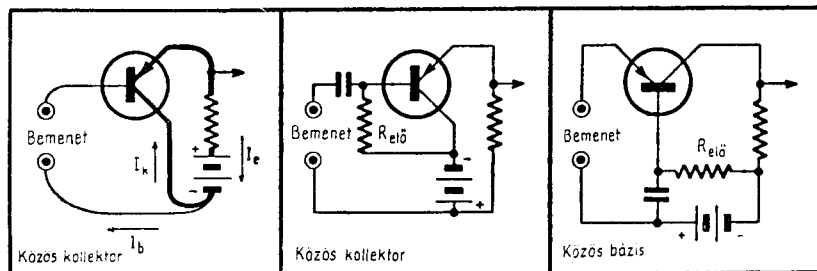
A harmadik kapcsolás



K. K.: Hát akkor végeztünk is ezzel a szerencsétlen közös bázisú kapcsolással, többet hallani sem akarok róla. Remélem, hogy a közös kollektoros kapcsolásban nem fogok ennyire csalódnai.

O. I.: Mielőtt a részletekbe bocsátkoznánk, tudnod kell, hogy ennek két változata van aszerint, hogy a kollektorköri telepet a kollektor és a föld vagy pedig a terhelő ellenállás és a föld közé kapcsoljuk. Akár így, akár úgy járunk el, az eredmény ugyanaz marad, de a második változatban a bázis az emitterhez képest automatikus előfeszültséget kap.

K. K.: Eszerint az első változatban még egy telepet kell beiktatnunk az előfeszültség előállítására?



76. ábra. A közös kollektoros kapcsolás egy lehetséges változata. A 75. ábrán bemutatott kapcsolástól csak a kollektorfeszültség tápforrásának helyzetében különbözik

77. ábra. Az előfeszültség előállítása a 75. ábra szerinti kapcsolásban

78. ábra. Az előfeszültség előállítása a 74. ábra szerinti kapcsolásban

O. I. : Szó sincs róla ! A meglevő telep negatív sarka és a bázis közé helyezett egyszerű R_{e16} feszültségejtő ellenállás tökéletesen megfelel erre a célra, akár csak a közös emitteres kapcsolásban. Egyúttal mindjárt megmutatom, hogyan állítjuk elő a gyakorlatban a közös bázisú kapcsolás előfeszültségét.

K. K. : Mindenesetre ez rokonszenvesebb, mint a két telep az előző elméleti kapcsolásaidban, amelyek legfeljebb a telepeket gyártó vállalatnak okoznak örömet. De térjünk csak vissza a közös kollektoros kapcsolásunkra. Látom, itt sem változik meg a kimenetre érkező feszültség fázisa. Ha a bázison negatívabbá válik a potenciál, megnő az emitteráram erőssége, tehát nagyobb feszültségesés jön létre, aminek következtében az emitter kevésbé lesz pozitív, vagyis negatívabbá válik.

O. I. : Helyes. A három kapcsolás közül csak a közös emitter esetén fordulhat meg a jelek fázisa. Most lássuk, mi van az áramerősítéssel.

K. K. : Itt a bemeneten a bázisáram folyik, ennek erőssége mindig kicsi. A kimeneten viszont megkapjuk áramaink legnagyobbikát, az emitteráramot. Következésképpen itt még nagyobb áramerősítést kell kapnunk, mint a közös emitteres kapcsolásban. Nem kifogásolod, ha továbbra is a görög ábécéhez folyamodva ezt az erősítést a γ betűvel jelölöm?⁶

O. I. : Azt hiszem, a jó görögök sem kifogásolnák. Látom, nagyon megnyerte a tetszésedet ez a kapcsolás, amely ilyen jól erősít. Szabad hát újra a nyakadba zúdítanom egy kis hideg vizet, hogy lehűtsem fiatalos lelkesedésedet?

K. K. : Érzem, megint gonosz akarsz lenni és mindjárt kijelented, hogy itt a belső ellenállások ellentétesek a közös bázisú kapcsolás ellenállásaival, és így a szép áramerősítésünkkel semmire sem megyünk.

O. I. : Nem titkolom, ez a szomorú valóság. A közös kollektoros kapcsolás tulajdonképpen a katódkövető fokozat tranzisztoros megfelelője, úgyhogy itt is a bemenő ellenállás elérheti az 1 M Ω -ot, míg a kimenő ellenállás nagyon kicsi, alig 50—500 Ω .

K. K. : Minden az ellenkezője annak, amit a közös bázisú kapcsolásban látunk. Tehát semmilyen erősítést sem kapunk sem a feszültségben, sem a teljesítményben?

O. I. : Semmit vagy majdnem semmit. Ezt könnyen beláthatod, ha megfigyeled, hogy a terhelő ellenállás itt erős negatív visszacsatolást idéz elő. Amikor a bemenő jel hatására az egyik félperiódusban a bázis az emitterhez képest negatívabbá válik, megnő az emitteráram, és ennek következtében az emitter potenciálja negatív irányban eltolódik, ami gátolni igyekszik a bemenő jel hatását.

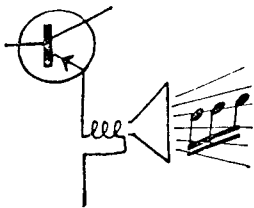
⁶ Közös kollektoros kapcsolásban az áramerősítés ;

$$\gamma = \frac{\Delta I_e}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_k + \Delta I_b}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} + \frac{\Delta I_b}{\Delta I_b} = \beta + 1.$$

Amint látjuk, a közös kollektoros kapcsolás áramerősítése valamivel nagyobb, mint a közös emitteres kapcsolásé. A három alapkapsolás áramerősítése között a következő egyszerű összefüggés áll fenn :

$$\alpha \cdot \gamma = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_e} \cdot \frac{\Delta I_e}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} = \beta.$$



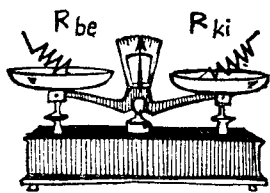


K. K.: Akkor hát mire jó ez a kapcsolás, ha nem képes megfelelő feszültség-erősítésre?

O. I.: Olyankor alkalmazzák, amikor például egy teljesítménytranszisztor kivezérléséhez nagy áramra van szükség, vagy amikor a kis kimenő ellenállással jobb impedanciaillesztést lehet elérni, például amikor közvetlenül akarjuk táplálni a hangszóró lengőtekercsét.

K. K.: Látom, itt is érvényesül a régi igazmondás: legjobb az arany középút. A tranzisztorok világában kétségtelenül a közös emitteres kapcsolás halad ezen a középúton: a bemenő és a kimenő ellenállásának is jó közepes értéke van, úgyhogy nemcsak az áramban, hanem a feszültségben és a teljesítményben is megfelelő erősítésre képes.

O. I.: Igazad van. A bemenő és a kimenő ellenállás értéke olyan, mint egy mérleg két serpenyője. A közös emitteres kapcsolásban ez a mérleg körülbelül egyensúlyban van, közös bázis esetén a bemenő ellenállás serpenyője mélyen lesüllyed, közös kollektorral viszont felemelkedik a kimenő ellenállás serpenyőjéhez képest. És — ha megígéred, hogy nem mondom el senkinek — elárulok egy nagy titkot: a bemenő ellenállás és a kimenő ellenállás $R_{be} \cdot R_{ki}$ szorzata adott tranzisztor esetén változatlan marad, bármelyik alapkapcsolásról van szó.



K. K.: Így például ha a közös emitteres kapcsolásban $R_{be} = 500 \Omega$ és $R_{ki} = 20\,000 \Omega$, a szorzat $10\,000\,000$. Ugyanezzel a tranzisztorral közös bázisú kapcsolásban mondjuk $R_{be} = 50 \Omega$ bemenő ellenállást kaptunk; ebben az esetben — mivel a szorzat állandó marad — a kimenő ellenállás $R_{ki} = 200\,000 \Omega$ lesz. Ha pedig a közös kollektoros kapcsolásban $R_{be} = 200\,000 \Omega$, a kimenő ellenállásnak kell 50Ω -nak lennie. Ha megengeded, egy táblázatban összefoglalom a három alapkapcsolás fontosabb jellemzőit, hogy könnyebben összehasonlíthassuk őket.

O. I.: Kitűnő ötlet. De ezzel be is fejezhetjük mai, igen hasznos beszélgetésünket.⁷



⁷ Az előző lábjegyzetben levezettük a három alapkapcsolásnak megfelelő három áramerősítési tényező közötti egyszerű összefüggést, amely szerint

$$\beta = \alpha \cdot \gamma, \text{ vagyis } \alpha = \beta / \gamma$$

A következő táblázatban megadjuk, hogyan fejezhetők ki az egyes áramerősítési tényezők a másik kettővel.

Kapcsolás	Közös emitter	Közös bázis	Közös kollektor
Közös emitter	β	$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$	$\beta = \gamma - 1$
Közös bázis	$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$	α	$\alpha = \frac{\gamma - 1}{\gamma}$
Közös kollektor	$\gamma = 1 + \beta$	$\gamma = \frac{1}{1 - \alpha}$	γ

Kapcsolás	Közös emitter	Közös bázis	Közös kollektor
Kapcsolási rajz			
Bemenő ellenállás (r_{be})	$\frac{\Delta U_b / \Delta I_b}{200 - 2000 \Omega}$	$\frac{U_{\Delta c} / \Delta I_e}{30 - 1500 \Omega}$	$\frac{\Delta U_b / \Delta I_b}{0,2 - 1 M\Omega}$
Kimenő ellenállás (r_{ki})	$\frac{\Delta U_k / \Delta I_k}{10 - 100 k\Omega}$	$\frac{\Delta U_k / \Delta I_k}{0,5 - 2 M\Omega}$	$\frac{\Delta U_c / \Delta I_c}{50 - 500 \Omega}$
Áramerősítés	$\beta = \Delta I_c / \Delta I_b$ 20–200	$\alpha = \Delta I_c / \Delta I_e$ 1-nél kisebb	$\gamma = \Delta I_e / \Delta I_b$ 20–200
Feszültségerősítés	Több százszoros	Több százszoros vagy több ezeres	kb. 1-szeres
Teljesítményerősítés	Több ezeres	Több százszoros	Több száz tizedes
A kimenő feszültség fázisa a bemenő feszültség fázisához képest	Ellentétes	Egyező	Egyező
Felhasználása	Általános. Erősítő és fázisváltó	Igen nagy frekvenciákon. Nagy impedancia előtt	Kis bemeneti impedancia előtt

79. ábra. A három tranzisztoros alapkapsolás legfontosabb jellemzőinek összefoglaló táblázata

Két levél

A tranzisztoros kapcsolásokban az impedanciaillesztés éppen olyan jelentős (vagy talán még fontosabb) szerepet játszik, mint az elektroncsövek területén.

Kíváncsi kis barátunknak nehézségei vannak, nem egészen érti ezeket a dolgokat, mert kissé hiányosak az elektrotechnikai alapismeretei. Okos barátja segíteni akar neki, és elmagyarázza ezeket az elemi fogalmakat, amelyeknek alaposabb megértése bizonyára sok technikusnak nehézséget okoz... (Természetesen nem akarunk senkire célozni, és ha a nyájas olvasó tudja, mit jelent az impedanciaillesztés, ne fárassza magát ezeknek a leveleknek az elolvasásával.)

***Összefoglalás:** Generátor és fogyasztó. — Elektromotoros erő és belső ellenállás. — Kapocsfeszültség. — Feszültségvezérlés. — Áramvezérlés. — A legkedvezőbb energiaátadás feltételei. — Impedanciaillesztés. — A transzformátor alkalmazása. — A legkedvezőbb transzformátorátvitel.*

Illesztési kérdések

A Kis Kíváncsi levele az Okos Ifjúhoz

Kedves Barátom!

Kellemetlen influenzám miatt nem tudlak személyesen felkeresni, ami azonban nem akadályoz meg abban, hogy tovább gondolkozzam mindarról, amiről legutóbb beszélgettünk.

Így rájöttem, milyen nagy jelentőséget tulajdonítsz a bemenő és a kimenő ellenállások kérdésének. Ezeknek az ellenállásoknak az értéke attól függ, hogy milyen kapcsolást választunk. Amikor ezekről a kérdésekről beszélgettünk, többször is visszatértél az ellenállások illesztésére (?).

Bevallom, nem nagyon értettem meg beszélgetésünknek ezt a részét. Úgy érzem magam, mintha lyukakat tartalmazó P típusú félvezető volnék: hiányosságaim vannak!

Nem tudnád valamilyen rekombinációval kitölteni ezeket a lyukakat és megszüntetni hiányosságaimat? Nagyon hálás lennék, ha megtennéd. Addig is ölel barátod

a Kis Kíváncsi

Az Okos Ifjú válasza

»Szegény kis Barátom!

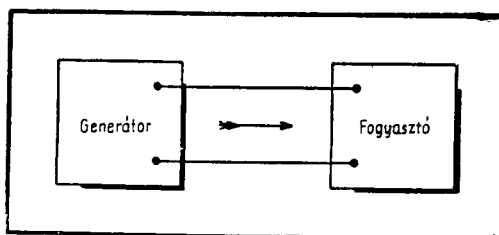
Mennyi szerencsétlenség egyszerre! Influenza, lyukak...

Az orvoságok megszabadítanak influenzádtól. A magam részéről én megpróbálok a másik bajodon segíteni.

Az ellenállások (és általában az impedanciák) illesztése valóban nagyon fontos kérdés, azon leszek hát, hogy mindent jól megérts.

Mindazokban a kapcsolásokban, amelyeket még meg kell beszélnünk, az a helyzet, hogy a villamos energiát minél kevesebb veszteséggel, minél takarékosabb módon kell továbbadni az egyik egységről a másikra. Más szóval ez azt jelenti, hogy a lehető legnagyobb hatásfokra kell törekednünk.

80. ábra. A generátor és a fogyasztó közötti energiaátadás legáltalánosabb alakja



Mindig van tehát egy egység, ahonnan az energia kiindul, és egy másik egység, ahova az energia megérkezik. Az első ebből a szempontból az energiaforrás, a generátor. Ha viszont a generátor szemével nézzük a dolgokat, a másik egység, amely az energiát átveszi, a fogyasztó. Van tehát egy energiaszállító és egy energiafogyasztó.

Ne vedd rossz néven, hogy ilyen nagyképpen hangoztatok egyszerű igazságokat. Tulajdonképpen mindig találkozhatsz ezekkel az energiaszállítókkal és energiafogyasztókkal. Zseblámpád eleme is energiaforrás, és az ezzel táplált kis izzólámpa a fogyasztója. Az erőművekben levő generátorok energiaforrást alkotnak, a fogyasztó pedig ebben az esetben az elosztóhálózatra kapcsolt motorok, világítólámpák és fűtőtestek sokasága.

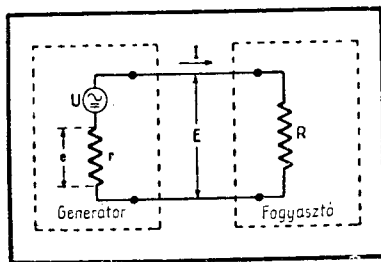
Hasonlóképpen a rádióvevődben levő antennakör olyan generátornak tekinthető, amelynek fogyasztója a hozzá csatlakoztatott nagyfrekvenciás előerősítőcső bemenőköre. Ugyanígy a végerősítőcső a generátor, a hangszóró a fogyasztó.

A tranzisztoros kapcsolásokban is az egyes tranzisztorok kimenete a generátor, viszont a következő fokozat bemenete ennek a generátornak a fogyasztója.

De miért szaporítsam a példákat? A lényeg az, hogy a generátort két mennyiség jellemzi:

1. *Elektromotoros ereje.* Ez az a legnagyobb feszültség, amelyet a generátor a kapcsain előállíthat; ha úgy tetszik, a mozgató erő... Ez a feszültség van a generátor kapcsain, amikor nem veszünk ki belőle semmilyen áramot.

2. *Belső ellenállása.* Minden generátor önmagában is bizonyos akadályt, ellenállást állít a benne folyó áram útjába. Ezt az ellenállást általánosabban a generátor impedanciájának nevezzük.



81. ábra. A generátor egyirányú vagy váltakozó irányú U elektromotoros ereje I áramot létesít az r belső ellenálláson és az R fogyasztói ellenálláson keresztül. Az r ellenálláson e feszültségesés létesül, a fogyasztói ellenálláson pedig megjelenik az E feszültség

A generátorral előállított áram ezen az r belső ellenálláson természetesen feszültségesést létesít, és ez a feszültségesés csökkenti a generátor kapcsain megjelenő és az R fogyasztói ellenállásra vezetett E feszültséget. Így tehát az E feszültség kisebb, mint az U elektromotoros erő, mégpedig annál nagyobb a kettő közötti különbség, mennél nagyobb az I áram. Ha nem folyik áram, a generátor kapcsain megjelenő feszültség nyilvánvalóan megegyezik az elektromotoros erővel. Ilyenkor azt mondjuk, hogy a generátor üresjárásban van, vagy hogy a fogyasztói ellenállás végtelen nagy.

Remélem, nem fog felszökni a lázad, ha most megfigyeled a következő, egészen egyszerű számítást. Az áramkör teljes ellenállása $r + R$, tehát Ohm törvénye szerint az áramerősség:

$$I = \frac{U}{r + R}$$

Az r belső ellenállás mentén ez az áram

$$e = \frac{U r}{r + R}$$

feszültségesést létesít.

Az R fogyasztói ellenállás mentén létrehozott feszültségesés viszont:

$$E = \frac{U R}{r + R}$$

Ha van még annyi erő benned, hogy ceruzát végy a kezvedbe, add össze ezt a két feszültséget. Megállapíthatod, hogy a két feszültség összege

$$e + E = U,$$

amint előre várhattuk. Amint látod, az elektromotoros erő két feszültségre oszlik: az egyik az e belső feszültségesés, a másik pedig a fogyasztóra kerülő E feszültség, vagyis a generátor kapcsain megjelenő feszültség. Ez az eloszlás követi a generátor és a fogyasztó ellenállásarányát.

Ha a generátor belső ellenállása a fogyasztói ellenálláshoz képest nagyon kicsi, a belső feszültségesés szintén kicsi lesz. Ebben az esetben az E kapcsolófeszültség majdnem ugyanolyan nagy, mint az U elektromotoros erő. Ilyenkor a változó elektromotoros erő a fogyasztói ellenálláson mint változó feszültség jelenik meg, úgyhogy úgynevezett *feszültségvezérléssel* van dolgunk.

Vegyük most az ellenkező esetet: képzeljük el, hogy a generátor r belső

ellenállása sokkal nagyobb a fogyasztói ellenállásnál. Ebben az esetben nagy feszültségesés létesül a generátor belsejében, úgyhogy a kapcsokon megmaradó E feszültség — amelyet a fogyasztói ellenállásra vezethetünk — sokkal kisebb, mint az U elektromotoros erő. A hatás ilyenkor az, hogy az I áramerősség lesz arányos U -val, és nem függ az R értékétől. Ebben az esetben *áramvezérlésről* beszélhetünk.

A tranzisztoros áramkörökben mind a két szélső eset előfordulhat. Általában azonban itt is az arany középut a legelőnyösebb.

A csövek közötti csatolással a lehető legnagyobb feszültséget akarjuk továbbadni a következő fokozat bemenetére. Itt nagyon előnyösek a viszonyok, mert az elektroncső rácsa és katódja közötti bemenet általában végtelen nagy ellenállású. Ilyen módon az egész elektromotoros erő a bemenetre kerül, ami feszültségvezérlésnek felel meg, hiszen a feszültséggel vezérlünk.

A tranzisztoros áramkörökben más a helyzet. Itt már nem egyszerűen csak feszültséget, hanem *teljesítményt* kell a bemenő áramkörre vezetnünk, mert bármilyen kapcsolást alkalmaznánk, áram folyik a bemeneten. Közönségesen szólva, a csövek feszültséggel is beérik, a tranzisztorok viszont, amikor feszültséget vezetünk rájuk, áramot is fogyasztanak. Márpedig a feszültség és az áram szorzata teljesítményt jelent.

A teljesítménycsátolás kérdése nem olyan egyszerű. Ítéld meg magad.

A fogyasztóra a legnagyobb teljesítményt, vagyis a lehető legnagyobb feszültségen a lehető legnagyobb áramot akarjuk átadni.

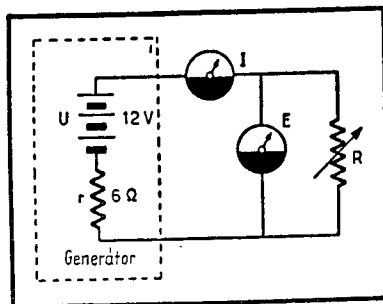
Figyeljük meg, mekkora fogyasztói ellenállással kapjuk meg a legkedvezőbb eredményt.

Ha ez az ellenállás a generátor belső ellenállásához képest kicsi, az áramerősség nagyobb lesz. Ez előnyös. Ugyanakkor azonban a feszültség, amelyet ezen a fogyasztói ellenálláson kapunk, csökken, mert megnőtt a generátor belsejében létesülő feszültségesés. Ez már rossz.

Vegyük az ellenkező esetet. Legyen most a fogyasztói ellenállás sokkal nagyobb, mint a generátor belső ellenállása. Ekkor (akárcsak az elektroncsövek esetében) majdnem az egész elektromotoros erő a fogyasztóra kerül. Ez jó. Csakhogy most meg az áram nagyon kicsi. Ez már rossz!

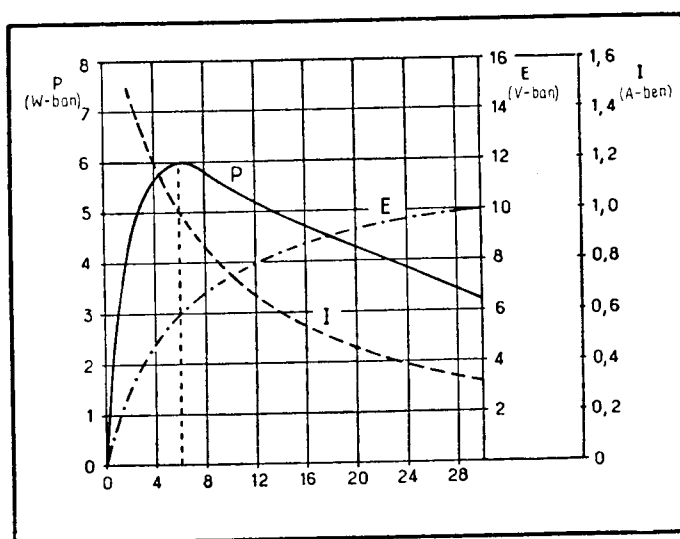
Magadtól is rájöhetsz, hogy itt is az arany középutat kell választanunk: a fogyasztói ellenállás nem lehet sem nagyobb, sem kisebb, mint a generátor ellenállása. Másképpen kifejezve, ez azt jelenti, hogy *az energiátadás akkor a legkedvezőbb, amikor a fogyasztó ellenállása megegyezik a generátor belső ellenállásával.*

82. ábra. A 83. ábrán látható görbék felvételéhez összeállított kísérleti kapcsolás. A generátor r belső ellenállását a telep rajzjelétől különválasztva tüntettük fel, a valóságban azonban ez az ellenállás a telepen belül van. A mérésekhez kis ellenállású I ampermérőt és nagy ellenállású E voltmérőt kell használnunk, nehogy meghamisítsuk az áramok és a feszültségek értékét



Ha ez a feltétel teljesül, azt mondjuk, hogy az ellenállásokat (vagy általánosabban szólva az impedanciákat) illesztettük.

Hogy teljesen meggyőztelek ennek a megállapításnak a helyességéről, szerettem egy áramforrást (egy generátort), amelynek elektromotoros ereje $U = 12$ V, belső ellenállása pedig $r = 6 \Omega$, ehhez a generátorhoz egy R fogyasztói ellenállást és megfelelő mérőműszereket csatlakoztattam, majd R változtatása közben mértem a terhelésre átadott P teljesítményt, a kivett I áramot és az E kapocsfeszültséget (82. ábra). Amint a felvett görbéken láthatod (83. ábra), R növelése közben I csökkent, E pedig növekedett. P szorzatuk rohamosan növekszik, $R = r = 6 \Omega$ esetén maximumot ér el, majd lassan csökken. Ugye meggyőző?



83. ábra. Az R ellenállásra átadott P teljesítmény változása az ellenállásérték változtatásakor. E az ellenállás kapcsain levő feszültség, I pedig az ellenállásban folyó áram. P , E és I értékeit különböző skálák szerint mértük fel

Ne hidd azonban, hogy a legkedvezőbb energiaátadásra vonatkozó követelmény mindig a generátor és a fogyasztó impedanciájának egyenlőségét írja elő. Egyéb kívánságaink is lehetnek, például jó lineáritásra törekszünk, és ilyenkor esetleg eltérő impedanciákat választhatunk.

Érzem, most hirtelen megkérdeznéd: hogyan köthetünk össze nagyobb energiapazarlás nélkül két olyan egységet, amelynek impedanciája nagyon különbözik egymástól.

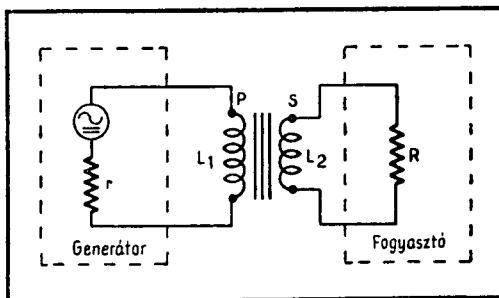
Valóban, hogyan vezérelhetünk egy kis bemenő ellenállású tranzisztort egy nagy kimenő ellenállású tranzisztorral? Hogyan vihetjük át a nagy belső ellenállású végerősítőcső teljesítményét a hangszóró lengőtekercsére? Hogyan lehet vezérelni a kis impedanciájú elektrodinamikus hangszedővel a végtelen nagy bemenő ellenállású erősítőcsövet?

A választ magad is megadhatod: régi ismerősünkkel, a transzformátorral

illeszthetjük az impedanciákat. A transzformátort ilyenkor mint *impedancia-illesztőt* használjuk. Helyes illesztést természetesen a primér és a szekundér tekercsben levő menetek arányának megfelelő megválasztásával érjük el.

Magától értetődik, hogy a primér tekercs impedanciáját a generátor belső ellenállásához kell illesztünk, vagyis ennek a két impedanciának egyenlőnek kell lennie egymással. Ugyanígy a szekundér tekercs impedanciájának a fogyasztói ellenállással kell egyeznie. Elegendő persze az arányokkal törődnünk.

84. ábra. Ha a generátor és a fogyasztó különböző impedanciájú, a kettő közé megfelelő áttételű illesztő-transzformátort kell beiktatni



Amint tudod, a tekercsek impedanciáját úgy kapjuk meg, hogy induktitásukat megszorozzuk a $2\pi f = \omega$ körfrekvenciával. Ha tehát a primér és a szekundér tekercs induktivitását L_1 , illetve L_2 betűvel jelöljük, az

$$\frac{r}{R} = \frac{\omega L_1}{\omega L_2} = \frac{L_1}{L_2}$$

arányosságra kell törekedni.

Bizonyára emlékszel arra is, hogy a tekercsek induktivitása arányos a menetszám négyzetével. Ha a primér és a szekundér tekercs menetszáma N_1 , illetve N_2 , felírhatjuk, hogy

$$\frac{r}{R} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$

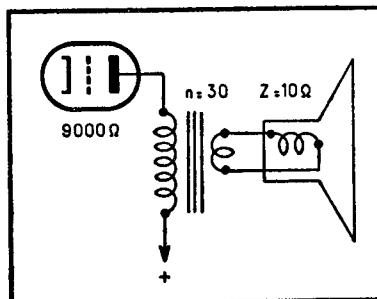
Mi azonban az N_1/N_2 hányados? Emlékezz csak vissza, ez nem más, mint a transzformátor áttétele, n . Így tehát az előző összefüggést az

$$\frac{r}{R} = n^2, \text{ vagyis } n = \sqrt{\frac{r}{R}}$$

alakban írhatjuk.

Ezt az eredményt jól jegyezd meg magadnak. Vegyünk például egy végerősítőcsövet, amelyhez 9000Ω -os terhelő ellenállást kell alkalmaznunk. Ha ezzel a végerősítő fokozattal hangszórót akarunk működtetni, és a hangszóró lengőtekercsének impedanciája 10Ω , a hangszóró elé olyan transzformátort kell beiktatnunk, amelynek áttétele:

$$n = \sqrt{\frac{9000}{10}} = \sqrt{900} = 30.$$



85. ábra. Feszültségcsök-
kentő transzformátorral il-
lesztjük a hangszóró lengő-
tekercsének kis impedanciá-
ját a végerősítőcső nagy
belső ellenállásához

Ezzel azonban be is fejezem levelem. Sok a jóból is megárt, és nem akarom,
hogy hiába szedd az aszpírint.
Jobbulást kíván barátod

az Okos Ifjú«

Tizedik beszélgetés

Előző beszélgetéseik során barátaink a különálló tranzisztorok viselkedésével foglalkoztak, most viszont már rátérnek a tranzisztorok társadalmi életére. A közös készülékekben levő különböző tranzisztorok között a csatolóáramkörök létesítenek kapcsolatot. Ezeknek az áramköröknek kell átvenniük a következő tranzisztorra az előző fokozat kimenetéről levett energiát. Amint kiderül, az elektroncsöves kapcsolásokban szokásos klasszikus csatoló áramkörökön kívül itt számos egyéb megoldás is alkalmazható. Ezek a megoldások a tranzisztorok sajátágaiból következnek. Kíváncsi barátunk először meglepődik, majd meglepetése lelkesedésbe csap át...

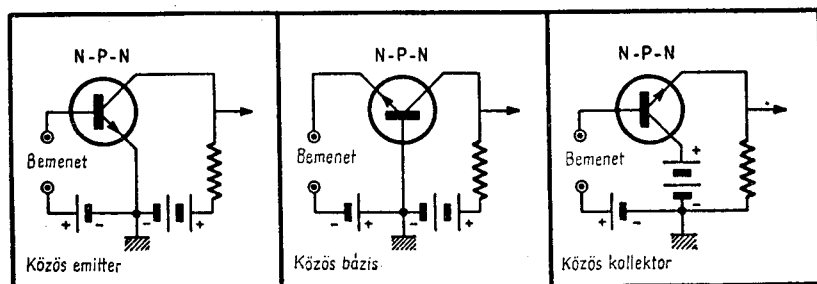
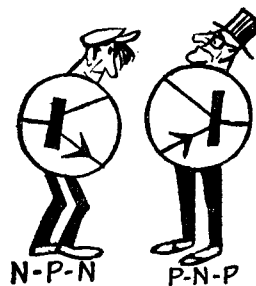
Összefoglalás: Az $N-P-N$ tranzisztor alapkapsolásai. — A transzformátoros csatolás előnyei és hátrányai. — A hangerősség szabályozása. — Ellenállással és kapacitással létesített csatolás. — A csatolókapacitás kapacitása. — Közvetlen csatolás. — Egyenáramú erősítő. — Kiegészítő tranzisztorok. — Tandemkapcsolású tranzisztorok

Különböző csatolások

K. K.: Az utóbbi időben már csak a $P-N-P$ tranzisztorokról beszéltél, az $N-P-N$ típusúakkal pedig úgy bántál, mintha szegény rokonok volnának.

O. I.: Ennek két oka van. Az első ok az, hogy a gyakorlatban többnyire $P-N-P$ típusú tranzisztorokat alkalmazunk, a másik pedig, hogy mindaz, amit a $P-N-P$ típusútról mondunk, az $N-P-N$ típusúra is érvényes, ha a tápforrásokban és esetleg az elektrolitkondenzátorokon megváltoztatjuk a polaritást.

K. K.: Így is tettem, amikor a legutóbb megbeszélt három alapkapsolást az $N-P-N$ tranzisztorokra alkalmaztam. Ezeket a rajzokat az ágyban készíttettem, amíg beteg voltam.



86. ábra. Az $N-P-N$ típusú tranzisztorok három alapkapsolása. Figyeljük meg a telepek polaritását

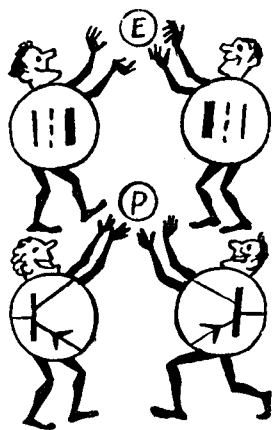
O. I.: Azért nem kell túlzásba vinni semmit. Mindenesetre annyit megállapíthatok, hogy kapcsolási rajzaid teljesen hibátlanok, tehát ez az influenza nem nagyon befolyásolhatta szellemi képességeidet.

K. K.: Remélem is, mert nagyon jó volna már rátérni a teljes erősítők és a teljes vevők kapcsolásaira. Egyébként azt hiszem, hogy mindazt, amit az elektroncsövekkel tettünk, a tranzisztorokkal is megvalósíthatjuk, csak hogy persze nem szabad elfelejtenünk az utóbbiak bemenő és kimenő ellenállásának értékéről.

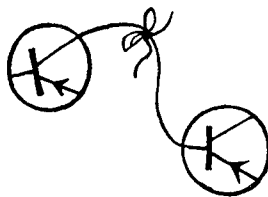


Alapvető eltérés

O. I.: Igazad is van és nem is. A normandiaiak szoktak adni ilyen kétértelmű válaszokat, de mindjárt megmagyarázom a dolgokat. Az elektroncsöves kapcsolásokban használatos csatolóáramkörök természetesen a tranzistoros kapcsolásokban is jól alkalmazhatók. Csakhogy a kétféle kapcsolat között egy lényeges különbség is mutatkozik: az elektroncsöves készülékekben minden egyes fokozat felerősített feszültséget továbbít a következő fokozatra, csak a — többnyire szintén feszültséggel vezérelt — végerősítő fokozatnak kell teljesítményt szolgáltatnia. Ezzel ellentétben a tranzistoros készülékek fokozatai teljesítményt erősítenek, és ezt a felerősített teljesítményt vezetik további erősítés végett a következő fokozatra. Ilyen módon a tranzistoros vevőkészülék olyan láncolata a fokozatoknak, amelynek mentén fokozatosan növekszik a teljesítmény.



K. K.: Belátom, ez valóban megváltoztatja a viszonyokat. Leveledben világosan megmagyaráztad, hogy amennyiben a lehető legnagyobb feszültséget akarjuk a fogyasztói ellenállásra vezetni, nagy ellenállásértéket kell választanunk. Pontosan erre törekszünk az elektroncsövek közötti csatolásokban. Ott valóban erre van szükség, mert a csövek bemenő ellenállása végtelen nagy. A tranzisztorainkkal azonban a lehető legnagyobb energiát akarjuk átvinni. Ennek érdekében olyan fogyasztói ellenállásra van szükségünk, amelynek értéke megegyezik a generátor belső ellenállásának értékével. Márpedig a három alapkapcsolásban, amelyekről már beszéltünk, a kimenő ellenállás meglehetősen eltér a bemenő ellenállástól. Ebből vaslogikámmal arra következtetek, hogy az impedanciák illesztésére mindenképpen transzformátort kell alkalmaznunk. Eszerint a tranzisztorok egyetlen lehetséges csatolási módja a transzformátoros csatolás.



O. I.: Lám, a fiatalos hév megint mennyire elragadott! Lehet, hogy kiábrándítalak, de a tranzisztorok körében ugyanilyen jogos az ellenállásos (általánosabban véve az impedanciás) csatolás is. Az is lehetséges egyébként, majd meglátod, hogy elhagyunk minden csatolóelemet, és a fokozat kimenetét közvetlenül kapcsoljuk össze a következő fokozat bemenetével.

K. K.: Hogyan? Egyszerűen egy huzaldarabbal?

A transzformátor előnyös tulajdonságai és hátrányai

O. I.: Bizony. De vegyük csak sorra a dolgokat, minthogy pedig annyira rokonszenvezel a transzformátorral, kezdjük hát ezzel. Megemlítetted egyik jó tulajdonságát, nevezetesen azt, hogy a transzformátorral tökéletesen illeszthetjük az egyik fokozat kimenő impedanciáját a következő fokozat bemenő impedanciájához. Ilyen módon a legnagyobb energiát tudjuk továbbítani. Van azonban a transzformátornak más előnye is. Tekercseinek kis ohmos ellenállása eléggé jelentéktelen feszültségesést idéz elő, úgyhogy kis tápfeszültségeket tudunk alkalmazni. Főként pedig azt ne felejtse el, hogy a primér vagy a szekundér tekercs, vagy esetleg egyidejűleg mindkét tekercs illesztésével megfelelő szelektivitást érünk el a nagyfrekvenciás és a középfrekvenciás fokozatokban, sőt, a csatolás mértékének változtatásával középfrekvencián a kívánt sávzsélességet is beállíthatjuk.

K. K.: Na látod, a transzformátornak csak előnyös tulajdonságai vannak. Nem tudom, miért...

O. I.: Várj csak, nézzük meg az érem másik oldalát is. Mindenekelőtt az a helyzet, hogy bármilyen mértékben haladunk előre a miniatürizálással, a transzformátor nagyobb helyet foglal el, mint az ellenállásból és kapacitásból álló csatolás, legalábbis olyankor, amikor hangfrekvenciákról van szó, ugyanis nagyfrekvencián és középfrekvencián semmilyen más csatolással nem pótolható. A hangfrekvenciák területén tapasztalható versengésben a transzformátor egyébként az ár szempontjából is hátrányosabb helyzetben van, mint az RC-csatolás.

K. K.: Végeredményben tehát ilyen kicsinyes hely- és pénztakarékoskodás miatt kell feláldoznunk?

O. I.: A tranzisztoros készülékek tervezői nem lehetnek önzetlen emberbarátok, minthogy pedig egyre kisebb és kisebb készülékeket követelnek tőlük, a kétféle megtakarítás elérésére kénytelenek lemondani a transzformátorról. Egyébként egy járulékos hátrányról még nem is beszéltünk; ez akkor mutatkozik meg, amikor a transzformátort nagy erősítésű erősítők bemenetén akarjuk alkalmazni.

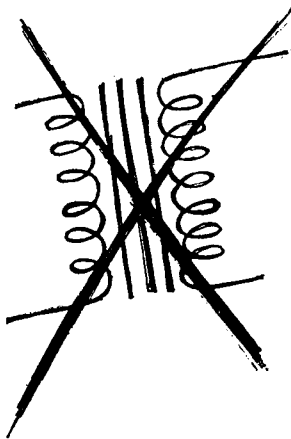
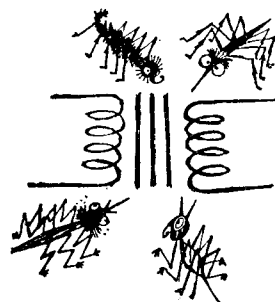
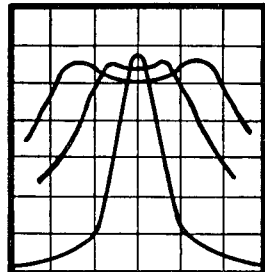
K. K.: Ugyan mi ez a hátrány?

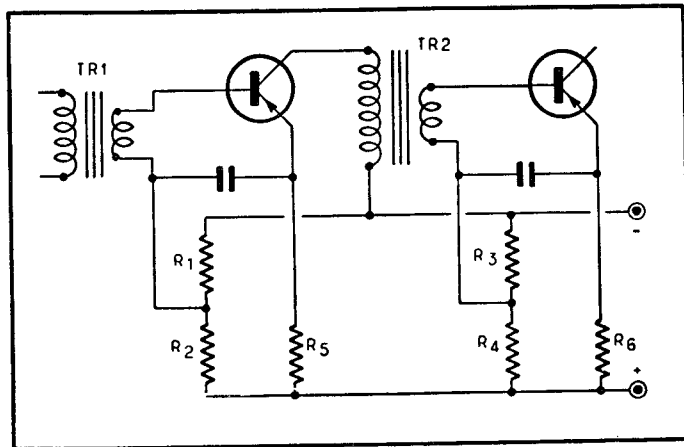
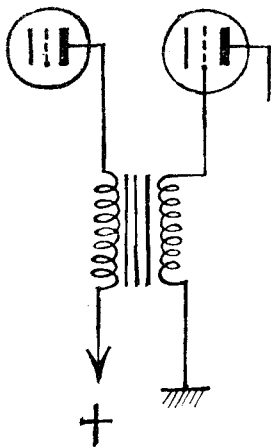
O. I.: A paraziták módjára viselkedő zavaró terek is indukálnak feszültségeket a tekercsekben, és erősítés után ezek a feszültségek kellemetlen zavarokat okozhatnak. Olyan helyeken tehát, ahol erős zavaró erőterek vannak, semmiképpen sem alkalmazhatunk transzformátort.

A gyakorlati kapcsolások

K. K.: Mennyi sok bűn nyomja szerencsétlen transzformátoromnak a lelkét!... Megtudhatnám azért végre, hogyan alkalmazzák mégis, amikor ezek a takarékosági szempontok és zavaró erőterek nem tiltják meg a használatát?

O. I.: A kapcsolás lényegileg ugyanaz, mint az elektroncsöves készülékekben. Amint látod, ezen a rajzon közös emitteres kapcsolásban két tranzisztoros fokozatot tüntettem fel. Az első tranzisztor a TRI transzformátoron ke-





87. ábra. Két közös emitteres fokozat transzformátoros csatolása. Az első fokozat bemenetéhez is transzformátoron keresztül csatlakozunk

resztül kapja a vezérlést, a $TR2$ transzformátor pedig csatolást létesít a két fokozat között. Ebben az utóbbi transzformátorban a szekundér tekercs sokkal kevesebb menetet tartalmaz, mint a primér tekercs. Ha az első tranzisztor kimenő ellenállása $20\,000\ \Omega$, a második tranzisztor bemenő ellenállása pedig $250\ \Omega$, a legjobb illesztés elérése végett a transzformátoráttételnek

$$n = \sqrt{\frac{r_{kl}}{r_{be}}} = \sqrt{\frac{20\,000}{250}} = \sqrt{80} \approx 9$$

értékűnek kell lennie.

A szekundér tekercsben ezek szerint kilencszer nagyobb erősségű áram fog folyni, mint a primér tekercsben.

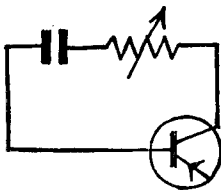
K. K.: Amint látom, a bázisfeszültséget kapacitív szűréssel az $R_1 - R_2$, illetve az $R_3 - R_4$ feszültségosztóról kapjuk. Azt is látom, hogy az emitterek áramkörében az R_5 , illetve az R_6 ellenállással szünteted meg a hőmérséklet-ingadozások hatását.

O. I.: Helyes. Örömmel állapítom meg, hogy kitűnő memóriádban nem okozott kárt az influenzád.

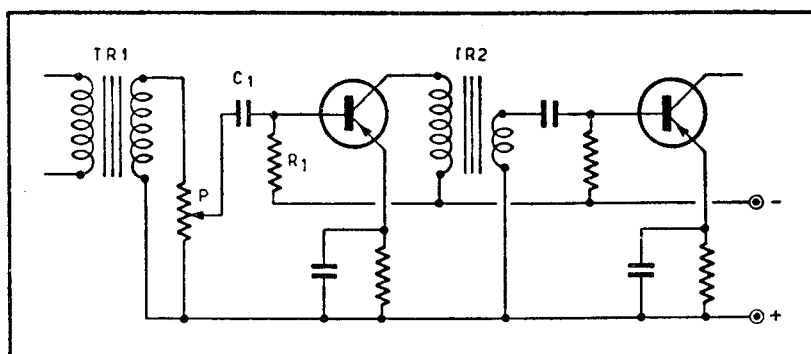
K. K.: Tovább nézegetve rajzodat, nem értem, hogyan akarod a hangerősséget szabályozni, vagyis — a szokásosabb kifejezést használva — hol a hangerősszabályozód?

O. I.: Ez tulajdonképpen erősítésszabályozást jelent. Úgy érhetjük el, hogy változtatható mértékű negatív visszacsatolást alkalmazunk. Őszintén szólva a magam részéről ezt nem tartom helyesnek. Elsősorban azért, mert így nem lehet nullára csökkenteni az erősítést, vagyis nem lehet teljesen elnémítani a készüléket. Egyébként pedig a hangerősség szabályozása közben a torzítás is változna, és éppen akkor volna a legnagyobb, amikor a hangerősséget is a legnagyobb értékre állítottuk be.

K. K.: Vagyis amikor a legnehezebben lehet elviselni. Mit tehetünk hát?



O. I.: Ha már az erősítő bemenetén nem gondoskodtunk erősítésszabályozásról, miért ne lehetne ezzel a P potenciométerrel tetszés szerint változtatnunk az első transzformátor szekundér tekercséről levett feszültséget? Ilyen módon könnyen megszabhatjuk a hangerősséget. A csúszóérintkezőt a C_1 csatolókapacitátoron keresztül összekötjük az első tranzisztor bázisával, a bázis előfeszültségét pedig az R_1 ellenállással állítjuk elő. Ugyanígy rajzoltam meg a két tranzisztor közötti csatolást is (88. ábra).

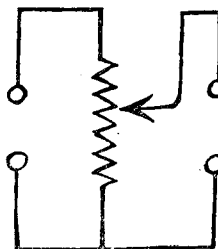


88. ábra. Transzformátorral és RC -taggal megvalósított vegyes csatolás a P potenciométerrel lehetővé tett feszültségszabályozással

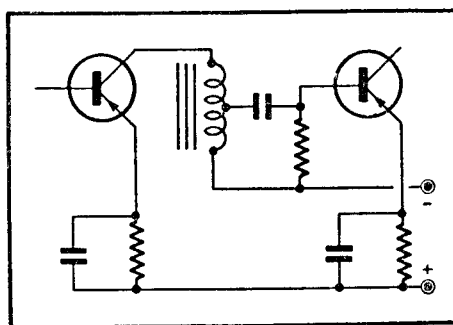
K. K.: A második kapcsolási rajzod kentaurhoz hasonlít; amint ez a mitológiai lény félig ember, félig pedig ló volt, éppen úgy az erősítő is félig a transzformátoros csatolás, félig pedig az ellenállással és kapacitással megvalósított csatolás benyomását kelti.

O. I.: Elismerem, hogy ezzel a megoldással elveszítjük a tiszta transzformátoros csatolás egyszerűségéből származó előnyöket. Lehet, hogy jobban kielégítene ennek egy logikus további változata, az autotranszformátoros csatolás. Ilyenkor általában feszültségcsökkentést alkalmazunk, hogy az előző tranzisztor nagy kimenő ellenállását helyesen illesszük a következő tranzisztor kisebb ellenállású bemenetéhez, már amennyiben a két fokozat közös emitteres kapcsolású.

K. K.: Ez is csak olyan vegyes saláta.

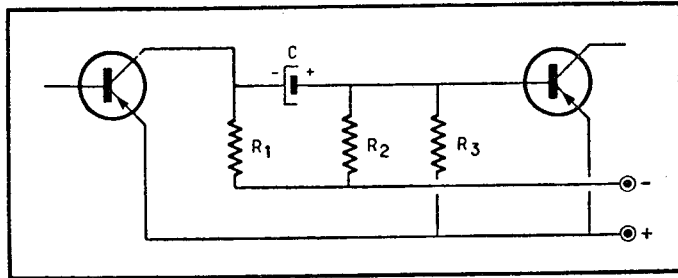
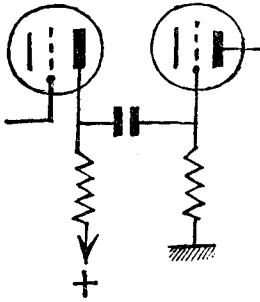


89. ábra. Autotranszformátoros csatolás



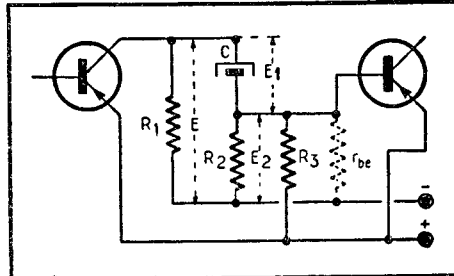
A tiszta RC-csatolás

O. I.: Ha már ezek a hibridkapcsolások nem tetszenek neked, térjünk át nyíltan az RC-csatolású erősítőre. Ezt a legtisztább alakjában itt láthatod (90. ábra).

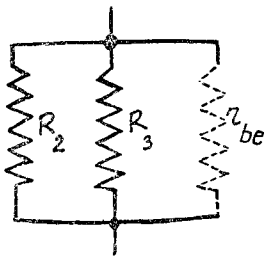


90. ábra. RC-csatolás

K. K.: Hiszen ez egészen pontosan megfelel az elektroncsöves kapcsolásnak. Az R_1 kollektorköri terhelő ellenállás az anódköri munkaellenállás megfelelője. A bázispotenciált meghatározó R_2 és R_3 ellenállás voltaképpen a rácslevezető ellenállás kistestvére. Ami pedig a csatolókapacitort illeti, miért kell ennek elektrolitkapacitornak lennie? Nem tehetnénk ide valamilyen 50 nanofarados, vagy ha úgy tetszik, 0,05 μF -os papírkapacitort, amilyent az elektroncsöves erősítőkben is használunk, ahol ez is tökéletesen megfelel a célnak?



91. ábra. Az előzővel azonos, de más alakban felrajzolt kapcsolás, hogy világosabban látható legyen a C csatolókapacitortól és a párhuzamosan kapcsolt R_2 és r_e ellenállásból kialakuló feszültségosztó. Az áramforrás belső ellenállása elhanyagolható



O. I.: A mi esetünkben ez katasztrofális volna. Az elektroncsöves kapcsolások rácslevezető ellenállást is tartalmaznak, ennek szokásos értéke 0,5 $\text{M}\Omega$. Itt viszont a párhuzamosan kapcsolt R_2 és R_3 ellenállás együttes értéke nagyságrendben 1000 Ω , és ezenkívül párhuzamosan csatlakozik hozzájuk a második tranzisztor r_{be} bemenő ellenállása. Ez a láthatatlanul is jelen levő ellenállás ugyanolyan nagyságrendű, mint R_2 és R_3 együttesen, tehát mondjuk szintén 1000 Ω .

K. K.: A három ellenállás eredője tehát 500 Ω . Még most sem látom be azért...

O. I.: Türelem! Ha kissé átalakítjuk kapcsolási rajzunkat, jól láthatjuk, hogy a C kapacitort az R_2 , R_3 és r_{be} ellenállással együtt feszültségosztót

alkot az R_1 terhelő ellenálláson megjelenő E feszültség részére. Mit gondolsz, mekkora ennek a kondenzátornak a kapacitív ellenállása?

K. K.: Ez az ellenállás a frekvenciától függ, és annál kisebb, mennél nagyobb a frekvencia

O. I.: Úgy van. Ha most betesszük ide $0,05 \mu\text{F}$ -os kondenzátorodat, amelyre olyan büszke vagy, és meggondoljuk, hogy a keresztülfolyó áram frekvenciája 50 Hz (hertzet mondj, ne periódust, ez ennek az egységnek a tisztességes neve), C kapacitív ellenállására $65\,000 \Omega$ -ot kapunk, ez viszont százharmincszor nagyobb a párhuzamosan kapcsolt R_2 , R_3 és r_{be} eredőjénél.

K. K.: Valóban katasztrofális! Minthogy az E_1 és E_2 feszültség az ellenállások arányában alakul ki, E_2 csak százharmincad része volna az E feszültségnek. Így tehát csak ez a jelentéktelen feszültség kerülne át a második tranzistorra.⁸

O. I.: Na látod, ezért kell e felesleges pazarlás elkerülésére nagykapacitású kondenzátort használnunk. $10 \mu\text{F}$ -os elektrolitkondenzátorral a kapacitív ellenállás 50 Hz -en csak 325Ω , tehát a feszültségnek több mint a felét továbbadjuk. Nagyobb frekvenciákon a C kapacitancia még kisebb lesz, tehát a viszonyok még kedvezőbbek. Ha azonban a kapacitív ellenállás nem elég nagy, a mély hangokra kellemetlen csillapítást kapunk.

Vigyázzunk a polaritásra!

K. K.: Amint látom, a tranzistoros kapcsolásokban az ellenállások általában sokkal kisebbek, mint azok, amelyeket az elektroncsöves áramkörökben használunk, és ezért sokszor elektrolitkondenzátorokra lehet szükség. De vajon nem kellemetlen ezeknek a kondenzátoroknak a nagy mérete?

O. I.: Egyáltalán nem. A kis feszültségekre (tehát a tranzistoros áramköröknek megfelelően) méretezett elektrolitkondenzátorok egészen kicsinyek, úgyhogy könnyen elhelyezhetők a zsebrádiók huzalozásában... Amikor beépítjük őket a készülékbe, nagyon kell ügyelni a helyes polaritásra.

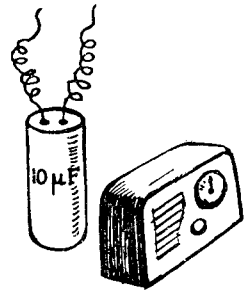
K. K.: A kondenzátor negatív sarkát, amint látom, a kollektorhoz csatlakoztattad, persze azért, mert az negatívabb potenciálon van, mint a bázis. Ha $N-P-N$ típusú tranzisztorról lett volna szó, bizonyára fordított polaritással kötötted volna be.

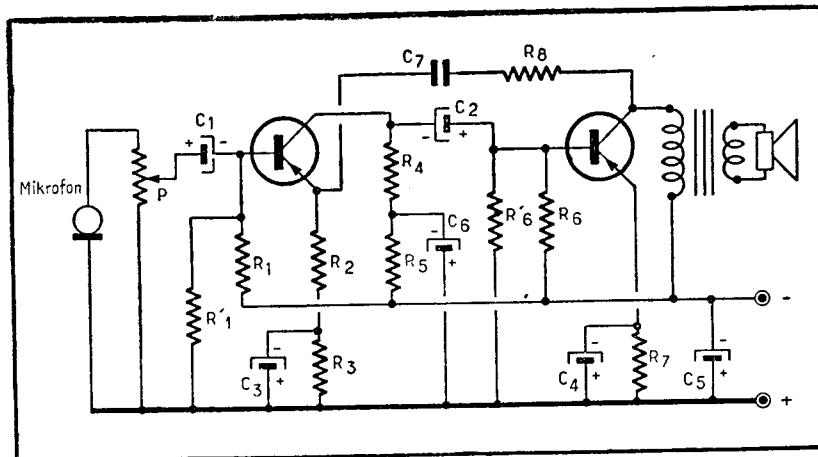
O. I.: Természetesen. Hogy megmutassam neked, milyen polaritással iktatjuk be a elektrolitkondenzátorokat a kapcsolás különböző helyein, megrajzoltam részre egy mikrofonerősítő kapcsolását. Figyeld meg, a hangerősítéssel ezzel a P potenciométerrel az első tranzisztor bemenetén szabályozhatjuk.

K. K.: Ez a potenciométer a C_1 kondenzátoron keresztül csatlakozik a bázishoz, ebben az esetben a kondenzátor negatív sarkát kötjük össze a bázissal. Éppen az ellenkező a helyzet a C_2 csatoló kondenzátorral, amely a bázishoz képest negatívabb potenciálon levő kollektorról ágazik le, tehát pozitív sarkát fordítja a bázis felé. Látom, a két tranzisztor részére beiktattad a hőmérsékletváltozások hatását kiegyenlítő R_3 és R_7 ellenállást; e két ellenállás C_3 és C_4

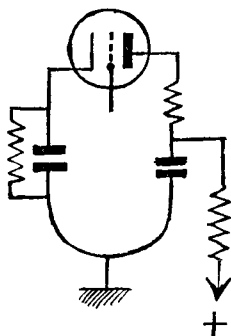
⁸ Ha gondosabban vizsgáljuk meg a dolgokat, és figyelembe vesszük az első tranzisztor kimenőfeszültségét, kiderül, hogy a valóságban nem ilyen katasztrofális a helyzet. Első közelítésnek azonban elfogadhatjuk az előző okoskodást is.

$$Z_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 50 \times 0,00005} \approx 65\,000 \Omega$$





92. ábra. A mikrofonerősítő teljes kapcsolási rajza. A visszacsatoló áramkörben levő, körülbelül $0,05 \mu\text{F}$ -os C_7 kivételével mindenhol elektrolitkondenzátorokat alkalmazunk



szűrőkondenzátora természetesen a pozitív végével csatlakozik a telep pozitív sarkához. De mit akarsz ezzel az R_5 ellenállással, amelyet sorbakapcsoltál az első tranzisztor R_1 munkaellenállásával? Ennek szűrőkondenzátora, amint látom, a C_6 elektrolitkondenzátor; ezt szintén a pozitív sarkával kötötted a telep „plusz” sarkához.

O. I.: Nem ismered meg régi barátunkat? Gyakran szerepel az elektroncsöves kapcsolásokban.

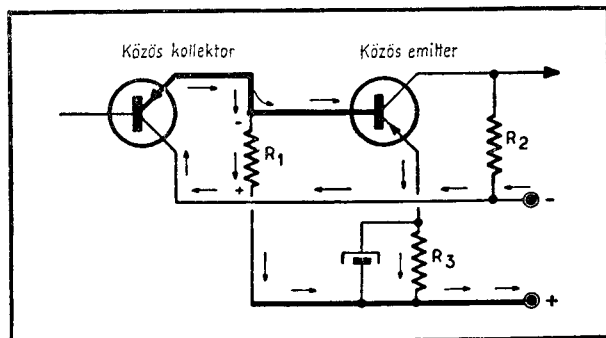
K. K.: A diódáját! Hiszen ez a jó öreg anódköri csatolásmentesítő ellenállás! Jaj, bocsánat, itt persze a kollektorkörben van. Bizonyára azokat a káros csatolásokat szünteti meg, amelyeket a közös tápforrás impedanciája idézne elő, és amelyek hatására könnyen begerjedhetne az erősítő.

O. I.: Pontosan így van. Az áramforrás belső ellenállása veszélyes visszacsatolásokat okozhat. Ezenkívül, hogy a váltakozó áramú összetevő részére jó utat biztosítsunk, okos politikával egy elég nagy kapacitású C_5 kondenzátort kapcsolunk a telep sarkaira.

K. K.: Ezen a kapcsolási rajzon minden megvan, amit szem és száj megkíván. Látom, vegyes negatív visszacsatolást is létesítettél, amennyiben a kimeneti feszültségnek az egyik részét az R_3 ellenálláson és a C_7 kondenzátoron keresztül visszavezetted az első tranzisztor emitterkörébe beiktatott R_2 ellenállásra. Ez ugyanaz a megoldás, amelyet a 61. ábrán láttunk.

Az egyenes út

O. I.: Korod ellenére még egészen jó az emlékezeted... Éppen ezért nem érdemes részletesebben beszélnünk erről az ellenálláscsatolásról, amit másképpen, általánosabban impedanciacsatolásnak is nevezhetünk, hiszen a terhelő ellenállás helyett egy költségesebb és terjedelmesebb, de kis ohmos ellenállású tekerestet is beiktathatunk. De hogy megjutalmazalak türelmedért, megmutatom a



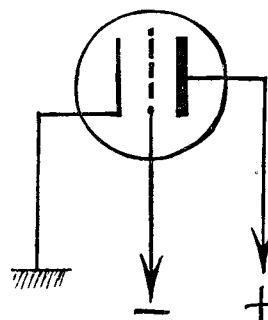
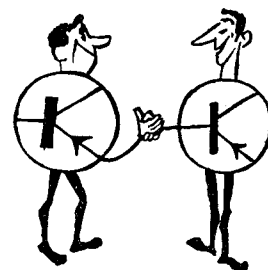
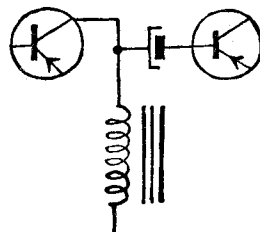
93. ábra. Közvetlen csatolás. A nyilakkal megjelölt irányban folyó áram a feltüntetett polaritású feszültségeszt létesíti az R_1 ellenálláson

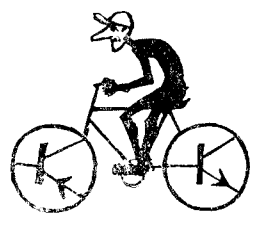
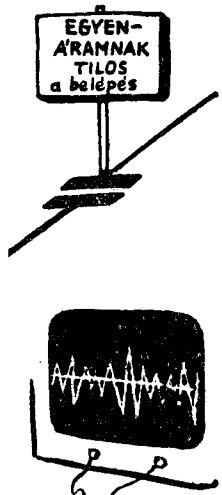
közvetlen csatolás egyik változatát. Nézd, itt van az első tranzisztor, közös kollektoros kapcsolásban, ennek emitterét közvetlenül összekötöm a második, közös emitteres kapcsolású tranzisztor bázisával.

K. K.: Elismerem, ez igen gazdaságos megoldás. De mondd csak, hogyan lehet ilyen egyszerűen elhagyni a csatoló kondenzátort?

O. I.: Az elektroncsöves áramkörökben valóban nem volna ilyen egyszerű a dolog, a kapcsolás sokkal bonyolultabbá válna, mert az anódot nagy pozitív potenciálra kell kapcsolni, míg a következő cső rácására ugyanakkor negatív előfeszültséget kell vezetnünk. A tranzisztorokkal azonban összehasonlíthatatlanul kedvezőbb a helyzet. A potenciálkülönbségek csekélyek, ezenkívül a bázisnak és a kollektornak az emitterhez viszonyított potenciálja azonos előjelű. A csőben viszont a rác negatív, az anód pedig pozitív potenciálon van. Így tehát a tranzisztoros kapcsolásokban minden egyes „elektróda” minden nehézség nélkül megkaphatja a szükséges potenciált, ha megfelelő ellenállásokon megfelelő feszültségesztéseket létesítünk.

K. K.: Hadd próbáljam meg magam megmagyarázni kapcsolásod működését. A tápforrás negatív sarkából kiindulva nyilakkal bejelölöm a tápáram útját. Az elektronok a kollektoron keresztül belépnek az első tranzisztorba, majd az emitteren keresztül kilépnek belőle. Ezután az áram két ágra oszlik. Az elektronok egy része keresztülhalad az R_1 terhelő ellenálláson, tehát ennek az ellenállásnak a második tranzisztor bázisával összekötött vége a tápforrás pozitív sarkához képest negatív potenciálra kerül. A többi elektron a második tranzisztor bázisából az emitter felé áramlik. Ez volt a közepes bázisáram... Valóban igazad volt, az első tranzisztorban az emitter pozitívabb potenciálon van, mint





a kollektor. A másik tranzistorban az emitterhez képest negatív potenciálon van a bázis. Minden szép rendben van. Egy elektrolitkondenzátort és egy ellenállást megtakarítottunk.

O. I.: Nem csak ebből áll a közvetlen csatolás előnye. Gondold csak meg, a kondenzátor soha sem képes egyenletesen átvinni minden frekvenciát. Az egészen lassú feszültségváltozások még akkor sem képesek keresztüljutni rajta, ha nagy a kapacitás. Itt viszont ténylegesen egyenáramú erősítőt kaptunk.

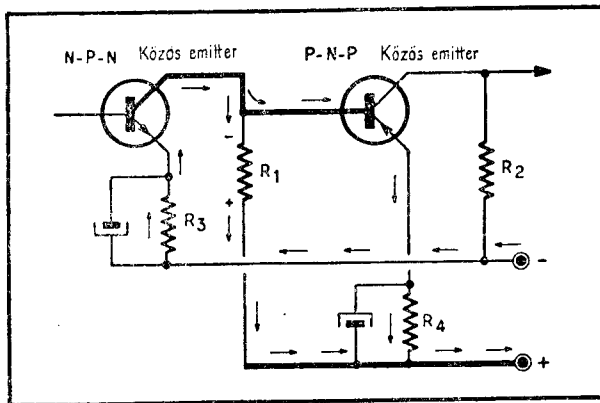
K. K.: Nem értem, mit akarsz ezzel mondani.

O. I.: Elismerem, nem egészen szerencsés ez a kifejezés. Így nevezzük az olyan jelek erősítőit, amelyeknek frekvenciája nagyon kicsi, csak néhány hertz, vagy még ennél is kisebb, úgyhogy a periódusok ideje több másodperc is lehet. Olyan jeleink is lehetnek, amelyek nagyon lassan változó, nem periodikus feszültségek vagy áramok. Ilyen jelek a biológiában fordulnak elő, és ezeket csakis egyenáramú erősítővel lehet felerősíteni.

K. K.: Tudok egy másik alkalmazási területet is részükre: a televízió videojeleinek erősítése. Itt nagyon fontos, hogy megtartsuk az egyenáramú összetevőt, viszont a csatoló kondenzátor megakadályozná ennek átvitelét.

Szimmetria a tranzisztorok között

O. I.: Azt hiszed, mások még nem gondoltak erre? Persze, most megint megállapítod magadban, hogy mindig ellopják gondolataidat és ötleteidet... mielőtt még megszülted volna őket. De hogy megvigasztaljalak ezért az újabb



94. ábra. Ellentétes típusú kiegészítő tranzisztorok között létesített közvetlen csatolás

csalódásért, mutatok egy másik kapcsolást is, szintén közvetlen csatolással. Itt a két tranzistor közös emitteres kapcsolású. Típusuk ellentétes, az egyik $N-P-N$, a másik $P-N-P$. Ezeket komplementer vagy kiegészítő tranzisztoroknak nevezzük, mert egymáshoz képest szimmetrikus felépítésűek, mintegy kiegészítik egymást.

K. K.: Ha az elektronok útját a nyilak irányában követjük, rögtön megállapíthatjuk, hogy itt is minden tökéletes rendben van. Az első tranzisztor kollektora a mellette levő emitterhez képest pozitív potenciálra kerül, ahogy az $N-P-N$ tranzisztorokhoz illik. A másik tranzisztor $P-N-P$ típusú, ebben a bázis az emitterhez képest negatív potenciálú. Mit is kívánhatnék még? Nem lehetne valahogy elhagyni ezeket az R_3, R_4 stabilizáló ellenállásokat és a hozzájuk tartozó szűrőkondenzátorokat is, hogy további megtakarításokat érjünk el?

O. I.: Ha az egyenáramú összetevő abszolút értékét nem kell változtatlanul megtartanunk, lemondhatunk ezekről az alkatrészekről, de akkor le kell mondanunk egyúttal a hőmérsékleti kompenzálásról is.

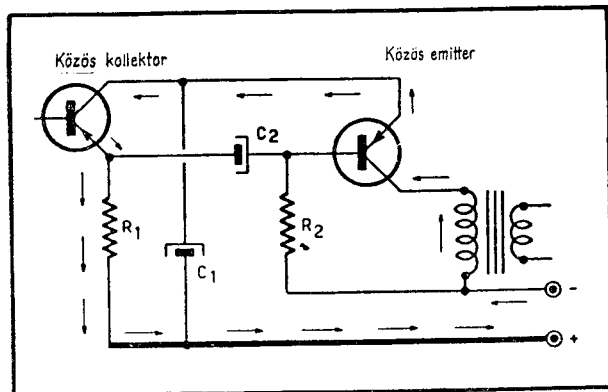
K. K.: Kár, mert bevallom, ezek a kapcsolások nagyon tetszenek nekem

Tandemkapcsolás

O. I.: Tudd meg, barátom, vannak más, közvetlen csatolású kapcsolások is, olyanok, amelyek kevésbé függenek a hőmérséklet ingadozásaitól. Itt van például ez a tandemkapcsolású tranzisztorokból álló előerősítő vagy végerősítő fokozat.

K. K.: Mi köze lehet a kerékpárnak a tranzisztorokhoz? Tandemkerékpárról már hallottam, de tandemtranzisztorokról még nem.

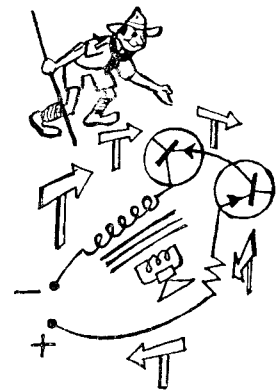
O. I.: Két sorosan táplált tranzisztort nevezünk így. Az egyenáramú összetevő sorra keresztülhalad a két tranzisztoron, ami kitűnő stabilizálást eredményez. Nézd meg ezt a kapcsolási rajzot (95. ábra), az első tranzisztor itt



95. ábra. Két soros táplálású tranzisztor tandemkapcsolása. A nyilak mindig az elektronok áramlási irányát adják meg

közös kollektoros, a második pedig közös emitteres kapcsolású. El tudod képzelni, hogyan működik?

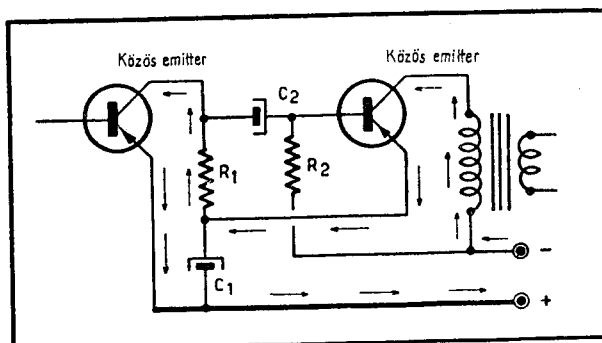
K. K.: Kövessük újra túravezetőnket, akarom mondani a nyilakat. Erről jut eszembe, annak idején én is részt vettem ilyen játékokban, ott is követni kellett a nyilakkal megjelölt utat. Induljunk hát el a tápforrás negatív sarkából.





Derék elektronjaink, miután keresztülhaladtak a kimenő transzformátor primér tekercsén, a kollektoron át bejutnak a második tranzisztorba, az emitterből kilépve bevetik magukat az első tranzisztor kollektorába, és az emitternél hagyják el ezt a tranzisztort. E hosszú túra után már csak a terhelő ellenálláson kell keresztülverekedniük magukat, hogy rátérhessenek a haza vezető útra, akarom mondani a tápforrás pozitív sarkára.

O. I.: Amint látod, ugyanaz az áram folyik át sorra a két tranzisztoron, ugyanis az első tranzisztor kollektora közvetlenül össze van kötve a második tranzisztor emitterével, közös pontjukban viszont ott van a C_1 leválasztó kondenzátor, amely kiegyenlíti a váltakozó áramú összetevővel kapcsolatos potenciálváltozásokat.



96. ábra. Két soros táplálású, de közös emitteres tranzisztor tandemkapcsolása

K. K.: Valóban nagyon elegáns kapcsolás. Nem lehetne ugyanezt az elvet két közös emitteres kapcsolású tranzisztorra is alkalmazni?

O. I.: Dehogyan. Az ilyen tandemkapcsolással még nagyobb erősítést kaphatunk. Kövesd csak a nyilak útját. Láthatod, hogy itt is ugyanaz az áram folyik át a két tranzisztoron. Az egyenáramú összetevő szempontjából a tranzisztorok sorba vannak kapcsolva. A felerősítendő jelek részére ugyanakkor a legközöségesebb RC-csatolást valósítottuk meg.

K. K.: Ezek a szédítően ravasz kapcsolások a cirkuszi artisták lovas mutatványaira emlékeztetnek, egészen elszédültem tőlük.

O. I.: Akkor hát nem kínozlak tovább. Jó éjszakát!

Tizenegyedik beszélgetés

A fokozatok közötti csatolás különböző módozatairól beszélgetve, két barátunk főképpen csak a hangfrekvenciás erősítésre gondolt. A fontosabb kapcsolásokat részletesebben megbeszélték, de a végerősítő fokozat kérdéseiről még nem volt szó. Márpedig ha bizonyos teljesítményt is kell szolgáltatni, ennek megfelelő kapcsolásokra és beállításokra van szükség. Ez a témája a következő beszélgetésnek.

Összefoglalás: A munkapont megválasztása. — Csúsztatott feszültségű takarékkapcsolás. — B osztályú ellenütemű erősítőfokozat. — Transzformátoros fázisforgatás. — Fázisváltó. — Tranzisztoros katódkövető. — Kiegészítő tranzisztorokkal megvalósított ellenütemű fokozat. — A végerősítő fokozat gyakorlati kapcsolása.

Takarékoskodás és teljesítményerősítés

Kis barátunk elbizakodottá válik

K. K.: A hangfrekvenciás kapcsolásokról most már olyan sokat tudok, hogy azt hiszem, méretezni is tudnék egy teljes tranzisztorerősítőt.

O. I.: Mindig bámultam szerénységedet...

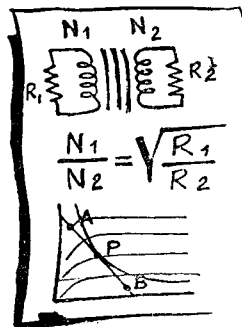
K. K.: Csak ne gúnyolódj. Ezen a területen minden egyszerű és világos. Ha transzformátoros csatolásról van szó, kiszámítom a legkedvezőbb illesztésnek megfelelő áttételi arányt. Csak nem fogok megjedni a négyzetgyökvonástól, elhiheted. Ami pedig az RC-csatolást illeti, hát nem elmondtad, hogyan kell meghúzni a munkaegyenest? Úgy szerkesztem meg, hogy érintse a határteljesítmény hiperboláját. A munkapontot középre állítva a legnagyobb jelamplitudót kapom meg a bemeneten.

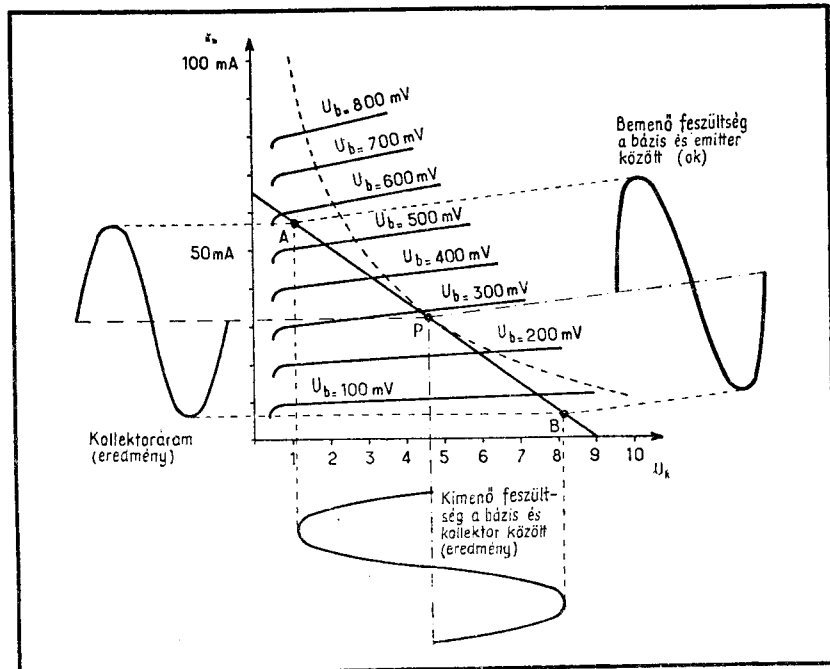
O. I.: Nem akarom elrontani a kedvedet, de meg kell mondanom, hogy a dolgok távolról sem ilyen egyszerűek. Nagyjából igazad van, de a számértékek meghatározásához figyelembe kell venni a bemeneten rendelkezésünkre álló teljesítményt, a szükséges átviteli sáv szélességet, a negatív visszacsatolás szerepét, a még megengedhető legnagyobb torzítást és még sok minden mást is, amit nem is lehetne ilyen hirtelen felsorolni.

K. K.: Ne is mondd tovább! Inkább elismerem, hogy naiv voltam és elbízta magam. Ha azonban előveszem a jelleggörbéket és a munkaegyenest, minden olyan világosnak tűnik. Bemenőjelünk (a bázisfeszültség vagy a bázisáram) két ponttal határolt szakaszt foglalhat el a munkaegyenesen: az egyik az A pont, ahol a görbék átmennek a könyökbe, a másik pedig a B pont, ahol a bázisáram megközelíti a nullát.

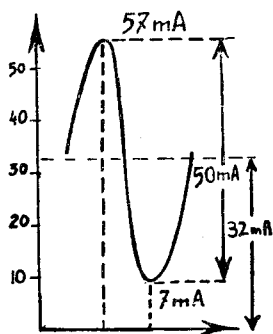
O. I.: Ami nemlineáris torzításokat okoz, amint emlékezhetsz rá.

K. K.: Persze. Ezenkívül a P munkapontot A-tól és B-től egyenlő távolságra kell felvenni. Ebben az esetben a bemenőjel legnagyobb amplitudója PA vagy





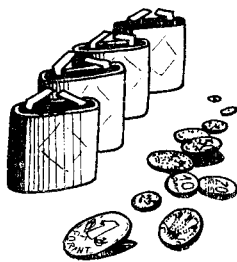
97. ábra. A bemenetre vezetett jel hatására a kollektor áramában és feszültségében bekövetkező változások. A bemenőjel a megengedett legnagyobb amplitudóval változik



PB , vagyis pontosabban I_b , illetve U_b megfelelő értékeinek a különbsége. Ezen a rajzon például ez az amplitudó körülbelül 275 mV. Hatására a kollektoráram 7 és 57 mA között változik, a középérték 32 mA, tehát az amplitudó 25 mA.

O. I.: Helyes. Remélem, teljesen meg vagy elégedve tranzisztorod működésével.

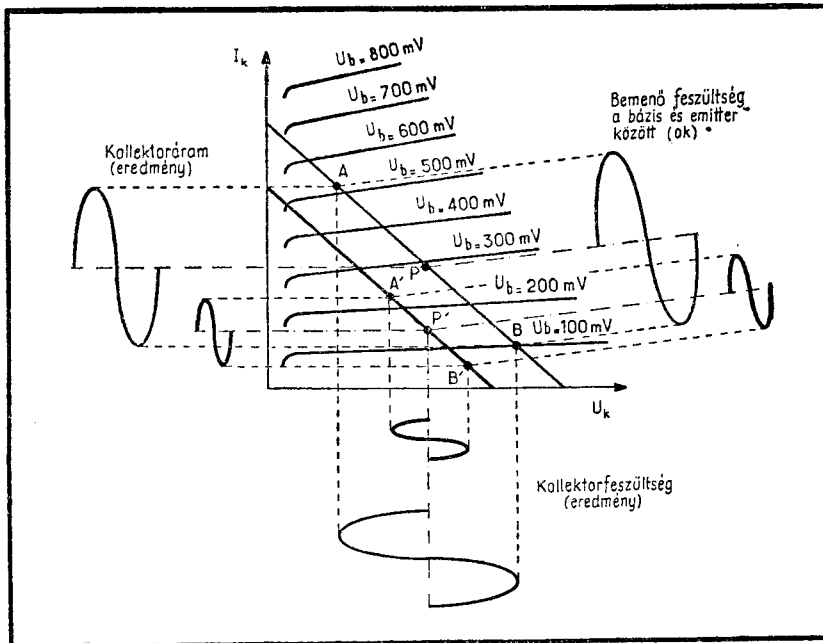
Ne pazaroljunk !



K. K.: Egyáltalán nem. Amíg nagy jeleket kapunk a bemeneten, minden rendben van, mielőtt azonban megszűnik a moduláció, vagy csökken a jelamplitudó, ijesztővé válik az energiapazarlás. A P pontnak megfelelő áramfogyasztás mindig ugyanaz marad, bármekkora legyen is az amplitudó, holott a kis amplitudójú jelek idejére lejjebb lehetne tolni a munkapontot, például P' -be, ami kisebb áramoknak megfelelő terhelésegycenst jelent. Ilyen módon csökkenteni lehetne a fogyasztást, tehát kímélni lehetne a meglehetősen költséges telepeket.

O. I.: Talán tönkre akarod tenni azokat a gyárakat, ahol a telepek készülnek?

K. K.: Nem arról van szó. De gondold meg, amikor valamilyen szimfóniát



98. ábra. Amikor a jelek amplitúdója csökken, célszerű a munkapontot P -ből P' -be tolni

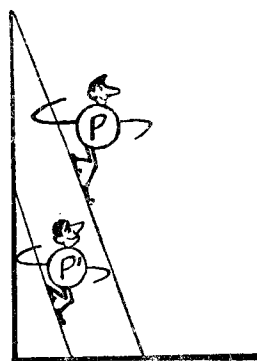
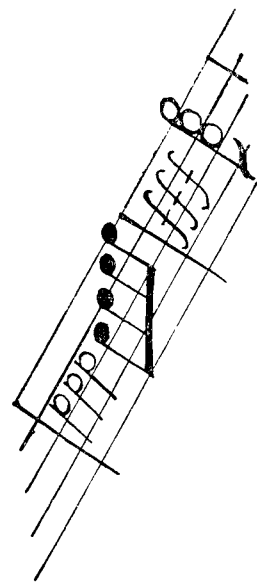
hallgatunk, nem ésszerű ugyanannyi teljesítményt fogyasztanunk a pianissimók alatt is, mint amekkora teljesítményt a teljes zenekar feltörő hangja igényelne. Csak azt nem tudom, hogyan lehetne rávenni a munkapontot arra, hogy mindig a terhelésnek megfelelően álljon be, és így pontosan csak annyit fogyaszthassunk, amennyi a különböző nagyságú jelek torzításmentes átviteléhez szükséges.

O. I.: Ez a takarékosági törekvésed nagyon dicséretes. Elmondom hát szívesen, mi a helyes eljárás. Ahhoz, hogy munkapontod megfelelően átsétálhasson az egyik munkaegyenesről a másikra, változó előfeszültségre van szükség.⁹ Ennek az értéknek növekednie kell, amikor a jelamplitúdó növekszik, amit egyszerűen úgy érünk el, hogy magát a jelet használjuk fel a vezérlésre.

K. K.: Hogyan? Hiszen a jel váltakozó áramból áll, az előfeszültség viszont nem változtatja előjelét.

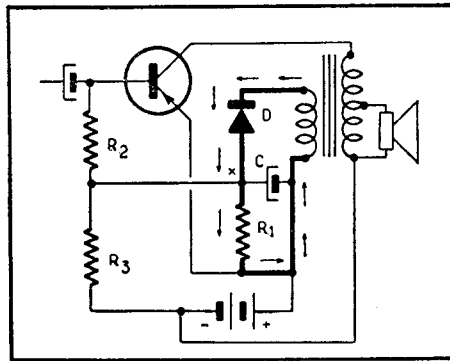
O. I.: Jól tudod, hogy a váltakozó áramot egyenirányítással könnyen át tudjuk alakítani egyenárammá. Itt is ezt csináljuk, hogy megkapjuk a változó előfeszítést.

⁹ Itt az előfeszültség megváltoztatásakor önmagával párhuzamosan tolódik el a munkaegyenes. Hajlásszöge továbbra is a terhelőimpedanciának megfelelő értékű lesz. A terhelőimpedanciának ohmos összetevője (a kimenő transzformátor primer tekercsének ellenállása) elhanyagolható, úgyhogy a kollektoron levő feszültség U_k közéértéke független az előfeszültségtől. Így tehát a munkapont függőleges irányban lecsúszik P -ből P' -be. Az ohmos ellenállás vízszintes irányú eltolódást okozza.





Nézd meg ezt a takarékkapcsolást, ebből könnyen kialakíthatunk megfelelő változatokat is. Amint látod, a kimenő autotranszformátor segédtekercséről felerősített jeleket vehetünk le. Ezeket a jeleket a D félvezető diódával egyenirányítjuk, úgyhogy az R_1 ellenálláson létesülő feszültségesés változtatni fogja az X pont potenciálját. A C kiegyenlítő kondenzátorra azért van szükség, hogy

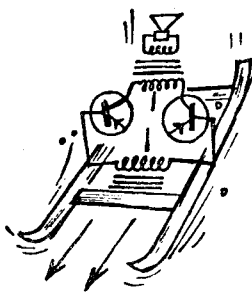


99. ábra. Végerősítő fokozat. A vastag vonallal berajzolt takarékkáramkör megnöveli az előfeszültséget, amikor a jelek amplitudója növekszik

az így kapott feszültség ne kövesse a jel gyors változásait, hanem mindig a középértéknek feleljen meg.

K. K.: Akárcsak az elektroncsöves rádiókészülékek fadingszabályozóiban, amelyeknek kondenzátora egy ellenállással együtt bizonyos időállandót visz be a fadingskiegyenlítésbe.

O. I.: A hasonlat nagyon jó, mert megoldásunk több szempontból emlékeztet az úgynevezett hátraszabályozó fadingskiegyenlítésre. A felerősített feszültségek amplitudóváltozásait egyenirányítás után itt is a bemeneti előfeszültség vezérlésére használjuk fel. A bázist a sorbakapcsolt R_2 és R_3 ellenálláson keresztül összekötjük a tápforrás negatív sarkával, és az X pont váltakozó feszültségét e két ellenállás közös pontjára vezetjük. A három ellenállásérték helyes megválasztásával elérhetjük, hogy az előfeszültség arányos legyen a jelamplitudóval. Ilyen módon a bázis annál negatívabb potenciálra kerül, mennél nagyobb a jelek amplitudója.



B osztályú erősítő

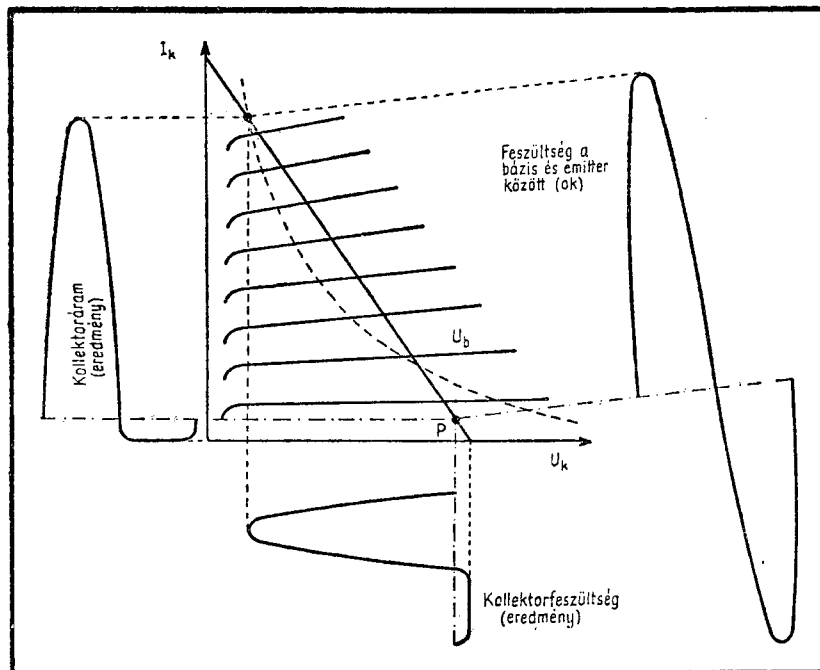
K. K.: Nagyon tetszik nekem ez a takarékkapcsolás. Amikor majd megépítem tranzistoros vevőmet, a végerősítő fokozatban ilyen csúsztatott előfeszültségű ellenütemű kapcsolást fogok alkalmazni.

O. I.: Az ellenütemű kapcsolásban jobbat is tehetünk: az előfeszültség rögzített értékű lehet, de olyan kicsi, hogy a nyugalmi áram majdnem nulla legyen.

K. K.: Nem a B osztályú erősítőre gondolsz? A megfelelő elektroncsöves kapcsolásokban a munkapont az anódáram és a rácsfeszültség közötti összefüggést kifejező jelleggörbe alsó könyökpontjára kerül.

O. I.: Úgy van, éppen a *B* osztályú erősítőkkel akartalak szórakoztatni. Ezek munkapontját úgy állítjuk be, hogy a kollektoráram nagyon kicsi legyen, de még ne csökkenjen nullára. Ha ugyanis túlságosan eltoljuk ezt a pontot, a kis amplitudójú jelek a jelleggörbe nemlineáris szakaszára kerülnek.

K. K.: Amint látom, azokban a félperiódusokban, amikor megnő a bázis-



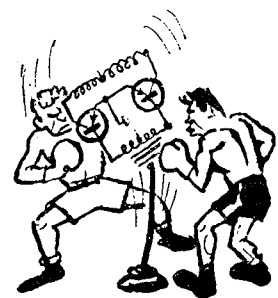
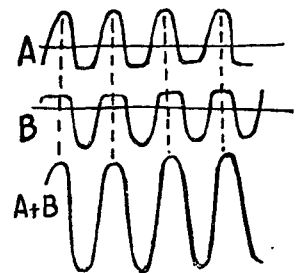
100. ábra. A *B* osztályú erősítőkből a munkapontot eltoljuk a munkaegyenes alsó végének környezetébe, hogy a jelamplitudó kétszer nagyobb lehessen, mint az *A* osztályú erősítőkből. A kimenő áram szemmel láthatóan erősen torzított

feszültség, igen nagy mértékben növekszik a kollektoráram, az ellentétes irányú félhullámok alatt viszont alig van változás. Rettenetesen eltorzul a jel!

O. I.: Éppen ezért egyetlen tranzisztorból nem készíthetünk *B* osztályú erősítőt. De ha két tranzisztorból ellenütemű kapcsolást állítunk össze, ezek között igazságosan megoszlik a munka: az egyik a pozitív, a másik a negatív félhullámokat fogja erősíteni. A kapcsolás szimmetriája folytán a tranzisztorok kölcsönösen kiegyenlítik egymás torzításait.

K. K.: Ez a *B* osztályú ellenütemű kapcsolás olyan, mint az a labda, amelyet egyidejűleg két ökölvívó használ az edzéshez: két oldalról váltakozva mérik rá az ütések, a labda pedig hol jobbra, hol meg balra leng ki.

O. I.: Pontosan úgy van itt is. A két irányból kapott ütések hatására nagyobb lesz a lengések amplitudója, mint akkor, amikor csak egy boxoló ütögeti a labdát.



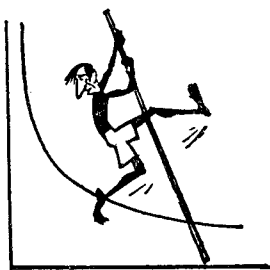
K. K.: Valóban, minthogy a munkapont a terhelésgyenes egyik végének közelében van, a bemenőjel kétszer olyan hosszú szakasz mentén változhat, mint az *A* osztályú erősítőben, amelynek munkapontját a munkaegyenes közepére állítjuk.

O. I.: Látod tehát, hogy a *B* osztályú erősítő kétszer nagyobb amplitudót tesz lehetővé, mint az *A* osztályú. Amíg nincsen moduláció, a fogyasztás nagyon kicsi, egyébként pedig a jelamplitudóval arányosan nő. Ezenkívül — amit eddig még nem árultam el neked — a *B* osztályú erősítőben át is ugorhatjuk a legnagyobb teljesítmény hiperbolájával meghatározott határvonalat.

K. K.: Azt akarod mondani, hogy a terhelésgyenes átmehet a hiperbolán túli tartományba?

O. I.: Igen, még hozzá a tranzisztor veszélyeztetése nélkül. Itt ugyanis a felvett teljesítmény csak egy-egy pillanatra lépi túl a határértéket. Nyugalmi állapotban és a közepes amplitudók idején kisebb lesz ennél az értéknél. A jel negatív félperiódusaiban pedig a teljesítmény csaknem nullára esik. Van azonban a tranzisztornak egy másik jellemzője is, amelyet a gyár szintén megad és amelyet itt feltétlenül figyelembe kell venni: ez az adat a megengedett legnagyobb kollektoráram $I_{k\ max}$. Ezt az értéket nem szabad túllépni.

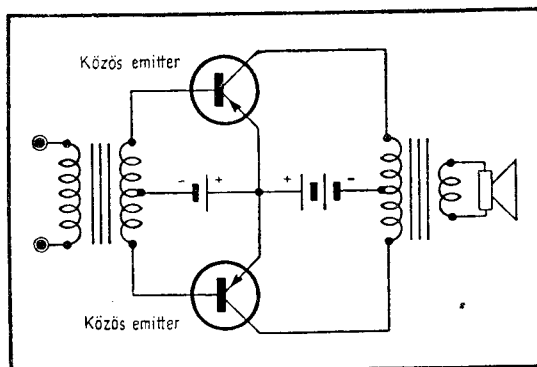
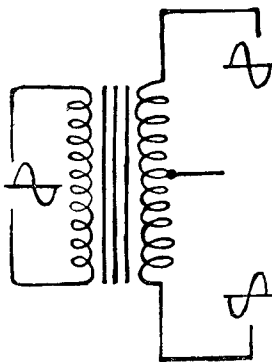
K. K.: Ígérem, hogy sohasem sértem meg ezt a szabályt. Ennek ellenében most már nyugodtan elárulhatod nekem a tranzisztoros ellenütemű kapcsolások minden titkát.



A szimmetria birodalma

O. I.: Mindenekelőtt tudd meg, hogy ezeket a kapcsolásokat, amelyekről szó lesz, nemcsak a *B* osztályú erősítőkben, hanem az *A* osztályúakban is fel lehet használni, csak az előfeszültség értékét kell másképpen beállítani. A leggyakoribb a közös emitteres kapcsolás, ezzel kapjuk a legnagyobb erősítést. Ha azonban minimumra akarjuk csökkenteni a torzításokat, célszerű lehet áttérni a közös bázisú kapcsolásra. Végül ha a bemeneten nagy ellenállást, a kimeneten pedig kis ellenállást akarunk, ...

K. K.: ... akkor közös kollektoros kapcsolást alkalmazunk. Ezt mindjárt gondoltam. Ami pedig a fázis megváltoztatását illeti, azt hiszem, egy transzfor-



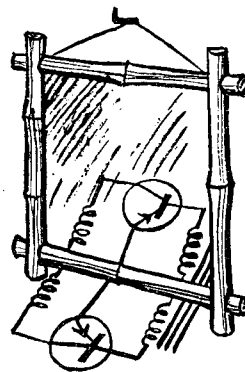
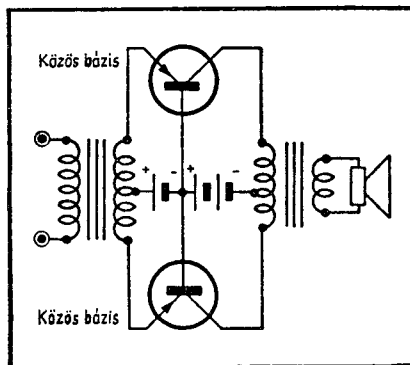
101. ábra. Transzformátoros ellenütemű fokozat. A tranzisztorok közös emitteres kapcsolásúak

mátorral ezt könnyen elérhetjük, ha a szekundér tekercsen középleágazást készítünk. Ugyanígy a kimeneti transzformátor primér tekercsének megcsapolásával megfelelően beállíthatjuk a kimenetre vezetett feszültséget.

O. I.: Úgy van. Most pedig nézd meg ezt a két ellenütemű kapcsolást; az egyiket (101. ábra) az emitter közös, a másikon (102. ábra) pedig a bázis. Figyeld meg a szép szimmetriát.

K. K.: Az előfeszültséget feltétlenül telepekkal kell előállítanunk, ahogyan itt megrajzoltad?

102. ábra. Az ellentétes fázisú vezérlőfeszültségeket itt is transzformátorral állítjuk elő, de a tranzisztorok most közös bázisú kapcsolásban működnek



O. I.: Nem. A szokásos módszereket követjük, vagyis sorbakapcsolunk egy ellenállást, esetleg feszültségosztót csatlakoztatunk az egyetlen telepre. Ezeket az áramköröket azért nem rajzoltam be (különben is jól ismered őket), hogy áttekinthetőbb legyen a rajzom.

A 180°-os fázisváltozás különböző módozatai

K. K.: Az elektroncsöves erősítőkből költséges és nagyméretű transzformátor nélkül is előállíthatjuk az ellenütemű fokozat vezérléséhez szükséges ellentétes fázisú feszültségeket. Azt hiszem, ezt a tranzisztorokkal is megtehetjük.

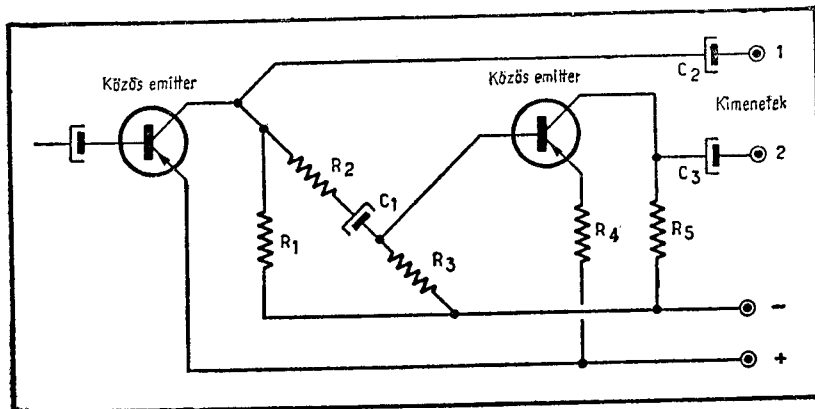
O. I.: Természetesen. Azt tudod, hogy a közös emitteres kapcsolásban a kimenő feszültség ellentétes fázisú a bemenő feszültséggel. Ha tehát két egymást követő fokozatot közös emitteres kapcsolásban építünk meg, a kimenő feszültségek ellentétes fázisúak lesznek.

K. K.: Nagyon furcsa ez a kapcsolási rajz. A két tranzisztor közötti csatolás egészen szokatlannak látszik.

O. I.: A C_1 csatolókapacitáttal sorbakapcsolt R_2 és R_3 ellenállás feszültségosztót alkot, hogy a második tranzisztorra csak egy részét vigyük át annak a feszültségnek, amely az első tranzisztor R_1 terhelő ellenállásán megjelenik. Ezenkívül, amint látod, negatív visszacsatolást létesítünk a második tranzisztor emitterkörében levő R_4 ellenállással.

K. K.: Mit csináltál ezzel a szerencsétlennel! Hiszen így kétszer is csökkentetted az erősítést.



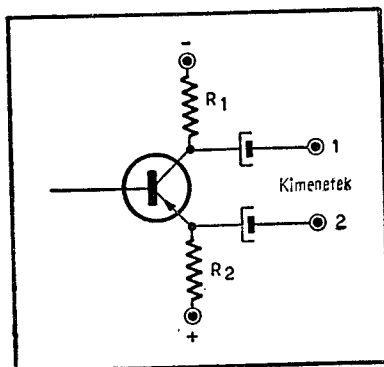


103. ábra. Az ellentétes fázisú feszültség előállítása egyszeres erősítésű, közös emitteres kapcsolású tranzisztorral

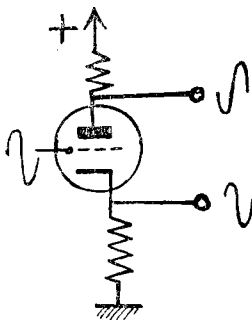
O. I. : Éppen ezt akartam. A két kimeneten egyenlő feszültségekre van szükségünk, ezért a második tranzisztor erősítésének pontosan 1-szeresnek kell lennie. Ennek a tranzisztornak nem szabad sem erősítenie, sem csillapítania.

K. K. : Így tehát csak annyi a szerepe, hogy megfordítja a fázist?

O. I. : Csakis ennyit várunk el tőle. Egyébként a két ellentétes fázisú feszültséget másféleképpen, egyetlen tranzisztorral is előállíthatjuk. Ebben az eset-



104. ábra. Az ellentétes fázisú feszültségek előállítása egyetlen tranzisztorral. Az emitter és a kollektor áramkörébe is beiktatunk egy-egy munkaellenállást



ben vegyesen közös emitteres és közös kollektoros kapcsolást alkalmazunk, amennyiben a kollektor és az emitter áramkörébe is beiktatunk egy-egy R_1 , illetve R_2 terhelőellenállást. A bemenő jelhez képest az 1 kimenet jele ellentétes fázisú, a 2 kimenet jele pedig egyező fázisú lesz.

K. K. : Hiszen ez tulajdonképpen az elektroncsöves katódkövető fázisváltó hű mása. Ott az anód és a katód körébe iktattuk be a terhelő ellenállást.

O. I. : Úgy van, ez pontosan annak a kapcsolásnak a tranzisztoros változata.

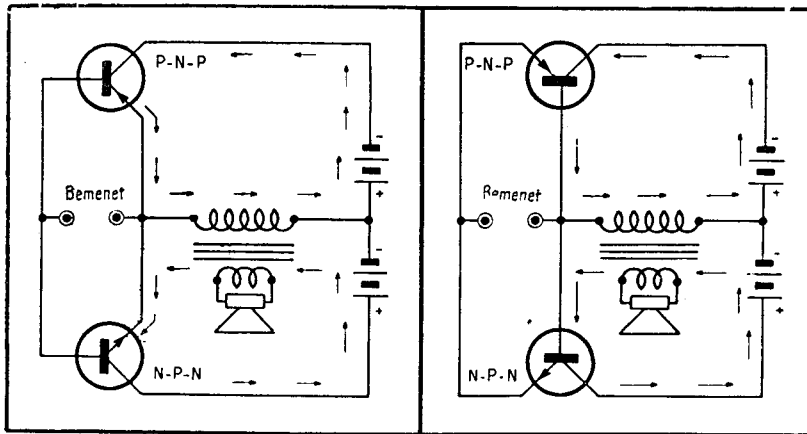
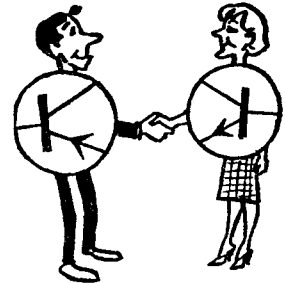
K. K. : Mindezek a kapcsolások, amelyekről most beszéltél, régi jó ismerőseim, ugyanilyen fázisváltók vannak az elektroncsöves erősítőkben is.

A csodálatos ellenütemű kapcsolás

O. I.: Csak hogy az elektroncsövekkel nem építhetsz meg *fázisváltó nélküli* ellenütemű kapcsolást.

K. K.: Nem hiszem, hogy a tranzisztorokkal könnyebb volna, ha csak valami csoda nem segít.

O. I.: Pedig úgy van, és ez a csoda, amire nem gondoltál, megint csak a $P-N-P$ és $N-P-N$ típusú kiegészítő tranzisztorok közötti szimmetria. Nézd csak meg figyelmesen ezt a kapcsolást. A két kiegészítő tranzisztor közös emitteres kapcsolásban működik.



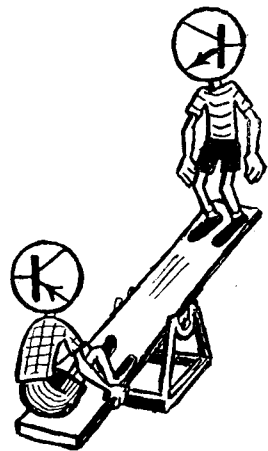
105. ábra. Fázisváltó nélküli ellenütemű fokozat közös emitteres kapcsolású $P-N-P$ és $N-P-N$ tranzisztorral

106. ábra. Még egy fázisváltó nélküli ellenütemű fokozat, most azonban közös bázisú kapcsolásban

K. K.: Hadd kövessem megint a szokásos módszert. Képzeljük el, hogy a bemenőjel egyik félperiódusában a két bázis negatívabb potenciálra kerül. Ekkor a $P-N-P$ tranzisztor erősít, az $N-P-N$ típusú viszont zárva marad. A következő félperiódusban a bázisok potenciálja pozitívabb lesz, tehát most a $P-N-P$ tranzisztor nem csinál semmit, és az $N-P-N$ típusú vezet át áramot a kollektoron. Milyen ravasz és milyen szellemes kapcsolás! Csodálatos!

O. I.: Csak ne lelkesedj annyira. Ebben a kapcsolásban két telepre van szükség (vagy legalábbis egy középleágazásúra), ami miatt kissé bonyolultabbak a dolgok. Ugyanez az eset, ha ezt az elvet közös bázisú kapcsolásban levő tranzisztorokra alkalmazzuk.

K. K.: Valóban. Ennek is ugyanolyan jól kell működnie, mint az előbbinek. Itt a $P-N-P$ tranzisztor az emitterére vezetett jel pozitív félhullámaira reagál, az $N-P-N$ típusú pedig a negatív félhullámok hatására jön működésbe. Félek azonban, hogy ezt a két telepet aligha tudjuk felhasználni a készülék többi tranzisztorának a táplálására.

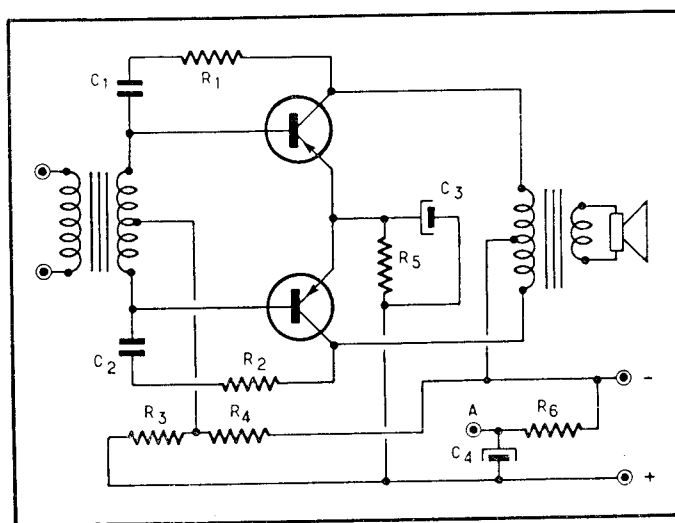
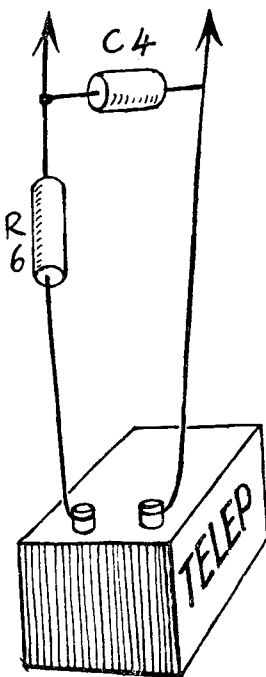




Megkérhetlek most egy szívességre? Szeretnék összeállítani egy tranzisztoros erősítőt a hordozható lemezjátszóhoz. Megrajzolnád nekem a végerősítő fokozat kapcsolását? Valamilyen jobb fajta *B* osztályú ellenütemű kapcsolást szeretnék, elég nagy teljesítményűt, hogy táncolhassunk a zenére.

O. I.: Tessék, már meg is rajzoltam, amit kívántál. Minden világos rajta?

K. K.: Na nézd csak! Az első tekintetre minden szokásosnak látszik. Transzformátoros fáziselforgatás... Párhuzamos negatív visszacsatolás mind a két



107. ábra. Negatív visszacsatolással, hőmérsékletkiegyenlítővel és csatolásmentesített táplálással ellátott ellenütemű fokozat gyakorlati kapcsolása

tranzisztoron, a kollektor és a bázis közé kapcsolt soros ellenállásból és kondenzátorból álló $R_1 - C_1$ és $R_2 - C_2$ láncokkal. Az előfeszültséget az $R_3 - R_4$ feszültségosztóval állítjuk be... Az R_5 stabilizáló ellenállás egyenlítő ki a hőmérsékletváltozások hatását; az ellenállást a C_3 kondenzátorral csatolásmentesítjük. Mindezt már kapásból meg tudom állapítani. Itt azonban mi a szerepe ennek az R_6 ellenállásnak, amelyhez a C_4 szűrőkondenzátor csatlakozik?

O. I.: A telepből nagyon változó lesz az áramfelvétel, viszont ettől függ a *B* osztályú teljesítményerősítő tranzisztoraid működése. Ezért célszerű csatolásmentesíteni ezt az áramforrást, hogy elkerüljünk minden visszahatást a többi áramkörben. A csatolás megakadályozására iktattam be ide ezt az R_6 ellenállást és C_4 kondenzátort. Az *A* pontból veheted le az ellenütemű végerősítő fokozat előtti fokozatok részére szükséges áramot. Meg vagy vele elégedve?

K. K.: Nagyon. Alig várom már, hogy nekilássak a munkának. Szervusz!

Tizenkettedik beszélgetés

A két előző beszélgetés során a hangfrekvenciás erősítés részleteit tisztáztuk, ami nagyon megkönnyíti további munkánkat. Most a nagyfrekvenciás erősítés módszereiről lesz szó. Rövidesen kiderül, mi a hasonlatosság és mi az eltérés a megfelelő tranzisztoros és elektroncsöves kapcsolások között. Végül azt is megtudjuk, hogy a tranzisztoros középfrekvenciás erősítőkben milyen automatikus erősítésszabályozást (fadingkiegyenlítést) alkalmazhatunk.

Összefoglalás: Határfrekvencia. — Rezgőkörös csatolás. — A csillapítás hatása. — Nagyfrekvenciás és középfrekvenciás fokozatok. — A kollektor és bázis közötti kapacitás. — Neutrodin. — Fadingkiegyenlítés. — A belső kapacitások és ellenállások változása. — Fokozott hatású fadingkiegyenlítés.

A nagyfrekvenciák birodalmában

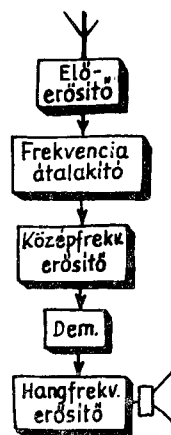
Aki á-t mond . . .

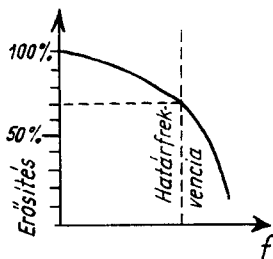
K. K.: Nézz rám, barátom, ugye csak úgy sugározom a büszkeségtől és a boldogságtól. Büszke vagyok, mert sikeresen befejeztem első tranzisztoros készülékemet, és boldog is egyúttal, mert ott van végre hordozható lemezzátszómban az a parányi kis erősítő, amely nagyon is csekély fogyasztással erős és tiszta hangot szolgáltat.

O. I.: Nagyon örülök, hogy ilyen sikeresen hasznosítottad a gyakorlatban azt a csekély tudást, amit sikerült belédvernem. Látom, teljesen kielégültél.

K. K.: Ószintén szólva, nem egészen. Nagyon szeretném az erősítőt nemcsak a hangszedőhöz, hanem mint hangfrekvenciás erősítőt rádióvevőben is használni. Csakhogy nem tudom, hogyan állítsam össze a hangfrekvenciát megelőző fokozatokat.

O. I.: Na lám, szóval azt akarod, hogy aki á-t mondott, az mondjon bé-t is, és ha már elmagyaráztam a végerősítő kapcsolását, most beszéljek a nagyfrekvenciás és a középfrekvenciás erősítőről is, utána pedig természetesen magyarázzam meg a frekvenciaátalakító fokozatot és a demodulátort. Ugyanis a tranzisztoros vevőkészülék lényegileg ugyanolyan felépítésű, mint elektroncsöves társa. Hát jó, kezdjük talán a nagyfrekvenciás erősítéssel.





A tranzisztorok viselkedése nagyfrekvencián

K. K.: Annyit már tudok, hogy ez a tranzisztorok gyenge pontja, mert az erősítésük, amint már említetted, csökken a frekvenciával.

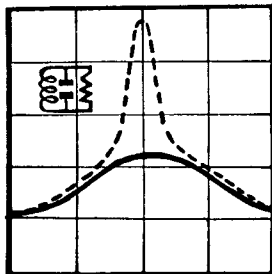
O. I.: Úgy van. A gyárak megadják többek között a *határfrekvencia* értékét is. Ezen a frekvencián az áramerősítés és a meredekség a kisfrekvencián elért érték 70 %-ára esik. Magától értetődik, hogy ennél sokkal nagyobb frekvenciákon is használható a tranzisztort, ha beéred kisebb erősítéssel. A technológia fejlődése következtében a határfrekvencia értéke egyre kijjebb tolódik a nagyobb frekvenciák felé. Jelenleg a frekvenciamodulációval használatos méteres hullámhosszaknak megfelelő többszáz hertzes áramok erősítése már nem ütközik semmilyen nehézségbe.

K. K.: Akkor hát hol a hiba? Úgy gondolom, nincsen más teendők, mint hogy a tranzisztorokra is alkalmazzuk ugyanazokat a kapcsolásokat, amelyeket a csövekkel használunk.

O. I.: Ekkor azonban feltétlenül figyelembe kell vennünk, hogy a tranzisztor kimenő ellenállása, különösen pedig bemenő ellenállása viszonylag kicsi.

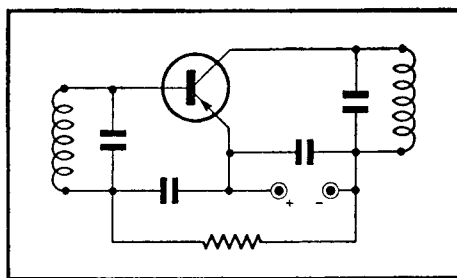
K. K.: Miért volna ez itt kellemetlenebb, mint a hangfrekvencián? Azt hiszem, csak azzal kell törődnünk, hogy a csatolóáramkörökben az impedanciák helyes illesztésének megfelelő áttételű transzformátorokat használjunk, amint a hangfrekvenciás kapcsolásokban is tettük.

Kettős feladat



O. I.: Elfelejtetted, barátom, hogy a nagyfrekvenciás erősítés feladata az antennából kapott gyenge jelek felerősítésén kívül a szelektálás is. A búzát is el kell választani a konkolytól... Más szavakkal ez azt jelenti, hogy a nagyfrekvenciás és a középfrekvenciás áramköröktől is erősítést és szelektivitást követelünk meg. A tranzisztorok elvégzik az erősítést...

K. K.: ... a csatolást létesítő hangolt körök pedig biztosítják a szelektivitást.



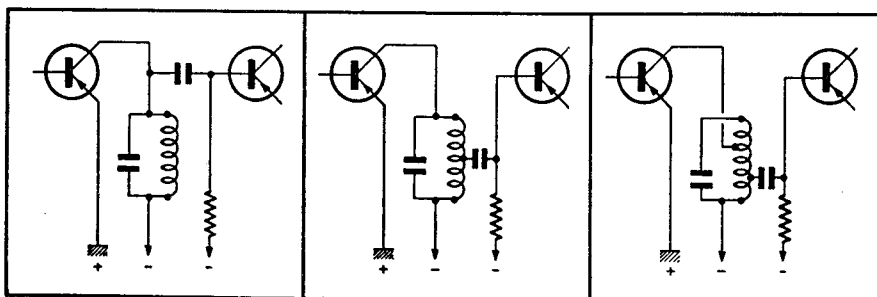
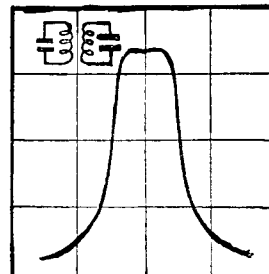
108. ábra. Hangolt bemeneti és hangolt kimeneti nagyfrekvenciás tranzisztoros fokozat

O. I.: Eltaláltad, ezt akartam én is mondani. Képzeld el egy fokozatot, amelynek bementén és kimenetén egy-egy rezgőkör van. A bemeneti rezgőkört a bázis és az emitter közé csatlakoztatjuk, vagyis párhuzamosan kapcsoljuk a 200 és 2000 ohm közötti értékű bemenő ellenállással. Ez az ellenállás erősen csillapítja a rezgéseket, tehát a rezonanciagörbe laposabbá válik. Valamivel

kedvezőbbek a viszonyok a kimeneten, mert itt a kollektor és emitter közötti ellenállás sőtöli a rezgőkört, ugyanis ennek az ellenállásnak az értéke néhány-szor tíz kilohm. A csillapítóhatás azonban itt is érezhető.

K. K.: Mit tehetünk hát, hogy az impedanciák illesztésével egyidejűleg ki-küszöböljük a nagy csillapítást? Olyasféle ez, mint a kecske és a káposzta me-séje...

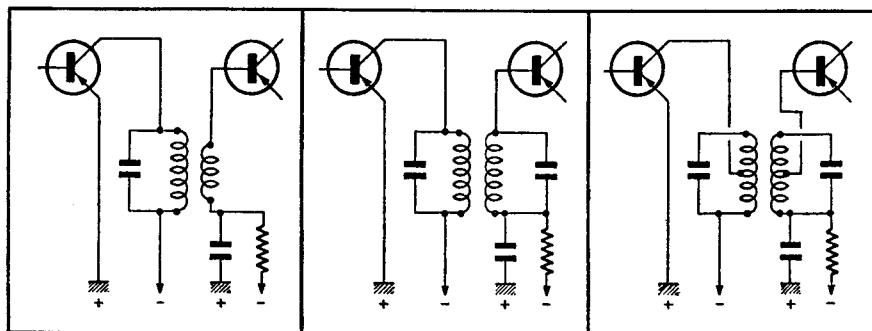
O. I.: Mind a két követelményt kielégíthetjük, ha az egyes rezgőkörökben



109. ábra (balra). „Záró-körös” csatolás. (Ebben és a következő kapcsolásokban is a tápforrás pozitív sarkát földeltük, ugyanis a gyakorlatban a $P-N-P$ tranzisztorral működő fokozatokban a telep pozitív sarkát rendszerint összekötjük a szerelvénylap fémtömegével.)

110. ábra (középen). Hangolt primér körű feszültség-csökkentő autotranszformátorral megvalósított csatolás. Itt az impedanciaillesztés jobb, mint az előző kapcsolásban

111. ábra (jobbra). A tranzisztor kimenő ellenállásával előidézett csillapítás csökkentésére ezt az ellenállást a rezgőköri tekercs egyik leágazásához csatlakoztatjuk



112. ábra (balra). Hangolt primér körű transzformátorral megvalósított csatolás

113. ábra (középen). A csatolótranszformátor primér és szekundér oldalán is rezgőkört létesítünk

114. ábra (jobbra). Az előzőhöz hasonló felépítésű, de szelektívebb kapcsolás. A tekercseken létesített megcsapolás következtében az első tranzisztor kimenete és a második tranzisztor bemenete itt kevésbé csillapítja a rezgőköröket

megfelelően választjuk meg az induktivitás és a kapacitás arányát, és ha a csillapítás hatásának csökkentésére a meneteknek csak egy részét csatlakoztatjuk a bemenethez, illetve kimenethez. Természetesen az is fontos, hogy a megfelelő transzformátoráttétellel kiegyenlítsük az impedanciákat.

K. K.: A csatoláshoz feltétlenül transzformátorra van szükség?

O. I.: Nem feltétlenül. Többnyire csak egyszerű zárókört használunk. Ez tulajdonképpen az impedanciával és kapacitással megvalósított csatolás. Autotranszformátort is vehetünk, hangolt, primér áramkörrel, és ezt esetleg egy megcsapoláson keresztül kötjük össze az előző tranzisztor kimenetével.

A legnagyobb szelektivitásnak és a legkedvezőbb zenei átvitelnek megfelelő csatolást olyan transzformátorral érhetjük el, amelynek a primér körét, vagy mind a primér, mind pedig a szekundér körét hangoljuk. Az első megoldás a középfrekvenciás részben gyakori, amikor is ezek a transzformátorok a tekercsek közötti megfelelő mértékű csatolás (kritikus csatolás) révén kitűnő sávszűrőket alkotnak.

K. K.: Vagyis ezek a középfrekvenciás transzformátorok áteresztik az egész modulációs frekvenciasávot, de erősen csillapítják a modulációs sávon kívül eső frekvenciákat.

O. I.: Úgy van. Látom, nem felejtetted el, hogy ezzel lehet a legjobban biztosítani a szelektivitás és a hű zeneátvitel békés együttlését.

A láthatatlan veszély

K. K.: Világos tehát, hogy amennyiben a gyárok jó tekercseket készítenek, nem lesz semmi nehézségem a nagyfrekvenciás és a középfrekvenciás fokozataimmal.

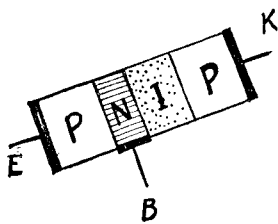
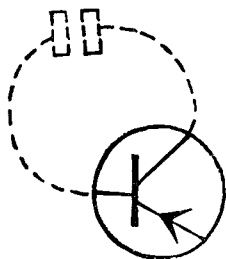
O. I.: Sajnos, le kell hútenem jámbor optimizmusodat. A tranzisztornak van egy rejtett tulajdonsága, amely láthatatlan ellenség módjára leselkedik rád és sok kellemetlenséget okozhat neked.

K. K.: Na jó. Én inkább nyíltan szeretek küzdeni. Mondd meg hát, mi ez az újabb kelepce.

O. I.: Ez a kollektor és bázis közötti belső kapacitás. Ha a bemenethez és a kimenethez azonos frekvenciára hangolt rezgőköröket csatlakoztatsz, ez a kapacitás (amelynek értéke néhány száz tíz pikofarad nagyságrendű) csatolást létesíthet rezgőkörök között, úgyhogy a békés tranzisztor nagyfrekvenciás oszcillátorra alakulhat át.

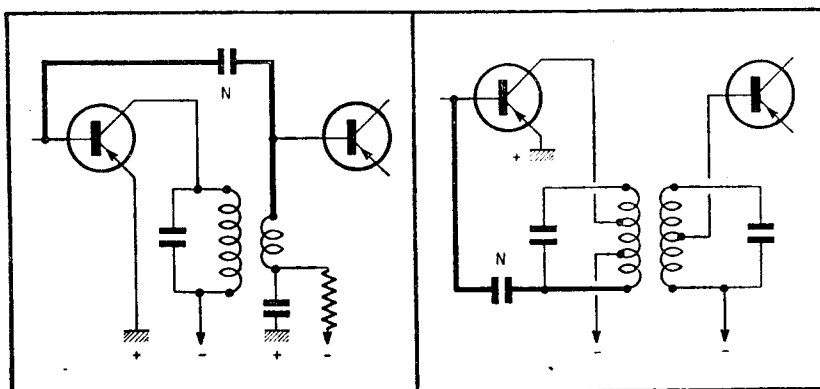
K. K.: Úgy emlékszem, az anód és rác közötti kapacitástól származó ilyen begerjedések elkerülésére az elektroncsövekben árnyékolórácsot szokás elhelyezni a két elektróda közé. Ezt az árnyékolórácsot meghatározott feszültségre kapcsoljuk. Ugyanezt, gondolom, a tranzisztorokban is meg lehet csinálni.

O. I.: Valóban ilyenek a $P-N-I-P$ tranzisztorok, amelyekről már beszélgettünk. A szennyezésmentes I típusú félvezető réteg csökkenti a bázis és kollektor közötti kapacitást, és ezzel bizonyos mértékben az árnyékolás szerepét tölti be. A drifttranzisztorokban szintén van elválasztóréteg a kollektor és a bázis között. A közönséges tranzisztorok esetében azonban, ha el akarjuk kerülni az ilyen spontán rezgések keletkezését, más módszerhez kell folyamodnunk. Ezt a módszert 1920 táján a nagyfrekvenciás triódkapcsolásokra



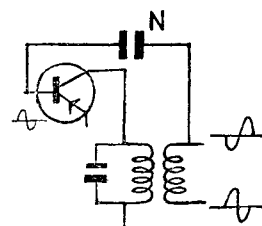
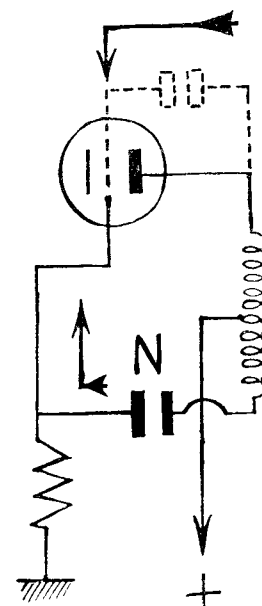
javasolta az amerikai *Hazeltine*, mert akkor még nem ismerték a tetródát, amelynek feltalálásával ez a kérdés az elektroncsöves kapcsolásokban véglegesen megoldódott. A módszer abban állt, hogy a káros kapacitás hatásának semlegesítésére ezzel egyenlő amplitudójú, de ellentétes fázisú feszültséget vezettek a vezérlőelektródára. A triódás *neutrodin*-kapcsolásokban tehát egy kis kondenzátoron keresztül ellentétes fázisban visszavezették a felerősített anódköri feszültség egy részét a rácusra.

K. K. : Véleményem szerint ez is a negatív visszacsatolás egy fajtája, amelyet most a nagyfrekvencián alkalmazunk. A tranzisztoros áramkörökben a bázisra



115. ábra. A kollektor és bázis közötti belső kapacitás hatásának semlegesítése az *N* kondenzátorral. Egyes esetekben ezzel a kondenzátorral sorbakapcsolnak egy ellenállást is, aminek előnye sokszor kétségsbe vonható

116. ábra. Neutralizáló kapcsolás arra az esetre, amikor a csatoló-kondenzátor primér és szekundér áramköre is rezgőkör

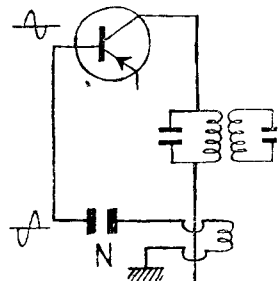


kell alkalmazni. Mit tegyünk, hogy megváltoztassuk a fázist? Iktassunk be egy fázisváltó fokozatot?

O. I. : Miért akarsz ilyen bonyolult megoldásokat? Valahol mindig találhatunk egy olyan pontot, amelynek feszültsége ellentétes fázisú a kollektoron levő feszültséggel. Ha hangolatlan szekundérkörű transzformátort használunk, ennek a szekundér tekercsnek az egyik végén megkapjuk a kívánt feszültséget.

K. K. : Tehát ezt a pontot az *N* kondenzátoron keresztül egyszerűen összekötjük a bázissal, de a kapacitást úgy állapítjuk meg, hogy az ilyen módon visszavezetett feszültség amplitudója megegyezék a kollektor és bázis közötti kapacitáson keresztül visszakerülő feszültség amplitudójával. Miért ne lehetne ugyanezt az eljárást akkor is alkalmazni, amikor a transzformátor szekundér tekercsén is hangolt rezgőkör van? Itt is a tekercs egyik végén levő feszültség ellentétes, a másik végén levő feszültség pedig egyező fázisú a felerősített feszültséggel.

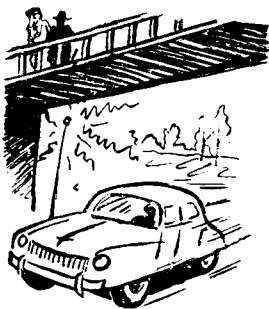
O. I. : Sajnos, tévedsz. Ebben az esetben ugyanis a feszültség fáziseltolása csak 90° -os, mégpedig a tekercs egyik végén levő feszültség 90° -kal siet, a másik végén levő feszültség pedig 90° -kal késik a kollektorfeszültséghez képest. Ez



kissé megnehezíti dolgunkat. A semlegesítő feszültséget ekkor egy kis segédtekercsről vehetjük le. Egyszerűbb azonban a primér tekercsen egy leágazást készíteni a tápforrás negatív sarka részére. A tekercsnek arról a végéről, amely e leágazásra vonatkoztatva a kollektorral összekötött másik tekercsrésszel ellentétes oldalon van, most már levehetjük a kollektor váltakozó feszültségével ellentétes fázisú feszültséget. Az így kapott feszültséget az N kondenzátoron keresztül egyszerűen a bázisra kapcsoljuk.

K. K.: Minden esetben szükséges, hogy neutralizáljuk a nagyfrekvenciás és a középfrekvenciás fokozatokat?

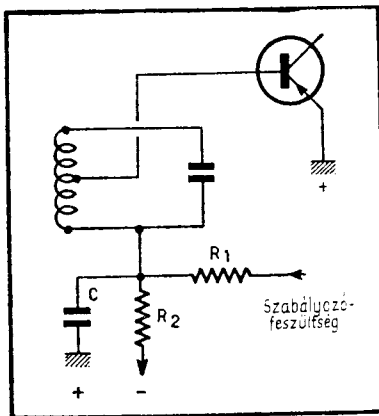
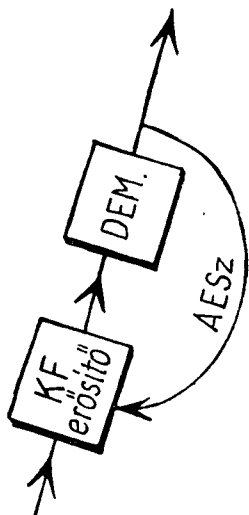
O. I.: Nem. A tranzistor kis ellenállásaival előidézett csillapítás sokszor elegendő az ilyen begerjedések megakadályozására. A $P-N-I-P$ tranzistorokban és a driftranzistorokban teljesen felesleges a semlegesítés. Egyébként jegyezd meg, hogy a nagyfrekvenciás és a középfrekvenciás erősítőkben is szükség van a hőmérsékleti hatások kiegyenlítésére (a kondenzátoros szűrés-
sel ellátott emitterkörü negatív visszacsatoló ellenállásra) és a bázisfeszültség stabilizálására. Ezeket az áramköröket csak azért nem szoktam mindig feltüntetni, hogy áttekinthetőbbek legyenek a kapcsolási rajzok.



Automatikus szabályozás

K. K.: Mondd csak, megvalósítható-e a tranzistoros vevőkben is a vett jelek erősségétől függő automatikus erősítésszabályozás? A fadingkiegyenlítésre gondolok, bár ez a szabályozás a vételi térerősség minden ingadozását kiegyenlíti, függetlenül attól, hogy az elhalkulás oka valóban fadingjelenség vagy egyszerűen csak az, hogy a gépkocsival, amelyben a vevőt hallgatjuk, egy fémszerkezetű híd alatt haladtunk át.

O. I.: Az automatikus erősítésszabályozást (más néven érzékenységszabályozást) a tranzistoros kapcsolásokban is ugyanolyan elv alapján érjük el, mint az elektroncsöves vevőkben. Azt már tudod, hogy a tranzistor teljesítményerősítése a meredekségtől függ, a meredekség viszont az emitteráramnak megfelelően változik. Így tehát a bázis előfeszültségének módosításával az erősí-



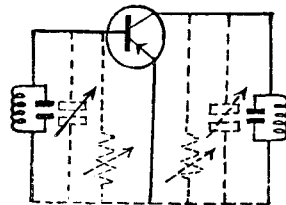
117. ábra. Automatikus erősítésszabályozású nagyfrekvenciás vagy középfrekvenciás erősítőfokozat

tést is befolyásolhatjuk. Ha — mint általában — $P-N-P$ tranzisztorról van szó, a bázisra kisebb negatív előfeszültséget engedve csökkentjük az emitteráramot, és ezzel együtt az erősítés is csökken.

K. K.: Az erre a célra felhasznált feszültséget, amint már látom, a demodulátort követő egyik pontról vesszük le, majd egy ellenállással kiegyenlítjük. Az ellenállást egy kapacitással csatolásmentesíteni kell.

O. I.: Pontosan így van. Csakhogy itt sem szabad elfelejtkezni arról, hogy a tranzisztorok vezérléséhez nem elegendő a feszültség: teljesítmény is szükséges. Éppen ezért a szabályozófeszültség levétele előtt sokszor erősítő-fokozatok is kellenek a demodulált jel egyenáramú összetevőjének felerősítésére. Később majd meglátjuk, hogy ez nem okoz semmilyen nehézséget.

K. K.: Addig is meglehetősen egyszerűnek látom az automatikus erősítés-szabályozással ellátott nagyfrekvenciás vagy középfrekvenciás fokozatot. A szabályozó feszültséget — amelynek pozitív irányban annál nagyobbak kell lennie, mennél nagyobb a jel — a B_1 ellenállás közbeiktatásával, a bemenő áramkörön keresztül a bázisra vezetjük (117. ábra). Az áramforrás negatív sarkával összekötött R_2 ellenállás ezzel az R_1 ellenállással együtt feszültségosztót alkot. Ilyen módon változni fog a bázis közepes potenciálja: ha a jel gyenge, a potenciál negatívabbá válik, tehát az erősítés megnő, amikor viszont a vett jelek megnőnek, a csökkenő potenciál csökkenti fogja az erősítést. Tehát amint Pangloss mondja *Candide*-nak, minden ezen a legeslegjobb világon a legnagyobb mértékben legjobb javunkat szolgálja.



Váratlan nehézség

O. I.: Megintcsak el kell rontanom a jókedvedet, és meg kell mondanom, optimizmusod nem egészen indokolt. Ne felejtse el, a tranzisztorban minden összefügg egymással; akármelyik mennyiség megváltozása maga után vonja a többi változását is. Itt például az emitteráram megváltozásával egyidejűleg és ugyanilyen irányban a bemenő és a kimenő kapacitás is megváltozik.

K. K.: Akkor hát a szabályozó ellenállás e változások révén elhangolja a tranzisztor bemenetével és kimenetével párhuzamosan kapcsolt rezgőköröket?

O. I.: El ám. De ez még semmi. A bemenő és a kimenő ellenállás is változik az emitteráram szerint, csakhogy ezek az ellenállások az emitterárammal éppen ellenkező értelemben módosulnak.

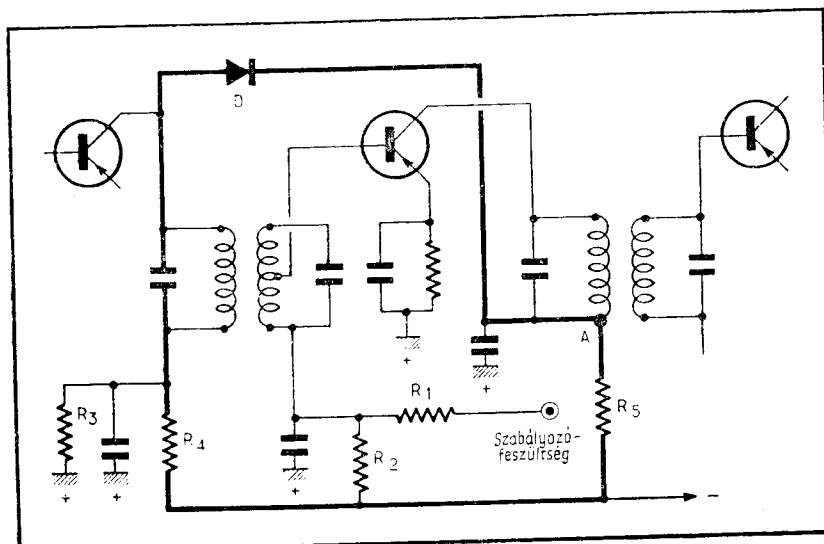
K. K.: Nagy baj ez? Növekedésük közben ezek az ellenállások egyre kevésbé fogják csillapítani a bemeneti és a kimeneti rezgőköröket, tehát a vétel egyre szelektívebb lesz...

O. I.: ... és ugyanígy romlik a zeneátvitel, mert az egyre keskenyebbé váló átviteli sávból eltűnnek a magas hangok.

K. K.: Amióta ismerlek, elég alkalmam volt, hogy tisztába jöjjenek módszereiddel. Az a szokásod, hogy egyre csak halmozod a súlyosabbnál súlyosabb nehézségeket, és a végén, mint a bűvész a varázspálcával, egyszerre eltüntetesz minden bajt. Vedd hát elő már azt a varázspálcát!

O. I.: Őszintén szólva, be kell érünk egy kompromisszumos megoldással is, mert a felsorolt nehézségeket nem könnyű mind kiküszöbölni. Ezért oly módon fokozhatjuk a szabályozóhatást, hogy egyidejűleg az egyik rezgőkör csilla-





118. ábra. Fokozott hatású automatikus erősítésszabályozás. A D dióda változó csillapítást okoz az első rezgőkörben

pítása is változzék, mégpedig növekedjék, amikor a vett jelek amplitúdója megnő. Egy igen szellemes megoldást itt láthatsz (118. ábra). Az erősítésszabályozás az előbbi, az egyenirányított jeleket az egyik tranzisztor bázisára vezetjük. Ezenkívül azonban szokatlan módon egy dióda is megjelenik az egyik bemeneti áramkör egyik vége és a kimeneti áramkörben levő R_5 ellenállás egyik vége között. Mit gondolsz, mi lehet ezzel a célunk?

K. K.: Na várj csak... Képzeld el, hogy a vett jelek erősödnek. Ebben az esetben az R_1 ellenálláson keresztül a második tranzisztor bázisára vezetett negatív feszültség csökken, tehát az emitteráram is kisebb lesz. Hasonlóképpen csökken a kollektoráram, úgyhogy az R_5 ellenállás mentén létesített feszültségesés szintén csökken, s az A pont kevésbé lesz negatív. Ennek következtében a D diódán keresztül folyó áram megnő, úgyhogy a potenciálkülönbség növekszik. Ez az egész...

O. I.: Hát nem, ezzel még nem fejeződik be a dolog. A dióda áramköre (amelyet vastag vonallal húztam meg), amint láthatod, párhuzamos az első rezgőkörünkkel. A benne folyó áram megnövekedése azt jelenti, hogy csökkent az áramkör ellenállása. Ilyen módon nagyobb teljesítményt vonunk el a rezgőkörből, tehát megnöveljük a csillapítását.

K. K.: Értem már! Az erősebb jelek idejére, amikor a tranzisztor belső ellenállásai növekszenek, mesterségesen beiktatunk ide egy csökkenő ellenállást. Ezáltal az egyik változással kiegyenlítjük a másikat. Ezenkívül az áramkör megnövelt csillapítása csökkenti az erősítést és elősegíti az automatikus erősítésszabályozást.

O. I.: Az a benyomásom, kedves barátom, hogy rövidesen te fogsz engem tanítani a tranzisztorok elméletére és gyakorlatára...



Tizenharmadik beszélgetés

Most már tudjuk, hogyan lehet a tranzisztossal nagyfrekvenciás, középfrekvenciás és kisfrekvenciás jeleket erősíteni, de arról még nem volt szó, hogyan térhetünk át az egyik ilyen frekvenciáról a másikra. Éppen ezért az Okos Ifjú a következőkben elárulja nekünk a demodulálás és a frekvenciaváltás titkait és közben néhány tranzisztoros oszcillátort is elmagyaráz.

Összefoglalás: Diódás demodulátor. — Egyenirányítási küszöb. — Gyakorlati kapcsolások. — Visszacsatolt audion. — Oszcillátorkapcsolások. — Keverés és frekvenciaátalakítás.

Áttérés a nagyfrekvenciáról középfrekvenciára, majd kisfrekvenciára

Az utolsó fehér foltok

K. K.: Most, amikor már a Holdról is vannak fényképfelvételeink, sokat gondolok azokra a régi térképekre, amelyeken még fehér foltok voltak az ismeretlen területek jelölésére, és amelyek nagyapáink korában szabadjára engedték Verne Gyula és társai képzeletét.

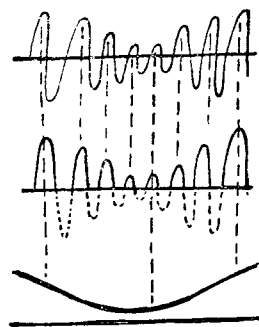
O. I.: Látom, mire akarsz kilyukadni. A vevőkészülék fokozatai között még két fehér foltot hagytunk: a demodulálást és a frekvenciaátalakítást, vagy más néven a frekvenciaváltást. Ezeket a foltokat már könnyen kitölthetjük, miután itt már nincsenek ravasz kelepécék, és gyakorlatilag már úgyis tudod, hogyan működik a diódás demodulátor.

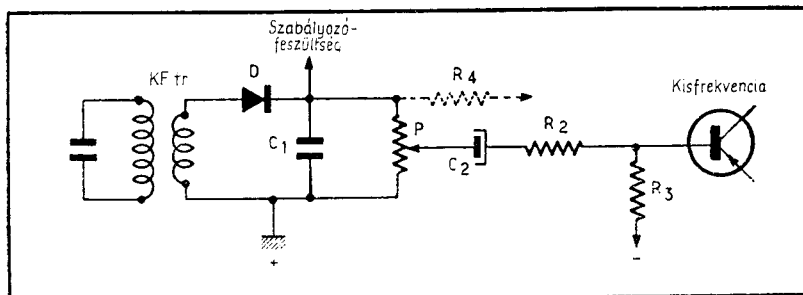
K. K.: Valóban, annak idején megbeszéltük, hogyan egyenirányíthatjuk diódával a nagyfrekvenciás jeleket; egyenirányítás után az egyirányú félhullámokat egy kapacitással kisimítjuk, és egy munkaellenálláson levezetjük a hangfrekvenciás feszültséget.



Demodulálás = egyenirányítás

O. I.: Nézd meg ezt a kapcsolási rajzot, nincs itt semmi rejtély részedre (119. ábra). A túérintkezős D diódával egyenirányítjuk az utolsó középfrekvenciás transzformátorról levett áramot, és a P ellenálláson ilyen módon kapott feszültség-hullámokat a C_1 kondenzátorral kisimítjuk, hogy leválasszunk a kisfrekvenciás összetevőt. A P potenciométer (hangerőszabályozó) karjának elforgatásával szabjuk meg, hogy a hangfrekvenciás feszültség hányad része jusson az elektrolitkondenzátoron keresztül (ne felejtse el, itt már hangfrekvenciás feszültség van) az első kisfrekvenciás tranzisztor bázisára.

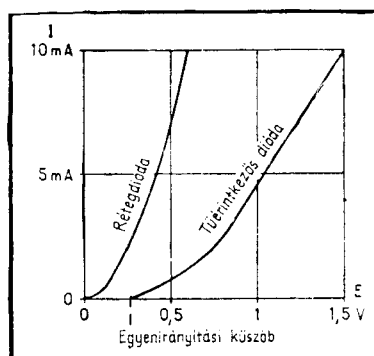




119. ábra. Az utolsó középfrekvenciás transzformátor és az első kisfrekvenciás tranzisztor közé beiktatott diódás demodulátor

K. K.: Miért van szükség erre az R_2 ellenállásra?

O. I.: Hogy a kisfrekvenciás tranzisztor kis bemenő ellenállása ne nagyon csillapítsa a középfrekvenciás transzformátort. Jegyezd meg, a túérintkezős dióda csak akkor kezd átvezetni „átvezetőirányban” az áramot, amikor az egyenirányítandó feszültség már elérte az egyenirányítási küszöbnek nevezett értéket. Éppen ezért ajánlatos a diódára olyan előfeszültséget is vezetni, amely megegyezik ezzel a (körülbelül 0,25 V) küszöbértékkel, hogy az ennél kisebb jeleket is egyenirányíthassuk, és hogy az ennél nagyobb, de még nem elég erős jeleket ne torzítsuk el. A P értékénél sokkal nagyobb értékű R_4 ellenállás ezzel a potenciométerrel feszültségosztót alkot, és a gyenge jelek idejére is vezetővé teszi a diódát.

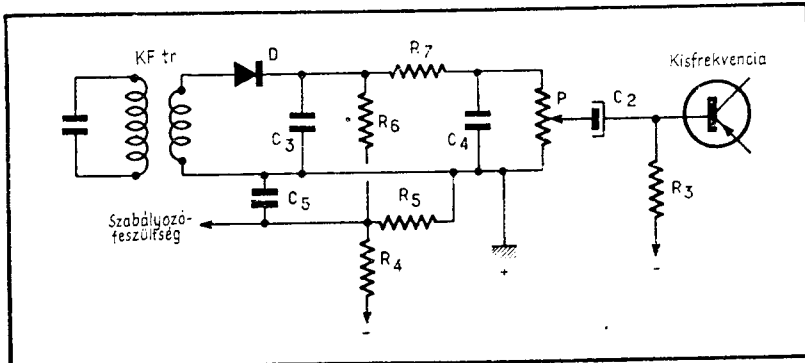


120. ábra. A diódaáram változása a két kivezetés közé kapcsolt feszültség függvényében. Amint az ábrán látható, a túérintkezős dióda csak akkor kezd egyenirányítani, amikor a feszültség már elérte a körülbelül 0,25 V-ot

K. K.: Úgy látom, az egész egyenirányított feszültséget felhasználod az automatikus erősítésszabályozásra.

O. I.: Még így sem vagyok biztos abban, hogy elegendő feszültséget kapok a kielégítő szabályozáshoz. Mielőtt azonban a felerősített fadingkiegyenlítő feszültségről beszélünk, próbáld meg logikus elemzőképességeddel követni ennek a „raffináltabb” demodulátorkapcsolásnak a működését.

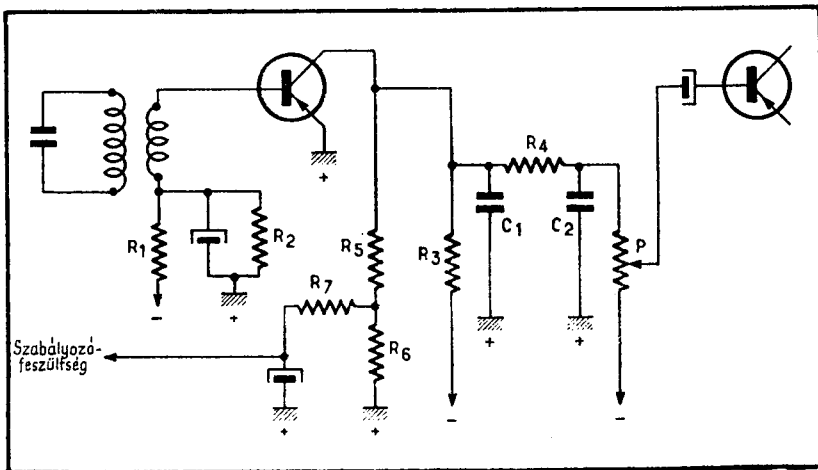
K. K.: Nem ijesztess meg velem. Az előzőtől abban különbözik, hogy beiktattad ezt a C_3 - R_7 - C_4 szűrőtagot; ez valójában egy kis aluláteresztő szűrő,



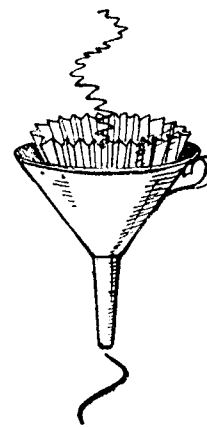
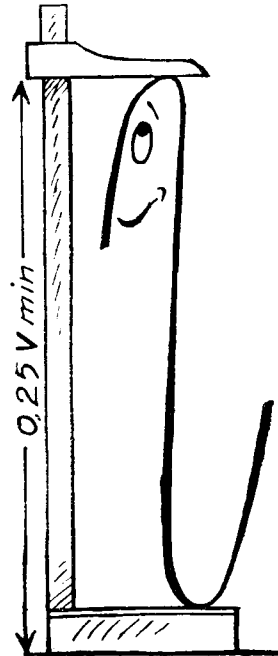
121. ábra. Demodulátorkapcsolás. A szabályozófeszültséget egy különálló munkaellenállásról lehet levenni, a demodulálással kapott kisfrekvenciás áramot egy ellenállásból és kapacitásból álló szűrőtaggal szűrjük

amely kiszűri a P potenciómteren megjelenő feszültség középfrekvenciás összetevőjének utolsó nyomait is. Ezenkívül egy különálló R_5 ellenálláson állítod elő a szabályozófeszültséget. Szűréséről (a csatolásmentesítésről) az R_6 ellenállással és a C_5 kondenzátorral gondoskodtál. Az előfeszültséget az R_4 ellenállás hozza létre. Végeredményben itt jobban elválasztottad a kisfrekvenciás áramköröket az automatikus erősítésszabályozás áramkörétől. De mutasd már meg, hogyan erősíthetjük a fadingkiegyenlítő feszültséget.

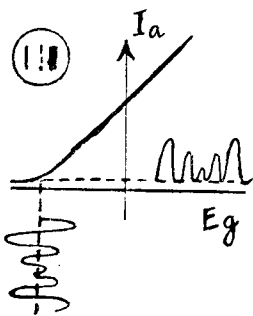
O. I.: Egyszerűen úgy, hogy egy tranzisztorral, vagyis helyesebben egy tranzisztor emittere és bázisa közötti átmeneti réteggel egyenirányítunk. Ez az átmenet tulajdonképpen rétegdiodát alkot, és küszöbértéke sokkal kisebb, mint a túérintkezős diódáé, úgyhogy az R_1 – R_2 feszültségosztóval előállított



122. ábra. Tranzisztoros demodulátor. Ez a kapcsolás felerősített automatikus erősítésszabályozó feszültséget állít elő

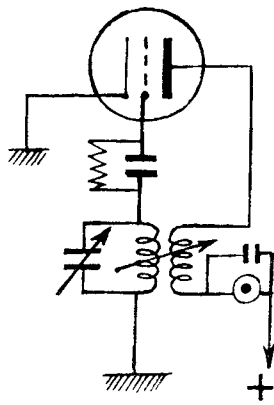


egészen kicsi előfeszültség révén a kis amplitudójú jeleket is egyenirányíthatjuk. Jegyezd meg jól, ennek az előfeszültségnek nem szabad meghaladnia a 0,1 V-ot. Egyébként ugyanis a tranzisztor egyenirányítás helyett erősítene a középfrekvenciás feszültséget, amire nincs semmi szükségünk. Így azonban csak azok a félhullámok érvényesülnek, amelyek negatívabb potenciálra viszik a bázist, úgyhogy a tranzisztor csak az ilyen félhullámoknak megfelelő áramokat fogja átvezetni.



K. K.: Hiszen ez ugyanaz, mint az elektroncsöves kapcsolásokban az anódkönyök-egyenirányítás! A többit már értem. Kollektorköri egyirányú áramimpulzusaink a tranzisztor erősítési tényezőjének megfelelően felerősített kisfrekvenciás feszültségeket létesítenek az R_3 ellenálláson. Ezek a feszültségek a $C_1-R_4-C_2$ szűrőtagon keresztül a P szabályozó potencióméterre jutnak, és innen folytatják útjukat a hangfrekvenciás erősítőfokozatok felé.

O. I.: Úgy van. Azt is megfigyelheted egyébként, hogy az R_6 ellenállás az R_5 ellenállással együtt feszültségosztót alkotva, mint munkaellenállás, megfelelő előfeszültséget szolgáltat az R_3 ellenálláson keresztül az automatikus erősítés-szabályozással vezérelt tranzisztorok bázisára.



A negatív visszacsatolás ellentéte

K. K.: Ezt a szabályozófeszültséget, amint látom, itt valóban felerősítettük. Minthogy azonban már úgyis a demodulálásról van szó, áruld el nekem légy szíves, hogy a tranzisztorokkal is megvalósítható-e a visszacsatolt audion, amelyet rendkívül nagy érzékenysége miatt mindig annyira csodáltam.

O. I.: Persze, hogy megvalósítható. A lényeg csak az, hogy a felerősített energia egy részét visszavezessük a kimeneti áramkörből a bemenetre. Magától értetődik...

K. K.: ... hogy a visszavezetett feszültségnek fázisban kell lennie a bemenő feszültséggel. Egyébként ugyanis negatív visszacsatolást létesítünk, és az erősítés megnövelése helyett csillapítóhatást érünk el.

O. I.: Vigyáznunk kell ezenkívül arra is, hogy a bemenet és a kimenet közötti csatolás ne legyen túlságosan szoros, mert különben...

K. K.: ... visszacsatolt demodulátorunk nagyfrekvenciás oszcillátorra alakul át, és nemkívánatos sugárzása interferenciafűttyöt idéz elő a szomszédok vevőiben.

O. I.: Ez akkor következik be, amikor a visszacsatolt energia meghaladja a bemeneti áramkörben különböző okok miatt elveszített energiát. Tudod, barátom, a nagyfrekvenciás oszcillátor nem mindig okoz veszekedést a szomszédokkal. Helyesen alkalmazva frekvenciaátalakítást tesz lehetővé.

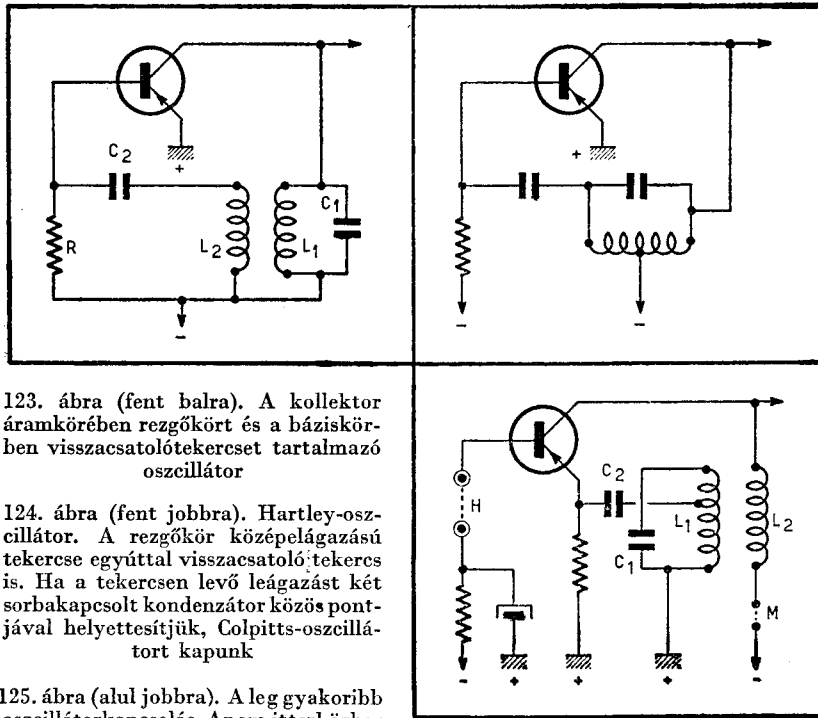
K. K.: Nagyon örülök, hogy végre szóba hoztad térképem utolsó fehér foltját. Remélem, hogy a tranzisztorok, amilyen sokoldalúak, számos oszcillátorkapcsolást is lehetővé tesznek.

O. I.: Nem fogsz csalódní bennük. Itt több tényezőt variálhatunk. A bemeneten a bázist vagy az emittert vezérelhetjük. A hangoláshoz a bázis vagy a kollektor áramkörét használhatjuk fel. Végül egyetlen tekercsel is készíthetünk oszcillátort, és ebben az esetben ezt a tekercset használjuk fel a hangoláshoz és a visszacsatoláshoz is.



K. K.: Ha megengeded, megpróbálok összehozni egy egészen egyszerű oszcillátort. A rezgőkört a kollektorkörbe iktatom be, és az L_1 rezgőköri tekercsről csatolást létesítek az L_2 tekercsre, amelynek egyik végét a C_2 kondenzátoron keresztül összekötöm a tranzisztor bázisával. Ennek előfeszültségét az R ellenállás állítja elő. Mit gondolsz, be lehet rezgetetni ezt a kapcsolást?

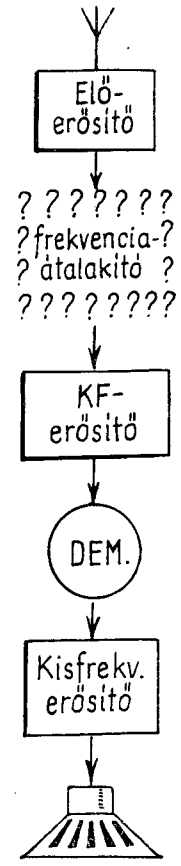
O. I.: Kétségtelenül, feltéve, hogy megfelelően állapítod meg a tekercselések irányát.



123. ábra (fent balra). A kollektor áramkörében rezgőkört és a báziskörben visszacsatolótekercset tartalmazó oszcillátor

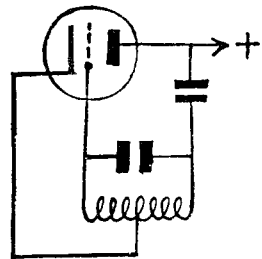
124. ábra (fent jobbra). Hartley-oszcillátor. A rezgőkör középelágazású tekercse egyúttal visszacsatolótekercs is. Ha a tekercsen levő leágazást két sorbakapcsolt kondenzátor közös pontjával helyettesítjük, Colpitts-oszcillátort kapunk

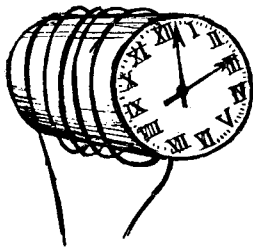
125. ábra (alul jobbra). A leggyakoribb oszcillátorkapcsolás. Az em itterkörben levő rezgőkör induktív csatolásban van a kollektor áramkörébe beiktatott visszacsatolótekercsel. A H és az M betű jelentésére vonatkozóan lásd a szöveget



K. K.: Honnan tudhatjuk előre, hogy teljesült-e ez a feltétel?
 O. I.: Gondolj mindig a Hartley-kapcsolásra; ennek tranzisztoros változatát itt láthatod (124. ábra). Nézd, a kollektorból a bázis felé haladva az áram keresztül folyik a menetek, de mindig ugyanazt az irányt követi. Alkalmazd ezt a szabályt a 123. ábra szerinti kapcsolásra, és ha az L_1 tekercsben a kollektorból az áramforrás negatív sarka felé haladó áram az óramutató járásával egyező irányban folyik át a menetek, ügyelj arra, hogy az áramforrás negatív sarkából a bázis felé folyó áram L_2 meneteiben is ugyanezt az irányt kövesse.

K. K.: És ha a bázis helyett az emittert vezéreljük, persze meg kell változtatnunk a tekercselési irányt.

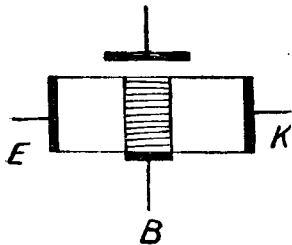




O. I.: Magától értetődik. Figyeld meg ezt a kapcsolást, itt az L_1-C_1 rezgőkört a C_2 kondenzátoron keresztül az emitterhez csatlakoztatjuk (125. ábra). A kollektorkörben levő visszacsatoló tekercsnek L_1 meneteivel ellentétes irányúnak kell lennie, mert az emitterre vezetett feszültség ellentétes fázisú a bázisfeszültséggel.

Triódák minden célra

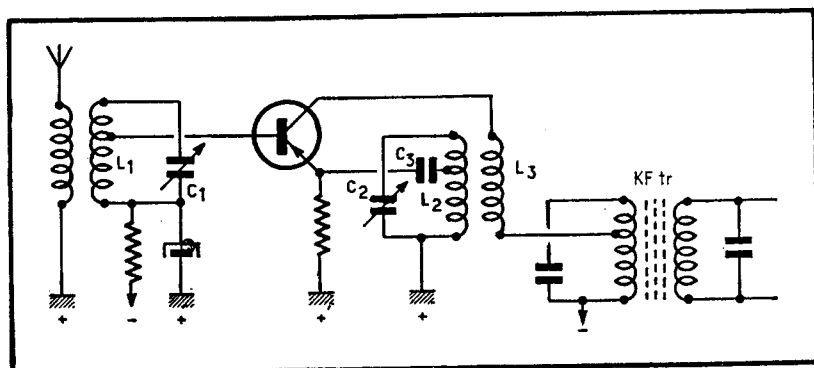
K. K.: Azt hiszem, le tudnék már rajzolni egy néhány tucat oszcillátorkapcsolást. De ha már ezekről beszélsz, bizonyára a frekvenciaátalakításra akarsz kilyukadni. Ezekkel még bajban vagyok. Hogyan lehetne teljes oszcillátoros keverőt összeállítani ezekből a tranzistorokból, amelyek egyszerűen csak félvezető triódák? Nem lehet valahogyan hexódákat, heptódákat és októdákat is készíteni félvezetőkből?



O. I.: Eddig még nem sikerült. Talán kidolgoznak majd olyan félvezető alkatrészeket, amelyeken két vezérlőelektróda lesz az áram befolyásolására. A bázis vezérlésével egyidejűleg egy elektróda villamos terével el lehetne téríteni útjukból a töltéshordozókat... Addig azonban meg kell elégednünk triódáinkkal is. Az első szuperheterodin-rendszerű vevőkészülékeket is akkor építették meg, amikor még csak a háromelektródás csöveket ismerték.

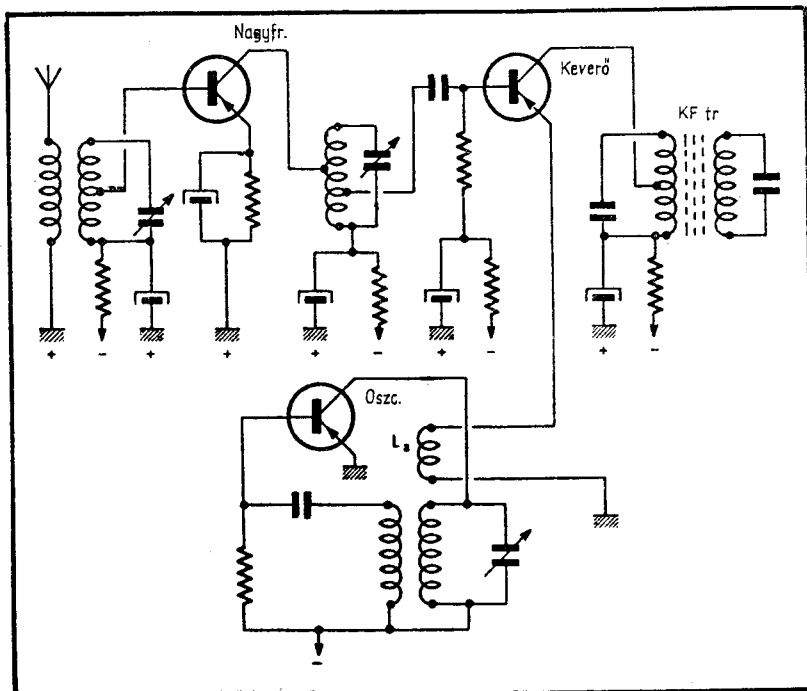
K. K.: Hogyan akarod ugyanannak a tranzisztornak a felhasználásával előállítani a helyi rezgéseket, keverni ezeket a rezgéseket az antenna nagyfrekvenciás rezgéseivel, majd az egészet egyenirányítani, hogy az üttetés eredményeként megkapd a középfrekvenciás összetevőt?

O. I.: Nagyon egyszerűen. Vedd a 125. ábra szerinti oszcillátort, iktasd be a H betűvel megjelölt helyen az antennajelre hangolt rezgőkört, majd az M helyén kapcsold be az első középfrekvenciás transzformátor primér tekercsét. Ezzel megkapod a 126. ábrán feltüntetett kapcsolási rajzot, amely a középfrekvencia értékével különbözik az antennával vett jel frekvenciájától, a frekvenciaátalakításnak nincsen semmi akadálya.

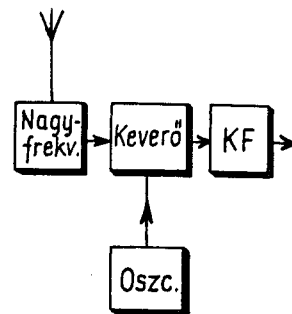


126. ábra. Az előző ábra szerinti kapcsolásból közvetlenül levezethető frekvenciaátalakító

K. K. : Valóban, a jeleket a bázisra vezetjük, az emitter és a kollektor között rezgéseket gerjesztünk, és persze kihasználjuk az erre a célra megfelelően elő-feszített tranzisztor jelleggörbéjének nonlinearitását, hogy egyenirányítsuk a kevert rezgéseket. De valljuk be, nem való ennyire kizsákmányolni ezt a sze-rencsétlen tranzisztort. Annyi sok munkát bízunk rá, hogy ez már a legvadabb rabszolgakorszakra emlékeztet.



127. ábra. Nagyfrekvenciás előerősítőt követő, különálló oszcillátorral működő keverőfokozat



O. I. : Ó, ettől még nem lesz semmi baja. De ha külön akarod választani az oszcillátort és a modulátort, ami rövidhullámon előnyös lehet, önálló oszcil-látort is használhatsz. Példaképpen megmutatom, milyen lehet az előerősítő (nagyfrekvenciás) fokozat és az ezt követő keverő és helyi oszcillátor kapcsolása, ha a helyi rezgéseket különálló tranzisztorral állítjuk elő. Ezeket a rezgéseket, amint látod, az oszcillátortekercessel csatolt L_3 tekercsen keresztül a keverő tranzisztor emitterére vezetjük.

K. K. : Ez a kapcsolás nagyon tetszik nekem. Egyébként most már örömmel megállapíthatom, hogy a tranzisztorok csodálatos országának térképén nincsen többé részemre semmilyen fehér folt.



Tizennegyedik beszélgetés

Ezzel a beszélgetéssel be is fejeződik a tranzisztorok szép országában tett utunk, és ha már utazásról van szó, a vonatnak is szerepelnie kell. Ezen az utolsó találkozáson megpróbáljuk hasznosítani eddig szerzett ismereteinket, és összeállítjuk egy teljes vevő kapcsolási rajzát. Miután ilyen módon megismertük a megtanult fogalmak gyakorlati alkalmazását, egy pillantást vetünk a tranzisztorok csodálatos jövőjébe.

Összefoglalás: Kapcsolási rajz egy teljes vevőkészülék összeállításához. — Ferritantenna. — A tranzisztorok felhasználásának változatos területei. — Egyenáram-átalakító. — A tranzisztorok jövője.

Kocsik és vonatok

A felhőtteknek szórakozás, a gyerekeknek nyugalom

K. K.: Ne csodálkozz, hogy ezzel a villamos vonattal játszom. Az unokaöcsémé, neki vettük. Csak ellenőrzöm a távvezérlését és a váltók működését.

O. I.: Látom. Az apák mindig ezt mondják a fiuknak, amikor játékvonatot vesznek neki, mert nem merik bevallani, hogy ők is mennyire szeretnek játszani vele... De egészen elkényeztetitek azt a fiút. Milyen sok kocsi, és milyen nagy választékban! Különböző osztályú személykocsik, hálókocsik, étkezőkocsik, hűtőkocsik, tartálykocsik, teherkocsik... nem is tudnám megmondani mindegyikről, hogy mire való!

K. K.: Csak arra való, hogy a legkülönbözőbb szerelvényeket lehessen összeállítani belőlük.

O. I.: Akárcsak a különböző tranzisztorkapcsolásokból, amelyekről beszéltünk, és amelyekből a legkülönbözőbb vevők készíthetők. Nem is lehetne felsorolni őket. Ha akarod, példaképpen összeállítok neked egy ilyen kapcsolást. Az ehhez szükséges kocsik, akarom mondani fokozatok a következők:

frekvenciaátalakító a 126. ábra szerint,

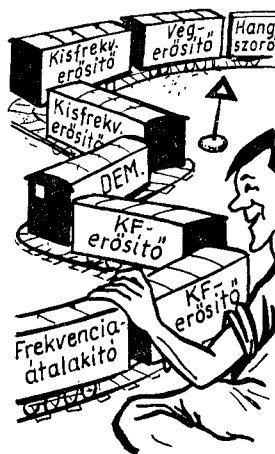
két középfrekvenciás erősítőfokozat a 115. ábra szerint (de a primér tekercsen megcsapolással, hogy kisebb legyen a csillapítás),

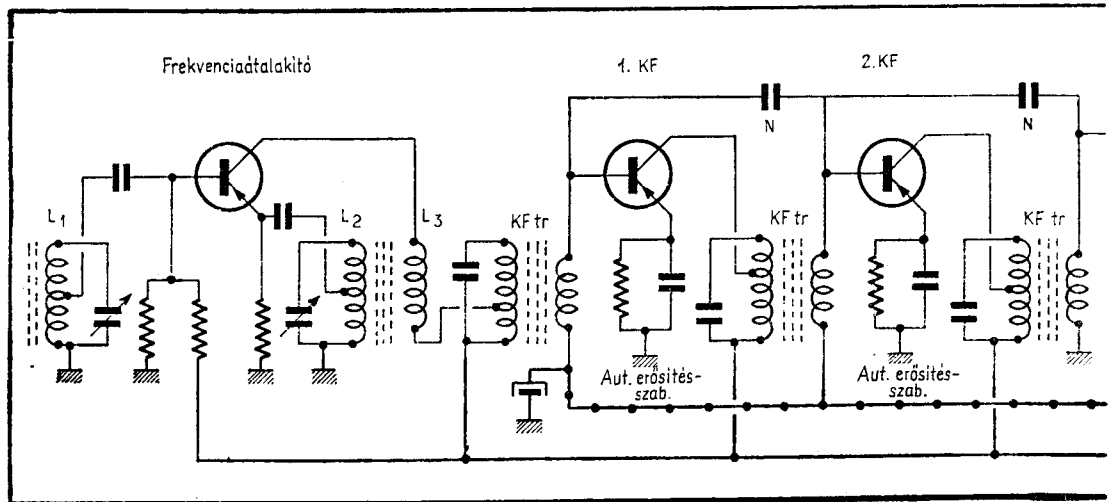
demodulátor a 119. ábra szerint,

két RC-esetolású kislefrekvenciás fokozat a 90. ábra szerint,

egy ellenütemű végerősítő fokozat a 101. ábra szerint.

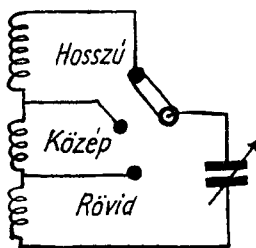
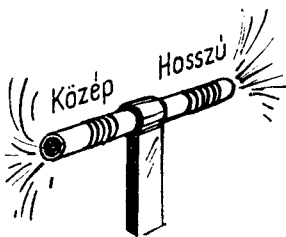
Figyeld meg jól ezt a kapcsolást, ugyanis azok a hordozható vevőkészülékek, amelyek annyira megzavarták nyári szabadságodat, néhány részletet nem tekintve, többnyire ilyen felépítésűek. Látsz-e valami olyant rajta, amit nem értesz?





128. ábra. A hordozható tranzistoros vevő szokásos kapcsolási rajza. Az egyes áramköri elemekhez számszerű értékeket nem adunk,

A miniatűr keretantenna

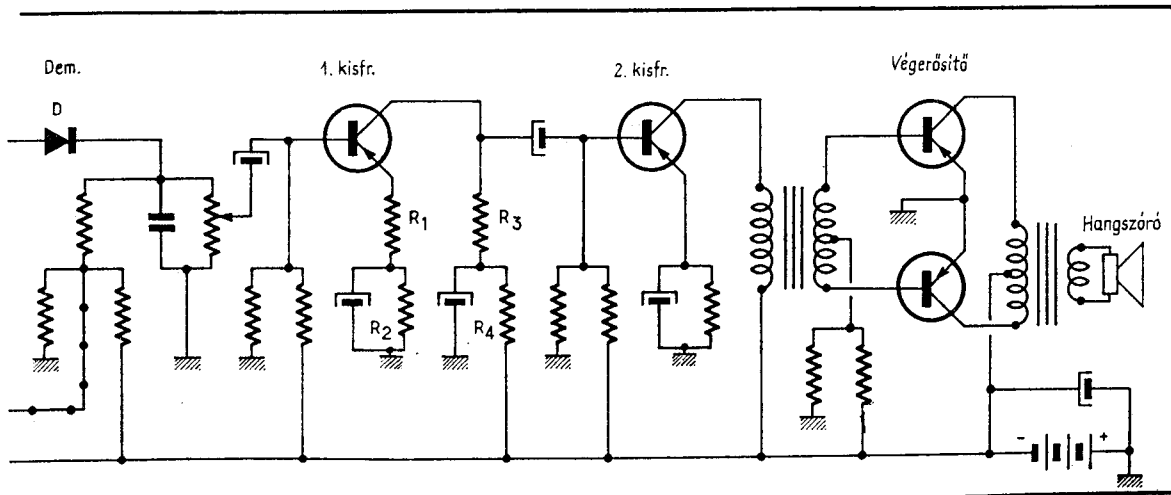


K. K.: Azt nem értem, miért nem rajzoltad be az antennát is?

O. I.: Ennek a vevőkészüléknek nincsen különálló antennája. Az L_1 bemeneti tekercs egy hosszú ferritrúdra kerül, és keretantenna módjára veszi a hullámokat.

K. K.: És nem kell nagy átmérőjűre venni a tekercset ahhoz, hogy megfelelő vételt érjünk el?

O. I.: Nem, mert a ferrit nagy permeabilitású mágneses kerámiái anyag, tehát mintegy magába szívja a környezetében levő mágneses erővonalakat. Ezzel az alig két centiméter átmérőjű tekercssel ugyanolyan antennahatást érhetünk el, mint a nagyméretű keretantennákkal. Ugyanúgy irányhatása is van, ezért a hordozható vevőket megfelelő irányba kell állítani. Ezáltal megnő a szelektivitásuk, amennyiben az adott irányból érzékenyen vesznek, a más irányokból jövő jeleket pedig erősen csillapítják. Jegyezd meg, hogy a valóságban az L_1 tekercs helyén (és ugyanígy az L_2 és az L_3 oszcillátortekercs helyén is) rendszerint több tekercs van. Ezeket egy átkapcsolóval lehet felváltva beiktatni az áramkörbe, és mindegyik tekercs egy-egy meghatározott hullámsávnak felel meg. A hosszúhullámok és a középhullámok vételére alkalmas készülékekben két-két tekercs szokott lenni. Ha rövidhullámon is akarunk venni, egy harmadik tekercset is beiktatunk, de ezt már egy kisméretű antennához csatlakoztatjuk, mert a rövidhullámok vételére a tekercs nem alkalmas. Van-e még valami, ami nem egészen világos előtted?



Az egyes részletek az előző beszélgetésekből már mind ismertek.
mert ezek az értékek a tranzisztorok típusától függenek

Most már minden világos !

K. K. : Nincsen. Amint látom, a bázisokon levő előfeszültséget feszültségosztóval rögzítetted.

O. I. : Ajánlatos valamilyen szabályozásról is gondoskodni úgy, hogy a két ellenállás közül az egyik helyén állítható ellenállást használunk. Rendkívül fontos, hogy a munkapontot helyesen állítsuk be.

K. K. : Az ellenütemű végerősítő fokozathoz tartozó teljesítménytranzisztorok előfeszültségét nyilván úgy kell beállítani, hogy *B* osztályú erősítést kapjunk, és ezáltal kíméljük a telepet.

O. I. : Hogy ellenőrizzem tudásodat, megmondanád, mi az R_1 , R_2 , R_3 és R_4 ellenállás szerepe?

K. K. : Ez a szűrés nélküli R_1 a soros negatív visszacsatolás ellenállása. Ezzel csökkentjük a torzításokat. Ezenkívül fokozzuk vele az R_2 ellenállás hatását. Az utóbbi a hőmérsékleti változások hatásának kiegyenlítésével stabilizálja a fokozat működését. Ami az R_3 ellenállást illeti, ez nem más, mint a jól ismert munkaellenállás. Végül R_4 a hozzátartozó kondenzátorral együtt csatolásmentesíti a kollektorkört, hogy megszüntessük vele az esetleges káros csatolásokat.



Mi mindenre jók a tranzisztorok!

O. I.: Helyes. Örömmel látom, nem vészett kárba az a sok időm, amelyet arra fordítottam, hogy elmagyarázzam neked a tranzisztorok működését, és azt, hogyan használhatjuk fel őket az erősítőkben és a rádióvevőkben.

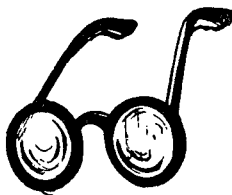
K. K.: Mert ugye, nemcsak ezekre korlátozódik a tranzisztorok alkalmazása?

O. I.: Elképzelheted, mennyire lelkesednek az elektronikusok ezekért a csodálatos kristálytriódákért. Méretük és súlyuk nagyon kicsi, fogyasztásuk (a fűtőáramot is igénylő elektroncsövek fogyasztásához képest) egészen jelentéktelen, élettartamuk pedig rendkívül hosszú. Az első tranzisztor megjelenése után tíz évvel komoly szakemberek már azt állítják, hogy ezek a csodálatos triódák legalább százezer óráig használhatók. Az egészben a legkülönösebb az, hogy a kérdéses tíz év összesen csak nyolcvanhétezer hatszáznegyvennyolc órát tesz ki! Ebben a számításban nem felejtkeztem el a szökőévekről sem. Ennek ellenére az extrapolálás, amellyel ezt az élettartamot kaptuk, bármilyen merésznek látszana is, pontos lehet, sőt, talán túlságosan óvatos is.

K. K.: Úgy tudom, az elektronikus számológépek nagyon sok tranzisztort fogyasztanak. Egyes gépekben tízezzrel lehetnek a tranzisztorok.

O. I.: Gondolhatod, milyen nagy előny ebben az esetben a kis méret és az, hogy gyakorlatilag nem kell félni semmilyen melegezettől.

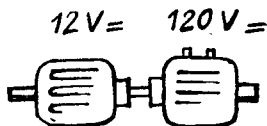
K. K.: Olvastam, hogy éppen e kis méretek folytán lehetett olyan hallókészülékeket szerkeszteni a nagyothalló személyek részére, amelyek a szemüveg két szárába építhetők be, és így teljesen láthatatlanok.



O. I.: Úgy van. Képzeld csak el, milyen sokat jelentenek a tranzisztorok azokban a különleges berendezésekben, amelyekben minden gramm, minden köbcentiméter és minden milliwattnyi fogyasztás rendkívül sokat számít.

K. K.: Ezek szerint a tranzisztor mindenhol előnyösebb, mint az elektroncső.

O. I.: Ez elhamarkodott vélemény volna. Egyelőre vannak olyan területek, ahol az elektroncsöveket nem lehet tranzisztorokkal helyettesíteni. Ilyenek például a nagyteljesítményű rádióadók. Az is igaz viszont, hogy vannak olyan feladatok is, amelyeket csak tranzisztorral lehet megoldani. Így tehát az elektroncsövek és a félvezetők között meglehetősen békés együttélés, ha mind a kettőt a maga helyén alkalmazzuk.

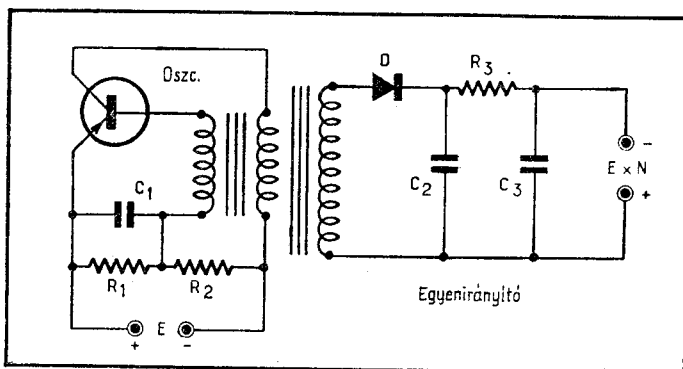


Kétségtelenül lesz még alkalmunk elbeszélgetni a tranzisztorok egyéb alkalmazásairól, például a tranzisztoros kapcsolóáramkörökről, multivibrátorokról, billenőkapcsolásokról; ezeket még nem ismered, és ezekkel is összeállíthatunk különböző elektronikus készülékeket, amelyekkel jól elszórakozhatnánk. Addig is megmutatok neked egy egyszerű példát, egy egyenáramú átalakítót, amely a tranzisztorokkal sokkal egyszerűbben megvalósítható, mint az elektroncsövekkel.

A néma átalakító

K. K.: Mit nevezel egyenáramú átalakítónak?

O. I.: Olyan készüléket, amellyel megnövelhetjük az egyenáramú tápforrás feszültségét. Ezt a feladatot eddig úgy oldották meg, hogy például a tizenkét voltos teplel egyenáramú motort tápláltak, a motor viszont egyenáramú generátort (dinamót) hajtott, és ez a dinamó mondjuk százhusz voltos feszültséget fejlesztett.



129. ábra. Az U egyenfeszültség N -szeres megnövelésére alkalmas átalakító. Az R_1 – R_2 feszültségosztó megfelelő előfeszültséget szolgáltat a bázisra

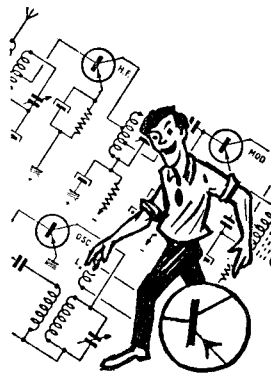
K. K.: Milyen bonyolult lehet ez, és nyilvánvalóan nagyon rossz a hatásfoka.

O. I.: Ugyanezt a feladatot egyetlen tranzisztorra minden zaj és mozgó alkatrész nélkül jobb hatásfokkal lehet megoldani. Az E feszültségű tápforrás egyenáramát váltakozó árammá alakítjuk át. Ehhez a tranzisztort kisfrekvenciás záróoszillátornak megfelelő kapcsolásban használjuk. Így nevezzük, amint tudod, a szorosan csatolt tekercsekkel működő oszcillátorokat; a rezgések távolról sem szinuszosak, de ez itt nem sokat számít.

K. K.: A többit már magamtól is kitalálom. Ugyanarra a mágneses magra egy harmadik tekercset is helyezünk, de ennek sokkal több menetből kell állnia, hogy megnőjön a váltakozó feszültség. Ezután már csak az van hátra, hogy az így kapott váltakozó áramot egy diórával egyenirányítjuk, majd az egyenirányított áramot az R_3 ellenállásból és C_2 , C_3 kondenzátorból álló szűrővel kisimítjuk, és megvan az n -szeresére megnövelt egyenfeszültség.

O. I.: Megint csak bebizonyítottad kitűnő értelmi képességeidet. Gratulálok!

Úgy látom, jól megértetted mindazt, amit elmagyaráztam neked, és már minden nehézség nélkül el fogsz igazodni a tranzistoros kapcsolások labirintusain. Tudj meg azonban, hogy a félvezetők technikája továbbra is erősen fejlődik, és újabb területeket hódít meg (például a televízióban), a technológiai fejlődés viszont kétségtelenül még sok meglepetést tartogat számunkra. Éppen ezért azt tanácsolom, ne maradj el e fejlődés mögött. Kövesd figyelmesen az újabb eredményeket, olvasd el a műszaki lapokban megjelenő cik-



keket. Ne felejtkezz meg soha arról, amit *Francis Bacon* mondott: „Ami nem újul meg, megsemmisül, mert az idő kérelhetetlen múlása mindent átalakítgat.” Ne habozz végül a gyakorlatban is hasznosítani ismereteidet, kísérletezz magad is tranzistoros kapcsolások összeállításával. Így még jobban rájössz arra ...

K. K.: ... milyen egyszerű is ez a tranzistor!

VÉGE



Tartalom

<i>Előszó</i>	5
<i>Bevezetés</i>	7
<i>Első beszélgetés: Az atomok élete</i>	9
Félvezetők. — A tranzisztor működése és előnyei. — A hő hatása a tranzisztorban. — Határfrekvencia, teljesítménykorlátozás. — Molekulák. — Atomok. — Protonok, neutronok és elektronok. — Az elektronok eloszlása az atomhéjakon. — Ionizálás. — Vegyértékek. — Kristályrács.	
<i>Második beszélgetés: Az átmenetek</i>	21
Saját vezetés. — Fényérzékeny ellenállások és fényelemek. — Szennyezések. — Donorok. — Lyukak, vagyis elektronhiányok. — Akceptorok. — <i>P</i> és <i>N</i> típusú félvezetők. — Átmenetek. — Potenciálgát. — Nyitóirányú feszültség és zárófeszültség. — Zener-feszültség. — Dióda. — Félvezető egyenirányítók.	
<i>Harmadik beszélgetés: Megérkeztünk a tranzisztorokhoz!</i>	31
<i>P-N-P</i> és <i>N-P-N</i> típusú tranzisztorok. — Nyugalmi áram. — Bázisáram. — A tranzisztorhatás. — Áramerősítés. — Az elektroncsövek és a tranzisztorok közötti hasonlatosság. — Bemenő és kimenő ellenállás. — Feszültségerősítés. — A tranzisztorok táplálása.	
<i>Negyedik beszélgetés: A tranzisztorok fizikája</i>	39
A töltések mozgása. — Többségi töltéshordozók. — A <i>P-N-P</i> tranzisztor működése. — Fémekből álló vegyületek. — A kivezetések felismerése. — A tranzisztorok rajzjelei. — Az alapfogalmak összefoglalása.	
<i>Ötödik beszélgetés: Egy kis technológia</i>	47
Zónás olvasztásos tisztítás. — Elektronikus melegítés. — Az egykristály növesztése. — Felszeletelés. — Az átmenetek növesztésének módszerei. — Ötvözött tranzisztorok. — A nagyteljesítményű tranzisztorokkal kapcsolatos problémák. — Diffúziós eljárás. — Átfutási idő. — Az emitter és kollektor közötti kapacitás szerepe. — Tranzisztor-tetróda. — Felületi záróréteges tranzisztorok. — Kétszeres diffúzió. — A drifttranzisztor. — <i>P-N-I-P</i> típus. — Mesa-tranzisztor. — Térhatású tranzisztor.	

<i>Hatodik beszélgetés</i> : A diagramok világa	59
A jelleggörbék felvételéhez szükséges kapcsolás összeállítása. — Az $I_b = f(U_b)$ és az $I_k = f(U_b)$ jelleggörbe. — Meredekség. — Áramerősítés. — Bemenő ellenállás. — A meredekség, a belső ellenállás és az áramerősítés közötti összefüggés. — Telítés. — Jelleggörbe-seregek. — A pentódára emlékeztető tulajdonságok. — Határteljesítmény. — Kimenő ellenállás. — A paraméterek meghatározása a jelleggörbék alapján.	
<i>Hetedik beszélgetés</i> : Egyenesek és görbék	71
Sztatikus és dinamikus jelleggörbék. — A munkaegyenes berajzolása. — Munkapont. — Áramerősítés, feszültség-erősítés és teljesítményerősítés. — A váltakozó áramú összetevő legnagyobb értékei. — Meddőfeszültség. — A terhelőimpedancia megválasztása. — Dinamikus meredekség. — A bázis előfeszítése.	
<i>Nyolcadik beszélgetés</i> : Visszahatások	81
A negatív visszacsatolás előnyei. — Negatív áram és negatív feszültség-visszacsatolás. — Elektroncsöves és tranzisztoros kapcsolások. — A negatív visszacsatolás hatása a bemenő és a kimenő ellenállásra. — A tranzisztorokkal előidézett fázistorzítás. — Belső negatív visszacsatolás. — A torzításban megmutatkozó hőmérsékleti hatások. — E hatások kiegyenlítése negatív visszacsatolással. — A terisztorok alkalmazása.	
<i>Kilencedik beszélgetés</i> : Közös emitter. Közös bázis. Közös kollektor	93
Elektroncsöves kapcsolások földelt katóddal, földelt rácossal vagy földelt anóddal. — Közös emitteres, közös bázisú és közös kollektoros tranzisztoros kapcsolások. — A három alapkapsolás áramerősítése és feszültség-erősítése. — Bemenő és kimenő ellenállásuk. — A jellemző adatok áttekintő táblázata.	
<i>Két levél</i> : Illesztési kérdések	102
Generátor és fogyasztó. — Elektromotoros erő és belső ellenállás. — Kapocsfeszültség. — Feszültségvezérlés. — Áramvezérlés. — A legkedvezőbb energiaátadás feltételei. — Impedanciaillesztés. — A transzformátor alkalmazása. — A legkedvezőbb transzformátoráttétel.	
<i>Tizedik beszélgetés</i> : Különböző csatolások	109
Az $N-P-N$ tranzisztor alapkapsolásai. — A transzformátoros csatolás előnyei és hátrányai. — A hangerősség szabályozása. — Ellenállással és kapacitással létesített csatolás. — A csatolókondenzátor kapacitása. — Közvetlen csatolás. — Egyenáramú erősítő. — Kiegészítő tranzisztorok. — Tandemkapsolású tranzisztorok.	
<i>Tizenegyedik beszélgetés</i> : Takarékoskodás és teljesítményerősítés	121
A munkapont megválasztása. — Csúsztatott feszültségű takarékkapsolás. — B osztályú ellenütemű erősítőfokozat. — Transzformátoros fázisforgatás. — Fázisváltó. — Tranzisztoros katódkövető. — Kiegészítő tranzisztorokkal megvalósított ellenütemű fokozat. — A végerősítő fokozat gyakorlati kapcsolása.	

<i>Tizenkettedik beszélgetés</i> : A nagyfrekvenciák birodalmában	131
Határfrekvencia. — Rezgőkörös csatolás. — A csillapítás hatása. — Nagyfrekvenciás és középfrekvenciás fokozatok. — A kollektor és bázis közötti kapacitás. — Neutro-din. — Fadingkiegyenlítés. — A belső kapacitások és ellenállások változása. — Fokozott hatású fadingkiegyenlítés.	
<i>Tizenharmadik beszélgetés</i> : Áttérés a nagyfrekvenciáról középfrekvenciára, majd kis-frekvenciára	139
Diódás demodulátor. — Egyenirányítási küszöb. — Gyakorlati kapcsolások. — Visszacsatolt audion. — Oszcillátorkapcsolások. — Keverés és frekvenciaátalakítás.	
<i>Tizennegyedik beszélgetés</i> : Kocsik és vonatok	147
Kapcsolási rajz egy teljes vevőkészülék összeállításához. — Ferritantenna. — A tranzisztorok felhasználásának változatos területei. — Egyenáram-átalakító. — A tranzisztorok jövője.	