

Híradástechnikai alkatrészek

Dr. Wersényi György

Széchenyi István Egyetem
Távközlési Tanszék

2004

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	4
1.1. Tematika.....	4
1.2. Az elektronika története.....	4
1.3. Passzív elemek és hálózataik.....	5
1.4. Matematikai háttér.....	6
1.4.1. Az idő szerinti derivált.....	6
1.4.2. A frekvencia-transzformáció.....	8
1.4.3 Az impedancia.....	10
2. Passzív eszközök és hálózataik.....	14
2.1. A kondenzátor.....	14
2.2. A tekercs.....	15
2.3. Az ellenállás.....	18
2.4. A források.....	19
2.5. Impedancia.....	20
3. Passzív eszközök.....	22
3.1. Az ellenállás.....	22
3.1.1. Állandó értékű tömörellenállások.....	26
3.1.2. Állandó értékű rétegellenállások.....	29
3.1.3. Állandó értékű huzalellenállások.....	34
3.1.4. Változó és szabályozható értékű ellenállások.....	36
3.1.5. Hőmérsékletfüggő ellenállások.....	37
3.1.6. Speciális ellenállások.....	40
3.2 A kapacitás.....	41
3.2.1 Műanyag dielektrikumú kondenzátorok.....	43
3.2.2 Papír dielektrikumú kondenzátorok.....	54
3.2.3 Kerámia dielektrikumú kondenzátorok.....	54
3.2.4 Egyéb kondenzátorok.....	56
3.3 Az induktivitás.....	57
3.3.1 A mágneses anyagok.....	59
3.3.2 A tekercsek fajtái.....	63
3.3.3 Követelmények.....	65
4. Elektronfizika.....	66
4.1. Klasszikus fizikai kép.....	66
4.1.1. Félvezetők.....	67
4.1.2. Áramok félvezetőkben.....	72
4.2. A kvantumfizikai kép.....	73
4.2.1. Vezetés és szigetelés.....	75
4.2.2. Szupravezetők.....	76
5. A pn-átmenet.....	77
5.1 Másodlagos jelenségek.....	82
5.2 Dióda.....	82
5.2.1 Adatlap.....	83
5.2.2 Zener-dióda.....	84

5.2.3 Varicap-dióda	86
5.2.4 Tokozás	86
5.3 Tranzisztor	88
5.3.1 Bipoláris tranzisztor	88
5.3.1.1 Másodlagos jelenségek	91
5.3.1.2 Tranzisztorhatás	91
5.3.1.3 Üzem módok	93
5.3.1.4 Karakterisztikák	94
5.3.2 Térvezérelt tranzisztorok	95
5.3.2.1 J-FET	95
5.3.2.2 MOS-FET	96
5.3.3 Tranzisztorok jelölési rendszere	98
5.3.3.1 A hőelvezetés	99
5.3.3.2 A tirisztor	100
6. Mikroelektronika és technológia	101
6.1. Bevezetés	101
6.2 Félvezetőgyártás	101
6.3 Fém kontaktusok kialakítása	104
6.4. Tokozás	104
6.5 Az integrált áramkörök alkatrész készlete	105
6.5.1 MOS alapú alkatrészek	106
6.5.2 Bipoláris alapú alkatrészek	107
6.6. Integrált tranzisztorok villamos tulajdonságai	108
6.7. A SiO ₂ tulajdonságai	109
6.8. Csomagolás, szállítás	111
7. Irodalomjegyzék	113

1. Bevezetés

1.1. Tematika

A Széchenyi István Egyetem villamosmérnöki képzésben szakmai alaptantárgyként nyújtja a híradástechnikai és általánosabb értelemben „nem erős áramú” elektronikai alkatrészek alapszintű megismerését. Ez magába foglalja elsősorban az ide vonatkozó matematikai apparátus, definíciók elsajátítását, amelyben részben épít az elméleti villamosságtanra és a párhuzamosan folyó matematikai oktatásra is (deriválás, integrálás, komplex függvénytan). Ugyanakkor nem célja a tervezés, méretezés és áramkörépítés, amely az elektronika tárgykörbe tartozik.

Feladata viszont az ún. „eszközfizika” ismertetése, különösen az alapvető fizikai jelenségek és alapok megismertetése az elektronfizikából, kvantum elektrodinamikából. Továbbá legfontosabb célja, hogy a hallgatók megismerjék az ún. katalógusadatokat, karakterisztikákat, a különböző felhasználási területekre (frekvencia, teljesítmény, hőtani adatok stb.) szánt alkatrészeket, csoportjaikat, azok tulajdonságait, a felhasznált anyagokat. Ez elsősorban a passzív elemekre vonatkozik (R, L, C), de röviden terítékre kerülnek aktív eszközök is (dióda, tranzistor). Utóbbi külön tantárgyként a második félévben kerül oktatásra részletesen.

Végül, de nem utolsósorban ez a tárgy nyújt lehetőséget a mikroelektronika és elektronikai gyártástechnológia bemutatására: miként állítjuk elő ezeket az eszközöket, és miként működik a mai világ mikroméreteiben, integrált áramkörökben a digitális technikában (memóriák, chipek, processzorok).

1.2. Az elektronika története

Az angol szaknyelvben ismert az ún. „4C” felosztása az elektronikának:

Communication (távközlés)
Computation (számítógép technika)
Control (szabályozás technika)
Components (alkatrészek)

Ebből az utolsó, alkatrészek fejezet az, amely a tárgyhoz tartozik. Az elektronika története a távközléssel vette kezdetét a XIX. században:

1837 Morse, telegráf
1876 Bell, telefon
1877 Edison, fonográf (az első „ROM”)
1865 Maxwell, az elektromágneses elmélet, egyenletek
1888 Herz kísérletileg előállítja a hullámokat (23 évvel később!)
1896 Marconi, drótnélküli távíró
1895 Lorenz, az elektronok felfedezése (elektroncső korszak)

- 1897 Braun, az első katódsugárcső
- 1904 Flemming, az első dióda (nem lineáris eszköz)
- 1920 rádió távközlés
- 1940 televízió, radar
- 1948 Bell labor, bipoláris eszköz: germánium-tűs tranzisztor
- 1954 szilícium tranzisztor
- 1958 az első integrált áramkör, és a JFET
- 1960 SSI (<100 elem), és a MOSFET
- 1966 MSI (~ n100 elem)
- 1969 LSI (~ n1000 elem), mikroprocesszor
- 1975 VLSI (~ n1000 elem)
- ma ULSI (~ n1 000000 elem)

1.3. Passzív elemek és hálózataik

Definíció: **passzív** elem az az áramköri elem, ami hőt ad le (ellenállás) vagy felhalmozza az energiát (kondenzátor, induktivitás). Áramköri szempontból szoktuk még ezt az elnevezést használni azokra az elemekre, melyek sem önmagukban, sem hálózatba kapcsolva nem igényelnek tápfeszültséget és erősítésre nem képesek (pl. hangszóró, passzív szűrő, potméter). Minden elem, ami nem passzív, az **aktív**. Képesek erősítésre bizonyos körülmények között, de ehhez tápfeszültséget (energiát) igényelnek. Aktív kétpólusok legegyszerűbb esetben a jelforrások (feszültség- ill. áramgenerátor, elemek). Másik példa lehet a PC-hez gyártott kisméretű hangszórók, melyek valóban képesek erősítésre, igaz, tápfeszültséget is igényelnek (a bennük található tranzisztor miatt).

Kétpólusnak (egykapu) nevezzük azokat az elemeket, melynek két kivezetése (lába) van: egy átfolyó áram és egy fellépő feszültség tartozik hozzá. Minden kétpólusnak van teljesítménye és végzett munkája is. Értelemszerűen, léteznek sokpólusok is, legelterjedtebb még a négypólus (kétkapu), melyet egyik kétpólusán gerjesztjük, másik kétpólusán pedig levesszük a jelet. A tranzisztor hárompólusú aktív elem.

Legegyszerűbb passzív eszközök az **ellenállás** (R), az **induktivitás** vagy tekercs (L) illetve a **kapacitás** vagy kondenzátor (C). A belőlük felépülő hálózatokat passzív RLC-köröknek is nevezzük, leggyakrabban szűrőkben, rezgőkörökben használjuk. A szűrő olyan eszköz, amely általában passzív elemekből épül fel és a jelet a frekvenciatartományban módosítja. Az ellenállás rezisztív elem (innen ered az R-jelölés), nagyságától függően „ellenáll” az áram, az elektronok áramlásának. Minél nagyobb értékű egy ellenállás annál inkább melegszik és annál több hőt ad le; energia felhalmozására nem képes. Az induktivitás és a kapacitás fizikai felépítéséből adódóan (a két töltött felület közelhelyezése ill. a tekercsmegetek egymásra hatása) képesek az elektromos töltés, így az energia felhalmozására, rövid idejű tárolására. Ezeket dinamikus elemeknek hívjuk.

Ahhoz, hogy akár a legegyszerűbb eszközöket is tárgyalni tudjuk, emelt szintű matematikai apparátusra van szükség. A működést leíró egyenletek differenciál- vagy integrál alakban állnak elő, így a legegyszerűbb esetben is az idő szerinti derivált fogalmát ismerni kell. Már középiskolában is elhangzott, hogy az áramnak és a feszültségnek iránya is van, ezért komolyabb számításokban a vektoranalízist hívjuk segítségül. Egyszerűbb esetekben ezek az irányok kétféleképpen lehetnek csak (polaritás) egy vezetékben pl., de az impedancia fogalma elkerülhetetlen. A komplex számok és a komplex függvénytan nem csak az impedanciához kell, de a frekvenciatartománybeli analízishez is. A mérnöktudományok alapvető, elkerülhetetlen része a Fourier-analízis és a frekvencia-transzformáció (FFT). Ez utóbbi

inkább az elméleti villamosságtan része, itt az egyszerűbb fogalmak kerülnek csak elő, mint az átviteli függvény (átviteli karakterisztika, ami a komplex átviteli függvény abszolút értéke). Általános értelemben fogjuk a következőkben használni a **karakterisztika** fogalmát: minden olyan összefüggés, matematikai kapcsolat, amely megadja két fizikai mennyiség közötti összefüggést egymás függvényében. Egy karakterisztika lehet lineáris illetve nem lineáris. Például az egyszerű $U=IR$ is egy karakterisztika, még hozzá az ellenállás feszültség-áram (vagy tekinthetjük fordítva is: az áram-feszültség) karakterisztikája. Megadja, hogy az adott elem (jelen esetben az ellenállásnak nevezett valami) milyen kapcsolatot létesít a rajta átfolyó áram és a kapcsain mért feszültség között. Minden áramértékhez tartozik egy feszültségérték, és viszont. Ha az ellenállás lineáris, akkor ez a függvénykapcsolat egy 45 fokos egyenes az U-I diagramon. Ha nem lineáris, akkor lehet parabola, hiperbola vagy bármilyen tetszőleges függvény. Középiskolában az állandó értékű ellenállásokkal találkoztunk, ahol R értéke bármekkora áram-feszültség ill. környezeti változások esetén is ugyanannyi marad. Ez azonban ideális eset, a valóságban ez soincs így. Éppen ezért a helyes működés kiválasztásához ismernünk kell az elemek karakterisztikáit, terhelhetőségét. Ebben a tárgyban nem csupán az ilyen egyszerű karakterisztikákat ismerjük meg, hanem pl. a hőmérséklet-, frekvencia-, hely-, vagy időfüggést. Egy ellenállás hőmérséklet karakterisztikája azt mondja meg, hogy miként változik R értéke a hőmérséklet függvényében. Csoportosításuk, kiválasztásuk és felhasználási területük ezekből a katalógusadatokból derül ki. A másik két passzív eszköz annyiban kezelhető matematikailag nehezebben, hogy ott ez a karakterisztika az áram és a feszültség között nem ilyen egyszerű az idő függvényében, mert az egyik a másiknak az idő szerinti deriváltjával (ill. integráljával visszafelé tekintve) áll kapcsolatban. **Lineáris** egy elem, ha a karakterisztikája egyenes. Pontos definíció szerint attól lineáris, hogy érvényes rá a szuperpozíció elve. **Invariáns**-nak nevezzük, ha az adott jellemzője az időtől független (mint pl. az időben állandó értékű ellenállás), azaz, az időbeni eltolásra az adott mennyiség érzéketlen.

Lineáris, invariáns hálózati elemek csoportosítása						
Aktív		Passzív				
források		rezisztív		dinamikus		
áramgenerátor	Feszültség-generátor	Ellenállás kétpólus	Csatolt kétpólus		Kondenzátor	Tekercs
			ideális erősítő	vezérelt forrás		

1. táblázat. A lineáris, invariáns hálózati elemek csoportosítása.

1.4. Matematikai háttér

1.4.1. Az idő szerinti derivált

A differenciálszámítás általános és egyszerű értelemben a változók változási gyorsaságáról ad számot. A tantárgyhoz szükséges legegyszerűbb eset a valós, egyváltozós függvények körében is csak az idő szerinti deriválttal foglalkozik, de teljesen hasonlóan értelmezhető más fizikai mennyiségre is a „változási gyorsaság”, azonban a fizikai képünkhöz ez áll a

legközelebb. A függvények deriváláshoz szükséges matematikai apparátust és deriválási szabályokat mellőzve, itt csak a szemléletes bemutatásra szorítkozunk.

A „differenciál” vagy „derivált” kifejezés azt jelenti, hogy a már általános iskolában is ismert $\Delta v/\Delta t$ gyorsulás fogalmat **egy pontban** értelmezi. Az út-sebesség-gyorsulás fogalmakat hamar megértjük, és elfogadjuk, hogy egy járműnek annál nagyobb a gyorsulása, minél hamarabb (rövidebb idő alatt) képes elérni ugyanazt a sebesség növekedést ill. fordítva, adott idő alatt minél nagyobb sebességnövekedésre képes. A gyorsulás persze lehet negatív is, ekkor lassulásról beszélünk. Mint látható, a gyorsulást a Δv és a Δt hányadosa adja meg, így felmerül a jogos kérdés, hogy mekkorának válasszuk meg ezeket a „hosszokat” a v illetve a t -tengelyen? Ha egy autó 0-ról indulva 10 mp alatt eléri a 100 km/h-t, ebből a gyorsulásra végzett számításunk csak arra terjedhet ki, hogy $\Delta v=100$ km/h és $\Delta t=10$ s. Ez egy átlagos gyorsulás a 10 másodpercre nézve, hiszen azt nem tudhatjuk, hogy a jármű a tíz másodperc alatt **hogyan** gyorsult: egyenletesen-e, vagy sem, és nem tudjuk megmondani, hogy milyen volt a gyorsulása a harmadik és negyedik másodperc között se nem azt, hogy mekkora volt a gyorsulás **pillanatnyi értéke** az ötödik másodpercben (egy pontban). Ennek megválaszolásához érezhetően azt kell tennünk, hogy a Δt időtartamot szűkítjük, és ha „összetoljuk” az intervallum két végét a nulladik és a tizedik másodperctől háromra és négyre, máris megkaptuk a választ az első kérdésre. Ezzel pontosítottuk a számításainkat, hiszen ha ezt minden 1 másodperces intervallumra megteesszük, akkor tíz közbenső átlagos gyorsulás értéket is megkapunk, amiből már jobb függvényt tudunk rajzolni: információnk bővült.

A második kérdésre már mindenki sejtheti a választ: ha ezt a Δt intervallumot zérusra csökkentjük, akkor megkapjuk egy pontban a gyorsulás értékét. Matematikailag ezt úgy mondjuk, hogy „ Δt tart a nullához” és **lim** (ejtsd: limesz) jelöléssel illetjük. A határérték-számítás és a differenciálszámítás kapcsolata nagyon szoros. Az itt elmesélt folyamat az idő szerinti deriválás, amit matematikailag így adunk meg:

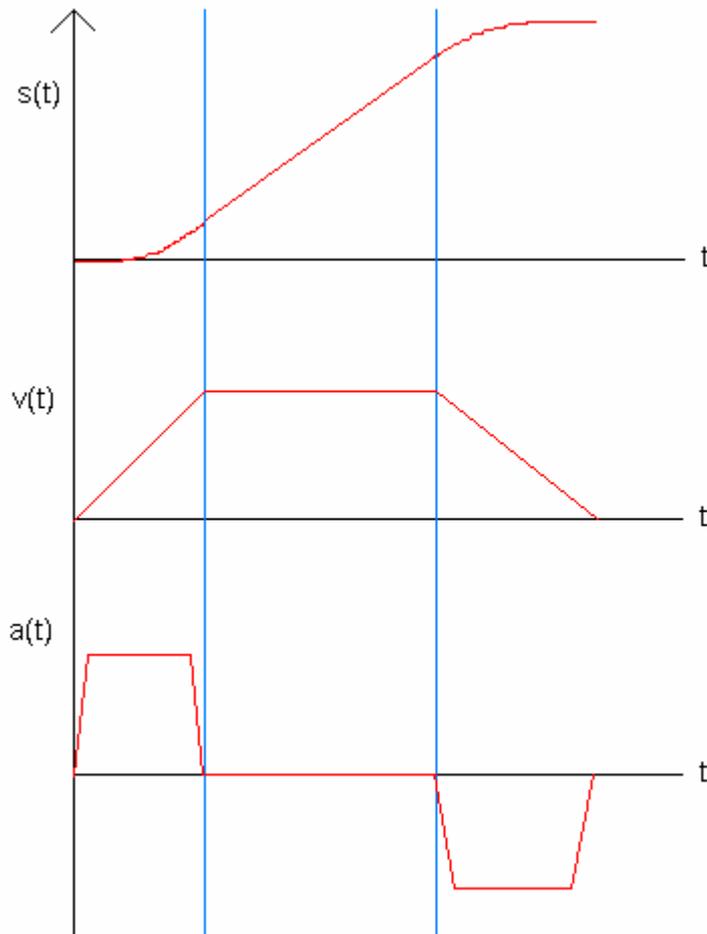
$$a = \frac{dv}{dt} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \dot{v} \quad (1)$$

A „vé pont” jelölést csak az idő szerinti deriváltra alkalmazzuk. Természetesen, a deriválás másodrendben is végezhető, illetve „visszafelé” – bizonyos matematika megszorításokkal és feltételek mellett – az integrálással. Az út (elmozdulás) idő szerinti deriváltja a sebesség, a sebesség idő szerinti deriváltja a gyorsulás, az út másodrendű idő szerinti deriváltja szintén a gyorsulás, amit két ponttal illetve az alábbi módon jelölhetünk:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = \ddot{s} \quad (2)$$

A deriválási változó a mértékegységben is megjelenik (méter, m/s, m/s²). A három mennyiséget tehát matematikailag a deriválás köti össze, és ezzel adhatjuk meg egy folytonos függvény formájában a kapcsolatot. Amennyiben ténylegesen függvényekkel dolgozunk, és pl. adott az út-idő diagram (ami nem más, mint a megtett távolság-idő karakterisztika), abból, ha analitikusan a függvény adott egyszerű módon pontosan kiszámíthatjuk a sebesség ill. a gyorsulás diagramját (karakterisztikáját). A deriválás egyszerű szabályokon nyugszik, és könnyen elsajátítható „algoritmikus” eljárás, ami könnyen gépiesíthető. Ellentétben az integrálással, ami „művészet”, és bizonyos esetekben nagyon nehéz felismerni a visszafelé vezető utat, így ott sokszor a gyakorlathoz elégséges numerikus módszert választjuk, és számítógépre bízunk a kiszámítást, ami gyors, de csak számértéket ad meg, nem pedig analitikus függvényt.

Ami számunkra fontos, hogy a fentiek analógiájára működik az áram-feszültség karakterisztika kondenzátorok és tekercsek esetén, ahol a kapcsolat pontosan ilyen derivált jellegű.



1. ábra. A derivált fogalma. Felül az út, középen a sebesség, alul a gyorsulás időfüggvénye látható (szemléltető ábra). Amikor a sebesség lineárisan nő, a megtett út nulláról nem lineárisan növekszik, hiszen az autó gyorsul és adott idő alatt egyre nagyobb útszakaszt tesz meg. A gyorsulás diagramját ebben az esetben pontosan a sebességfüggvény deriválásával kapjuk meg: ez mutatja, hogy miként változott maga a sebesség. Rövid idő alatt elérte az állandó gyorsulást, azaz a lineáris sebességnövekedést. Így vehető csak észre, hogy a sebességdiagram igazából nem is lineáris, mert az elején és végén az út-diagramhoz hasonló lefutású! Mihelyst a jármű egyenes sebességgel halad, a gyorsulás megszűnik (zérussá válik), a távolság pedig lineárisan nő. Minden konstans (vízszintes) függvényrész deriváltja szükségszerűen zérus, hiszen az adott mennyiség nem változik. A lassulás ellentétes folyamata a gyorsulásnak.

1.4.2. A frekvencia-transzformáció

A Fourier-tétel kimondja, hogy általános, periodikus folyamat (jel) visszavezethető szinuszos részfolyamatok szuperpozíciójára (összegére). Itt is mellőzve a pontos matematikai feltételrendszert elég annyi praktikus információ, hogy a valóságban előforduló elektromos jelek mindegyike előállítható különböző frekvenciájú szinuszos jelek összegeként. Más szóval, az oszcilloszkópon lévő **időtartománybeli** képpel teljesen egyenértékű **frekvenciatartománybeli** képet előállíthatunk. Ez utóbbi komplex mennyiség a **spektrum**,

melynek van abszolút értéke valamint fázisa, egy másik leírás szerint pedig valós (reális) és képzetes (imaginárius) része. Az abszolútérték- vagy amplitúdóspektrum mutatja az alaphangot és a felharmonikusokat, torzítás komponenseket és az átviteli tartományt. Az eszközök kiválasztásánál ez nagyon fontos lehet, hiszen egész más eszköz kell egy kisméretű hanggenerátorhoz, ami 20 kHz-ig működik és egész más egy mikrohullámú erősítőbe, ami a GHz tartományban üzemel!

Bizonyos jelek, eszközök könnyebben kezelhetők a frekvencia tartományban (szűrők). A mai gyors számítógépek az FFT (Fast Fourier Transform) eljárással végzik a műveletet, visszafelé pedig IFFT-nek nevezzük az eljárást. A legfontosabb célja azonban, hogy matematikailag igazolható, hogy két jel időtartománybeli konvolúciója (összegző integrálja) a frekvenciatartományban egyszerű szorzássá szelődik. A konvolúció is matematikai művelet, jelölésére gyakran a * jelet használjuk, ami nem a szorzás jele, hanem az alábbi műveleté:

$$f_1(t) * f_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t - \tau) f_2(\tau) d\tau \quad (3)$$

Ez f_1 és f_2 tetszőleges időfüggvény időtartománybeli konvolúciója, más szóval egy speciális összegképzés. Az integrálást gyakran 0 -tól t -ig végezzük csak. A konvolúciótétel szerint ennek a műveletnek a frekvenciatartományban az egyszerű szorzás felel meg, vagyis két jel konvolúciójának Fourier és/vagy Laplace-transzformáltja egyenlő a tagok Fourier- ill. Laplace transzformáltjainak szorzatával. Az egész művelet pedig azért fontos, mert két bemenő jel időfüggvényének vagy egy bemenő jel és egy rendszer átviteli függvényének az összege így határozható meg. És tekintettel arra, hogy az összegző integrálás nehéz, lassú művelet, jobb megoldás a tényezőket áttranszformálni a frekvenciatartományba, ott szorozni és visszatranszformálni.

Itt kell még megjegyeznünk, hogy az ábrázolásnál leggyakrabban nem a lineáris skálát, hanem a logaritmikust használjuk. Ebből kétféle terjedt el: az egyik az ún. feszültségdecibel, a másik pedig a teljesítménydecibel. Tekintettel arra, hogy a teljesítmény-jellegű mennyiségek a feszültségjellegűek négyzetével arányosak ($P=UI=I^2R=U^2/R$), ez megjelenik a (tízalapú) logaritmikus konstansban:

$$\text{Teljesítmény decibel: } k = 10 \log K \text{ (dB)} \quad (4)$$

$$\text{Feszültség decibel: } k = 20 \log K \text{ (dB)}. \quad (5)$$

Utóbbi jelentése tehát, hogy ha egy feszültségérték a százszorosára nőtt, akkor az dB-ben kifejezve csupán $20 \log 100 = 40$ dB növekedésnek felel meg. Feszültség dB esetén a teljesítményekre az ellenállások ismeretében tehetünk megállapítást.

A logaritmikus egységek használata azért indokolt, mert bizonyos természeti jelenségek, pl. a fül érzékenysége logaritmikus. Továbbá, egyes mennyiségek nagy határok között változhatnak, valamint sorba kapcsolt erősítőkkel való dolgozás dB-ekben összeadásnak felel meg, nem pedig szorzásnak.

Hírközlő rendszerekben célszerű minden teljesítményt ugyanarra a teljesítményre vonatkoztatni. Ilyenkor a vonatkoztatási alapszint a mértékegységben megjelenik (pl. 1 W-ra vonatkoztatva) a szint = $10 \log P$ [dBW].

Az átviteli függvény a legfontosabb jellemzője egy kétkapunak. Megadja, hogy miként viselkedik egy rendszer a frekvenciatartományban, amikor a bemenetére jelet adunk és a kimenetén levesszük. Ennek a komplex függvénynek az abszolút értéke az átviteli karakterisztika. Ebből megállapíthatjuk, hogy mi az eszköz átviteli tartománya. Definíció szerint az átviteli sáv az átviteli karakterisztika -3 dB-es pontja között értelmezett. Az

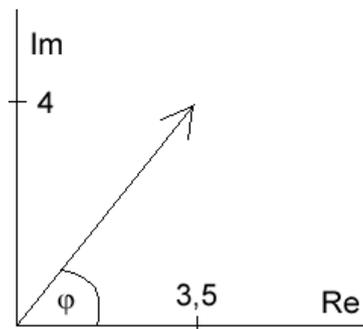
időtartományban leíró idő-amplitúdó tengelyek helyett itt frekvencia-amplitúdó tengelyeket veszünk fel, és gyakran mindkettőt logaritmikusan skálázzuk.

1.4.3 Az impedancia

A passzív eszközök időtartománybeli leírása megfelel az áram-feszültség karakterisztikáknak, azok időbeli viselkedésének és kapcsolatának, amely lehet lineáris, időben állandó, de változó, derivált-jellegű kapcsolat is.

Mivel a frekvenciatartománybeli kép ezzel egyenértékű, ott is elő lehet állítani a karakterisztikákat – sokkal egyszerűbb, egységesebb és matematikailag kezelhetőbb formában.

Az impedancia nem más, mint a „komplex ellenállás”. A komplex számok matematikáját mellőzve, annyit jegyezzünk meg, hogy minden szám komplex, csak a valós számoknak nincs képzetes (imaginárius) része. A komplex számok tulajdonképpen **vektorok**, amelyeknek iránya van a komplex számsíkon és két koordinátája, az egyik a valós része, a másik pedig a képzetes. A rájuk vonatkozó matematika egyszerű vektormatematikának felel meg, ahogy két vektort összegzünk vagy kivonunk, ugyanúgy kezeljük a komplex számokat is.



2. ábra. Az ábra a $3,5+4j$ komplex számhoz tartozó vektort mutatja. A valós számok számegegyense a Re (reális, valós) tengellyel esik egybe. A vektoralgebrához hasonlóan, a vektor hosszát az abszolút értékével adjuk meg, a valós tengellyel bezárt szögét pedig az iránytangenssel. Ezeket a koordinátákból könnyedén kiszámíthatjuk.

Amiért nagyon szeretjük őket az, hogy a frekvenciatartományban megadott kép egy jelről pontosan megfeleltethető egy komplex számnak, ahol az amplitúdó információt a valós rész (abszolútérték), a frekvencia információt meg a képzetes (fázis) hordozza. Így sokkal egyszerűbb egy 2 V amplitúdójú 1000 Hz frekvenciájú szinuszjelre azt írunk, hogy

$$Ae^{j\omega} = 2e^{j2\pi f} = 2e^{j2\pi 1000} \quad (6)$$

ahol A az amplitúdó (2 Volt), a komplex szám exponenciális alakjának kitevőjében pedig megjelenik a frekvencia: 1000 Hz. Ne feledjük, hogy $\omega=2\pi f$ és j a komplex számok képzetes részének jelölése, matematikailag -1 négyzetgyöke. Egy mérnök számára az utóbbi leírás sokkal kellemesebb és kezelhetőbb. Gondoljuk végig, milyen bonyolult két különböző frekvenciájú és amplitúdójú szinuszos jel együttesét (szuperpozícióját) kiszámítani a konvolúciós integrállal és ábrázolni az időtartományban, és milyen egyszerű ugyanezt a két komplex számot összeszorozni a frekvenciatartományban (lásd a 3 és 4 szemléltető ábrát)! Az áram és a feszültség ráadásul úgymint vektoriális mennyiségek.

A komplex számokat gyakran felülvonással jelöljük az alábbi két alakban:

$$\bar{X} = \text{Re}(\bar{X}) + j * \text{Im}(\bar{X}) = X * e^{j\varphi} \quad (7)$$

ahol az amplitúdó $X = |\bar{X}| = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}$ és $\varphi = \text{arctg}\bar{X}$, azaz $\tan(\varphi) = \text{Im}/\text{Re}$; j pedig definíció szerint -1 négyzetgyöke. A deriválás is rendkívül egyszerű művelet a komplex számok körében: megfelel $j\omega$ -val való szorzásnak! A passzív eszközök karakterisztikáit a 2.táblázat mutatja. Az első oszlop az időtartományi leírást, míg a másik a komplex formát, a frekvenciatartományi leírást. Az időtartománybeli képből kihagytuk a (t)-jelölést, hogy ne bonyolítsa túl az egyenleteket. Ez alapján $u(t) = \text{Ri}(t)$ alakban kéne írni az időben állandó értékű ellenállás egyenletét, amely pontosan mutatja, mely mennyiségek időfüggők és mely nem. Ennek a ténynek a másik tartományban a komplex szám-jelölés felel meg, látható, hogy a feszültség és az áram vektoriális mennyiség, míg az R, L, C mennyiségek nem.

Lineáris, invariáns passzív elemek karakterisztikái		
Ellenállás	$u_R = Ri_R$	$\bar{U}_R = R\bar{I}_R$
Tekercs	$u_L = L\dot{i}_L$	$\bar{U}_L = j\omega L\bar{I}_L$
Kondenzátor	$i_C = C\dot{u}_C$	$\bar{I}_C = j\omega C\bar{U}_C$ vagy $\bar{U}_C = \frac{1}{j\omega C}\bar{I}_C$
	Időtartomány	Frekvenciatartomány

2. táblázat. Karakterisztikák az idő- és a frekvenciatartományban.

Ahogy látható, maga az „ellenállás” komplex módban mindhárom elemre értelmezhető, csak dinamikus elemeknél (nevezzük őket reaktáns elemeknek is) ez frekvencia (illetve idő)függő jellemző. Az impedancia tehát csak az ellenállás esetében valós, egyébként komplex szám, amely tartalmazza az áram-feszültség karakterisztikát frekvenciafüggéssel:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_R &= R && \text{(valós szám)} && (8) \\ \bar{Z}_L &= j\omega L \\ \bar{Z}_C &= \frac{1}{j\omega C} \end{aligned}$$

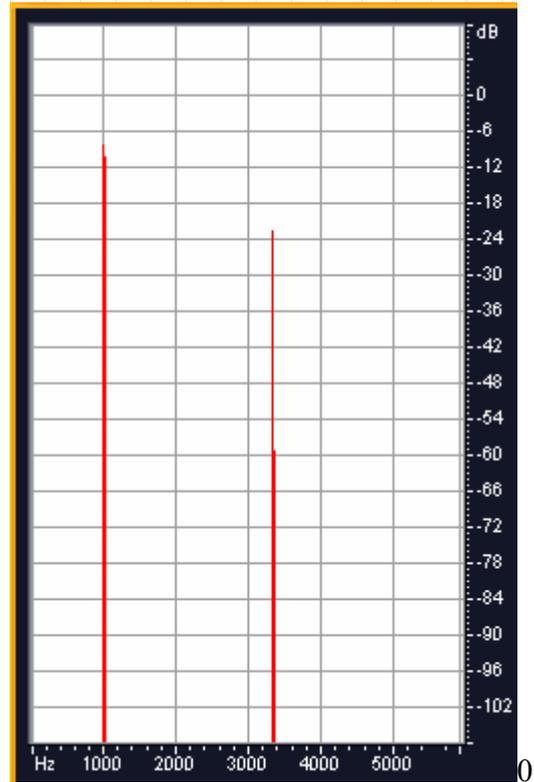
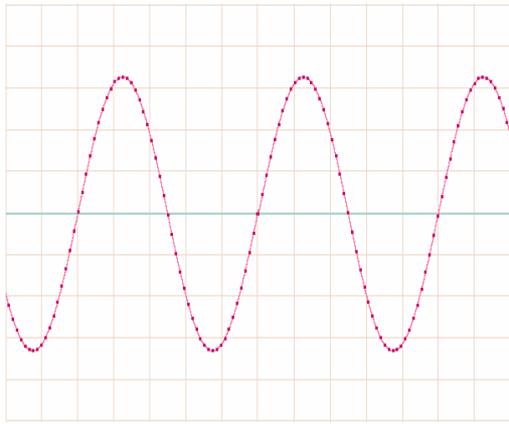
Ezek rendre az ellenállás, az induktivitás és a kapacitás komplex impedanciái. A frekvenciafüggő hálózatokat és a bonyolultabb kapcsolásokat komplex számokkal számítjuk ki ezen impedanciák felhasználásával. A jól ismert összefüggések itt is alkalmazhatók, az eltérés csak annyi, hogy a számok nem valósak, hanem vektoriálisak, komplexek:

$$\bar{Z}_{\text{soros}} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 \quad (9)$$

$$\bar{Z}_{\text{párhuzamos}} = \bar{Z}_1 \times \bar{Z}_2 = \frac{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \quad (\text{replusz művelet}) \quad (10)$$

Sorba kapcsolt elemek impedanciái a komplex számok algebrájának megfelelően összeadódnak, míg a párhuzamosan kapcsoltak repluszolódnak.

Megjegyzés: a mértékegységek nem változnak, így egy 3 ohmos valós ellenállás és egy tekercs, amelynek az ωL szorzata 4 ohm, egy soros kapcsolásban $R + j\omega L = 3\Omega + j*4\Omega = (3+4j)\Omega$ formában adható meg.



3. ábra. Balra fent az 1000 Hz-es szinuszjel, jobbra az 1000 Hz + 3330 Hz-es jel együttése (szuperpozíciója) látható az időtartományban. Az alsó sorban a frekvenciatartománybeli képen jól elkülöníthető a két jel, így egyszerű szűrővel szétválasztható.

2. Passzív eszközök és hálózataik

2.1. A kondenzátor

A kondenzátor olyan lineáris kétpólus, melynek feszültsége arányos áramának idő szerinti integráljával. Az áram idő szerinti integrálja nem más, mint a töltés (Q).

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_c(\tau) d\tau \quad (\text{integrál alak}) \quad (1)$$

vagy

$$i_c = C \frac{du_c(t)}{dt} = C \dot{u}_c \quad (\text{differenciál alak}) \quad (2)$$

továbbá $Q=CU$, ahol C a kondenzátor kapacitása, mértékegysége As/V (Farad). Szavakban: a kondenzátorban felhalmozott Q töltésmennyiség a kondenzátoron fellépő feszültséggel arányos, C pedig az arányossági tényező. Az általános értéktartomány a pF-mF nagyságrend. Az áram tehát:

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt}. \quad (3)$$

A jelölésekben általánosan használatos, hogy az időtől függő mennyiségeket kisbetűvel (u, i), míg az egyen feszültséget, egyenáramot, időben állandó mennyiségeket nagybetű jelöli (I, U, R).

A képletből következik, hogy időben állandó feszültség (egyenfeszültség) esetén a kondenzátor árama nulla, tehát szakadásként viselkedik. A kondenzátor feszültsége nem változhat pillanatszerűen, csak adott, véges idő alatt, ha az i áram véges. Egy kondenzátor képes a töltést és ezzel együtt az energiát tárolni, majd később leadni (kisütés). Az áramkörtervezésnél vegyük figyelembe, hogy a kondenzátoron eső feszültség megváltozásához időre van szükség. Tudnunk kell, hogy a rövidrezárt, feltöltött kondenzátoron igen nagy csúcsáramok folyhatnak. A feltöltött kondenzátorban felhalmozott energia:

$$W = \frac{1}{2} CU^2. \quad (4)$$

A kondenzátorok nem ideálisak, hanem veszteségesek. Az ilyen jellegű veszteséget ún. helyettesítőképpel szoktuk ábrázolni és figyelembe venni. Kondenzátor esetén a huzalok, fémfelületek valós ellenállása képezi a veszteséget, melyet egy párhuzamosan kapcsolt RC hálózattal modellezünk.

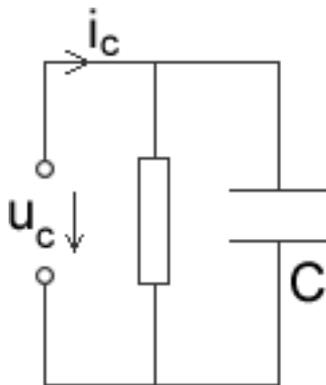
A kondenzátor árama, azaz a rajta átfolyó áram nagysága a kapcsaira kapcsolt feszültség változásával arányos, ez az, amit az időbeli deriválás kifejez. Ha feszültség nem változik (egyenfeszültség), akkor áram nem folyik, nem változik és ez független az egyenfeszültség

nagyságától. Amennyiben azonban a feszültség változni, ingadozni kezd (pld. szinuszosan), áram fog folyni, amelynek nagysága a feszültség változásának nagyságával lesz arányos.

A legegyszerűbb kondenzátor a síkkondenzátor, amely két elektromosan vezető felületből (lemez) és egy köztük lévő vékony szigetelő rétegből áll. A szigetelőt nevezzük dielektrikumnak is, amely lehet levegő, papír, kerámia vagy egyéb más anyag. A szigetelő anyagokat egymástól az ε dielektromos tényezőjük különbözteti meg, amelyet bizonyos katalógusok rögzítenek. Az ε_0 a levegő ill. a vákuum dielektromos állandója, értéke $8,856 \cdot 10^{-12}$ As/Vm. Amennyiben a kondenzátor szigetelője nem levegő, a relatív dielektromos állandóval számolunk: $\varepsilon_{rel} = \varepsilon/\varepsilon_0$. Ha tehát egy a levegőnél kétszer jobban szigetelő anyagot helyezünk a lemezek közé, akkor $\varepsilon_{rel}=2$ által a kapacitás is a duplájára növekszik. A síkkondenzátor kapacitását a lemezek A felületéből és a köztük lévő d távolságból a jól ismert képlet szerint számíthatjuk ki:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}. \quad (5)$$

A veszteséges kondenzátort a vele párhuzamosan kapcsolt ellenállással modellezzük.



1.ábra. A veszteséges kondenzátor helyettesítő képe.

2.2. A tekercs

A tekercs olyan lineáris kétpólus, melynek árama arányos feszültségének idő szerinti integráljával. A feszültség idő szerinti integrálja nem más, mint a fluxus (Φ).

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u_L(\tau) d\tau \quad (\text{integrál alak}) \quad (6)$$

vagy

$$u_L = L \frac{di_L(t)}{dt} = L \dot{i}_L \quad (\text{differenciál alak}). \quad (7)$$

L a tekercs induktivitása (önindukciós együttható), mértékegysége Vs/A (Henry). Szavakban, az induktivitás a rajta árfolyó áram megváltozásával arányos feszültséget állít elő, ahol L az

arányossági tényező. Felhívjuk itt is a figyelmet, hogy az egyik mennyiség a másik mennyiség megváltozásával arányos, nem pedig a nagyságával! Erre utal a képletben az idő szerinti differenciálhányados. Az általános értéktartomány a μH -H nagyságrend.

Egy i áramtól átjárt tekercs mágneses terében felhalmozott energia:

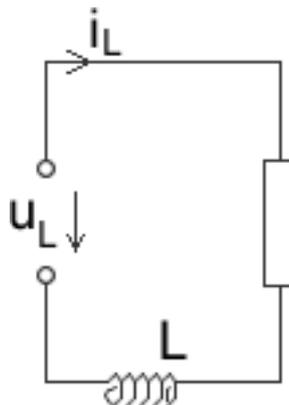
$$W = \frac{1}{2} LI^2. \quad (8)$$

A képletekből következik, hogy időben állandó áram (egyenáram, DC) esetén a tekercs feszültsége nulla, tehát rövidzárként viselkedik. Az áram nem változhat pillanatszerűen, csak adott, véges idő alatt. Adott idő alatt adott nagyságot elér az áram, majd ha a feszültséget kikapcsoljuk mindaddig folyik, amíg a mágneses tér energiája el nem fogy. Ha egy ideális induktivitásra lépcsőfeszültséget adunk, árama zérusról lineárisan nő. Kisütő áramkör hiányában a menetek vagy a kapcsoló érintkező között történik ívkisülés. A tekercs is dinamikus elem.

Egy tekercs jósági tényezője:

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (9)$$

ahol mindkét mennyiség ohm dimenziójú, így a jósági tényező mértékegység nélküli szám. Az ωL szorzatot induktív reaktanciának, az R -t valós ellenállásnak nevezzük. Előbbi a menetek közötti kölcsönhatás, utóbbi a huzallellenállásból adódik. A jósági tényező frekvenciával arányos mennyiség, hiszen „nulla frekvencián”, azaz egyenáram esetén az ω értéke zérus, így a jósági tényező is. Ez fejezi ki, hogy a tekercs rövidzárként működik, mintegy „eltűnik” a hálózathoz (eltekintve természetesen egy valójában nem nulla, de kis értékű huzallellenállástól). Ahogy a frekvencia növekszik, ω értéke egyre nő és egyre jobban dominál az induktív hatás, egyre jobban viselkedik az elem tekercsként. A valóságos tekercs nem ideális, hanem veszteséges, amit az R valós ellenállás taggal veszünk figyelembe. Tekercsek esetén a veszteséges helyettesítőkép általában soros $R+j\omega L$ alakú impedancia.



2.ábra. A veszteséges tekercs helyettesítő képe.

A váltakozó fluxust körülvevő tekercs áramforrásként viselkedik. A menetenkénti fluxust a B mágneses indukcióval [T] és az A felülettel kifejezve:

$$\Phi = BA. \quad (10)$$

A tekercsben a feszültséget a fluxus időbeni változása indukálja a menetszámmal arányosan:

$$u_{ind} = N \frac{d\Phi}{dt} = NA \frac{dB}{dt} \quad (11)$$

azaz

$$N\Phi = LI. \quad (12)$$

A gerjesztési törvény szerint:

$$\Phi = \mu_0 \frac{NI}{l} A \quad (13)$$

így az N menetes, l hosszúságú A keresztmetszetű tekercs induktivitása:

$$L = \mu_0 \frac{N^2 A}{l} \quad (14)$$

ahol μ_0 a permeabilitás, légmag esetén: $1,257 \cdot 10^{-6}$ H/m.

Ügyeljünk arra, hogy ne keverjük össze a két gyakran használt vákuum-állandót! A permeabilitás μ_0 mértékegysége Vs/Am, értéke $4\pi \cdot 10^{-7}$. A permittivitás jele ϵ_0 , mértékegysége As/Vm, értéke $8,85 \cdot 10^{-12}$. Előbbi a mágneses jelenségek esetén használatos, például az egyenes, I nagyságú áram által átjárt vezetőtől r távolságban a mágneses indukció:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}. \quad (15)$$

Míg utóbbi az elektromos térerősség kapcsán fordul elő, pl. Q ponttöltéstől r távolságra az elektromos térerő nagysága:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}. \quad (16)$$

A két állandóval a terjedési sebességet lehet adott közegben kifejezni:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}, \quad (17)$$

ami vákuumban az elektromágneses hullámokra $3 \cdot 10^8$ m/s (ebből látszik, hogy a fény is elektromágneses hullám).

Érdekesség, hogy elvileg **minden elem** tartalmaz R , L és C tagokat, csak attól függően nevezzük őket ellenállásnak, tekercsnek vagy kondenzátornak, hogy mely jelleg dominál benne. Így egy ellenállásnak az R értéke a hasznos, mert arra használjuk. Az ún. szórt kapacitás vagy szórt induktivitás, mint járulékos, nem kívánt jelenség van ott, ami korlátozza az elem működését (pl. frekvenciában). Hasonlóan, egy tekercsnél a nagy L érték a cél, így ott

a huzal ellenállást tekintjük másodlagos (parazita) hatásnak, veszteségnek. Ezek az elemek általában szélsőséges működési körülmények között viselkednek vegyes módon.

2.3. Az ellenállás

Az ellenállás nem tárol töltést és energiát, pusztán hő formájában adja le azt az energiát, amibe neki kerül az áram "feltartóztatása". Az ellenállás mértékegysége V/A, azaz Ohm. Értéke nagyon széles tartományban változhat, a mΩ nagyságrendű huzal ellenállástól a GΩ nagyságrendig. A tekercseknek nagyon kicsi veszteségi huzalellenállása van, a kondenzátoroknak azonban óriási szakadási ellenállása. Minél kisebb a működési frekvencia, annál inkább dominál ez az érték. Egyenfeszültség esetén pedig a kondenzátor „tűnik el” a hálózathoz és csak a végtelenné vált ellenállása fogja reprezentálni a szakadást.

Az áram a vezető keresztmetszetén időegység alatt áthaladó töltés mennyisége:

$$i = \frac{dQ}{dt}. \quad (18)$$

Ahogy említettük, a vezető és az ellenállás alapjában véve ugyanaz, csak a vezetőnek kicsi az ellenállása és azt veszteségnek fogjuk fel, míg a másik oldalon az ellenállás egy „nagyon rossz vezető”.

Az alapeset itt is egyszerű, ha veszünk egy adott l hosszúságú, A keresztmetszetű, vezetőhuzalt, melynek anyagát a ρ fajlagos ellenállás jellemzi, akkor az ellenállás értéke ohmban:

$$R = \frac{\rho l}{A}. \quad (19)$$

Fokozatosan kell ügyelni azonban a helyes behelyettesítésre, mert a ρ fajlagos ellenállást a katalógusok általában nem Ωm-ben, hanem Ωcm-ben, sőt Ωmm²/m-ben adják meg! A leggyakrabban használt réz fajlagos ellenállása 20°C fokon 1,72*10⁻⁶ Ωcm. A katalógusok ráadásul a hőmérséklet függvényében is megadhatják a ρ értékét, leggyakrabban azonban 25°C-ra adják meg (adott hosszúsághoz). Ettől eltérő hőmérsékleten az ellenállás értéke:

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - 25)], \quad (20)$$

ahol R_2 az ellenállás értéke a t_2 hőmérsékleten, R_1 a 25°C-on mutatott ellenállás, α pedig a hőmérsékleti együttható (réz esetében pl. 0,004). A fajlagos ellenállás reciproka homogén áramlási térben a fajlagos vezetés (mértékegysége 1/Ωm):

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \quad (21)$$

Az ellenállások nagy tűréshatárok között készülnek, vannak hosszú életűek és rövidek, vannak nagy tolerancia értékűek és pontosak. Viszonylag olcsó az előállításuk, de még ha időben állandónak is tekintjük, abban mindenképpen biztosak lehetünk, hogy az ellenállás értéke a környezeti hőmérséklettől erősen függ. A részletes tárgyalás a későbbiekben ezeket fogja vizsgálni. A használatos ellenállások általában a következő csoportokra osztható:

1. Állandó értékű, vagyis olyan, melyek értéke sem kézzel sem mechanikai úton nem változtatható, lehetőség szerint független a hőmérséklettől és a kapcsolás tulajdonságaitól.
2. Változtatható, melyek értéke kézzel vagy mechanikai úton beállítható, és ez az érték független a hőmérséklettől és a kapcsolástól. Ez lehet egyszer beállítható, vagy szabályozható típus.
3. Változó ellenállás, amelyet nem kézzel változtatunk, hanem értéke a feszültség és/vagy a hőmérséklet függvénye.

2.4. A források

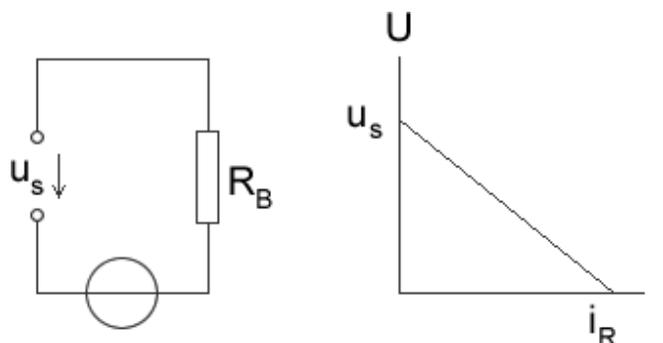
A források nem tartoznak szervesen ehhez a tárgyhoz. Mint a korábbi táblázatban láthattuk, a források **aktív** elemek, így nem is lenne helyük a passzív elemek fejezetben. Röviden azonban a definíció leírásával szeretnénk a kétpólusok halmazát teljessé tenni.

A források olyan aktív kétpólusok, melyek feszültsége ill. árama ismert az idő függvényében. Előbbit feszültségforrásnak, utóbbit áramforrásnak nevezzük. Gyakorlatban lényeges különbség a kettő között nincs:

$$u = u_s(t) \quad (22)$$

$$i = i_s(t), \quad (23)$$

ahol a kisbetűk az időfüggése utalnak, az s-index pedig a source-ból származik. U_0 és I_0 a jele az egyenfeszültségű ill. egyenáramú (DC) forrásnak. Az elvi (elméleti villamoságtanbeli) különbség az, hogy a feszültségforrás áramát illetve az áramforrás feszültségét a hálózat többi része határozza meg, így változó. Természetesen, a források sem ideálisak, hanem veszteségesek, rendelkeznek belső ellenállással. Az ideális forrásnak elhanyagoljuk a belső ellenállását, valamint úgy tekintjük, hogy a hálózat nem hat vissza rájuk (azaz tartják a feszültséget ill. áramot): ideális áramforrás árama független a feszültségétől ill. az ideális feszültségforrás kivezetései közötti feszültség független az áramától. A veszteséges helyettesítőképben az ideális feszültségforrással sorba kötjük a belső ellenállást, míg az áramforrással párhuzamosan. Ez hasonló a fentiekhez, csak itt a feszültség forrás „képes” rövidzárként ill. az áramforrás szakadásként működni.



3.ábra. Ideális feszültségforrás és belső ellenállása (helyettesítőkép). A valóságban a belső ellenállás miatt a forrás feszültsége csökken a rajta átfolyó áram növekedésével.

Ne felejtjük el, hogy váltóáramú forrásnál értelmezzük az effektív értéket, ami szinuszos jel esetén a csúcserték osztva négyzetgyök kettővel. Szemléletesen úgy mondhatjuk, hogy egy 115 V effektív értékű AC forrás ugyanakkora teljesítményt ad le egy adott ellenálláson, mint egy 115 Voltos DC. Ekkor az AC forrás csúcsertéke $115 \cdot \sqrt{2}$ V. Jelen esetben az effektív feszültség frekvenciafüggetlen, de nem szinuszos esetben a számítás bonyolultabb (integrálás).

Nem tartozik a tárgyhoz szorosan az említett aktív és passzív kétpólusok hálózatba kapcsolása, mert ez elméleti szinten a villamosságban, gyakorlati szinten pedig az elektronika feladatköre. Emlékeztessünk azonban három fogalomra, amelyet nem árt észben tartanunk:

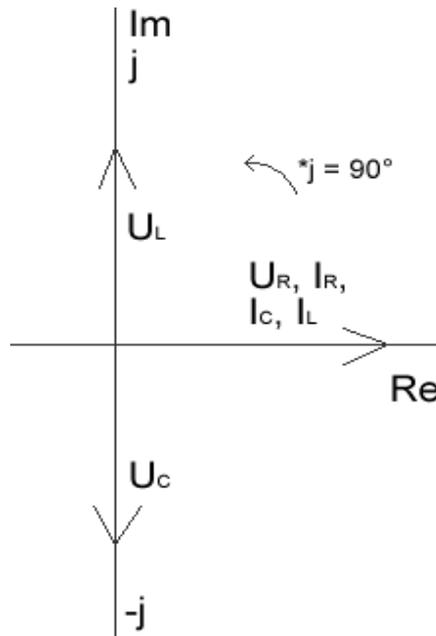
1. a „szuperpozíció elve” kimondja, hogy a különböző gerjesztésekre adott válasz egy hálózatban meghatározható az egyes, különböző gerjesztésekre adott válaszok összegeként. Ez lineáris hálózatokban igaz, ahol nincs pl. tranzisztor.
2. A *Kirchoff-törvények* értelmében egy csomópontba befolyó áramok vektoriális összege nulla, azaz amennyi befolyik, annyi folyik ki (a csomópont tehát memóriamentes). Másrészt egy zárt hurokban a feszültségek vektoriális összege zérus.
3. A villamosságban bizonyítja és alkalmazza az elemek helyettesítőképében és a hálózatokban a *Thévenin-* és a *Norton* átalakítást, amelyek egymásba könnyen átszámíthatók és egyenértékűek. Minden a fenti elemekből álló hálózat leegyszerűsíthető egy egykapura, amelyben egy impedancia és egy ideális forrás található.

2.5. Impedancia

Az ellenállás R értéke mindig valós, így az ellenálláson folyó áram és a rajta eső feszültség fázisban van. Ha az áram kezdőfázisát nullára választjuk, vektorja a komplex számsíkon pozitív, valós. A tekercsen a feszültség az áramhoz képest negyedperiódussal (90 fokkal) siet, a kondenzátoron ugyanennyivel késik.

A $+j$ -vel való szorzás megfelel a balra-elforgatásnak („sietés”), a $-j$ -vel szorzás ellentétes irányú vektorforgatás („késés”). A 180 fokos fáziskülönbség megfelel az ellenfázisú valós vektornak. Ne feledjük:

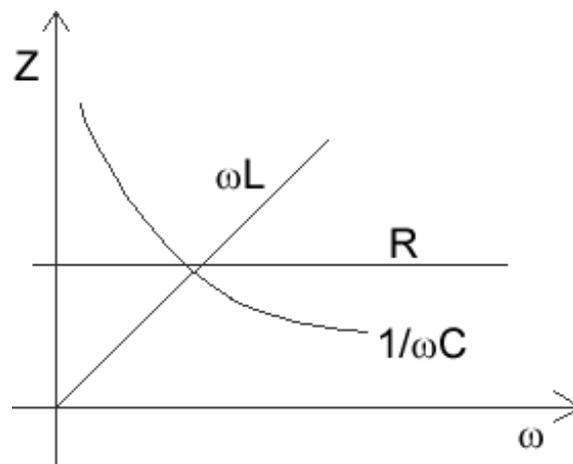
$$\frac{1}{j} = \frac{1}{j} \cdot \frac{j}{j} = \frac{j}{j^2} = \frac{j}{-1} = -j. \quad (24)$$



4. ábra. Áramok és feszültségek a komplex számsíkon soros RLC-kör esetén. U_R és I_R fázisban van, mindkét nyíl a valós tengelybe esik. Ugyanilyen áram irány mellett, ideális eszközöket feltételezve U_L és U_C 90 fokkal elforgatott vektor: tekercsen az áram késik, kondenzátoron siet a feszültségükhöz képest. A vektorok nagysága (hossza) R , ωLI_L ill. $I_C/\omega C$.

Ha egy elemen a feszültség és az áram nincs fázisban, a pillanatnyi teljesítmény a pillanatnyi áram és feszültség szorzata. Ez előjeles mennyiség, amely hol pozitív, hol negatív. A pozitív munka jelenti az ohmikus ellenállásokon leadott és az elektromágneses mezők felépítésére fordított munkát (energiát). A negatív munka a mezők összeomlásakor a hálózatba visszatáplált energiák összessége. A kettő különbsége az a hatásos munka, amely egy fogyasztón (R) hő formájában felszabadul, illetve ami munkára fogható (motoroknál). A hatásos teljesítmény a pillanatnyi teljesítmény időátlaga (integrálja).

Az impedancia dinamikus elemek esetén frekvenciafüggő. A tekercs a frekvenciával lineárisan nő, a kapacitásé exponenciálisan csökken. Az ideális reaktancia frekvencia független, állandó ellenállás-értékű elem.



5. ábra. Az R , L , C elemek impedanciájának frekvenciafüggése. Szokásos jelöléssel $X_L = \omega L$, $X_C = 1/\omega C$.

3. Passzív eszközök

3.1. Az ellenállás

Ahogy az előző fejezetben szó volt róla, az ellenállások legnagyobb ellensége a melegedés. Egyrészt minél nagyobb az értékük, annál jobban melegsznek, másrészt a hőmérsékletfüggés erős lehet ahhoz, hogy ne csak a környezet hasson rá, hanem a belső melegedés is visszahasson. Előfordulhat, hogy másodpercek alatt olyan hőfokra melegszik, hogy megégeti az ember kezét. A melegedés ellen külső hűtéssel (ventilátor) védekezhetünk, vagy „belső” tervezéssel: minél nagyobb méretű az ellenállás, annál nagyobb a hőátadó felülete. A leadott hőmennyiség a *villamos teljesítményből* származik: az ellenállás, munkája, hogy ezt az energiát hővé alakítja és leadja.

$$P = I^2 R = U^2 / R \quad [\text{W}], [\text{J/s}]. \quad (1)$$

A teljesítményértékek beleszólnak a költségekbe, így vizsgálatuk mindig fontos szempont. A teljesítményt az energia idő szerinti differenciálhányadosaként is értelmezhetjük, ill. mint feljebb, a munkavégzés sebességeként:

$$p = \frac{dW}{dt} = U \frac{dQ}{dt}. \quad (2)$$

Váltóáramú jeleknél a teljesítmény is időfüggő, ilyenkor a pillanatnyi áram és a pillanatnyi feszültségérték szorzataként adódik. A *pillanatnyi maximális teljesítményre* ritkábban van szükségünk, mint az átlagosra, mely az előzőből kiszámítható.

Az ellenállás *hővezető képessége*:

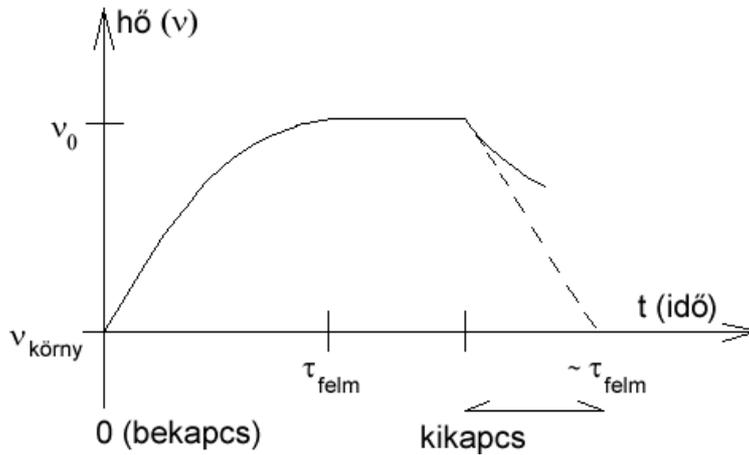
$$\lambda \quad [\text{W/Km}], \quad (3)$$

melynek értéke Cu: 380, Al: 280, víz: 0.55, levegő: 0.025, kerámia: 1-2 esetén.

A *hőellenállás*:

$$R_t = \frac{l}{\lambda A} \quad [\text{K/W}]. \quad (4)$$

A tapasztalat szerinti általánosított idő-hőmérséklet karakterisztika megmutatja, miként melegszik fel ill. hűl le egy ellenállás. Hőmérséklete a bekapcsolás pillanatában a környezeti hőmérséklettel egyezik meg, majd τ_{felm} felmelegedési idő alatt nemlineárisan éri el v_0 üzemi maximális hőmérsékletet, melyet a feszültség kikapcsolásáig megtart. Kikapcsolás után is exponenciális jelleggel hűl ki. Ez az idő hosszabb, mintha „lineárisan” hűlne ki (szaggatott vonal), ami megfelelne kb. a τ_{felm} időszaknak.

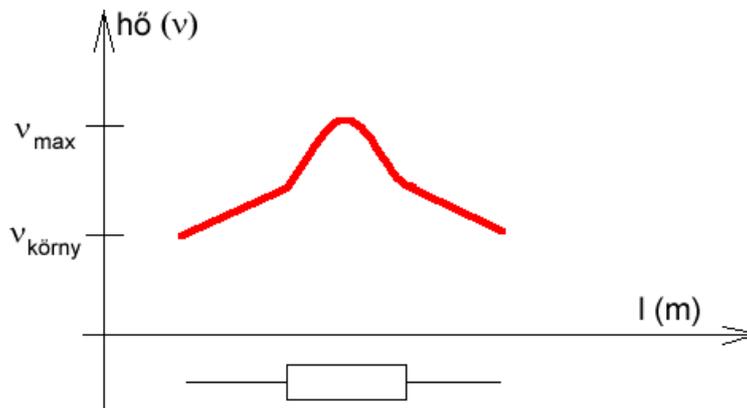


1. ábra. Idő-hőmérséklet karakterisztika ellenállások esetén.

Ha $\Delta v = v_0 - v_{\text{körny}}$ akkor, $\tau_{\text{felm}} \approx cm\Delta v / P$, ahol m az ellenállás tömege, Δv a hőmérsékletváltozás, c pedig a fajhő. A fajhő mértékegysége vagy [Ws/gK] vagy régebbi katalógusokban [cal/gC]. A fajhő értéke alumíniumra 0.9, rézre 0.4, vízre 4.19. A sugárzás formájában leadott hőre igaz, hogy:

$$P_{\text{sugárzási}} = \text{konst}(T_{\text{ell}}^4 - T_{\text{körny}}^4). \quad (5)$$

Hengeres ellenállásokra jellemző, hogy a hőelvezetés nem csak magán az ellenálláson, hanem a lábakon is történik. Jellemzően, a hőmérséklet lineárisan változik a lábakon (az ellenállás irányában nő), ugyanakkor az ellenállástestben lényegesen nagyobb mértékben. A maximális v_{max} „maghőmérséklet” az ellenállás közepén lép fel.



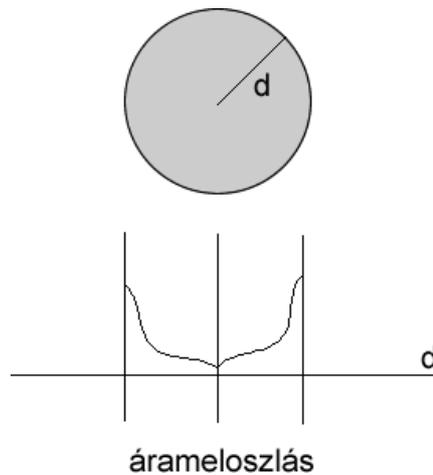
2. ábra. Távság-hőmérséklet karakterisztika hengersizmetrikus ellenállás esetén.

Egy áramkör megépítésénél sokféle áramköri elem tulajdonságaival kell tisztában lenni, mivel egy helytelenül kiválasztott darab az egész működését károsan befolyásolja. Néhány alkatrész egészen speciális alkalmazásokhoz való, nem használhatjuk őket válogatás nélkül. A közönséges szénréteg ellenállás nagyon sokszor megfelelő, bizonyos esetekben azonban nem alkalmazható.

Az ellenállások és vezetők frekvenciafüggők, melyet néha (főleg kisméretű) elhanyagolunk. Tény azonban, hogy AC üzemmódban az ellenállás értéke változik, ahogy a

frekvencia emelkedik. Gyakorlatban ez a változás a frekvencia (Hz-ben) négyzetgyökével arányosan nő, mert az áram „kiszorul” a vezető felületére, az árameloszlás nem lesz egyenletes a keresztmetszetében a mágneses tér eloszlása miatt (belül több az erővonal és így az ellenfeszültség). Az áram tehát a felület mentén folyik, amitől az ellenállás értéke nő. Ezt a hatást *skin-hatásnak* nevezzük. A képletek levezetését mellőzve, az ellenállás relatív megváltozása kiszámítható az AC módban ill. a DC módban mutatott érték hányadosaként:

$$\Delta R_{skin} = \frac{R_{AC}}{R_{DC}}. \quad (6).$$



3.ábra. A skin-hatás okán az árameloszlás nem egyenletes nagyfrekvencián a vezető keresztmetszetében, az áram „kiszorul” a felület mentére, amitől az ellenállás értéke nő.

A megoldást Bessel-függvények adják, melyeket közelítőleg az alábbi képlettel tudunk kiszámítani:

$$1 + \frac{x^4}{6\sqrt{2}} \quad , \text{ ha } 0 < x < 1,5 \text{ közé esik, illetve} \quad (7)$$

$$\frac{1 + x\sqrt{2}}{4} \quad , \text{ ha } x > 4,5 \text{-nél.} \quad (8).$$

Az x -változó ez esetben:

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\mu\omega}{\rho}} \quad (9).$$

ahol d a vezető vastagsága [mm], ω a frekvencia [rad/sec], μ a relatív permeabilitás, ρ a fajlagos ellenállás, amit ebbe a képletbe [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]-ben kell helyettesíteni. A képletekből látszik, hogy kis x értéknél az ellenállás növekedés a frekvencia négyzetével, nagyobb x esetén viszont a frekvencia négyzetgyökével arányos. Bizonyos esetekben táblázatos formában is kereshetők adott R_{DC} -hez tartozó R_{AC} értékek.

A behatolási mélység az a δ mennyiség, ahol az áramsűrűség a felületen lévő értéknek éppen $1/e$ -részére csökken.

$$\delta = 50,2 \sqrt{\frac{\rho}{f\mu}} \text{ [cm]}, \quad (10)$$

ahol f [Hz], ρ [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]. Rézre egyszerűbben a

$$\delta_{\text{réz}} = \frac{6,62}{\sqrt{f}} \text{ [cm]} \quad (11)$$

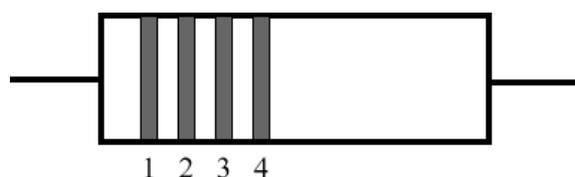
képlettel számolhatunk. Ennél mélyebben is folyik áram, de az elhanyagolható, különösen a keletkező hőmennyiség szempontjából. Különböző vezetőalakoknál más az ellenállás növekedés értéke: cső alakú vezetónél kisebb, mint tömör huzal esetén. Szalag alakúnál a legkisebb.

A szabványosítás segíti a technológia haladását és irányt szab neki. Különleges elemekről a katalógusokból és a gyári adatlapokból tájékozódhatunk. A szabványosítás vonatkozik a jelölésekre, értékekre, tűrésre, méretre stb. Ahol lehet, mindig igyekezzünk szabványos elemeket használni.

A felhasznált *anyagok* nem lehetnek fémesek, hiszen a tiszta fém vezető: fajlagos ellenállása kicsi, hőmérsékleti együtthatójuk nagy és pozitív (bár léteznek ún. fémellenállások is). A legjobb vezetők a réz és az ezüst. A *szén*, mint nem fém anyag, több kristálmódosulásában is használatos. A grafit vezető, hőmérsékleti tényezője negatív (hőmérséklet emelkedésével az ellenállása csökken) ugyanakkor a korom nem vezető. Az *ötvözetek* fajlagos ellenállása (huzal ellenállás) magas, hőmérsékleti tényezője alacsony, így mérési célra alkalmasak. Ilyen anyag pl. a krómnikkel (CrNi). Ennek jellegzetessége, hogy 1000 fok fölé hevíthető, 80% Ni és 20% Cr-ból áll. Lényegesen olcsóbb, amikor a nikkelt vassal helyettesítjük (FeCr). Az ellenállások tárgyalását az anyag szerinti csoportosítás alapján kezdjük. A három fő csoport: tömör, réteg és huzal ellenállások.

3.1.1. Állandó értékű tömörellenállások

Az állandó értékű tömörellenállások (és néhány kondenzátortípus is) a *gyűrűs színkódot* alkalmazzák. Minden ilyen ellenálláson legalább három színes csík van: az első kettő a két értékes számjegyet jelenti, a harmadik a szorzót, az esetleges negyedik a tűrést.



4. ábra. Gyűrűs színkód az ellenállás testén.

Szín/gyűrű	1	2	3	4
Fekete	-	0	*1	-
Barna	1	1	*10	-
Piros	2	2	*100	± 2%
Narancs	3	3	*1k	-
Sárga	4	4	*10k	-
Zöld	5	5	*100k	-
Kék	6	6	*1M	-
Ibolya	7	7	-	-
Szürke	8	8	-	-
Fehér	9	9	-	-
Arany	-	-	*1/10	± 5%
Ezüst	-	-	*1/100	± 10%
	Kétértékes számjegy		Szorzó	Tűrés

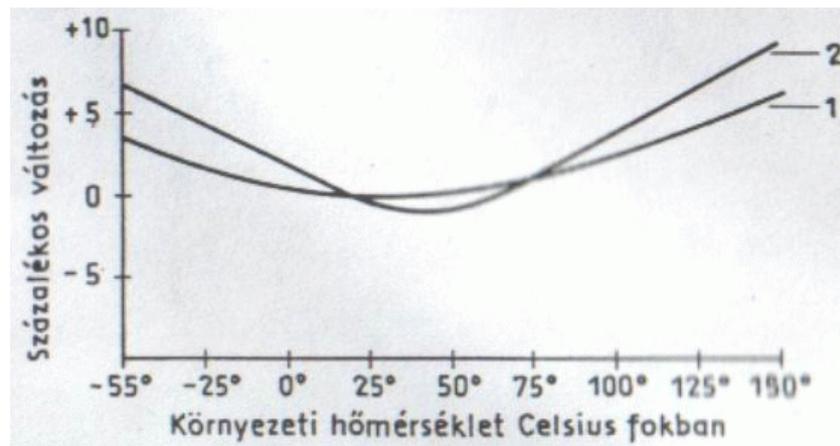
1. táblázat. A gyűrűs színkódok jelentése. A negyedik csík opcionális, ha nincs, akkor a tűrés ±20%.

A piros+ibolya+arany értéke 2,7Ω ±20%, a zöld+barna+piros+arany értéke 5100 Ω ±5%.

A szabványosítás kiterjed az értékskálára, tűrésre, terhelhetőségre, méretre. Ahol lehet, célszerű ebből a szabványos készletből választani. Az ellenálláson a *névleges érték* van feltüntetve, melyek szabványosak kb. 2,7Ω és 22MΩ között. A szabványos terhelhetőségi értékek tömörellenállásnál ¼ W, ½ W, 1 W és 2 W. Ezt a maximális megengedhető belső hőmérséklet szabja meg. A tönkremenetel oka általában a túlmelegedés, ezért a hőelvezetésről gondoskodni kell. Ezért van az, hogy geometriailag a 100Ω/2W ellenállás nagyobb az 100Ω/1W-nál. Az alkatrészeket a megengedett maximális értéknél kisebbben kell üzemeltetni, mert értéke akkor stabilabb. A hideg ellenállás megbízhatóbb, ezért érdemes tartalékot hagyni és nagyobb terhelhetőséget választani (cserébe nagyobb lesz a mérete...).

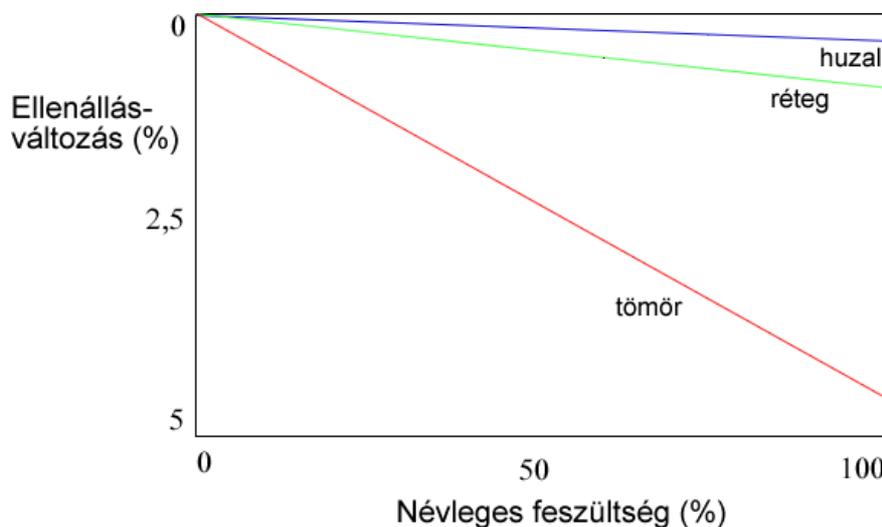
A tömör ellenállások általában 70°C-ig használhatók, utána 70-130 fok között értéke kb. lineárisan csökken, 150 fok felett pedig speciális ellenállás kell. Nagy értékű ellenállásoknál (MΩ felett) a megengedett maximális feszültség határozza meg a teljesítményvesztéséget. Például egy 20 MΩ, 2 Wattos ellenállás kb. 6,3 kV-on adna le 2W-ot, de ha a megengedett maximális feszültség csak 500V, akkor a teljesítményvesztés biztos 2W alatt marad mindig.

A *hőmérsékleti együttható* mondja meg, hogy adott hőmérsékletváltozásra az ellenállás mennyire változik meg. Ezt általában relatív egységben, százalékosan adjuk meg, így a mértékegysége $1/^\circ\text{C}$, $\%/^\circ\text{C}$ vagy $\Omega/^\circ\text{C}$ jellegű. Minél nagyobb ez az együttható, annál nagyobb mértékű a változás, annál rosszabb minőségű az ellenállás, hiszen nem hőmérsékletstabil. Pozitív együttható a hőmérséklet növekedésével arányos ellenállásérték-növekedést jelent, negatív értékcsökkenést. A hőmérsékleti együttható szintén nem lineáris függvénye R-nek, és nagyrészt véletlenszerűen változik. Megadása gyakran görbével történik a hőmérséklet-relatív ellenállás-változás diagramban, de sajnos ezek a mérések nem reprodukálhatók jól.



5. ábra. Az ellenállás hőmérsékleti együtthatója. 25°C -on mért ellenállástól való százalékos eltérés egy $10\text{ k}\Omega$ (1.görbe) és egy $0,5\text{ M}\Omega$ (2. görbe) ellenállásra a hőmérséklet függvényében.

Az ellenállás értéke bizonyos fokig a rajta eső feszültség függvénye, de ezt gyakran elhanyagoljuk. A *feszültség együttható (tényező)* mondja meg, a relatív (százalékos) ellenállás változást a névleges feszültség relatív változásának függvényében. Huzallellenállásoknak és rétegellenállásoknak kicsi, tömör ellenállásoknak nagy a feszültségtényezője, mert az ábrázolt görbe meredek.



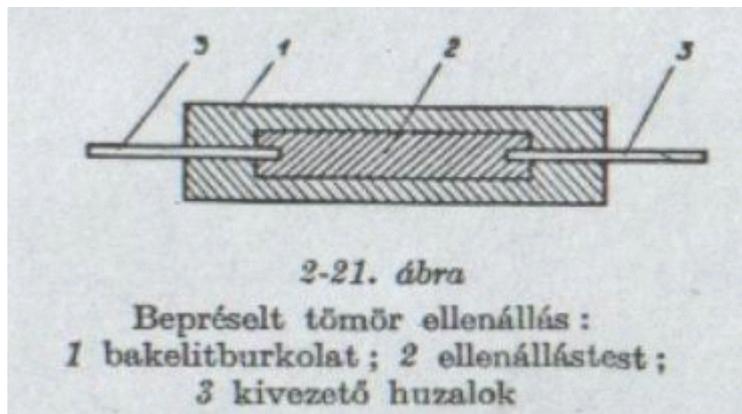
6. ábra. A feszültségtényező változása huzal, réteg és tömör ellenállások esetén.

Az ellenállásoknak több ellensége is van, pl. a *nedvesség*, ami rontja a tulajdonságokat. Jó hír azonban, hogy általában a meleg, a kiszáradás visszaállítja az eredeti állapotot.

Az áram folyása zajgenerátorként működik. Mértékének kifejezésére vezették be a *zajfeszültség* fogalmát, ami függvénye az átfolyó áramnak, és R -nek. Mértékegysége [$\mu\text{V}/\text{V}$], és ahogy R nő, a zajfeszültség nemlineárisan nő. Általánosságban a zajfeszültség kb. voltonként egy mikrovolt. Kiszajú erősítők bemenetén éppen ezért nem használnak tömörellenállást, hanem jobb minőségű huzalellenállásokat.

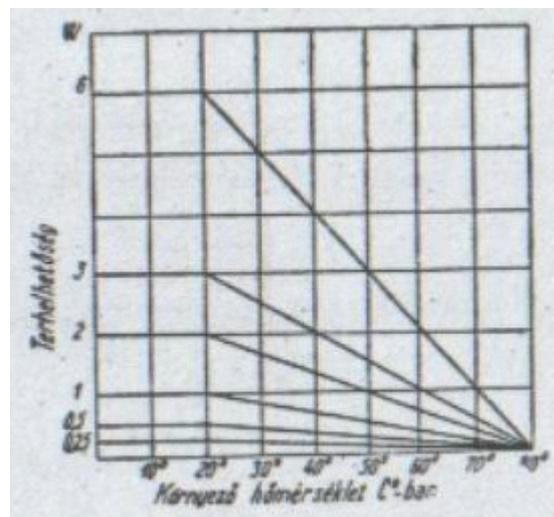
A sok paraméterből, ami az ellenállás értékét befolyásolja, adódik ki a *tűrés*. Egy $\pm 5\%$ -os ellenállás akár $\pm 15\%$ -al is eltérhet *névtleges értékétől*, így ajánlatos megmérni őket használat előtt. Többségük azonban megbízható, olcsó és könnyen beszerezhető nagy mennyiségben.

A tömör ellenállások általános tulajdonsága, hogy a stabilitás rossz, zajosak, nedvességre érzékenyek. A hőmérsékleti- és a feszültség együttható sem kielégítő, viszont a nagyfrekvenciás viselkedés és megbízhatóság elég jó. Általában bakelit bevonattal látják el.



7. ábra. Bepréselt tömör ellenállás keresztmetszeti képe.

A tömör ellenállások, mivel teljes anyagi felülete részt vesz az áram vezetésében, négyzetcentiméterre esően jól terhelhetők. Így kisebb méretben készíthetők, mint a rétegellenállások, viszont rosszabb minőségűek. Az ellenállás tömeggyártásban készül, utólagos értékbeállítás nem lehetséges (pl. köszörüléssel).



8. ábra. A tömör ellenállások terhelhetősége.

3.1.2. Állandó értékű rétegelLENállások

Ez a típus szinte mindenben felülmúlja a tömör ellenállásokat. Általában 1% pontossággal készítik őket és nagyfokú stabilitás jellemzi. A hőmérsékleti tényezőjük gyakorlatilag zérus. Két alapvető típusa van a réteg anyaga szerint: a párologtatott *szénréteg* ill. a párologtatott *fémréteg* ellenállás. A hordozó minden esetben kerámiatest, porcelán. A jellemzők elég eltérőek lehetnek, ezért az adatlap tanulmányozása szükséges. A leggyakrabban használt fémötvözet a krómnikkel (CrNi) melynek négyszer olyan jó a stabilitása ($\pm 0,25\%$), mint a szintén gyakran használt SnO (Sn: ón) fémoxidnak ($\pm 1\%$).

Példa értékek: Legkisebb tűrés $\pm 0,1\%$
Hőm. Tényező $\pm 15 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Feszültség tényező $\pm 3 \cdot 10^{-6} / \text{V}$
Frekvenciatartomány 10 MHz-ig
Nedvesség 0,02%
Terhelhetőség 100°C-ig nem csökken.

Az értékbeállítás köszörüléssel történik, hiszen az ellenállás értéke a réteg vastagságától, méretétől függ, jellemzően 1 Ω -1 M Ω tartományban.

Az ide vonatkozó IEC szabvány az ún. „E” sorozatok valamelyike, amely megadja a szabványos értékeket és tűréseket, pl:

E12: 1; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 4,4; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2 $\pm 10\%$

Az E24 $\pm 5\%$, az E96 $\pm 1\%$, az E6 $\pm 20\%$. Ezek az értéksorok a tűréshatárokkal összefüggnek: minél kisebb a tűrés, annál nagyobb az értéksor számjele ill. az értéksorban szereplő rezisztenciaértékek mennyisége. Néha a védőlakk bevonat színe is segít, hogy az ellenállás melyik értéksorba tartozik.

A rétegvastagság szerint is két csoportra oszthatjuk őket: *vékonyréteg* és *vastagréteg*. Vékonyréteg gyártásnál üvegre párologtatunk vékony fém, vagy fémötvözet réteget: CrNi, arany (Au), Ta₂N (Tantál-nitrát). Vastagrétegnél kerámialapra égetett ruténium (Ru), bizmut (Bi), arany (Au) vagy ezüst (Ag) jöhet számításba.

	Ellenállás érték (ohm)	Tűrés (%)
Vékonyréteg	5 – 100k	$\pm 10 \dots \pm 0,1$
Vastagréteg	10 – 10M	$\pm 20 \dots \pm 1$

2. táblázat. A rétegelLENállások jellemző értékei, tűrései.

Az alakja is kétféle lehet: *hengeres* ill. *lapos* felépítésű. A hengereset angolul Metal Electrode Face-Bonding (MELF) eszközöknek nevezik, amelyek NYÁK furatba illeszthetők. Ilyenkor henger alakú kerámiatestre viszik fel a fém, szén vagy más ellenállásréteget. A lapos lehet ún. lapfémezett vagy élfémezett típus, és általában vastagréteg technikával készítik a réteget egy kerámialapkára.



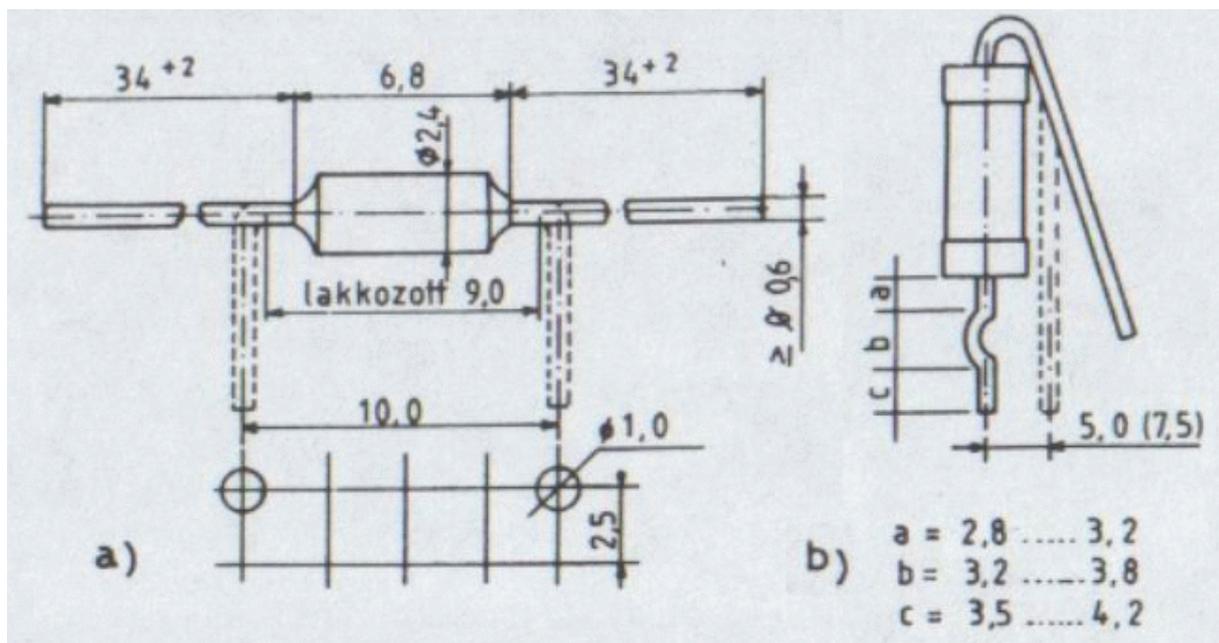
(a)



(b)

9. ábra. Lapfémmezett (a) és élfémmezett (b) típusok.

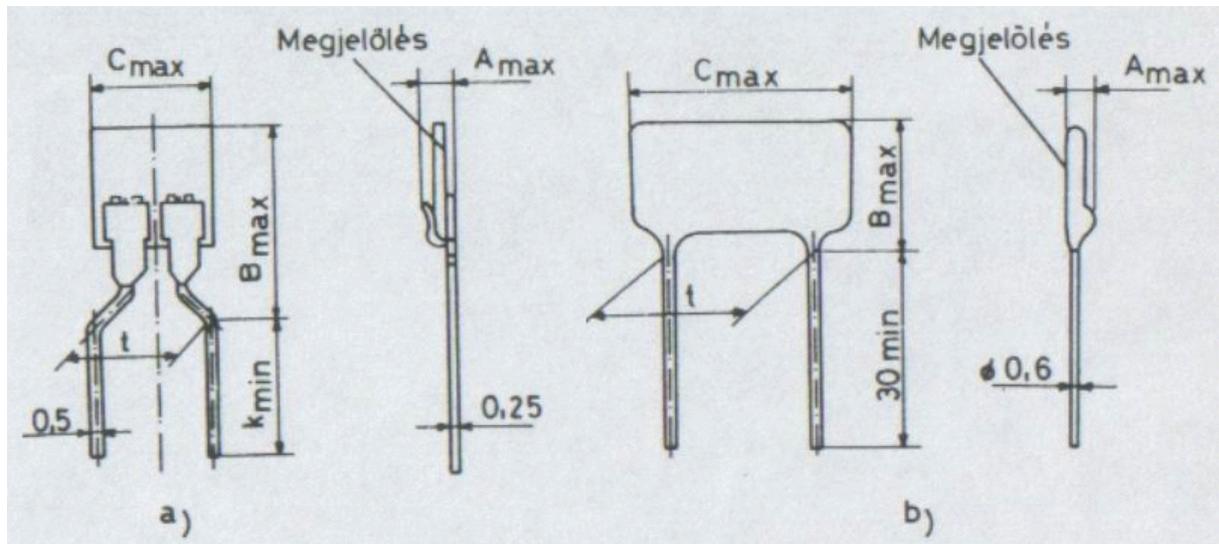
Az érték, tűrés és pontosság elsősorban a fém vagy a szén minőségétől, a kerámia nagyságától és minőségétől valamint a gyártástechnológiától függ. A katalógus tartalmazza a terhelhetőséget (P_{\max}), katalógusjelet, a rezisztenciaérték alsó és felső határát (ohm), tűréshatárokat ($\pm\%$), az ellenállástest méreteit, kivezetések átmérőjét és a beültetési távolságot.



10. ábra. Rétegellenállások tengelyirányú kivezetésekkel. (a) fémréteg ellenállás „sapka” nélküli kivitel, (b) fémréteg-ellenállás, a kivezetések ’álló’ szerelhetőségével.

Az ábra fémréteg ellenállást mutat „sapkás” kivitelben. Létezik azonban olyan is, ahol a kivezetést az ellenállástesten lévő fémréteghez közvetlenül forrasztják be. Ez a módszer jobb kötést biztosít az ellenállástest és a kivezetések között. A hordozó kerámiaanyag hőmérsékletfüggése is kedvezőbb. A függőleges, álló beszerelés akkor alkalmazható, ha felfelé több hely van a NYÁK-on, mint vízszintesen. Ugyancsak állítva építik be a nyomtatott áramköri lapokba a 11. ábrán látható vastagréteg ellenállásokat. A kivezetéseket a

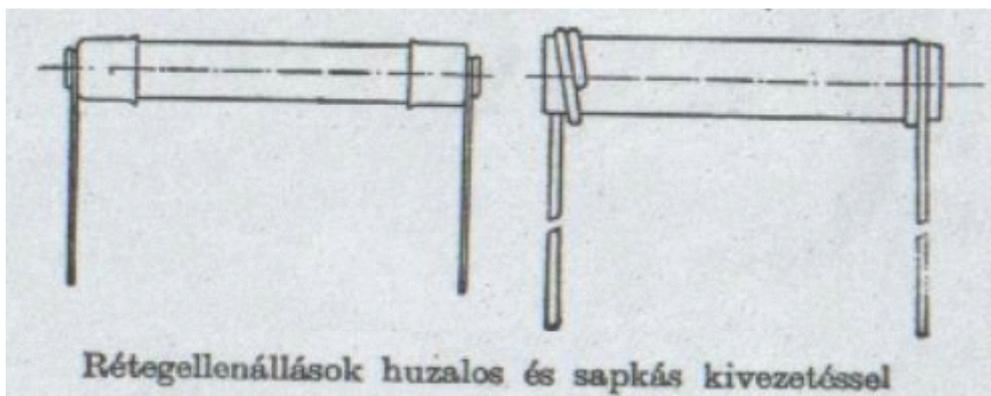
kerámialapka egyik oldalán alakítják ki oly módon, hogy a kivezetések közötti távolság 2,5 mm vagy annak többszöröse. Ezeket lakkréteg védi a külső sérülésektől (esetleg műanyag).



11. ábra. Vastagréteg-ellenállások lakkvédelemmel ill. műanyag bevonattal, álló beszereléshez.

A lapos kivitelű ellenállásokat sűrűn érdemes szerelni, ahol 1-100 M Ω értékekre van szükség. Ezeket mechanikailag 2,5 mm távra szerelhetjük, de ilyen esetben a hőleadás csökken és a felületi hőmérséklet emelkedik. Ennek elkerülésére a terhelést a névleges értékhez képest csökkentik.

A hengeralak lehet tömör, vagy cső alak, mely jobban terhelhető és jobb a hőelvezetés képessége. A rétegellenálláshoz szükséges masszát aszerint választják meg, hogy milyen értékűt kívánnak előállítani. Rendszerint két alapkeverékből indulnak ki, egy jó vezetőképességűből, melynek fajlagos ellenállása 3000 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ (sok grafit, kevés korom, lakk) és egy nagy ellenállású anyagból 10⁶ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ (kevés grafit, sok korom). Koromhoz legalkalmasabb a gázkorom, ami földgáz égetésével keletkezik, és szemcsenagyság-válogatás után kerül felhasználásra. A bakelit lakkból A, B és C típus is létezik, anyagtartalomtól függően. Gyártás során a megtisztított porcelán rudat szórópisztollyal fújjál be a rétegeket, majd centrifugálással egyenletessé teszik a vastagságát. Szárítás és hevítés után lakkbepvonat kerül a végén az eszközre. A kivezetés sapkás vagy huzalos lehet. Az így készült eszközök még nagy szórásúak, azért köszörüléssel meneteket vágnak bele, így az áram a kivezetések között nem a test hosszában, hanem spirálban halad – nő az ellenállásérték. A hőfejlődés nagyobb lesz a nem köszörült részeken, így a terhelhetőség csökken. A megoldás, hogy egyenletesen kell köszörülni.



12. ábra. Rétegenállások kivezetési formái.

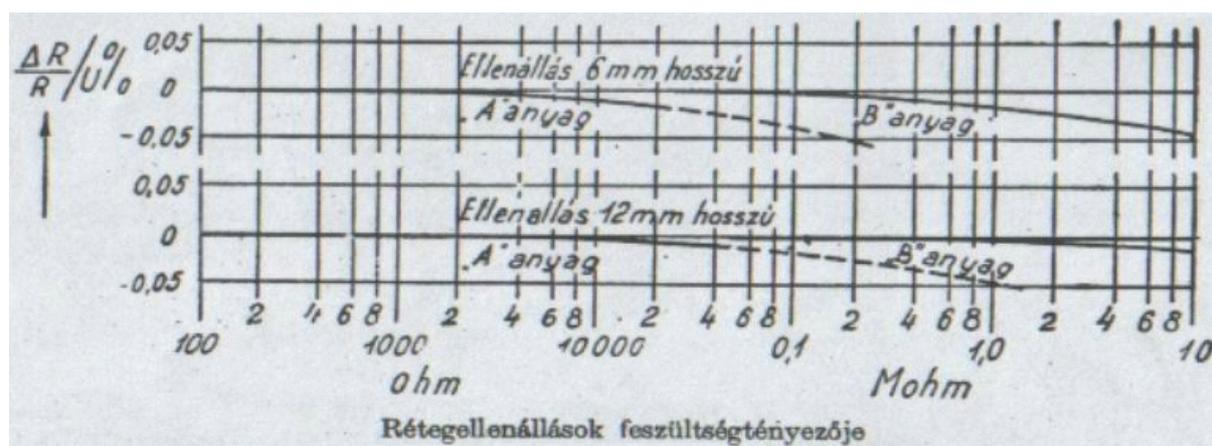
A nagy állandóságú szénréteg ellenállások esetén a vezető réteg magán a porcelán testen keletkezik, mint kemény, kristályos szénbevonat. Ehhez szénhidrogén gázba kell tenni, és a kicsapódott szénréteg magas hőmérsékleten kiválik. A réteg vastagsága kisebb, mint 0,1 mikron. A rétegben nincs amorf szén és kötőanyag. A szemcsék közötti érintkezés szilárd, az ellenállás állandóbb, ezért közkedveltebb eljárás. A kész eszközöket köszörülékkel és lakkal vonják be. Alacsony ohmszám esetén 0,5% pontosság is elérhető (mérési célokra).

A rétegenállások lehetséges hibái:

1. *Feszültségfüggés.* Az ellenállásérték nem független a feszültségtől, általában növekvő feszültség hatására csökken. E tulajdonságot jellemzi a *feszültségtényező*:

$$k = \frac{R_1 - R_2}{R_2} \frac{100}{U_1 - U_2}, \quad (12)$$

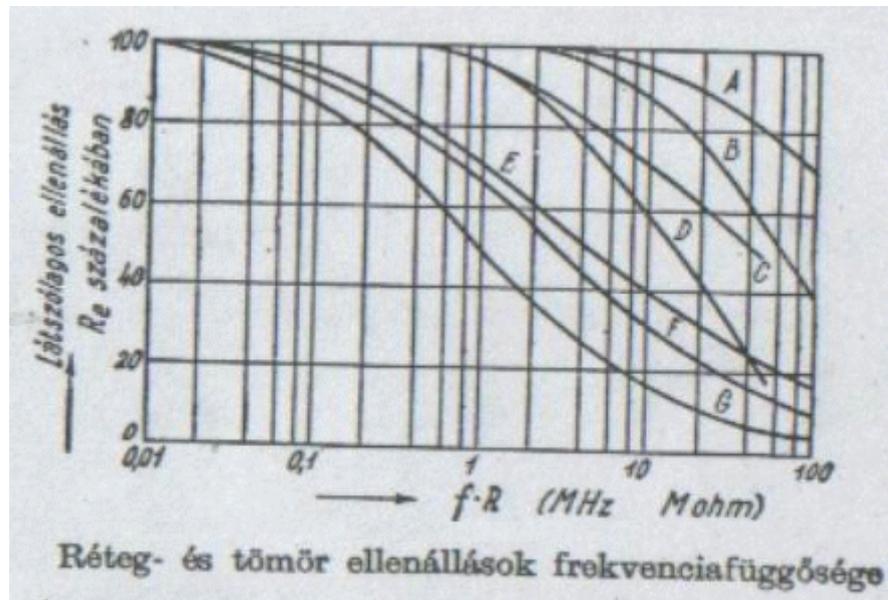
ahol U_1 a maximális megengedett állandó feszültség, U_2 ennek 0.1 része, R_1 az ellenállás a megengedett feszültségnél, R_2 pedig az U_2 esetén mért érték. E tényező általában az ellenállásanyagától és értékétől függ, továbbá a test hosszától.



13. ábra. Rétegenállások feszültségtényezője.

2. *Rádiófrekvenciás viselkedés.* A skinhatás miatt, a frekvencia növelésével csökken az ellenállás értéke, ellentétben a huzalellenállásokkal. Különösen magas rádiófrekvenciákon igaz ez, amit *Boella*-jelenségnek neveznek és amely a részletes helyettesítőképpel magyarázható meg. A jó viselkedéshez az kell, hogy kedvező alakú és kevés dielektrikum

legyen felhasználva: RF viselkedéshez maximális hosszúság/keresztmetszet értékre kell törekedni. Különösen a kristályos szénrétegek jók.

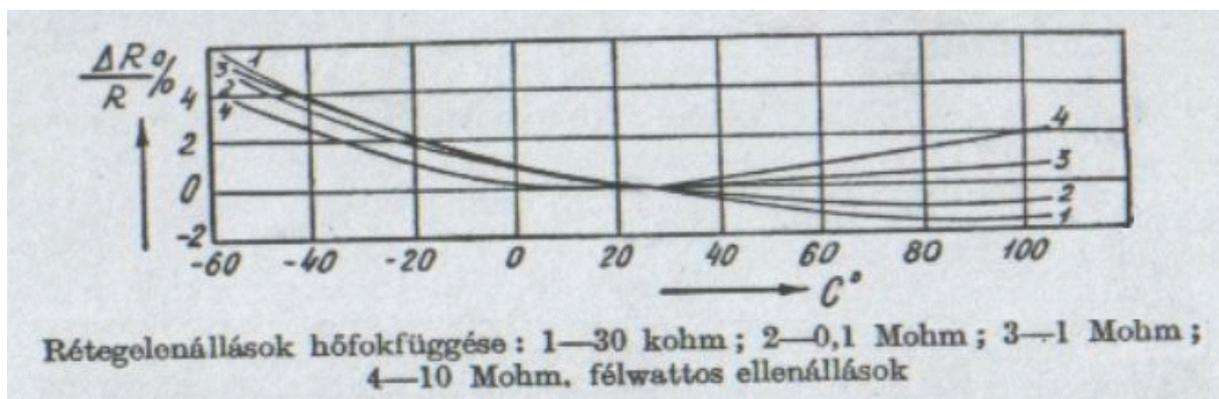


14. ábra. A fémréteg ellenállás, B keményszénréteg, C és D különböző ohmszámú, szórt rétegű ellenállás, E és G különböző méretű tömör ellenállások frekvenciafüggése.

3. *Zajkarakterisztika.* A zajfeszültség függ az anyagtól, ohmszámtól, mérettől és feszültségtől. A mérések szerint a zajfeszültség magasabb, az elméletileg várt, Johnson-mozgásból adódó értéknél. Oka a szemcsék közötti érintkezésingadozás lehet. A széntartalom növelése csökkenti a zajt. Növekvő ellenállásértékhez a szigetelőanyag mennyiségét is növelni kell, nő a szemcsék közötti ellenállás és a zaj is. Cél tehát a kevesebb szigetelőanyag használata.

4. *Nedvességfüggés.* A beszivárgó víz növeli az átvezetéseket, így az ellenállás csökken. A massa-ellenállásoknál viszont fordítva: duzzadás következik be, a szénszemcsék távolsága nő, így az ellenállás értéke szintén. Lakk, műanyagbevonat csökkenti a nedvesség beszivárgását.

5. *Hőfokfüggés.* A legkisebb szerepe ebben a grafit negatív hőfoktényezőjének van. Erősen függ azonban a réteg és a tartóanyag hőkiterjedésétől, mely a részecskék érintkezését befolyásolja. Ezért nem lehet egyetlen számmal, hanem csak grafikonnal jellemezni.

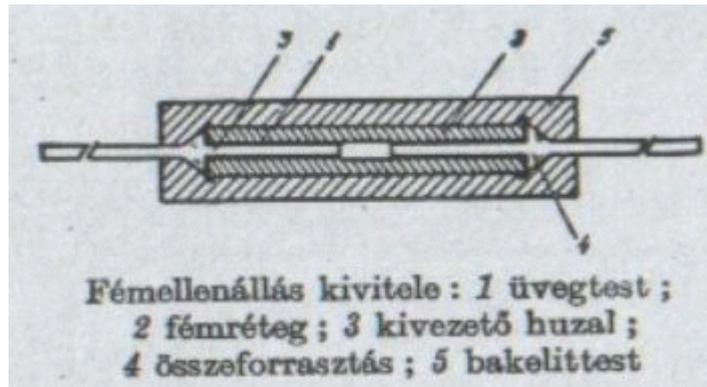


15. ábra. Rétegenállások hőfokfüggése.

A kemény szénréteg ellenállások mindenben jobbák, mert szigetelőanyag nincs az ellenállás rétegben:

1. igen magas hőfokon is használhatók, erősen terhelhetők.
2. nagyon stabilak
3. öregedési változások kicsik. Feszültségtényező elhanyagolható, zajosság kicsi.

Egy újabban terjedő típus a *fémréteg* ellenállás. Egy kerámia, üveg esetleg bakelit tartóanyagra felvitt, igen vékony fémréteg vagy fémötvözet alkotja. A bevonás történhet katódporlasztással, fémgőzölgetéssel, vagy egyéb kémiai úton. A vastagság kb. 10^{-6} mm nagyságrend.



16. ábra. A fémellenállások keresztmetszeti képe.

Amennyiben szükséges, köszörüléssel állítják be az értéket. A préselt bakelitburkolat tökéletesen védi. Igen jó elektromos stabilitásuk van, jól terhelhetők, jó a hőelvezetés, hőfoktényező negatív, de nem lineáris a hőmérséklettel. Igen erősen túlterhelhetők maradandó értékváltozás nélkül. Nagy előnye, hogy rádiófrekvencián 50 MHz-ig tartja az értékét.

3.1.3. Állandó értékű huzallellenállások

A kialakítás henger alakú kerámiatestre tekercselt ellenálláshuzal (tekercselt kivitel). A felhasznált huzalanyagok: NiCr, FeCr, FeCuCrNi. Felülete vagy szabadon van hagyva, vagy cement- ill. zománcreteggel bevonva. A bevonat célja, hogy a melegedés és lehülés közben megakadályozza a huzal mozgását, leemelkedését a testről vagy a túlzott megfeszítést. Így a huzal szakadás, nyúlása, és a rövidzár elkerülhető. A nedvesség behatolása a huzalanyagban lévő nagy mennyiségű vas miatt korrózióhoz vezetne. A kis értékűeknek nagy a terhelhetőségük, kis zajúak, stabilak, megbízhatóak. A nagy értékű fajtái nem megbízhatóak, mert az ellenálláshuzal átmérője csökken, és mechanikai roncsolódás léphet fel. Ennél a típusnál a tekercselés okán számolnunk kell a parazita induktivitással, így alacsony és középfrekvencián használhatók csak az *erős induktív jelleg* miatt. Értéke jellemzően az $1\Omega - 10k\Omega$ tartomány, viszont elég magas hőmérsékleten is jól üzemelnek ($150-350^\circ\text{C}$). Teljesítmény (70°C -on) kb. 1-10 W. A skinhatás miatt, a frekvencia növelésével nő az ellenállás értéke.

A nagy ohm-értékű huzallellenállásokat feltétlenül krómnikkelből készítik, egyrészt mert nagy a fajlagos ellenállásértéke, másrészt nagy a mechanikai szilárdsága. Így igen vékony huzallá húzható, tehát viszonylag kis hosszúságú huzalból készíthető el a kívánt értékű ellenállás. A *manganin* (87% Cu, 13% Mn) és a *konstantán* (57% Cu, 43% Ni) fajlagos ellenállása közel

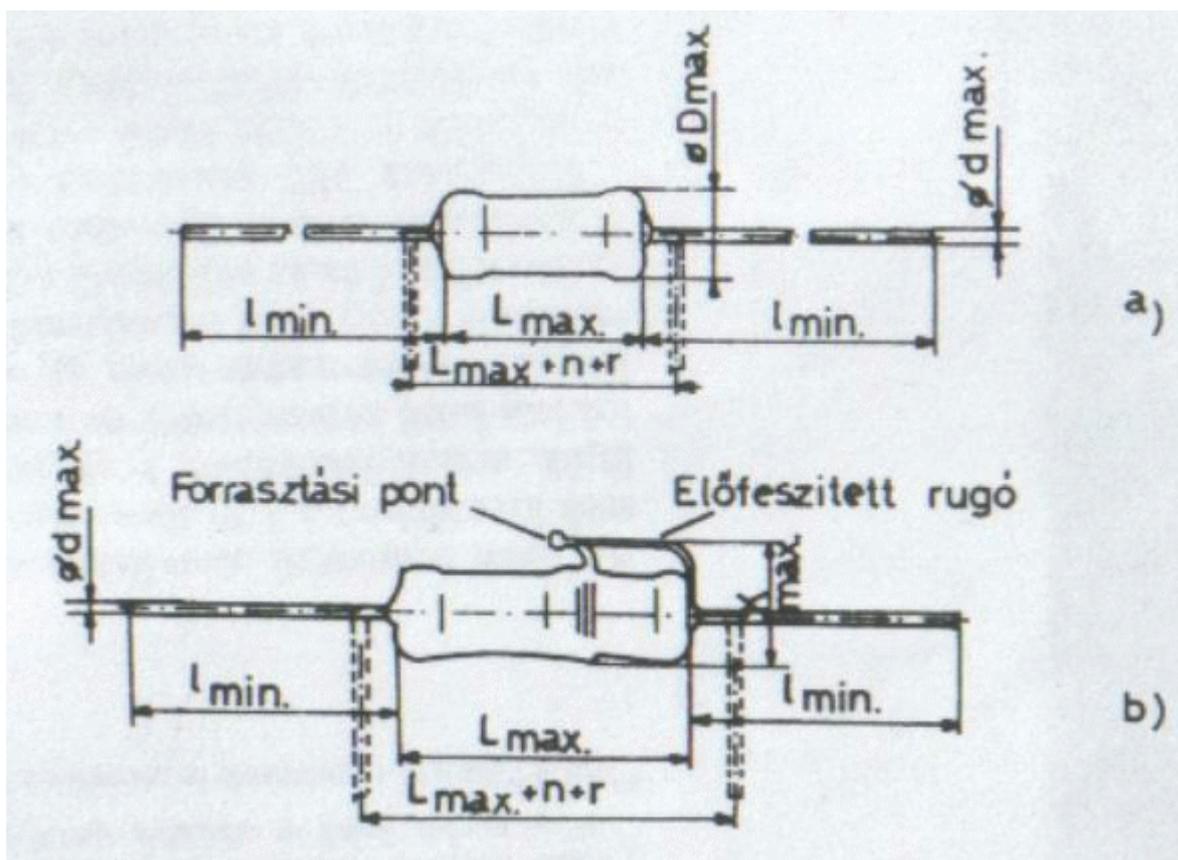
azonos, utóbbi hőfoktényezője zérus, míg előbbié 10^{-5} nagyságrendű – tehát stabilabbak. Precíziós ellenállásokhoz, egyenáramú mérésekhez mangánin-t használnak.

A huzallellenállás konstrukciója a két előnyös tulajdonságának felel meg: nagyobb a terhelhetősége és a stabilitása is a rétegellenállásokhoz képest. A kerámiatest szembeni követelmények:

1. Szigetelési tulajdonságaik üzemi hőmérsékleten is megfelelő legyen
2. Lehetőleg mentes legyen alkalikus anyagoktól, mert különben elektrolitikus vezetés indulhat meg, aminek korrózió a következménye
3. Megfelelő mechanikai szilárdságú legyen és hőkitérjedési együtthatója egyezzen meg az ellenálláshuzaléval és a bevonattal.

A bevonóréteg vagy szerves alapanyagú, száradó, alacsony hőn kiégethető lakk, vagy pedig tisztán szervetlen anyagból álló zománcréteg, mellyel a huzalt bekenik, megszártják és olvadási főfokon kiégetik. Mindkettő lehetőleg legyen azonos hőfoktényezőt (hőtáguláson) a huzalanyaggal. Alapvető különbség, hogy előzőt maximálisan 160 fokon, utóbbiakat egészen 300 fokig használhatjuk. Ezért a zománcfelület azonos méretben sokkal nagyobb terhelést bír el. Előbbi esetén kb. $0,3-0,5 \text{ W/cm}^2$, utóbbinál ez $1-1,2 \text{ W/cm}^2$.

A tekercselést különleges, szálvezetővel ellátott gépeken készítik, hogy egyenletes menetemelkedés és zárlatmentes eszköz készüljön. Általában nincs szükség szigetelt huzalra, mert a krómnikkel felületén lévő oxidréteg nem üt át. Huzallellenállások rádiókészülékekbe nem jók, mert 100 kohm felett nincs és nagyfrekvencián erősen induktívak, továbbá drágák.



17. ábra. Cement védőréteggel ellátott huzallellenállások (a) R615 jelű és a (b) R616 jelű hőre kioldó fajta.

3.1.4. Változó és szabályozható értékű ellenállások

A változó értékű ellenállások azon fajtáit, amit mi állíthatunk be *potenciométereknek* nevezzük. Ez lehet egyszer beállítható ill. többször (szabályozható) körbefordítható kivitel, vagy egyenes. A fenti kettő mindegyike előfordulhat, így készülnek tömör és huzallellenállásból is.

Legfontosabb paraméterei: a végellenállás értéke (min, max állás), ami minimálisban általában szakadás; visszatérési pontosság és a linearitás. Nem minden potenciométer állítható lineárisan.

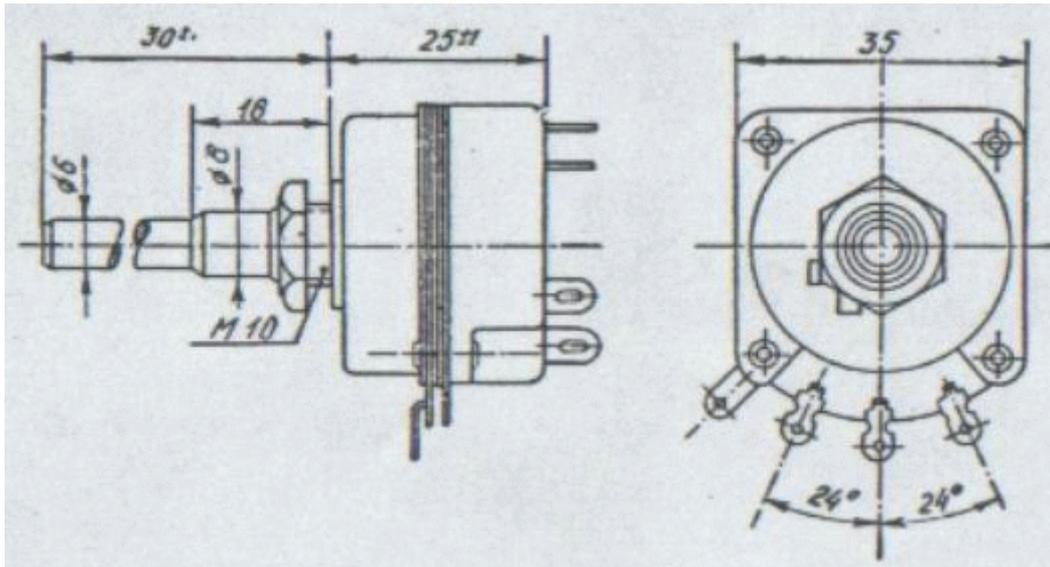
Csoportosítás:

Feladat szerint:

1. szabályozható, ami I és U gyors megváltoztatására alkalmas (kb. 50000 szabályozás) kis zajfeszültséggel. Az ellenálláspálya rezisztenciája állandó és kopásálló. NYÁK-ba ritkán szerelik.
2. beállító, amit egyszer állítunk be állandóra, kb. $\pm 2\%$ pontossággal. Az előzőeken túlmenően a pályáellenállás és a beállítóérték hosszú idejű változatlansága még szélsőséges körülmények között is elvárás.

Ellenálláspálya anyaga szerint:

1. amorf szén (korom), ami olcsó, tömör, de hamar kopik és erősen érzékeny a nedvességre és hőmérsékletre. Az ellenálláspálya hőmérsékletfüggése közepes.
2. cermetréteg (ruténium alapú fém-félvezető és üveg-kerámia összetételű), ami jobb, mert jobb a hőmérséklet tényezője, ezáltal R értéktartása is egy nagyságrenddel (5%) valamint kopásálló. Speciális leszedő mozgóérintkezővel szerelik a pontos értéktartás érdekében. Viszonylag olcsó, és magas ohmértékű (szénpotméter). Az ellenállástest általában patkó alakú és csúszóérintkezős. A bevonat vastagsága változhat, amivel nemlineáris potméter is készíthető. Az ellenálláspálya zajmentességének követelménye, hogy az tűkörsima legyen és a csúszóérintkező is kritikus. A por és elektromos védelem céljára védősapkával látják el. Gyakran alkalmazzák végállásban kapcsolóval erősáramú hálózatokhoz. A szénréteg-tulajdonságok igazak rá, nem köszörülhet így nagy szórással gyártható csak (5-20% pontosság). Feszültség- és hőfoktényező megegyezik a rétegellenállásoknál leírtakkal. A szénpotmétereket hangfrekvenciás erősítők hangerő- és hangszín szabályozóihoz használják (logaritmikus!). A kopás sebességét az ellenállásréteg felületi keménysége, a csúszó érintkező felületi nyomása és simasága határozza meg.
3. huzalozott, ahol kerámiatestre vagy textilvázaz műanyag testre csévélt CrNi vagy FeCr ötvözet található sor vagy toroid kivitelben. I és U folyamatosan, lineárisan, pontosan vezérelhető. Finombeállítás is van. A kisebb fajtákat NYÁK-ra is lehet tervezni. Jól terhelhetők. eltérő tekercselési módokkal nem lineáris ellenállás-szabályozást is elérhetünk, pl. négyzetest (háromszög alakú tekercseléssel), logaritmikust, exponenciálist. Magas ohm érték nem megengedett és elég drágák. Általában jobban terhelhetők a többinél. Maximális értékek 30-50 kohm közöttiek, de üzembiztosan csak 10 kohm alatt.



18. ábra. Kapcsolós potenciométer oldal- és felülnézete.

3.1.5. Hőmérsékletfüggő ellenállások

A termisztor olyan ellenállás, ahol annak hőmérsékletfüggését előnyünkre használjuk ki. Ebből következik, hogy *hőmérsékleti tényezője nagy*. A negatív tényezőjűt NTC (Negative Thermal Coefficient) ellenállásnak, a pozitívét PTC-nek nevezik. Az NTC magyar neve a termisztor, ahol az ellenállás a hőmérséklet növekedésével csökken; a PTC-t baretternek is hívják.

Általában félvezetőanyagú: grafit (C), germánium (Ge), szilícium (Si), fémoxidok, vasoxid (Fe_2O_3). Felhasználása hőmérőként (külső fűtésű) vagy áramfüggő ellenállásként (belső fűtésű).

A ρ fajlagos ellenállás a hőmérséklet függvényében ilyen alakú:

$$\rho \sim \frac{1}{e^{\frac{B}{T}}} \text{ és} \quad (13)$$

$$\alpha = -\frac{B}{T^2} \quad (14)$$

ahol B adott konstans: 3000K, 4000K, 6000K. Az α értéke szobahőmérsékleten -3,3 %/K; -4,4 %/K; -6,7 %/K körüli, anyagtól függően.

$$R = A e^{\frac{B}{T}} \quad (15)$$

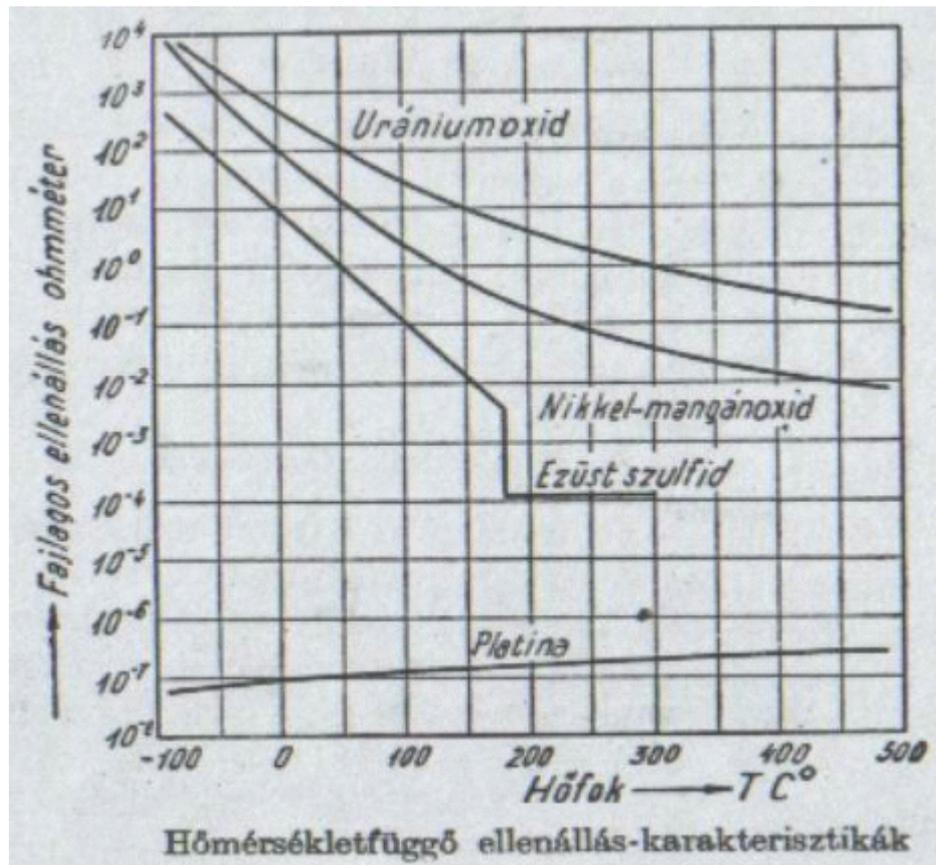
$$R_T = R_{25^\circ\text{C}} e^{\left(\frac{B}{T} - \frac{B}{298}\right)} \quad (16)$$

A PTC baretterek fém vagy félvezető-kerámia alapúak (BaTiO_3). Egy 50 fokos hőmérséklet tartományon belül 3-4 nagyságrendben is változhat az ellenállás értéke. Jellemző kiviteli

alakjuk a vashidrogén ellenállás, melynek segítségével változó feszültség mellett állandó áramot lehet előállítani. Felhasználása nem-melegedő verzióban szenzorokban, erősen melegedő kivitelben áramkorlátozásra (motorok, hangszórók), áramstabilizálásra, speciális alkalmazásban folyadékszint mérésére.

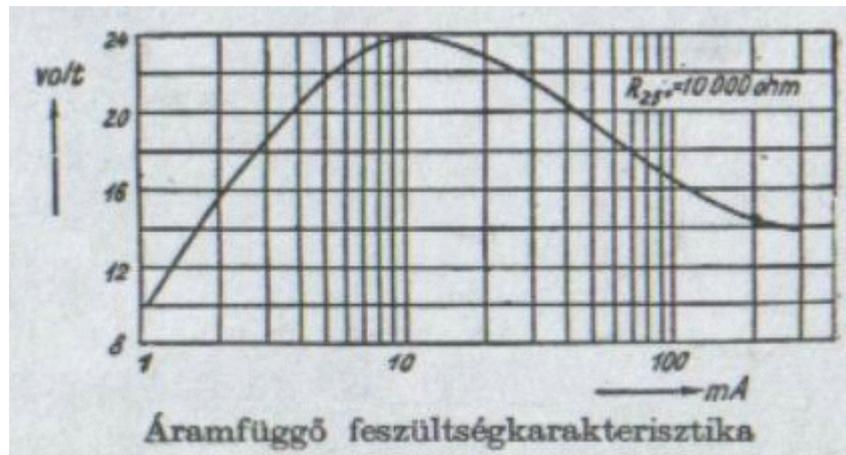
Az NTC termisztorok kapcsolástechnikai alkalmazása jelentősebb a PTC-nél. Alapanyaga fémoxid: Fe_2O_3 , nikkeloxid NiO , mangándioxid MnO_2 , melyeket közömbös kötőanyagokkal szemcsékké, rudakká szinterelnek össze. Az alkalmazott félvezetők alacsony hőmérsékleten kevés szabad elektronnal rendelkeznek, amelyek vezetnek. Magasabb hőn, a kötött elektronok kiszabadulnak és részt vesznek a vezetésben. A termisztorok karakterisztikái:

1. Ellenállás a hőmérséklet függvényében. Az ellenállás általában exponenciálisan változik, melynek kitevőjében az abszolút hőmérséklet szerepel.



19. ábra. Különböző anyagok nem lineáris karakterisztikái.

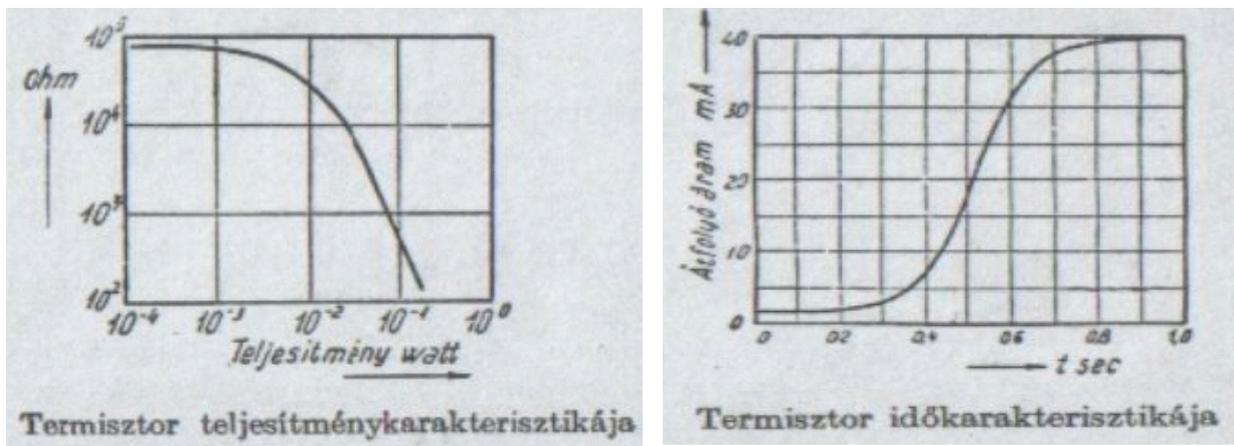
2. Feszültség az átfolyó áram függvényében.



20. ábra: Vasoxid termisztor jellegzetes karakterisztikája.

Érdekes, hogy egy maximum után esik a jelleg, ami oszcillátorbeli alkalmazhatóságra is utal.

3. átfolyó áram a melegedési idő függvényében. A termisztor ellenállása hőmérsékletfüggő, így váltóáram esetén mindaddig változik az érték, amíg be nem áll a teljes anyag hőmérséklete. Ez a tömeg függvénye. A bekapcsolástól a teljes áram kialakulásáig terjedő idő a termisztor által okozott időkésettetés.

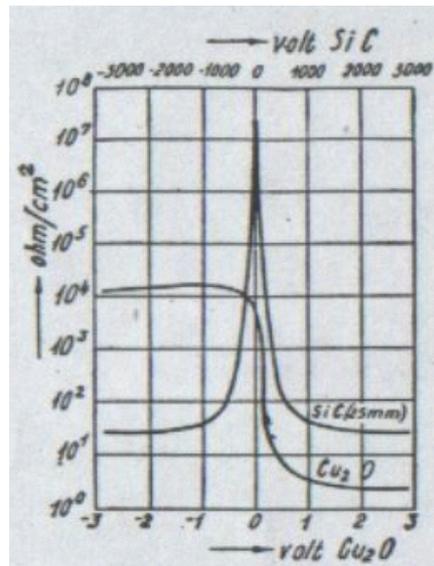


21. ábra: Termisztor teljesítmény-és időkarakterisztikája.

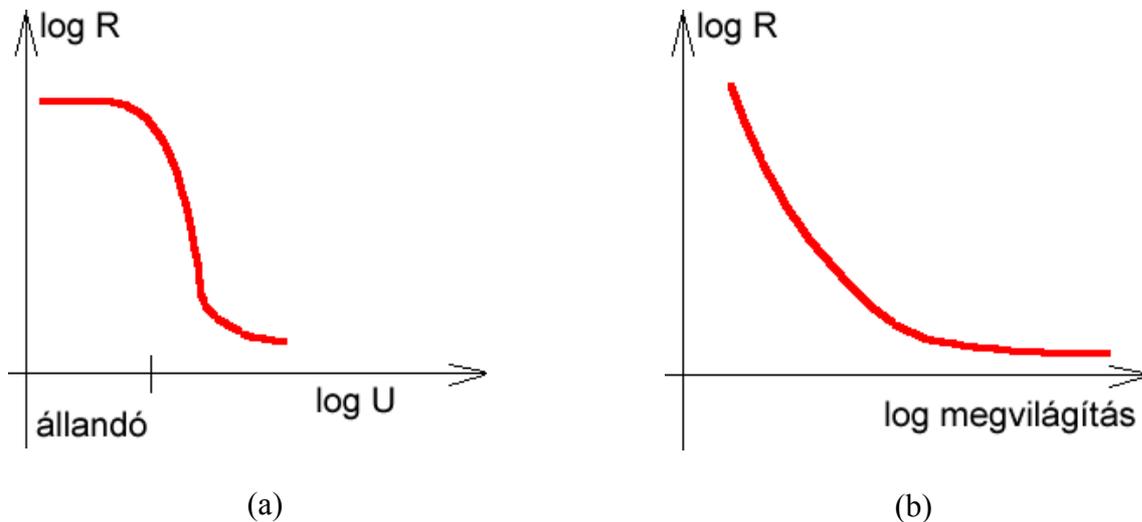
A termisztorok felhasználhatósága: ellenállás-hőmérő, időkésettetett kapcsoló, kis fogyasztású wattmérő, motorindító és védő kapcsolásban, erősítők önműködő szabályozójaként és soros fűtésű rádiócsövek bekapcsolásához.

3.1.6 .Speciális ellenállások

Ritkán használatosak, de speciálistulajdonságaik miatt adott alkalmazáshoz nagyon jók. Létezik mágneses térerősség-függő ellenállás, feszültségfüggő vagy éppen fényérzékeny (anyagtól függő speciális érzékenység a beeső fényre). A feszültségfüggő kivétel alkalmas túlfeszültség védelemre vagy egyenirányításra, mint pl. a szelencellás egyenirányító. Ez utóbbi negatív feszültség esetén nagy R értékű, pozitív esetén pedig nagyon kicsi. Többnyire csak kis feszültségen használhatók.



22. ábra. Feszültségfüggő ellenállás karakterisztikák.



23. ábra. Feszültségfüggő (a) és fényérzékeny ellenállás (b) karakterisztikája. Ügyeljünk arra, hogy minden tengely logaritmikus léptékű!

3.2 A kapacitás

Az elektronikus berendezésekben nagy számban használunk kondenzátorokat (gyakrabban, mint a tekercseket). E széles körű felhasználás kiterjedt gyártási módszereket kíván, melyet a követelmények és a megkívánt tulajdonságok ismerete alapján lehet kidolgozni.

Kondenzátornak nevezünk minden olyan eszközt, amelynél két elektromosan vezető felület vagy felületcsoport szigetelő réteggel van elválasztva és áll egymással szemben. A szigetelő lehet gáznemű, folyékony vagy szilárd, de a két vezetőt egymáshoz képest csak szilárd szigetelővel lehet meghatározott helyzetben tartani. A kondenzátorok jellemzője a kapacitása, amely megmondja, hogy mekkora nagyságú elektromos töltést képes eltárolni. A feszültség, a kapacitás és töltés között meghatározott kapcsolat áll fenn (ld. I. fejezet).

A veszteségmentes kondenzátor működési egyenletei egyszerűek. Ilyen esetben ugyanis a töltés közben a kondenzátorba vezetett elektromos energia (az a munka, amit a töltés közben végezni kellett) a kondenzátor kisülésekor teljes egészében visszanyerhető, és az eszköz ideális energiatárolóként működik.

A töltés:

$$Q = CU \quad [C = As]. \quad (17)$$

Az energia

$$W = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} QU. \quad (18)$$

Ahogy már láttuk, a kondenzátor árama és feszültsége között a C arányossági tényező teremt kapcsolatot, a derivált szorzataként. Ha a kondenzátort egy ellenálláson át kisütjük, akkor azon áram folyik. Töltés közben ugyancsak folyik áram a töltő vezetéken. Ennek az áramnak az értékét adja meg a kondenzátor töltésének időbeni változása:

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt}. \quad (19)$$

A szigetelőanyagot a dielektromos tényezőjével jellemezzük, mely általános esetben a relatív és a vákuum dielektromos tényezőjének a szorzata. A vákuumra vonatkozó állandó értéke:

$$\varepsilon_0 = 8,85 * 10^{-12} \frac{As}{\Omega m}. \quad (20)$$

A veszteséges kondenzátorban még a teljes feltöltődés után is folyik áram be, ezen kívül kisütéskor a teljes energia nem nyerhető vissza. Ennek oka részint a szigetelőanyag tökéletlenségei, illetve a kivezetések ohmos veszteségei. A szigetelőanyag egyik hibája, hogy nem szigetel tökéletesen, mert átvezetéssel bír. Továbbá feltöltődéskor a molekulák polarizálódnak: bizonyos mértékben rendeződnek, elfordulnak. Kisütéskor, pedig időre van szükség ezek visszafordulásához természetes helyzetükbe. Így kisütés után azt látjuk, hogy rövidzárás után ismét lesz (marad) töltés benne. Ennek oka a dielektromos abszorpció (elnyelés). Ez a maradék feszültség a dielektrikum anyagától függ. Ha a kondenzátort DC helyett AC módban használjuk, akkor az átpolarizálás és utóhatás miatt lépnek fel veszteségek, melynek oka szintén a szigetelő anyaga (ún. dielektromos hiszterézis).

Váltóáram esetén, az ideális kondenzátoron átfolyó áram a kapcsokon mért feszültséghez képest 90 fokkal siet, hiszen

$$U = \frac{I}{j\omega C} = -j \frac{I}{\omega C}, \quad (21)$$

mert

$$\frac{1}{j} = \frac{1}{j} \frac{j}{j} = \frac{j}{j^2} = \frac{j}{-1} = -j. \quad (22)$$

és a $-j$ -vel való szorzás a komplex számítás szerint negatív forgásirányban történő 90 fokos eltérést jelent, j^2 pedig pontosan -1 .

Ha az elem veszteséges, akkor ez a fáziskülönbség nem pontosan 90 fok, hanem kisebb. Azt a szöveget, amivel ez kisebb, a kondenzátor veszteségi szögének (δ) nevezzük, mert egyben jellemzi az összes veszteséget.

A szög szinusza adja meg a teljesítménytényezőt (néha $\cos \varphi$ -ként is szerepel):

$$\sin \delta = \text{felvett tényleges teljesítmény} / \text{felvett látszólagos teljesítmény}. \quad (23)$$

A számítások megkönnyítése érdekében a párhuzamos helyettesítő kapcsolást használjuk inkább. Ez jellemzi a dielektrikum átvezetési veszteségeit. Létezik azonban a soros helyettesítő kapcsolat, ahol az ideális kondenzátort sorba kapcsoljuk a veszteségi ellenállással: ez a vezetékek és a fegyverzetek veszteségét jellemzi. A két kapcsolásnak más a frekvenciafüggő viselkedése.

Soros kapcsolásnál a kondenzátor által felvett tényleges teljesítményt az $I^2 R$ adja meg, míg a látszólagost az UI szorzat. Ebből:

$$\sin \delta = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}}. \quad (24)$$

Továbbá, a gyakrabban használt kifejezés alapján:

$$\tan \delta = \frac{\sin \delta}{\sqrt{1 - \sin^2 \delta}} = R\omega C. \quad (25)$$

Ez az ohmos ellenállás/kapacitív ellenállás viszonyt fejezi ki, ha a számlálót és a nevezőt is I^2 -el beszorozzuk:

$$D = \tan \delta = \text{veszteségi ellenállás} / \text{kapacitív ellenállás} = \text{veszteségi telj} / \text{kapacitív telj.},$$

ahol D a kondenzátor *veszteségi tényezője*. Kis veszteségű eszközöknél $\tan \delta \approx \delta$, így:

$$D = R\omega C. \quad (26)$$

Vagyis, ilyenkor a veszteségi szög radiánban egyúttal a kondenzátor veszteségét is megadja. E mennyiség reciproka a *jósági tényező*:

$$Q = \frac{1}{D} = \frac{1}{R\omega C}. \quad (27)$$

Áramkör tervezésénél nem csak a kapacitás értéke szempont, hanem a dielektrikum anyagát, üzemi feszültséget, hőmérsékleti előírásokat, szivárgási áramot, a megbízhatóságot, méretet és beszerezhetőséget is figyelembe kell venni. Léteznek változtatható kapacitású típusok is.

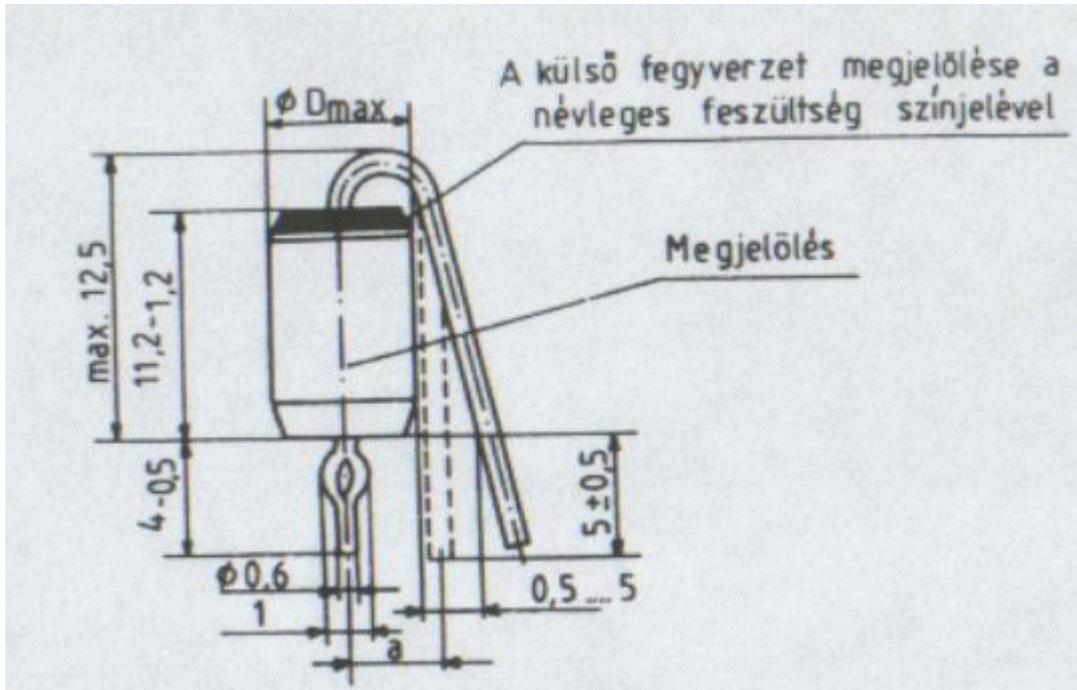
A legfontosabb dielektrikumok: levegő, papír, mylar, polisztirol, csillám, tefflon, kerámia, elektrolit és tantál-oxid.

Kisütéskor nagy áram folyik, ha egy feltöltött kondenzátort rövidrezárunk. Ismételt rövidzárások az eszközt tönkretelhetik, így a kisütést véges ellenálláson át kell végezni. A feltöltött kondenzátor belső impedanciája kicsi, ezért nagy áramlökésre képes.

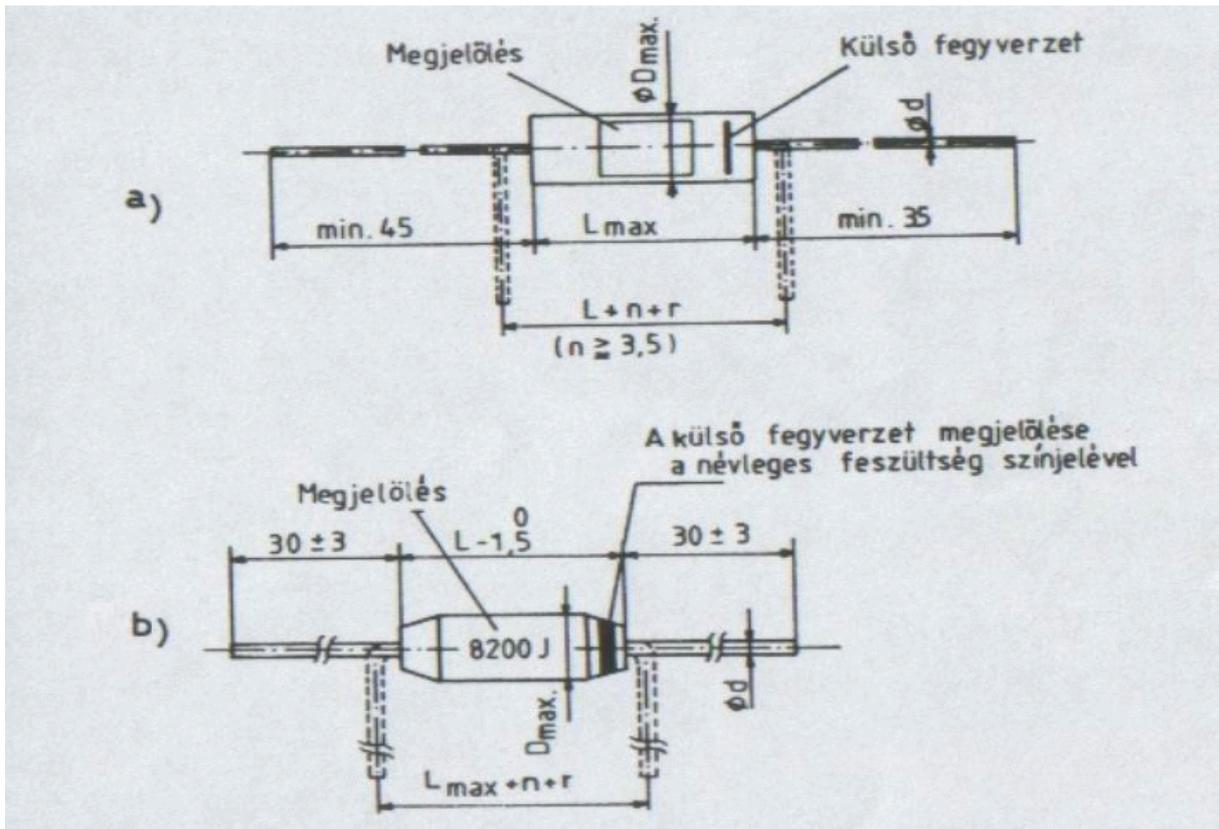
Csaknem minden kondenzátornál problémás a beszerelés. A kapacitást a tokra ható erő, nyomás befolyásolhatja (mivel a fegyverzetek közötti távolság változik, általában csökken). A dielektrikumok szerint a négy legnagyobb csoport: műanyag, papír, kerámia és elektrolit.

3.2.1 Műanyag dielektrikumú kondenzátorok

A műanyag kondenzátorok egyik megjelenési formája a hengeres alak, tengelyirányú kivezetésekkel. Ezeket az ellenálláshoz hasonlóan vízszintesen szerelik. A függőleges beültetésűeknél a kivezetéseket felhasítják és kb. 1 mm szélességűre lapítják, a másikat behajlítják.

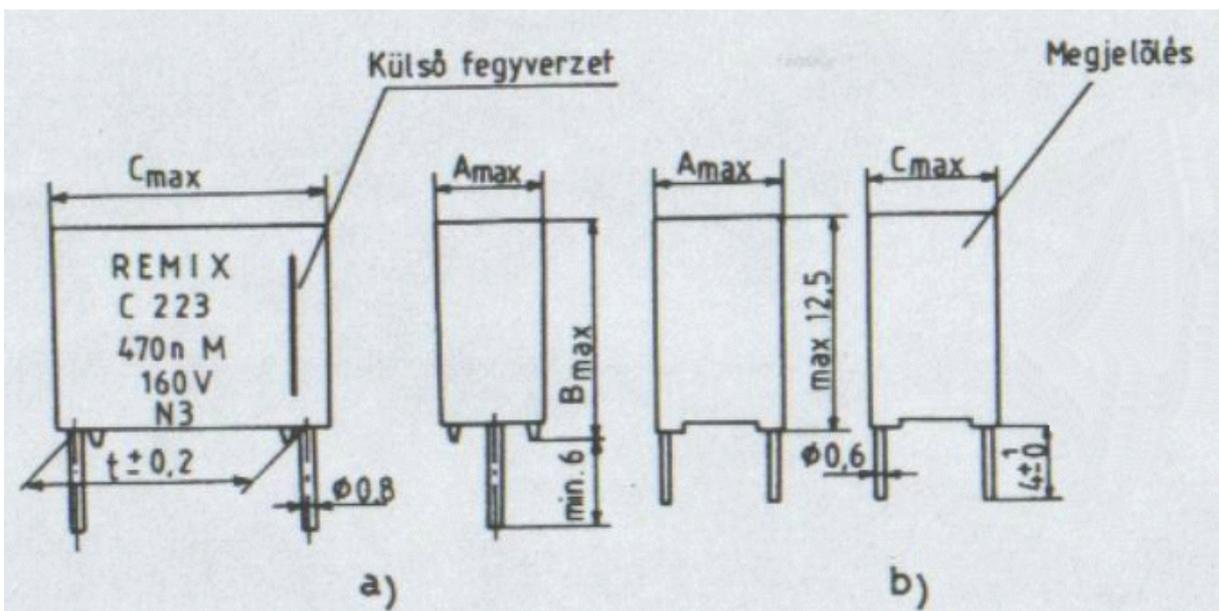


24. ábra. C2442 jelű polisztirol kondenzátor, álló szereléshez.



25. ábra. Hengeralakú műanyag dielektrikumú kondenzátorok: (a) C219 jelű fémzett poliészter, műgyanta kiöntéssel; (b) C2441 jelű polisztirol.

A másik kialakítási forma a szögletes, hasáb alakú. A kivezetések 4 vagy 6 mm hosszúak, egymástól való távolságuk is megszabott. A kivezetések merevek, nem hajlíthatók.



26. ábra. Hasábalakú kondenzátorok: (a) C223 fémzett poliészter, (b) C224 polisztirol.

Dielektrikum céljából használt anyagok: polisztirol (PS), polipropilén (PP), poliészter (PE, vagy a polietilén-tereftalát: PETP).

POLISZTIROL

Analóg számítógépekben és időzítő áramkörökben stabilitásuk miatt használják. Hőmérsékleti tényezőjük negatív, és a $-55...65^{\circ}\text{C}$ tartományban lineáris. A maximális megengedett hőmérséklet 85°C , ha a névleges feszültség 60%-át alkalmazzuk. Egy példa adatlap adatai:

Hőmérsékleti tényező	$-100 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Hosszú élettartamú stabilitás	0,1%/év
Veszteségi tényező	$10 \cdot 10^{-4}$
Szigetelési ellenállás	500 G Ω

Az ilyen típusok tűrései: $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 3\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ és $\pm 20\%$. Közepes hőmérsékleten, ha nagy stabilitásra van szükség, polisztirol kondenzátorokat használnak.

A polisztirol fóliaanyagának van a legkisebb dielektromos vesztesége és szigetelési ellenállása is a legnagyobb. Ezek az értékek állandóak $+60-70$ fokig. Kiváló időbeni stabilitással rendelkeznek, kicsi negatív lineáris hőfoktényezőjük van és igen szűk tűréshatárral állíthatók elő. Nagy méretűek és drágák.

POLIPROPILÉN

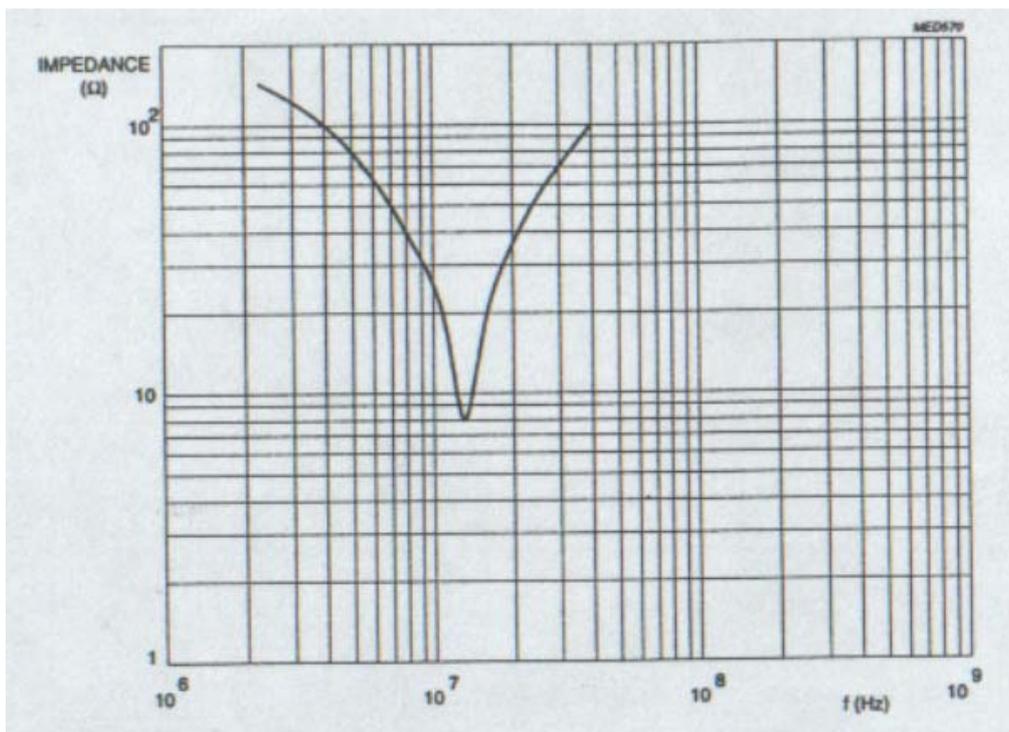
Áruk kisebb, jó elektromos tulajdonságokkal rendelkeznek és különösen impulzus üzemben jók. A PS-nél nagyobb hőmérsékleten is használhatók, még $+85$ fokon is. Egyedülálló tulajdonságuk az öngyógyulás: rövid idejű túlterhelés hatására bekövetkező átütés, rövidzár villamos energiáját a fegyverzet helyileg elpárologtatja, amivel a hibahelyet elszigeteli. Átütés után változatlan adatokkal tovább működik.

POLIÉSZTER

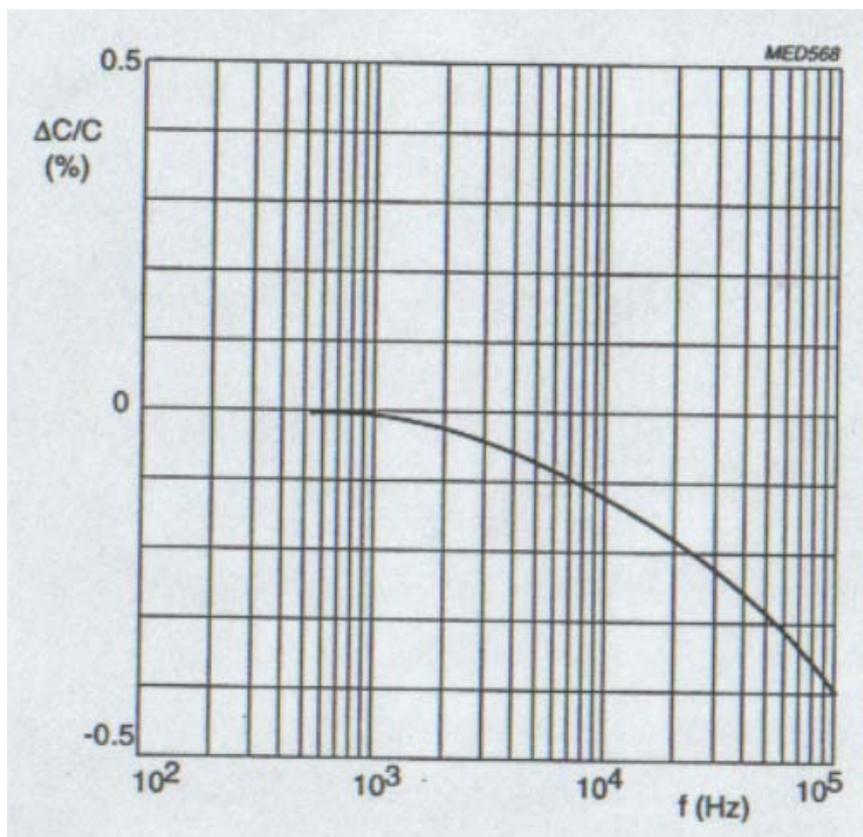
A legkisebb méretben ezek állíthatók elő, de elektromos paramétereik valamivel rosszabbak. Ezért sűrű szerelés esetén szűrési célokra vagy közepes frekvenciákon csatalókondenzátorként használhatók.

A legkisebbek a fémezett fóliával gyártottak, de elektromos paramétereik némileg rosszabbak (pl. a dielektromos veszteség). A táblázatokban M-betűvel jelölik az ilyen típusokat.

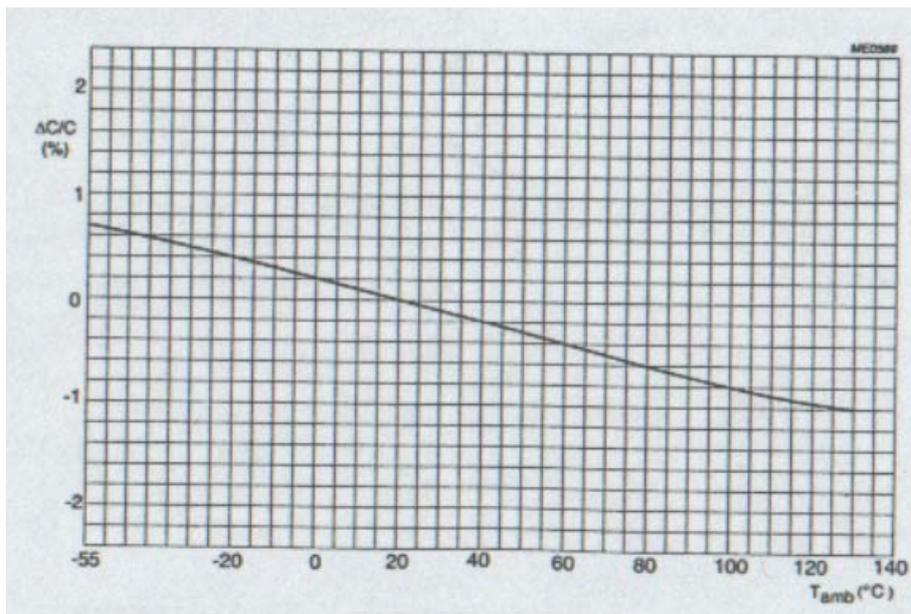
A fémezett polikarbonát szűkebb hőmérsékleti előírások mellett ugyanolyan célra használható, mint a polisztirol (RC időzítő, integrátor). Mindkét típus 125 fokig üzemképes feszültség csökkenés nélkül. Egy 600V -os kondenzátor nagyobb egy 200V -osnál, és drágább is. A fémezett polikarbonát eszközök hőmérsékleti tényezője abszolút értékben csaknem ugyanakkora, mint a polisztirolé. Mivel utóbbiaké pozitív, a PS-é negatív, e kettővel erősen stabil kondenzátort építhetünk. Poliészter és polikarbonát fajtát használunk általános célra, ahol alacsony DC szintek és kis AC feszültségek jelennek meg alacsony frekvencián.



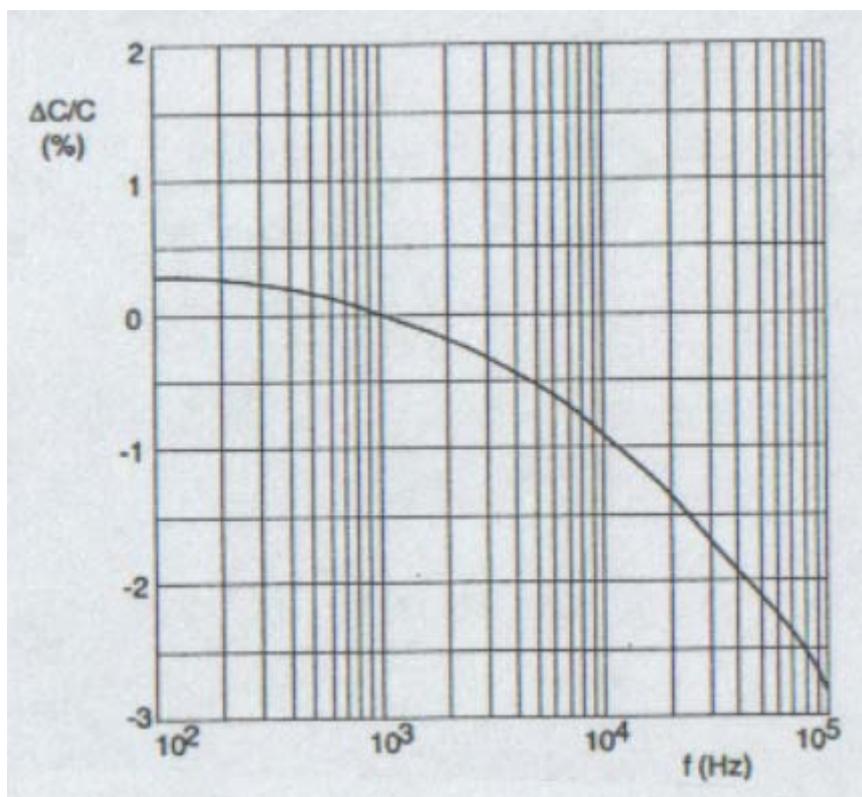
27. ábra. Impedancia a frekvencia függvényében (tipikus görbe) 0,047 μF polipropilén kondenzátor esetén (1 kHz).



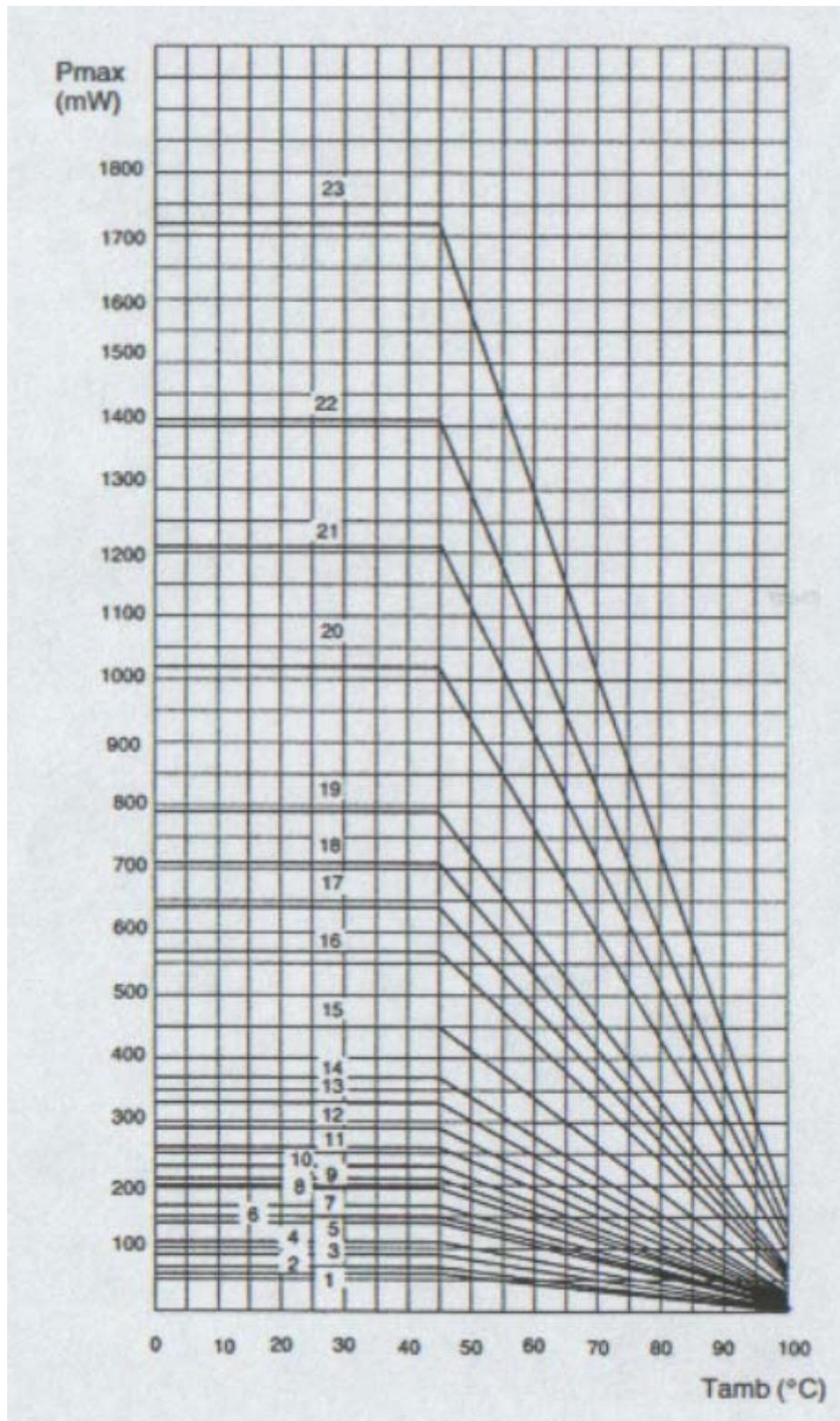
28. ábra. Relatív kapacitásváltozás a frekvencia függvényében polipropilén kondenzátor esetén (1 kHz).



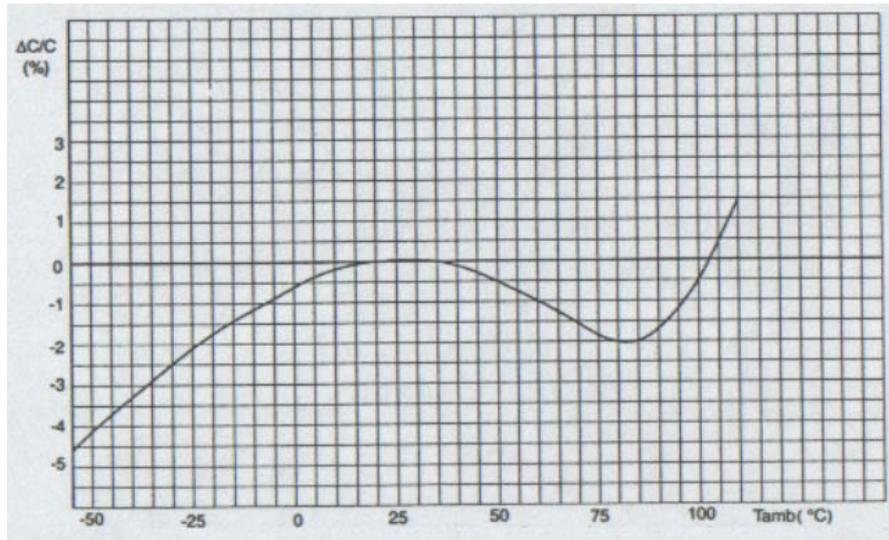
29. ábra. Relatív kapacitásváltozás a környezeti hőmérséklet függvényében (tipikus görbe) polipropilén kondenzátor esetén (1 kHz).



30. ábra. Relatív kapacitásváltozás a frekvencia függvényében fémezett poliészter kondenzátor esetén (1 kHz).

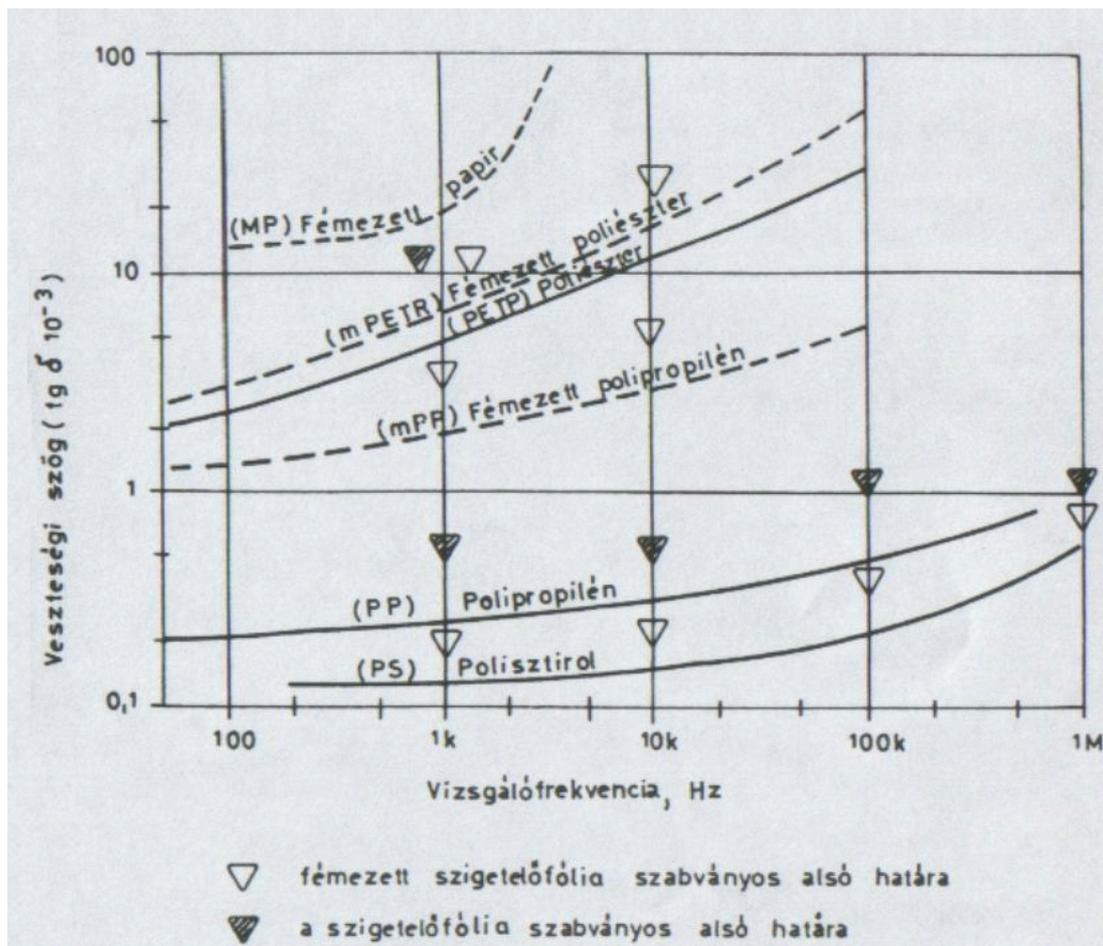


31. ábra. Maximális disszipáció a környezeti hőmérséklet függvényében (tipikus görbék, fémezett poliészter kondenzátor). Az ábrázolt görbék különböző geometriai méretekhez tartoznak, az egyes a legkisebb, a 23 a legnagyobb méretű.

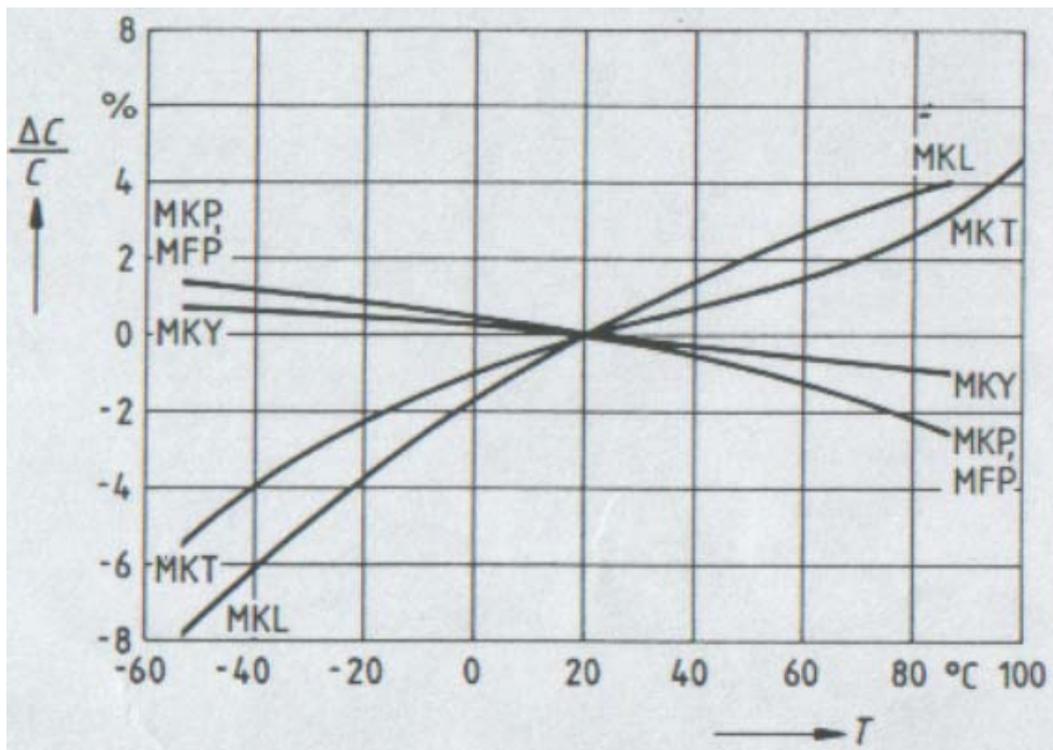


32. ábra. Relatív kapacitásváltozás a hőmérséklet függvényében (tipikus görbe) fémezett poliészter kondenzátor esetén (1 kHz).

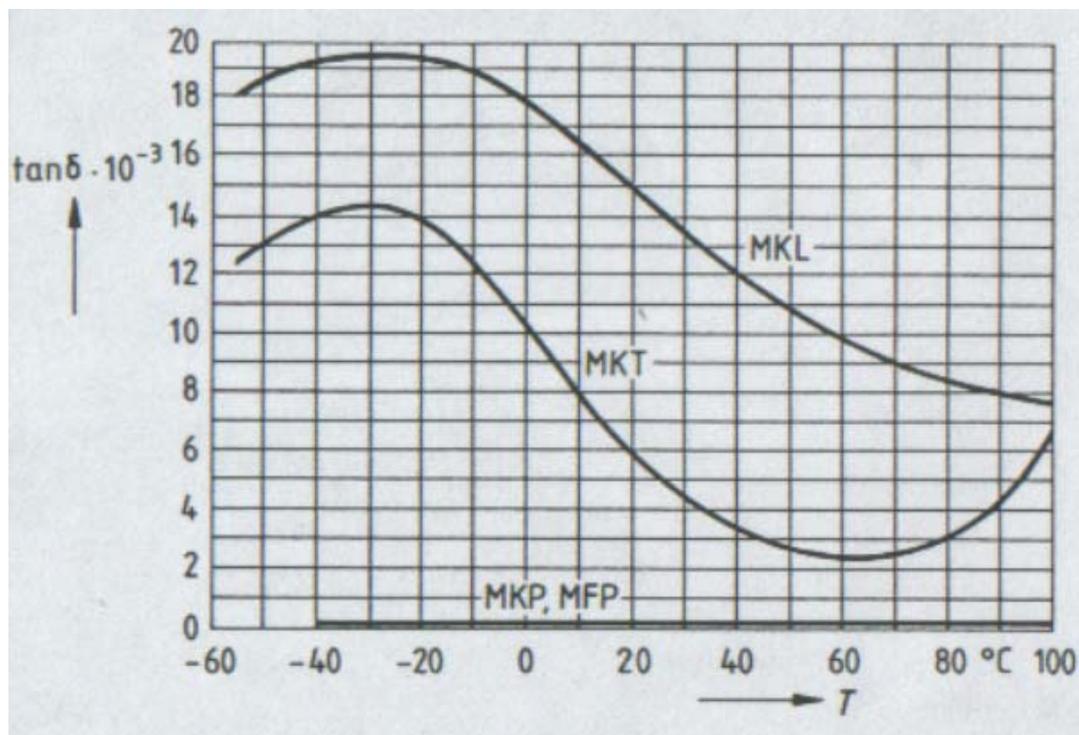
Általános esetben a különböző műanyagoknál tapasztalható veszteségi tényező ill. kapacitás változás a frekvencia és a környezeti hőmérséklet függvényében:



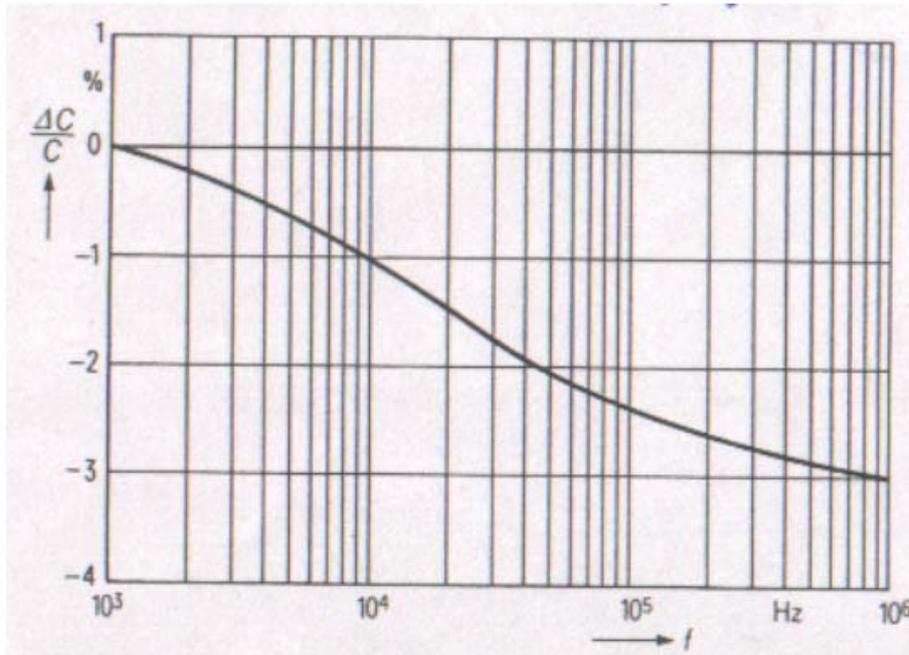
33. ábra. Különböző dielektrikumú anyagok veszteségi szöge a frekvencia függvényében. A PS a legjobb.



34. ábra. Relatív kapacitásváltozás $\Delta C/C$ a T hőmérséklet függvényében 1 kHz-re. MKT: polietilén-tereftalát (PETP), MKP és MFP és MKY: polipropilén (PP), MKL: cellulóz-acetát. A kapacitás a páratartalommal együtt is növekszik.



35. ábra. Veszteségi tényező $\tan \delta$ a T hőmérséklet függvényében 1 kHz-re. MKT: polietilén-tereftalát (PETP), MKP és MFP és MKY: polipropilén (PP), MKL: cellulóz-acetát.

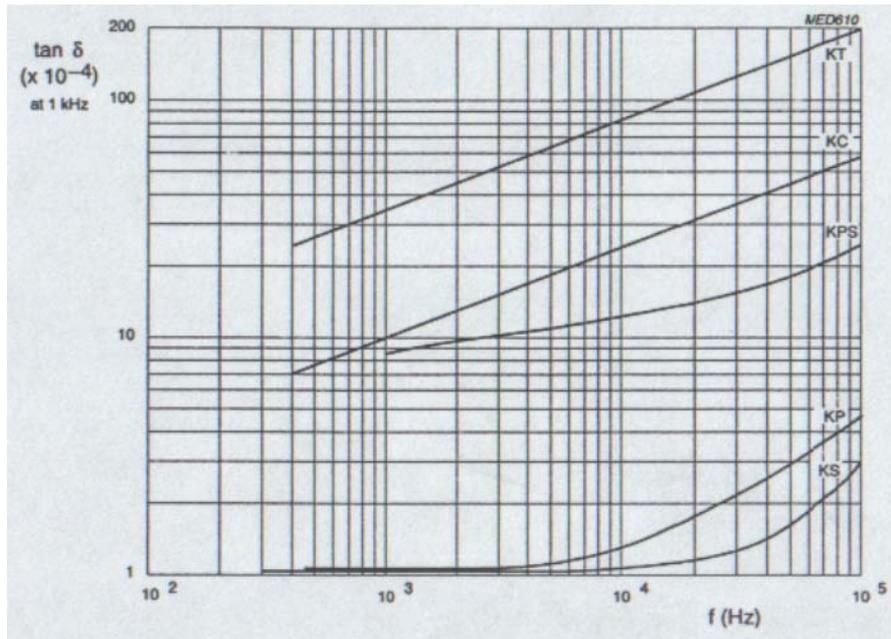


36. ábra. Relatív kapacitásváltozás $\Delta C/C$ az f frekvencia függvényében 20°C-ra. A kapacitás csökken a frekvencia növekedésével.

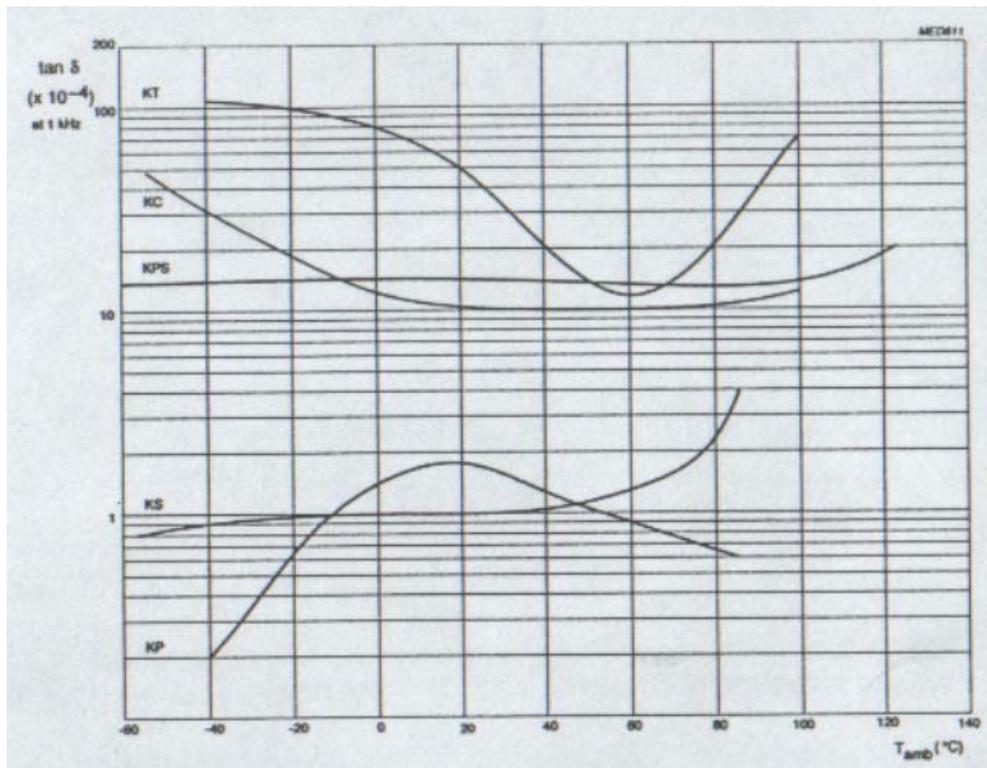
Általánosan elmondhatjuk a műanyag dielektrikumú kondenzátorokról, hogy szűk hőmérsékleti tartományban jó stabilitással bírnak: +5 és +65°C között a kapacitásváltozás $\pm 0,1\%$. A hőmérsékleti együttható általában nem változik lineárisan: 125°C-on a 25°C-hoz képest a változás kb. +1%, -55°C-on pedig -1%. A polisztirol, polikarbonát és műanyag fóliás eszközök szabványos értékrendben kaphatók kb. a 0,001 μF -5 μF tartományban. A polipropilén fólia adatai gyengébbek, de hőállósága tartósan jobb a PS-nél.

Katalógusadatok: katalógusjel, dielektrikum, kapacitás (min, max), névleges feszültség, alkatrész átmérője, hossza, kivezetései mérete és beültetési távolság.

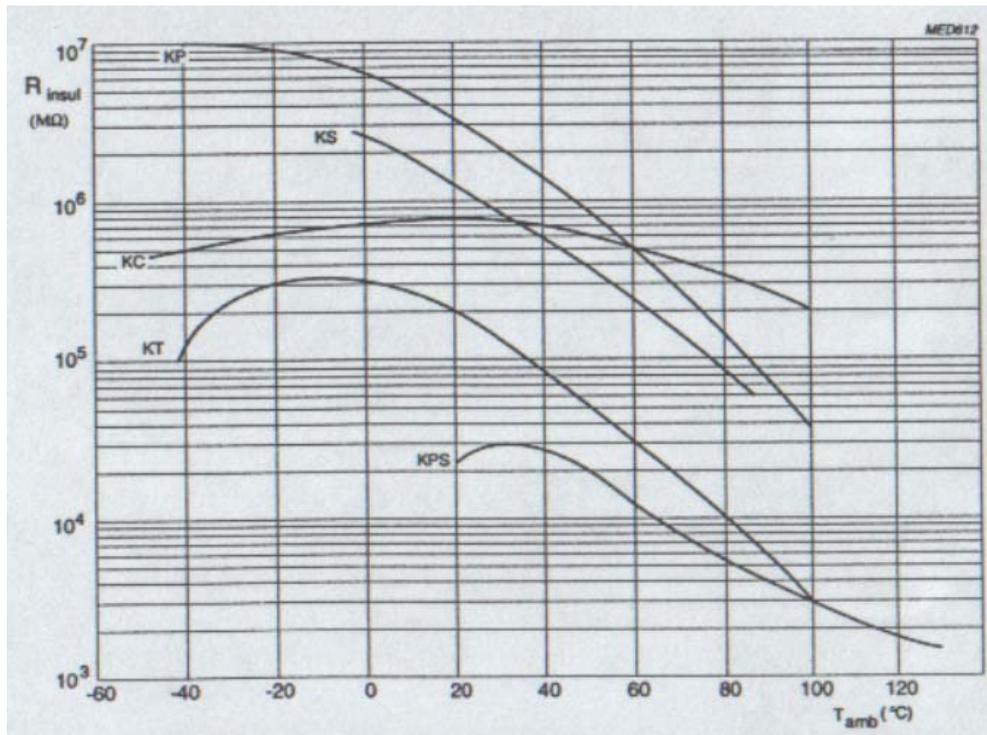
Az alábbi ábrák különböző karakterisztikákat mutatnak adott dielektrikumokra nézve. A görbék ún. tipikus görbék, azaz jellemzően hasonló lefutású az egyes eszközöknél.



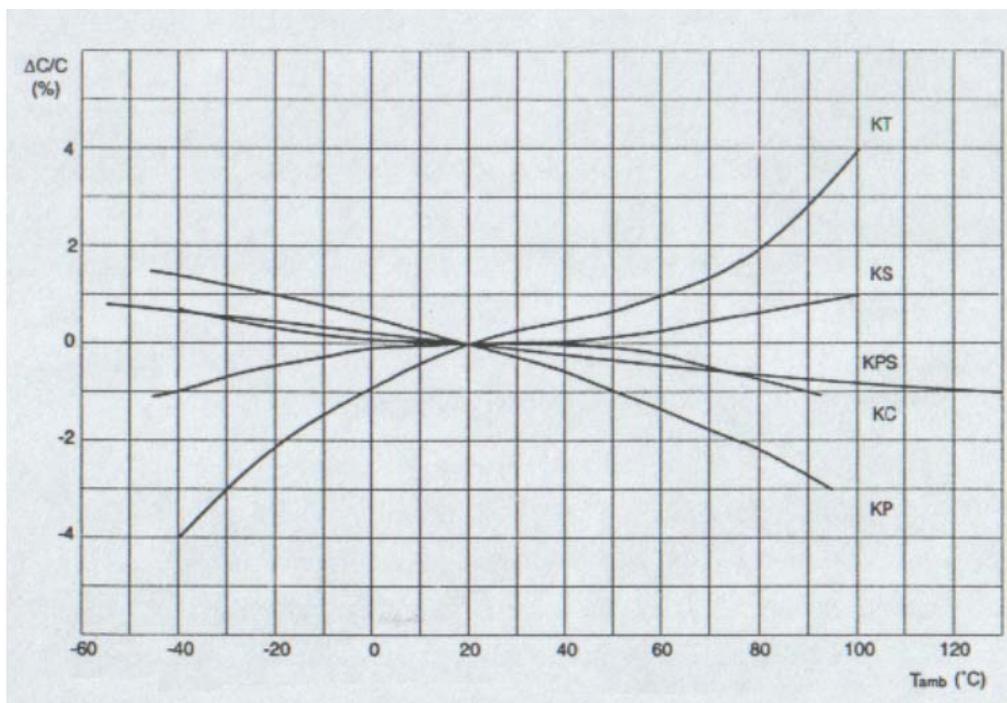
37. ábra. Disszipációs tényező a frekvencia függvényében (tipikus görbék). KT: polietilén-tereftalát, KC: polikarbonát, KPS: poliphenilene-szulfid, KP: polipropilén, KS: polisztirol.



38. ábra. Disszipációs tényező a környezeti hőmérséklet függvényében (tipikus görbék). KT: polietilén-tereftalát, KC: polikarbonát, KPS: poliphenilene-szulfid, KP: polipropilén, KS: polisztirol.



39. ábra. Szigetelési ellenállás a környezeti hőmérséklet függvényében (tipikus görbék). KT: polietilén-tereftalát, KC: polikarbonát, KPS: poliphenilene-szulfid, KP: polipropilén, KS: polisztirol.



40. ábra. Relatív kapacitásváltozás a környezeti hőmérséklet függvényében (tipikus görbék). KT: polietilén-tereftalát, KC: polikarbonát, KPS: poliphenilene-szulfid, KP: polipropilén, KS: polisztirol.

3.2.2 Papír dielektrikumú kondenzátorok

Papír dielektrikumú eszközök olcsón, könnyen beszerezhetők és az átlagos követelményekhez megfelelnek. Hátránya, hogy nedvességre érzékenyek és rossz a stabilitásuk. Pl. adott fémezett papír dielektrikumú kondenzátor adatlapja szerint $\pm 10\%$ a kapacitásváltozás, miközben a hőmérséklet -55°C -ról 125 fokra emelkedik. Egyéb adatok: veszteségi tényező 25°C -on kisebb, mint $200 \cdot 10^{-4}$, a szigetelési ellenállás 25°C -on és 200V DC esetén 1000 $\text{M}\Omega/\mu\text{F}$ nagyságrend. Előírás szerint a szigetelési ellenállás, amit DC esetben mutat, nem lehet nagyobb $3\text{G}\Omega$ -nál. Az ilyen típusok tűrései: $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ és $\pm 20\%$. Más típusok egy-két % pontossággal készülnek – drágábban.

Egy kondenzátor stabilitását *nem a tűrés határozza meg!* Ez azt jelenti, hogy az 1%-os eszközök nem stabilabbak a 20%-nál, ha egyébként minden tekintetben azonosak. Tűrésértéket állapítanak meg azért, hogy kondenzátoronként megszabják a névleges érték változását, amelyet adott peremfeltétele mellett mérnek meg (25 fokon, 1000 Hz-en).

Ne feledjük, hogy a váltóáramú és az egyenáramú névleges feszültség és tűrés nem egyezik meg (AC esetében akár 40-60% kisebb is lehet a DC-hez képest).

A papírral csak közepes elektromos tulajdonságokat érhetünk el és még a fémezett papírfóliával is csak nagyobb méretűek gyárthatók, korszerű NYÁK-okba nem építik be.

3.2.3 Kerámia dielektrikumú kondenzátorok

A kerámiakondenzátorok dielektrikumához fémoxidokat használnak fel. A legfontosabb a titán-dioxid (TiO_2). A relatív permittivitása (dielektromos állandója) közepes értékű $\epsilon_{\text{rel}} = 85$, ami erősen hőmérsékletfüggő. Ennek csökkentése céljából és hogy a permittivitás nőjön, más fémoxidot is kevernek hozzá. Cél a nagy permittivitás, hogy abból kis térfogat esetén is nagy kapacitású, olcsó kondenzátort lehessen építeni. Ehhez alkalmas a bárium-oxid keverése 1:1 arányban, ahol a permittivitás a tízezret is elérheti.

A keveréssel nem csak ez, hanem a hőmérsékletfüggés, frekvenciafüggés és a dielektromos veszteség is változtatható. Az anyagokat összetételük alapján két csoportba osztjuk:

„Egyes típusú” kerámiák, permittivitása $\epsilon_{\text{rel}} = 13 \dots 470$, $\text{tg } \delta = \max 10^{-3}$. A hőmérsékletfüggés alapján két csoportja van: a P jelűek kapacitásváltozása egyenesen arányos a hőmérséklettel, az N-jelűek fordítottan. Az NPO jelűek bizonyos tartományban érzéketlenek a hőmérséklet megváltozásra. Főleg nagyfrekvenciás áramkörökben használjuk. Hőkiegyenlítésre is alkalmasak.

„Kettes típusú” kerámiák, permittivitása $\epsilon_{\text{rel}} = 70 \dots 50000$, $\text{tg } \delta = \max 50 \cdot 10^{-4}$. Ezek a nagy permittivitású anyagok erősen hőmérsékletfüggők, minél nagyobb a permittivitás, annál jobban. A kapacitásváltozás ráadásul nem lineáris. Elsősorban szűrési, „hidegítési” célra valók, amennyiben a hőmérsékletváltozás nem haladja meg a 10-20 fokot.

Külön T3 csoportba sorolják azokat a bárium-titanát alapú, ún. záróréteges típusokat, melyeket különleges gyártástechnológiával állítanak elő, s melyek 50000-es nagyságú permittivitással bírnak.

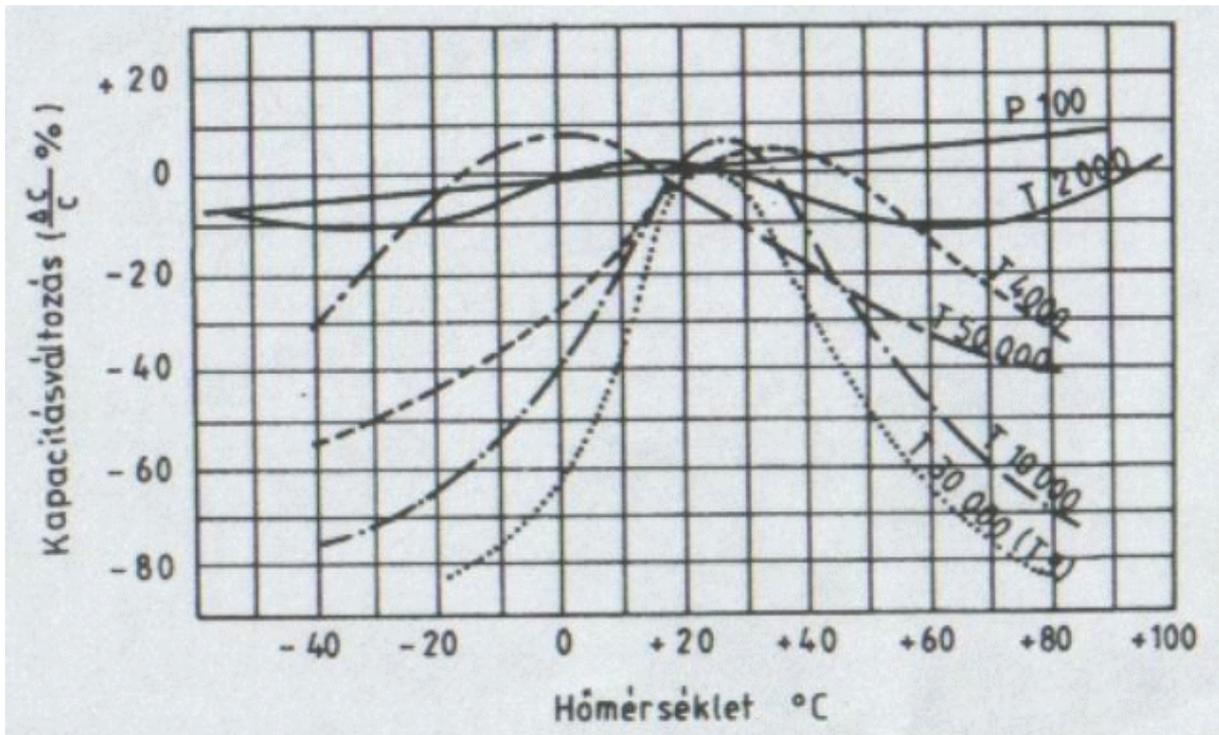
A védelem céljából bevonattal látják el ezek a típusokat. Ez lehet

- védőlakk, amely színes műgyanta alapú lakk (jele L).
- műgyanta bevonat, amely 100 fok felett keményedik és a felületen 1 mm vastag réteget képez, növelvén egyben a szilárdságot is. A rövid idejű forrasztást jól bírja (jele M).
- impregnált műgyanta bevonat, ami az M-jelű eszköz utólagos vákuumimpregnálásával készül. Ezek fokozott környezetállósággal bírnak (jele IM).

A kerámiakondenzátorok formája

- cső,
- tárca vagy
- vékony szögletes hasáb (fémmezett kerámia és a monolitkondenzátorok).

A cső alakúak kivezetései a kerámiacső szélein van szimmetrikusan vagy aszimmetrikusan, de adott beültetési távolságra. A nagyfeszültségű és impulzusüzemű fajták jele NC illetve I. Mivel a lakkréteg rálóg a lábakra, beforrasztásnál ügyelni kell, hogy ez lehetőleg ne sérüljön. A tárcsa alakúakat bármilyen kerámiából készíthetik. A kivezetések a tárcsa két oldalán vannak, NYÁK-ba illesztéshez a lábakat meghajlítják. A fólia- és monolitkondenzátorok kivezetései ugyancsak a két oldalon helyezkednek el. A bevonatuk fröccsöntéssel készül, lábaik adott beültetési távolságra vannak.



41. ábra. Különböző kerámiaanyagokkal készített kondenzátorok kapacitásváltozása a hőmérséklet függvényében.

3.2.4 Egyéb kondenzátorok

EZÜSTÖZÖTT CSILLÁM

Stabil, kis értékű típus. Tipikus értéktartománya 1pF-30nF közötti. Szabványos tűrés $\pm 1\%$. Jellegzetes hőmérsékleti együttható: $\pm 100 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, tehát lehet pozitív és negatív is. Hőmérséklet tartománya -55 és +150 fok között.

TANTÁL

Nagy előnyük, hogy térfogategységre nézve nagy a kapacitásérték. Kiválóan alkalmazhatók sőtölőnek szűrőkben. Szívesen alkalmazzák késleltetőkben, mert néhány száz mp is megvalósítható velük. Két komoly hátrányuk: a nagy szivárgási áram és a rossz stabilitás. Élettartamuk 5-10 év. Csak a névleges feszültség közelében megbízhatóak. A kapacitás jelentősen változhat a frekvencia vagy a DC polarizációs feszültség függvényében. A tantál kondenzátoroknak (ellentétben a többivel) nincs induktív reaktanciája (a helyettesítő kép egyre nagyobb frekvencián egyre induktívabb).

A szivárgási áram jelentékeny és a kondenzátor feszültségével, valamint a környezeti hőmérséklet emelkedésével tovább nő. A közelítő képlet alapján:

$$I_{\text{szivárgási}} = kCU. \quad (28)$$

ahol I a maximális szivárgási áram mikroamperben, C a kapacitás mikrofardban és U a feszültség voltban, k állandó értéke 25 fokon 0.02, 85 fokon 0.2, 125 fokon 0.25.

A tantál kondenzátorok kapacitásának hőmérsékleti együtthatója számottevő és típusonként erősen változó (40-75%).

A polarizált típusoknál nem kapcsolhatunk 0,5 V-nál nagyobb ellenirányú feszültséget. A nem polarizált típusok elektródái felcserélhetők. Értéktartományuk széles, 0.22-330 μF , tűrés $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ és $\pm 20\%$.

3.3 Az induktivitás

A fizikai kép szerint az induktivitáson átfolyó áram feszültséget indukál, ami a változás ellen irányul (csökkenti a változást). Az induktivitás ritkábban használatos elem, mert az esetek többségében ugyanaz a feladat kondenzátorokkal is megoldható, melyeket azonban könnyebb kisebb méretben gyártani. Az önindukció mechanikai megfelelője a tehetetlenség. Egyensúlyi helyzetben (elektronikában ez a DC-nek felel meg) nem létezik, változás szükséges hozzá (AC üzemmód). Minél nagyobb (gyorsabb) ez a változás, annál jelentősebb a hatás: minél nagyobb a frekvencia, annál inkább „induktívabb” egy tekercs. Ahogy már említettük, egyenáram esetén a tekercs rövidzárral helyettesítendő, mert nincs jelen változás és a derivált nulla. (A kondenzátor pont fordítva működik: egyenáram hatására szakadás, azaz végtelen nagy impedanciát mutat.) A veszteségek megjelenése is fordított: egyenáram esetén csak egy kicsiny valós huzalellenállás jelenik meg a tökéletes rövidzár helyett, ahogy a kondenzátor sem végtelen, hanem csak nagyon nagy ($G\Omega$ nagyságrendű).

Az induktivitás mértékegysége a Henry, $1 \text{ H} = 1 \text{ Vs/A}$. Jelentése: 1 V feszültség indukálódik, ha az áramváltozás mértéke 1 A/s. Ebből is látható, hogy nem az áram nagysága (A), hanem annak időbeli változása (A/s) okozza a hatást (a mechanikai analóg az elmozdulás (m) és a sebesség (m/s)). Ha tehát egy 1 H induktivitású elemen át áramot folytatunk, akkor annak kapcsain mindaddig nem jelenik meg feszültség, amíg az áram egyenáram – függetlenül annak abszolút nagyságától. Mihelyst azonban az áram értéke nőni kezd másodpercenként 1 Amperrel, 1 V feszültség fog a kapcsokon megjelenni. Kétszeres induktivitás vagy 2 A változás esetén pedig 2 V. Amikor a változás megszűnik (beáll egy újabb DC szint vagy az áramot kikapcsoljuk) az induktivitás feszültsége nem szűnik meg azonnal, hanem exponenciális lecsengés mellett mindaddig esik, amíg a tárolt energia el nem fogy.

Egyenes vezetőnek is van induktivitása, de fokozott hatást tekercseléssel érhetünk el. Ilyenkor a mágneses tárerősség arányos az indukcióval. A szomszédos menetek hatással vannak egymásra és a térre, szorosabb tekercselés nagyobb induktivitást hoz létre. A tekercs a kondenzátorhoz hasonlóan az energiát tárolja, és ha kikapcsoljuk róla a feszültséget, az áram nem szűnik meg azonnal, csak adott idő alatt: mindaddig folyik, amíg a tárolt energia el nem fogy. Az összefüggés:

$$n\Phi = LI \quad (29)$$

ahol n a menetszám, Φ a mágneses fluxus ($1 \text{ Wb} = 1 \text{ AH} = 1 \text{ Vs}$), L az induktivitás nagysága és I az átfolyó áram. A mágneses tér energiája, amit tárol:

$$W = \frac{1}{2} LI^2. \quad (30)$$

Ohmos veszteséggel mindig kell számolnunk, hiszen egy tekercsnek van kivezetése kettő, valamint a vezetőanyagának is ellenállása. E káros veszteség hő formájában távozik (DC). A felületi hatás és a szomszéd menetek áramának ún. közelhatása AC-esetben okoz veszteséget (az ellenállás nő). A helyettesítőkép itt is lehet párhuzamos de gyakrabban soros. A *jósági fok* (tényező):

$$Q = \text{induktív reaktancia/veszteségi ellenállás}, \quad (31)$$

melyet soros esetben $\omega L/R$, párhuzamos kép esetén $R/\omega L$ képlettel számítunk ki. A *veszteségi tényező* hasonlóan:

$$D = 1/Q = \operatorname{tg} \delta. \quad (32)$$

A *teljesítmény tényező* a tényleges és a látszólagos teljesítmény hányadosa:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1+Q^2}}. \quad (33)$$

Egy induktivitás esetén nem csak az ohmos ellenállások, hanem a szórt kapacitások is számottevőek lehetnek nagyfrekvencián.

A tekercs lehet légmagos (rádiófrekvenciás alkalmazások) vagy vasmagos (50 Hz környékén). Utóbbival a mágneses tulajdonságokat lehet felerősíteni és általában vörösréz huzalozás közé teszik.

A tekercselés alakja, fajtája lehet:

- egysoros: alacsony szórt kapacitás és menetek közötti feszültség jellemzi, kis L érték, magas frekvenciatartományú felhasználás, $\pm 2\%$ szórás.

- többsoros: nagyobb L, kisebb méret, nagyobb szórt kapacitás és feszültség jellemzi, a veszteségek nőnek. Könnyebben átüt.

- egyéb speciális tekercselések: kereszt, lejtős, lapos csiga, pókháló.

A legegyszerűbb egysoros tekercs úgy készül, hogy hengeres tartóanyagra vezetőhuzalt csévélnék szorosan egymás mellé. Egyszerűen előállítható és előnye, hogy a tekercs eleje és vége távol van egymástól, a szórt kapacitás alacsony. Nagyobb L érték előállítása nem lehetséges, mert akkor a méretek túl nagyok lennének, így rádiófrekvenciánál magasabb tartományban nem használjuk őket.

Nagyobb induktivitást kisebb mértékben kapunk, ha többsoros a tekercselés. Ilyenkor a mágneses tér sokkal koncentráltabb. Hibája, hogy két sor esetén a kivezetések közvetlenül egymáson fekszenek és így nagy lesz a szórt kapacitás és a menetek közötti feszültség. A veszteség megnövekszik, átütés léphet fel. A tekercselések közé szigetelőt lehet helyezni. Ezen a hibán segít a lejtős tekercselés, ahol az szintén koncentrált, tehát kevés menettel nagy L érhető el, de nem kerülnek egymás mellé távol lévő menetek. Az eredő szórt kapacitás csökken, de jobb lesz az egysorosnál.

A szórt kapacitás csökkentésének módja a kereszttekercselés. Ez egy keskeny, többrétegű tekercs, melynél a szigetelt vezetőket tekercselés közben a tekercs hosszában jobbra-balra mozgatják. Így egy szilárd, öntartó rácyszerű felépítés jön létre. A szórt kapacitás alacsony, mert egymás melletti vezeték között kicsi a feszültségkülönbség, és keresztvezéskor a nagy potenciálkülönbségű huzalok csak egyetlen pontban érintkeznek. A ma használatos tekercsek java így készül.

A tekercselés anyaga általában rézhuzal. Rádiókban selyemmel szigetelt vagy zománcozott vezetőket használnak. MHz-nél magasabb frekvenciákon, rövidhullámon a huzalanyag tömör, 0,6-1,5 mm vastag réz. Adókban, nagyobb teljesítményhez vörösréz cső is alkalmazható, melyben vizet keringetnek hűtés céljából. Magas frekvencián, ahol kis menetszámú tekercsek szükségesek, lehet szigetetlen huzalt is használni, de megfelelő térközt kell biztosítani, így a veszteség is lecsökken. Szokás a csupaszhuzal felületét ezüsttel bevonni, hogy a skinhatás miatt kiszorult áram lehetőleg a kis fajlagos ellenállású vezetőben folyjon. Ez egyúttal megvédi a huzal felületét a korróziótól, és ezáltal az ellenállás megnövekedéstől.

3.3.1 A mágneses anyagok

A huzal jellemzői megegyeznek a rézvezetők tulajdonságaival. Fontosabbak azonban a felhasznált mágneses anyagok jellemzői. A *vasmag* nagyobb L értéket tesz lehetővé, mert nagyobb lesz a csatolás a menetek között. A vas mágneses vezetőképessége nagy, de a veszteségeket megnöveli. A vasmag puhamágnesből és kerámiaoxidból áll, ellenállása körülbelül a $10^{-7} \dots 10^{-6} \Omega\text{m}$ nagyságrend, ellentétben a tiszta vassal, ahol ez $1-10 \Omega\text{m}$ körüli. Nagyobb frekvencián, a MHz tartományban MnZn-t ill. a 100 MHz felett NiZn-t használnak. Az anyagok leírása katalógusadat. Legfontosabb karakterisztika a H-B diagram, egyszerűen szólva a *hiszterézis* görbe. H a *mágneses térerősség* A/m-ben, a B a *mágneses indukció* Teslában (Vs/m^2) adható meg:

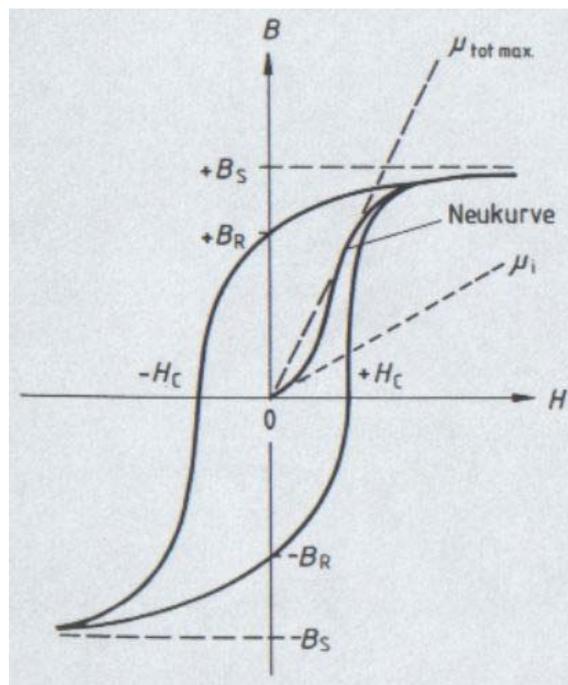
$$B = \mu_0 \mu_{rel} H \quad (34)$$

ahol μ a permeabilitás, $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$. A koercitív térerősség és a remanens indukció a görbéről leolvasható. Használjuk még az ún. hatásos permeabilitást, ami:

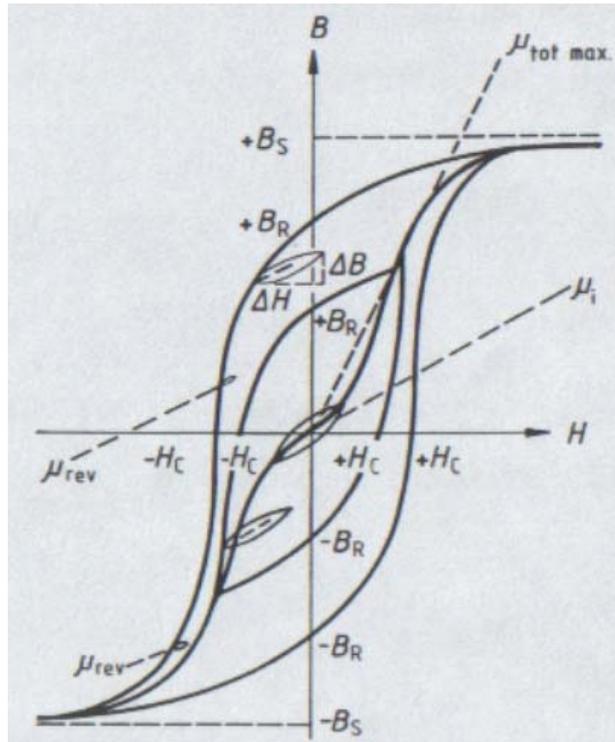
$$\mu_{hat} = \frac{L_m}{L_0} \quad (35)$$

ahol L_m az induktivitás maggal, L_0 pedig mag nélkül. Az induktivitás kiszámítható az N menetszám, az A vezetőfelület és l tekercshosszból:

$$L = \mu_{rel} \mu_0 N^2 \frac{A}{l}. \quad (36)$$



42. ábra. Sematikus mágnesezési görbe. H_c a koercitív térerősség, B_R a remanens indukció.



43. ábra. Mágnesezési görbék különböző kivezérések esetén.

A magvesztésre jellemző a már ismert *veszteségi tényező* (soros) és a *relatív veszteségi tényező*:

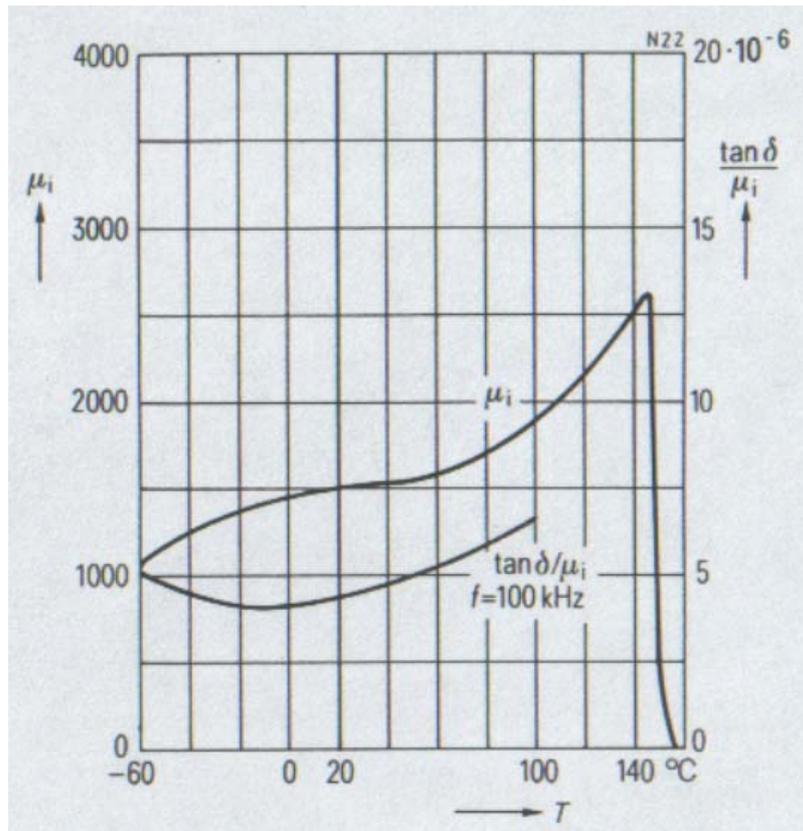
$$\tan \delta = \frac{R}{\omega L} \quad (37)$$

$$\tan \delta_{rel} = \frac{\tan \delta}{\mu} \quad (38)$$

A *hiszterézis veszteség*:

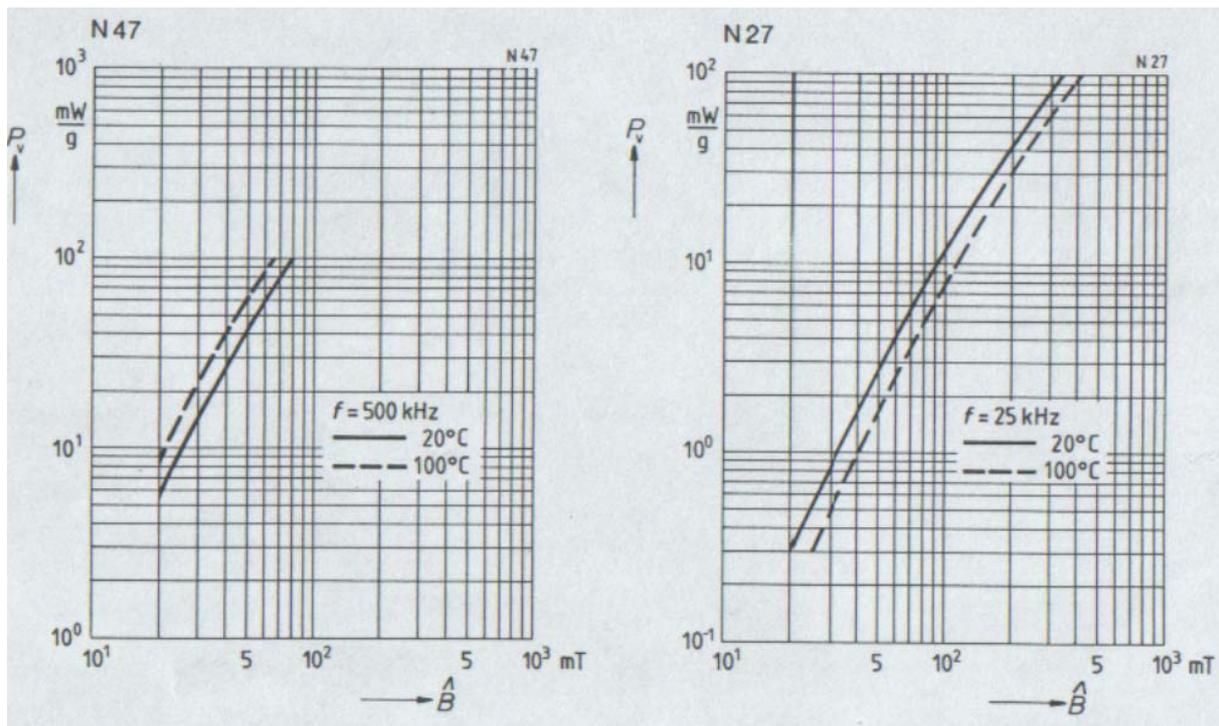
$$\tan \delta_h = \frac{\Delta R_h}{\omega L} \quad (39)$$

ahol R_h a *hiszterézis veszteségi ellenállás*, mely megmutatja a veszteség növekedését növekvő kivezérés mellett.

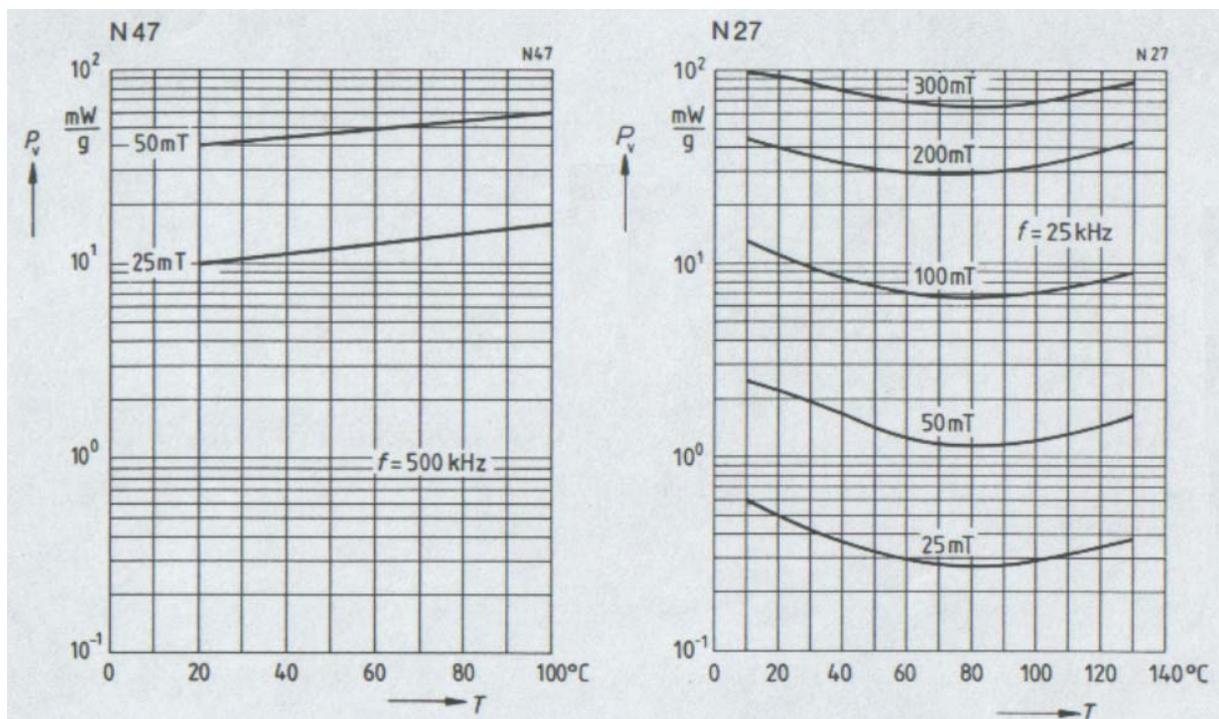


44. ábra. A permeabilitás (μ) és relatív veszteségi tényező $(\tan \delta)/\mu$ hőmérsékletfüggése R10-es jelű vasmagra nézve.

A transzformátorok méretezéshez különösen fontos az induktivitás és a mágneses anyagok kiválasztása. Pl. ha nagy permeabilitású nikkelötvözet magot használunk, kisebb transzformátor is elegendő. A légrés is újabb változó, de pusztán a vas megválasztása sem határozza meg egyértelműen a típusnagyságot, mert L értéke a menetszámtól is függ. A méret és a menetszám egymás rovására kompenzálható. A permeabilitás függ a mágneses térerősségtől, így a B-H karakterisztika ismerete a méretezésnél fontos. Ezek ellenkező értelemben hatnak az induktivitásra: növekvő indukció esetén az induktivitás is nő, DC előmágnesezés hatására azonban csökken. Az induktivitás értékek ingadozásának csökkentésére szolgál a légrés.



45. ábra. Relatív teljesítmény veszteség a változó mágneses térerősség függvényében két frekvencián (500 Hz, 25 kHz) R16-es jelű vasmagra nézve.



46. ábra. Relatív teljesítmény veszteség a változó hőmérséklet függvényében két frekvencián (500 Hz, 25 kHz) R16-es jelű vasmagra nézve.

3.3.2 A tekercsek fajtái

A tekercseket jelfogóként, fojtótekercsként és leggyakrabban transzformátorokban használjuk. A legfontosabb jellemzői az induktivitás mellett a jósági tényező, a DC huzal ellenállás, a működés közben átfolyó egyenáram és a mag típusa. Rádiófrekvenciás szűréshez kis induktivitású (0,15 μ H-2 mH) és kis méretű tekercsre van szükség.

A *toroid* tekercsek nagy Q-val rendelkeznek széles frekvenciatartományban, a külső mágneses tér alig zavarja őket. Pontosságuk $\pm 1\%$ és nagy hőmérsékletingadozás esetén is stabilak (-55...+85°C). Értékük 1 mH-től pár H-ig terjed.

Adott tekercs induktivitása függ a rajta átfolyó egyenáramtól is. A *rezonancia fojtótekercs* olyan elem, mely változó L értéket mutat a DC áram függvényében. Például értéke 25 H-ről 5 H-re változik, ha az áram értéke 20 mA-ról 200 mA-re nő. Minden más esetben ez a DC-áram függő tulajdonság rossz. Az adatlapon megadják azt a maximális egyenáramot, ahol az induktivitás megváltozása 5% belüli. Az egyenáram fontos paraméter, pl. két 2 H tekercs közül amelyik DC ellenállása 160 Ω és a maximális DC terhelése 55 mA, kb. 12 dkg tömegű. A másik, melynek ugyanekkora induktivitás mellett 47 Ω a DC ellenállása, de a terhelhetősége 300mA, a tömege másfél kg! A mag súlya és térfogata közvetlen kapcsolatban áll a DC árammal.

A *jelfogók* szinte ideális kapcsolóként működnek: zárasi impedancia kisebb, mint 0,1 Ω ; a nyitási nagyobb, mint 1 M Ω . A sokféle közül a szabványos névleges feszültségűek a 26,5V-ak, de létezik 1-100 V is. Egy 26,5 V névleges feszültségű jelfogó már 13 V-ra meghúz, működésbe lép, amint a tekercsre 13 V jut. Ugyanakkor már 2,3 V-nál elenged, ha a tekercs feszültsége ez alá az érték alá csökken (ezek erősen hőmérsékletfüggő értékek). A DC huzallellenállás 20 Ω – 10 k Ω közé esik, L értéke 1-2 H.

A *transzformátorok* a legfontosabb tekercsfajták. Használhatóságukat olyan tényezők befolyásolják, mint a méret, súly és a szórt mágneses tér. Az alapvető felhasználási terület a teljesítményátvitel és átalakítás, állandó értékű feszültség- vagy áramerősítés és erősítőfokozatok közötti váltóáramú csatolás, impedanciaillesztés. A beszerezhető eszközök közel állnak az ideálishoz. Feltételezzük, hogy a gerjesztőárama elhanyagolható, a kimeneti teljesítmény egyenlő a bemenetivel (100% hatásfok) és a belső impedancia zérus. Rendszerint a következő paraméterek adottak: menetszámáttétel, teljesítményszint, névleges primer és szekunder feszültség és impedancia, a megengedett primer egyenáram, frekvencia átvitel és DC huzallellenállások. Ezek közül az alkalmazáshoz fontosakat kell figyelembe vennünk. Ha több szekundertekercs is van, mindegyikre megadják a menetszámáttételt. Például egy 1:2 menetszámáttételű transzformátor a primerre adott 1 V-ot 2 V-ra transzformálja a két vége között, de középen megcsapoljuk akkor a végpont és a középpont között 1 V lép fel. Így azonos amplitúdójú és ellenfázisú (180 fok) jeleket könnyen előállíthatunk. A névleges feszültség és a súly között közvetlen a kapcsolat: amikor a teljesítményt előírjuk, a súlyát is megadjuk. Sokszor elégséges az átvitel meghatározásához a DC huzallellenállásokkal számolni. Például egy 1:2 áttételű eszköz, ahol a primer DC ellenállása 10 Ω , a szekunder pedig 20 Ω , a négyzetes transzformáció miatt a szekunderen 40 Ω jelenik meg. Így a helyettesítőkép egy feszültséggenerátor (a primer feszültség kétszerese) és egy 60 Ω ellenállás. Az impedanciaáttétel az optimális illesztést adja meg. Egy transzformátortekercs szórt induktivitása a tekercs azon részének az önindukciója, amelyet a másik tekercs erővonalai nem járnak át. A *k* csatolási tényező adja meg a primer erővonalak azon részét, amely a szekundertekercset is átjárja (és viszont).

Tekercseket összetett hálózatokban, pl. *rezgőkörökben* is használunk. Egy ideális, veszteségmentes rezgőkör rezonanciafrekvenciája a jól ismert:

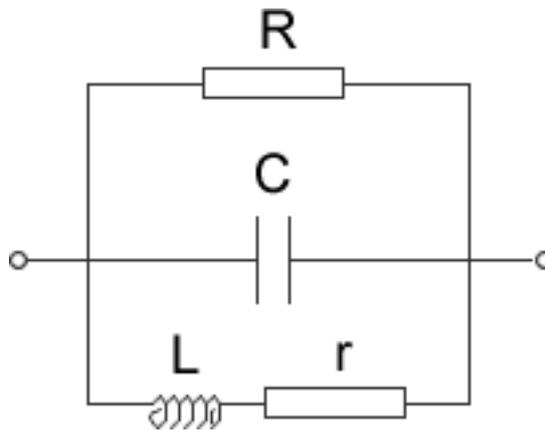
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (40)$$

Veszteséges esetben

$$\omega_v = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}. \quad (41)$$

A veszteségi tényező:

$$D = r \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{Q}. \quad (42)$$



47. ábra. Veszteséges RLC rezgőkör.

Egy egyszerű RC-körben értelmezett $T = RC$ *időállandó* megmondja, hogy mennyi idő alatt csökken e -ad részére az eltérés az állandósult állapothoz képest ($5T$ elteltével az eltérés kisebb, mint 1%).

3.3.3 Követelmények

Igen fontos követelmény a tekercsekkel szemben, hogy induktivitásuk értéke lehetőleg állandó, stabil legyen. Sem saját melegezése, sem pedig a környezet melegezése ne okozzon változást, ugyancsak ne kövesse induktivitásváltozás a mechanikai igénybevételt, például a rázást sem. Ez utóbbi a tekercstest megfelelő megválasztásával lehetséges.

A másik fontos követelmény a tekercstartókkal szemben, hogy jelenlétük, anyaguk ne okozzon veszteséget, mert ez rontja a jóságot. A legalkalmasabbak a keramikus és üveg tartók. Kicsi a veszteségük, hőkiterjedési együttható alacsony, de drágák. Mivel lényeges, hogy a tekercsek a testen ne mozduljanak el, szokásos a testet csigavonalban bevágni és abba tekercselni bele a vezetőt. A hőfoktényező ilyen eszközöknél kb. 10^{-6} nagyságrendű.

A leggyakrabban használt műanyag testek nem ilyen jók. Hőfoktényezőjük tízszer nagyobb, viszont olcsóbbak. Nagy hőmérsékleten meglágyulhatnak. A bakelit viszonylag szilárd de vesztesége nagy. A hőkiterjedése közel azonos a rézzel.

Az elmozdulás ellen *impregnáló* anyagokat használnak rögzítéshez. Ilyen tekintetben még jobbak a kerámiatestre rácsapatott, ráégetett szalagszerű vörösréz menetek. Ezek elválaszthatatlanul rögzítettek a testhez.

A nem homogén testek hőkiterjedése nem egyenletes, nedvességre érzékenyek és nem elég szilárdak (pabit, pertinax, fenolfiber anyagok). Az ilyen eszközöket muszáj impregnálni, aminek két célja van: a tekercstől és a testtől távol tartani a nedvességet és megnövelni a mechanikai szilárdságot. A felhasznált anyagok és eljárás hasonló a kondenzátorok esetéhez. Fontos, hogy ezen anyagok olvadáspontja alacsonyabb legyen, mint az a hőfok, ahol a szigetelő tartó és a huzalok szigetelője megsérülhet. Legyen viszont magasabb annál, mint a készülékben előforduló legnagyobb hőmérséklet. Dielektromos tényezője és veszteségi tényezője alacsony legyen, és kémiaileg sem a teste sem a huzalt nem támadhatják meg. Az impregnálást 100 fokon történő szárítás előzi meg, majd az impregnáló anyagba mártják a testet és hagyják kihűlni. Lakkokat, gyantákat használnak illetve bizonyos műanyagokat (oldott polisztirol). A szabadban dolgozó berendezésekhez különleges impregnálás kell (ahol a nedvességtartalom és/vagy a hőmérséklet magas). A nagy hőmérséklet ingadozás ellen is különleges anyag kell.

A légmagos tekercsek veszteségi ellenállása több részből tevődik össze. Leglényegesebb a felhasznált huzal AC ellenállása, mely a DC ellenállás, a skinhatás és a közelhatás értékéből adódik össze. Hozzájárul még a huzal szigetelőjének és a tartótest veszteségének ellenállásrésze. Az optimális jósági tényezőre való méretezéshez egyszerűsített képletek állnak rendelkezésre. Egyrétegű hengeres tekercselésnél ez akkor van, amikor a tekercsátmérő-tekercselési hosszúság aránya közelítőleg 2,5 értékű. Többrétegű kereszttekercselésnél akkor a legjobb, ha a tekercs közepes átmérője körülbelül háromszorosa a tekercs magasságának (ami épp a tekercs hossza). A legnagyobb veszteséget a skinhatás és a közelhatás okozza.

4. Elektronfizika

4.1. Klasszikus fizikai kép

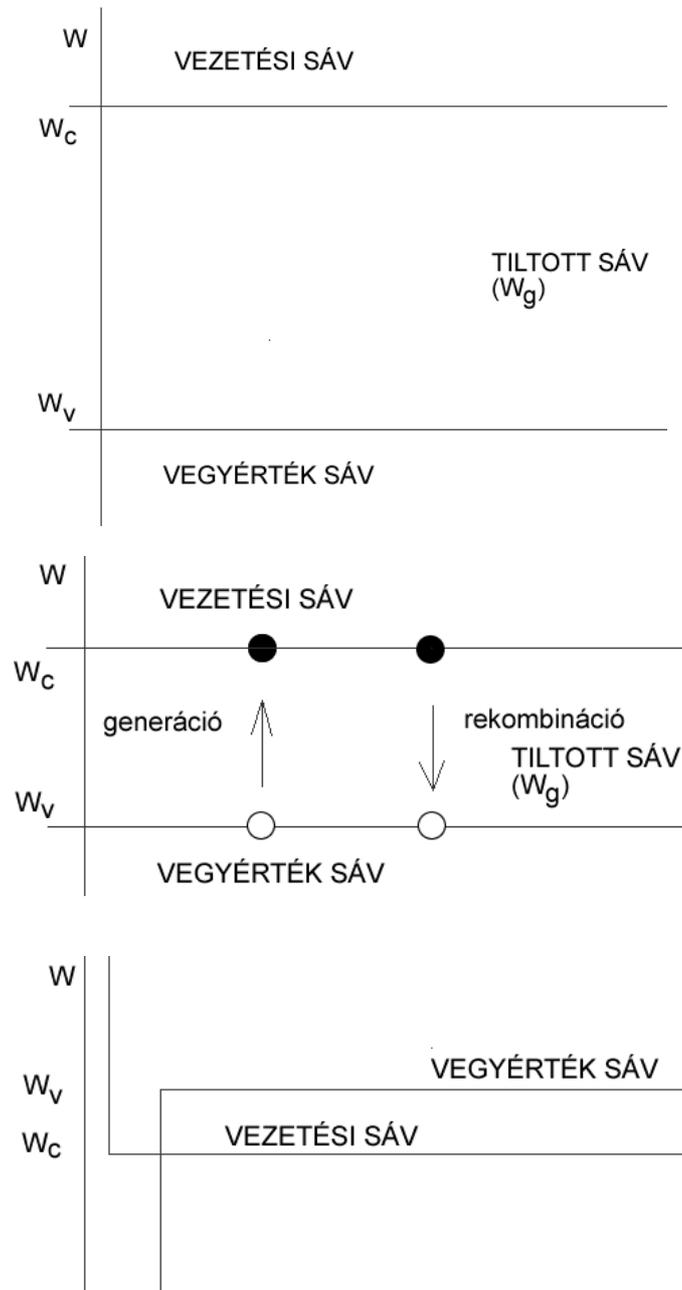
A Bohr-modell szerint az atommag potenciálterében lévő elektronok csak bizonyos energiaszinteket foglalhatnak el. Ezek az energiaszintek kvantáltak, csak bizonyos alap energiamennyiség egészszámú többszöröse lehetnek. Alacsony hőmérsékleten az elektronok a megengedett energiaszintek közül a legalacsonyabbakat töltik be. A 0 K-tól eltérő magasabb hőmérsékleten az elektronok a termikus energia hatására gerjesztődnek. A Pauli-féle kizárási elv azt is megmondja, hogy maximum két ellenkező spinű elektron lehet egy energiaszinten és az elektronok az energiaszinteket alulról töltik be.

Az atomok szabályos térközönkénti elrendeződését kristály(rács)nak nevezzük. Több atom esetén a potenciáltér változik és a megengedett szintek értéke (az energia vonalak) sávokká szélesednek. A sávok annyi szintre válnak szét, ahány atomból a kristály áll. Ezeket a megengedett sávokat a tiltott (energia) sáv választja el egymástól. Ez a sávszerkezet meghatározó az adott anyag elektromos tulajdonságainak szempontjából. Az elektromos viselkedésnél azok a sávok lényegesek, amelyekben betöltött és betöltetlen helyek is vannak. *Vezetési sáv*nak nevezzük azt a legnagyobb energiájú sávot, amelyben még vannak elektronok. A *vegyérték sáv* a vezetési sáv alatti megengedett energiasáv. Ez csaknem teljesen betöltött, néhány lyuktól eltekintve. A vezetés szempontjából e két sáv és a köztük húzódó tiltott sáv (szélessége) a meghatározó. A sávok tényleges teljes szélessége a vezetés szempontjából nem lényeges, csak azok 0,1 – 0,2 eV tartománya a szélein ($1 \text{ eV} = 0,16 \cdot 10^{-18} \text{ J}$). *Töltéshordozó* lehet negatív és pozitív töltésű is. A valóságban ezek olyan helyhez nem kötött elektronok, melyek képesek elmozdulni és ezáltal az áramot vezetni. Azt az esetet, amikor az elektronok néhány lyukat kihasználva áramolnak, tekinthetjük úgy is, mintha pozitív töltésű részecskék áramolnának. A mozgásképes elektronok a vezetési sávban vannak, a lyukak a vegyérték sávban. A teljesen betöltött sávok nem vezetnek.

A fémek vezetők. Atomjaik ionizáltak és elektronfelhő veszi őket körül. A kötés gyenge, így könnyen alakíthatók. A vegyérték és a vezetési sáv átlapolódik (nincs tiltott sáv).

A szigetelőknél a vegyértéksáv teljesen be van töltve, a vezetési teljesen üres és a tiltott sáv is nagyobb, mint 5 eV. Ez nagyobb, mint a szokásos termikus energiák, így vezetés nem jön létre. A félvezetőkben a sávszerkezet a szigetelőkhöz hasonló, de a tiltott sáv mérete kisebb (Si esetén 1,12 eV; Ge esetén 0,7 eV, GaAs 1,44 eV). A termikus energia hatására néhány elektron gerjesztett állapotba kerül és felugrik a vezetési sávba. Egy szokásosan alkalmazott ökölszabály, hogy a tiltott sáv mérete (energiában értve), amennyiben 2 eV-nál kisebb, akkor az eszköz félvezető, felette szigetelő, de ez az „átmenet” folytonos, nem ennyire meghatározott.

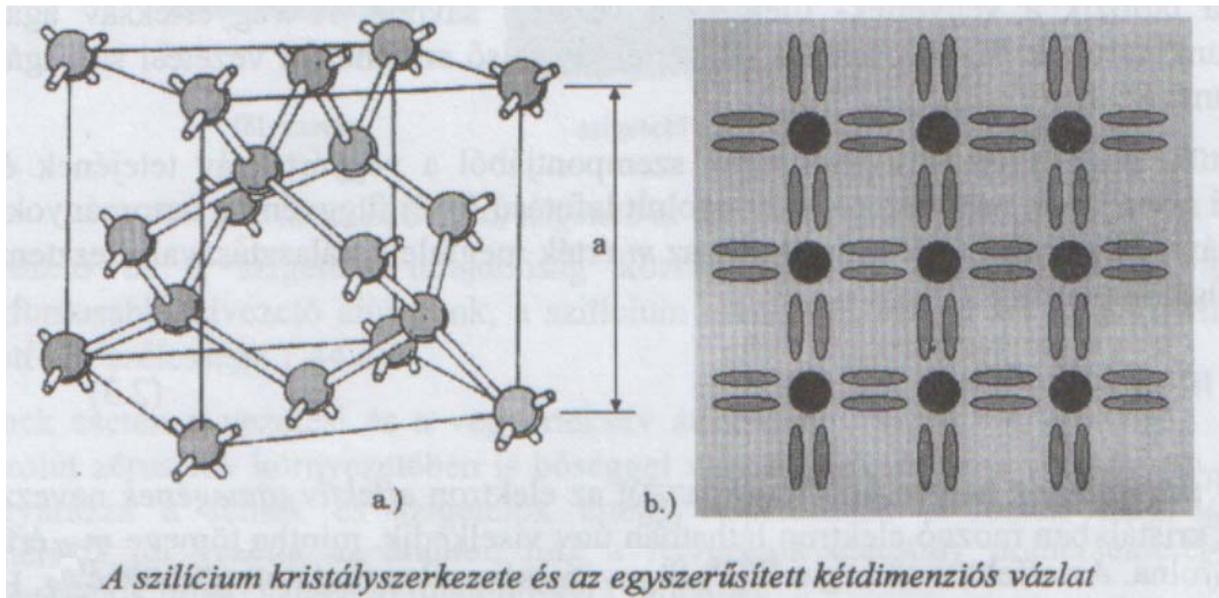
A termikus átlagenergia csak a hőmérséklet függvénye és Boltzmann-eloszlású (nem egyenletes). Szabadságfokoként $kT/2$ értékű, ahol k a Boltzmann állandó: $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws/K}$.



1. ábra. Szigetelő, félvezető és vezető sávszerkezeti ábrája. A szigetelők esetén a W_g tiltott sáv mérete (band gap) túl nagy a termikus generációhoz. A vezetők esetén a két sáv átlapolódik, nincs tiltott sáv 0 Kelvinen sem. W_c jelöli a vezetési (conduction band) és W_v a vegyérték sáv (valence band) energiaszintjének a szélét.

4.1.1. Félvezetők

A gyémánt rács-struktúrában kristályosodik: minden atom 4 kovalens kötéssel kapcsolódik szomszédjához. *Intrinsic* (adalekölés mentes, tiszta, szerkezeti) félvezetők esetén, minden atom legkülső elektronhéján a szomszédokkal közös 2-2 elektron kapcsolódik.



2.. ábra. A szilícium rácsszerkezete.

Termikus gerjesztéskor (nem nulla Kelvin) a termikus energia kiszakít elektronokat a rácsból és az elektron szabad mozgásra képes vezetővé válik. Helyén a vegyérték sávban egy megüresedett hely, lyuk keletkezik. Az ilyen elektron-lyuk párok létrehozását generációnak nevezzük. A folyamat megfordítása a rekombináció. A rekombináció során is teljesül az energia- és impulzuszemmaradás törvénye, és a folyamat félvezetőtől függően direkt fénykibocsátással is járhat (Si esetén). Az ilyen félvezető sáv szerkezete *indirekt*, ellentétben a *direkt* sáv szerkezettel, ahol látható fénykibocsátás nincs (GaAs-ben infravörös a foton). Az elektronra ható F erő és p kristálybeli impulzusa között az összefüggés:

$$F = \frac{dp}{dt} \quad (1)$$

az energia pedig:

$$W = \frac{p^2}{2m}. \quad (2)$$

Az elektron koncentráció: n_i [$1/\text{cm}^3$], Si esetén kb. $\sim 10^{10}$.

A lyuk koncentráció: p_i [$1/\text{cm}^3$], ahol i az intrinsic jelzése és

$$n_i = p_i. \quad (3)$$

Az elektronkoncentrációt ebben az esetben a hőmérséklet határozza meg (négyzetesen):

$$n_i^2 = f(T). \quad (4)$$

A töltéshordozók száma (és ezáltal a vezetési tulajdonságok) növelhető adalék anyagok hozzáadásával. Ez nem más, mint mesterséges szennyezés, amellyel megbontjuk a gyémántrács struktúráját. Az adalékanyag atomja beépül a kristályrácsba, de a felesleges

plusz elektronja ill. annak hiánya változást okoz a vezetési sáv ill. a vegyértéksáv betöltöttségében. Az ilyen félvezetőt adalékolt félvezetőnek nevezzük.

A legfontosabb alapelem az adalékoláshoz a szilícium (Si). Rendszáma 14, négy vegyértékű kristályrácsát gyémántrácsnak nevezzük. A négy szomszédjával négy vegyérték elektronnal kapcsolódik, a rácsállandó (a szomszédos atomok távolsága a kristályban) 0,357 nm. A tiszta szilíciumban kevés a szabad elektron, melynek koncentrációja:

$$n_i \approx 10^{10} \frac{1}{\text{cm}^3}. \quad (5)$$

Az adagolás kétféle lehet: ún. donor (5 vegyértékű elemekkel) vagy akceptor (3 vegyértékű elemekkel). Öt vegyértékű adalékanyag a foszfor (P), az arzén (As) esetleg az antimon (Sb). Miután beépültek a kristályrácsba és négy elektront beadtak a kovalens kötésbe, a felesleges ötödik elektronjuk könnyen kiszakad a kötésből és mint szabad elektron lesz jelen a vezetési sávban. Teljesen hasonlóan, az akceptor atomok is beépülnek a rácsba, de mivel csak három elektronjuk van egy „lyukat adnak” hozzá a vegyérték sávhoz. Ilyenkor már kis termikus energia is elég ahhoz, hogy egy elektron a vegyértéksávban elfoglalja ezt a helyet, és ezzel áramlást okozzon. (Valójában tehát mindig az elektronok áramlanak, de ezzel ellentétes irányúnak felfoghatjuk a lyuk vándorlását.) A donor atom elektronjai diszkrét, elkülönült energiaszinten helyezkednek el, W_d -vel a vezetési sáv alatt.

$$\begin{aligned} \text{A donor koncentráció:} & \quad N_d^+ [1/\text{cm}^3] \\ \text{Az elektron koncentráció:} & \quad n_n [1/\text{cm}^3], \\ \text{A lyuk koncentráció:} & \quad p_n [1/\text{cm}^3] \text{ és} \end{aligned}$$

$$n_n \sim N_d^+, p_n < n_n. \quad (6)$$

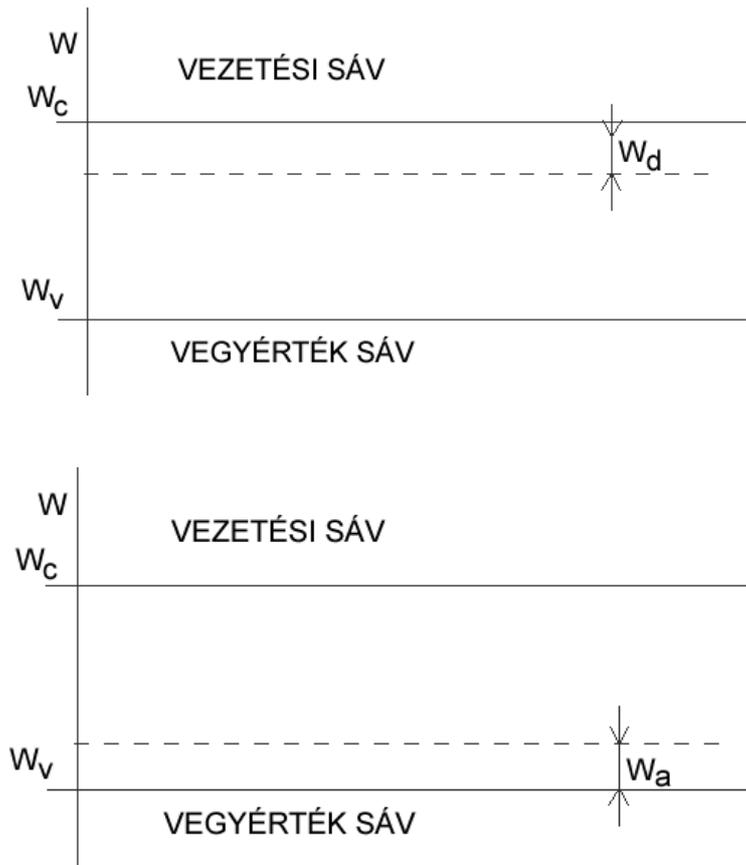
ahol N_d a donor atomok száma. Az elektronok a többségi, a lyukak a kisebbségi töltéshordozók, a rekombináció valószínűsége nő. A pozitív donorion helyhez kötött, az elektronok mozoghatnak, az eszköz kívülről semleges. Amennyiben térerősséget kapcsolunk a félvezetőre és ez elektronok áramlásba kezdenek, létrejön a kiürítés (ahonnan elmennek) és az akkumuláció (ahol lokálisan felgyűlnek). Ez az n-típusú félvezető.

Az akceptor adalékolásnál felhasznált három vegyértékű elemek: a bór (B), a gallium (Ga), az alumínium (Al) és az indium (In).

$$\begin{aligned} \text{Az akceptor koncentráció:} & \quad N_a^- [1/\text{cm}^3] \\ \text{Az elektron koncentráció:} & \quad n_p [1/\text{cm}^3], \\ \text{A lyuk koncentráció:} & \quad p_p [1/\text{cm}^3] \text{ és} \end{aligned}$$

$$p_p \sim N_a^-, p_p > n_p. \quad (7)$$

ahol N_a az akceptor atomok száma. Az elektronok a kisebbségi, a lyukak a többségi töltéshordozók. A negatív ion helyhez kötött, a lyukak mozoghatnak, az eszköz kívülről semleges. Az akceptor atom elektronjai diszkrét, elkülönült energiaszinten helyezkednek el, W_a -vel a vegyérték sáv felett. W_a elég kicsi, szobahőmérsékleten gyakorlatilag be van töltve az alulról felkerült elektronokkal. Ez az p-típusú félvezető.



3. ábra. A donor és az akceptor ionok lehelyzkedése diszkrét energiaszinten a sávok közelében.

A generációs ráta az időegység alatt térfogategységben generálódó töltéshordozó-párok száma (G). A rekombinációs-ráta ugyanígy adja meg a rekombinálódó párok számát (R). Mértékegysége $1/m^3s$. Termikus dinamikus egyensúlyban minden folyamat egyensúlyban áll az inverzével, jelen esetben a rekombináció a generációval: $G=R$, amely értékek a hőmérséklettől függenek. Az élettartam a statisztikus időátlaga az elektronok „fenn töltött idejének”, vagyis a generáció és rekombináció közötti időnek (nagyságrendileg $1\text{ ns}-1\mu\text{s}$):

$$\tau_n = n/R_n \text{ ill. } \tau_p = p/R_p. \quad (8)$$

Termikus egyensúlyban tiszta félvezetőnél:

$$n_i^2 = p_i^2 = np. \quad (9)$$

ahol n a mozgásképes elektronok, p a mozgásképes lyukak száma. Elektromosan semleges félvezetőben a pozitív és negatív töltések összege nulla. Az adalékkoncentrációk ismeretében a töltéshordozó koncentrációk kiszámíthatóak. Az np -szorzat csak a hőmérséklettől függ egy anyagban, intrinsic esetben $n=p$. A tömeghatás törvénye szerint:

$$np = const * T^3 e^{\frac{-W_g}{kT}}. \quad (10)$$

Félvezetőkben a többségi töltéshordozók sűrűsége kb. 10^{14} -el nagyobb a kisebbségénél már közepes adalékolás esetén is. Szokásos jelölés még, hogy felső indexbe helyezett + jel az erős, a – jel a (másikhoz képesti) gyengébb adalékolást jelöli.

Az energiaszintek betöltését a Fermi-Dirac (és nem a Bose-Einstein ld. később) statisztika (eloszlási függvény) adja meg:

$$f(W) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W - W_F}{kT}}}. \quad (11)$$

ahol W_F a Fermi-szint, k a Boltzmann állandó, T a hőmérséklet. 300 Kelvinen kT értéke 26mV. Ez az eloszlási függvény adja meg annak a valószínűségét, hogy a W energiaszintű állapot be van töltve. A töltéshordozó koncentrációk felírhatók W_F segítségével:

$$n = f(T)e^{\frac{W_C - W_F}{kT}} \quad (12)$$

$$p = f(T)e^{\frac{W_F - W_V}{kT}}. \quad (13)$$

ahol, W_C a vezetési sáv aljához tartozó energiaszint, W_V pedig a vegyérték sáv tetejéhez tartozó energiaérték.

Intrinsic anyagra:

$$W_C - W_F = W_F - W_V \quad (14)$$

vagyis:

$$W_F = \frac{W_C + W_V}{2}. \quad (15)$$

Termikus egyensúlyban W_F állandó, a nettó elektrontranszport értéke nulla minden energia szinten. N-típusú félvezetőben W_F a „félútnál” kicsit magasabban van, minél erősebb az adalékolás, annál feljebb, p-típus esetén pedig hasonlóan, de alatta. A töltéshordozó sűrűség erősen hőmérsékletfüggő a kisebbségi hordozók esetén: a hőmérséklet növelésével erősen nő a sűrűség is (Si esetén pl. 15%/°C). A többségi töltéshordozók sűrűsége hőmérséklet független.

4.1.2. Áramok félvezetőkben

Rendezetlen hőmozgás.

A legegyszerűbb áram a rendezetlen termikus energia által szolgáltatott és az elektronok gerjesztésére fordított energiából származik. Semmi köze az eszközre kapcsolt térerősséghez (feszültséghez). Ez az áramlás rendezetlen.

Drift áram (sodródási)

A töltéshordozók elektromos erőtér (elektromos, és nem termikus gerjesztés) hatására rendezetten mozognak. Nagysága a drift sebesség (az erőtér irányában):

$$v_D = -\mu_n E = \mu_p E. \quad (16)$$

ahol E az elektromos térerősség, μ a töltéshordozók mozgékonyasága (n: elektron, p: lyuk), mely hőmérséklet és adalékmennyiség függő.

$$\mu_{n(Si)} = 1500 \left[\frac{cm^2}{Vs} \right].$$

$$\mu_{p(Si)} = 475 \left[\frac{cm^2}{Vs} \right].$$

A drift áram áramsűrűsége (vektoriális mennyiség):

$$J_{Drift} = J_n + J_p = (qn\mu_n + qp\mu_p)E \quad (17)$$

ahol qn az ún. hordozósűrűség, $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ [As], n a darabszám.

Nagy térerősség hatására egyre csökken a drift áram növekedése. Szilícium esetén a hőmérséklet növekedése a mozgékonyaság és a fajlagos vezetés csökkenését okozza – ezáltal az ellenállása növekedését.

Diffúziós áram:

A részecskék a térbeli koncentráció különbség megszüntetésére irányuló mozgása. Oka a sűrűségkülönbség és a hőmozgás. Diffúziós áram indul meg a nagyobb koncentrációjú helyről a kisebb felé. Bár az elektronok egyik helyről a másikra történő vándorlásának valószínűsége azonos, ahol több az elektron (darabszáma), ott a nagyobb számú azonos valószínűségek eredőben nagyobb áramlást fognak okozni - és a folyamat a kiegyenlítő felé tart.

$$J_{n,diff} = qD_n grad(n) \quad (18)$$

$$J_{p,diff} = -qD_p grad(p) \quad (19)$$

ahol D a diffúziós állandó, az Einstein reláció szerint:

$$D = \mu \frac{kT}{q} \quad (20)$$

és *grad* a gradiens vektor jelzése, amely a (sűrűség) térbeli deriváltja és a 3D koordináta-rendszerben vektorokra alkalmazzuk (koordináta-mentéi parciális derivált). A gradiens (*grad f*) vektor fontos tulajdonsága, hogy a (*f*-függvény) változásának legnagyobb növekedésének irányába mutat. Ha például egy fűtőtest köré azonos hőmérsékleti pontokból alkotott síkfelületet képzelünk el, a *grad T* iránya merőleges erre és a hőmérséklet-növekedés irányába mutat: amerre a „melegség terjed”. Minél gyorsabban növekszik *T*, annál nagyobb *|grad T|*.

A teljes áramsűrűség tehát:

$$\vec{J}_n = qn\mu_n\vec{E} + qD_n\overline{\text{grad}}(n) \quad (21)$$

$$\vec{J}_p = qp\mu_p\vec{E} - qD_p\overline{\text{grad}}(p). \quad (22)$$

4.2. A kvantumfizikai kép

Az előzőekben bemutatott kép a klasszikus fizikából származik. Az ún. Bohr-modell, amely az atommag körül adott energialepcsőkön elhelyezkedő elektronokat vázolt fel, mára már nem érvényes. Ez ugyanis az alkotóelemek részecsketermészetét veszi figyelembe. A kvantumfizika már a múlt században kimondta alapigazságait, amelyeket sorra sikerült kísérletileg is igazolni. Anélkül, hogy részletes taglalásba kezdenénk és levezetnénk vagy akár csak értelmeznénk a Schrödinger-egyenletet és következményeit, elég ha megjegyezzük, hogy minden részecskének van a klasszikus fizika által részben tárgyalható részecsketulajdonsága és egyben hullámtermészete is. Mindenki ismeri a fény fotonjait, amelyekről már középiskolában megtanultuk, hogy kettős természetűek. Valójában egy tekegolyó is ilyen, csak ott elhanyagolható a hullámtermészet... Éppen ezért a kvantumfizika az elemi részecskék világában döntő jelentőségű.

Amit mindenki ismer, az a határozatlansági reláció, ami azt állítja, hogy nem ismerhetjük egyidejűleg a helyet és az impulzust (vagy pl. az energiát és az időt), így a jövő megjósolhatatlan, bizonytalanságokkal teli. Megjelenik tehát a valószínűség fogalma. A kvantumok világában a részecsketermészet és a hullámtermészet képe egyaránt szükséges. Az elektron valójában se nem részecske, se nem hullám, illetve mégis mindkettő egyszerre...

Miközben a klasszikus fizikában egymással kölcsönhatásban álló részecskéket képzelünk el, amely óraműként viselkedik akár megfigyeljük, akár nem; addig a kvantumfizikában a megfigyelő elvi szinten is olyannyira kölcsönhat a rendszerrel, hogy annak állapotát megváltoztatja. Ha pontosan akarjuk egy részecske helyét meghatározni, akkor ezáltal a Heisenberg-reláció értelmében az impulzusát csak egyre nagyobb bizonytalansággal kapjuk meg, illetve fordítva. Ha a hullámtulajdonságok mérésére alkalmas kísérletet választunk, nem tudjuk a részecsketulajdonságok mérni és viszont, mert nem létezik *elvieken sem* olyan kísérlet, műszer, mely ezeket egyidejűleg pontosan mérhetné. Így persze a részecske „jövője”, útja, impulzusa, helyzete csak adott valószínűséggel és adott bizonytalansággal határozható meg.

Továbbá semmi sem biztos, csak amit megmértünk: a kísérletek végeredményeit ismerjük csak. Egy megfigyelt elektronnal kijelenthetjük, hogy éppen a méréskor az A-állapotban van, majd egy következőnél a B-állapotában. Arra gondolhatunk, hogy talán az elektron átugrott az egyikből a másikba, ráadásul pont attól, hogy mi megfigyeltük. Semmit nem tudhatunk azonban arról, mit csinált az elektron aközben, miközben nem figyeltük meg. A kvantummechanika egyenleteiből csak annyit tudhatunk meg, hogy mekkora annak a

valószínűsége, hogy a megfigyeléseink közben az elektron az A ill. a B állapotában van-e. Az arra vonatkozó kérdés, hogy miként jut az A-ból B-be, illetve mi történik közben, értelmetlen.

A kvantum elektrodinamika feladata az elektromos jelenségek, Maxwell-egyenletek kvantumfizikai tárgyalása. Mivel ez a téma mélységében, nehézségében messze fekszik a tárgy célkitűzéseitől, nem is próbálkozunk a jelenségek kvantumfizikai magyarázatával. Ahhoz, hogy az áramvezetés, szigetelés kérdését mindennapos híradástechnikai alkatrészek kezeléséhez, tervezéséhez és tulajdonságaik vizsgálatához szükséges, az egyszerű, klasszikus Bohr-modellen alapuló kép teljesen kielégítő.

A klasszikus fizika jellemzője, hogy erővel, tömegekkel, valóságos mechanikai képpel dolgozik, így elvileg, ha ismernénk a világ összes részecskéjét, akkor azok jelenlegi helyzetéből és a ráható erőkből a jövő egyértelműen determinált lenne. Ez a kép Newton-tól ered, és még Maxwell is ilyen analógiával vezette le forradalmi egyenleteit. A klasszikus fizika két modellje a részecske (helyvel és sebességgel rendelkező tömegpont), valamint a hullám (rezgési mozgásállapot tovaterjedése). Ezenkívül a természet anyagból és erőterekből áll. A hullámtermészet legfőbb bizonyítéka mindig az interferencia, amit Young fedezett fel. A fénykibocsátás és elnyelés fotonokkal való magyarázata a részecske képhez tartozik. A kvantumfizika első lépése tehát az volt, hogy a világ kvantált: a fotonok (és más egyéb részecskék) energiája, illetve az energia átadása csak meghatározott adagokban történhet. Ez az alapegység a jól ismert $h\nu$, ahol h a Planck-állandó, ν pedig a frekvencia. A világ tehát olyan, mint egy bankautomata, amely nem képes ennél az egységnél kisebb pénzt kiadni.

A kvantumfizika lényeges része a valószínűség (amelyeket pl. a híres Schrödinger egyenlet, a hullámfüggvények írnak le), valamint az eloszlási statisztikák. Mivel a vizsgált rendszerek (gázok pl.) rengeteg atomból állnak, statisztikus törvények írják le a viselkedést. Boltzman után Einstein is foglalkozott ezzel a kérdéskörrel.

A Rutherford-féle atommodell, ahol az atommag és a körülötte keringő elektronok képét rajzolja elénk, pusztán mechanikailag stabil (ahogy a naprendszerünk is), azonban a klasszikus elektrodinamika szerint nem, mert a keringő elektron gyorsulással rendelkezik és sugározni kéne, ami az atom megszűnését jelentené. Ráadásul nehéz volt magyarázatot adni arra is, miért nem zuhannak az elektronok a pozitív töltésű magba.

Bohr ezt a modellt „kvantumfeltételekkel” egészítette ki, amelyek megengedett és tiltott energiaállapotokat feltételeznek. De ez csak a hidrogén színképét tudta magyarázni, a többi nem. Számára, ha egy elektron egyik megengedett (kvantált) energiaszintről egy másikra lép, akkor ahhoz vagy $h\nu$ energia befektetése kell, vagy ugyanennyi szabadul fel. Ehhez társult még a későbbiekben a Pauli-elv, amely még azt is megmondta, hogy az adott elektronhéjakon hány elektron tartózkodhat (legfelül kettő, aztán nyolc...stb.). Az elektronok pedig – a termodinamikából származó entrópia fogalmával magyarázva – a legalacsonyabb állapotokat kedvelik és azokat töltik be szép sorjában. Ehhez már csak a negyedik kvantumszám, a spin kellett, hogy meg is lehessen ezeket a számokat indokolni, mégpedig az atomban nem lehet két olyan elektron, amelynek minden kvantumszáma azonos. Ez azonban csak az ún. feles spinű részecskékre igaz, azok amiknek nincs (fotonok) ill. az egész spinűek egész másképp viselkednek: a felesek (fermionok) az ún. Fermi-Dirac statisztikát követik, még az egész spinűek a Bose-Einstein statisztikát (bozonok). A fermionok (elektronok, protonok, neutronok) engedelmeskednek a kizárási elvnek és „megmaradnak”, a bozonok nem, hiszen előállíthatók, elég csak felkapcsolnunk a villanyt.

Ez a kép tökéletesen magyarázta a molekulák kialakulását, mert azok stabilitását a közös elektronfelhő kialakítására vezette vissza. Ezeket később a Franck-Hertz kísérlet igazolta (a diszkrét energiaállapotokat).

A Bohr elmélet ezenkívül minden egy elektronnal rendelkező ionizált atomra is jó volt. Legfőbb hibája azonban a belső, logikai ellentmondás, miszerint se nem klasszikus, se nem kvantumelmélet.

A hullámok és részecske tulajdonságok együttes kezelése de Broglie-val kezdődött, aki szerint egy részecske pályájára a számításokból kijövő hullámhosszok egész számszor férnek, így a Bohr modell állapotai csak ekkor stacionáriusak (ezt kísérletileg igazolták is).

4.2.1. Vezetés és szigetelés

A félvezetők olyan szilárd anyagok, amelyek átmenetet képeznek a vezető és a szigetelő anyagok között. A szigetelők azért nem vezetnek áramot, mert a kvantummechanika értelmében, elektronjaik erősen kötődnek az atommaghoz. A vezetőkben azon van néhány, a maghoz csak nagyon lazán kötődő elektronja, amelyek az atom potenciálgödrének pereme közelébe eső energiaállapotokban tartózkodnak. Amikor az atomok szilárd testté (szilárdtest fizika) állnak össze, a szomszédosak potenciálgödreik kölcsönhatásba lépnek, és a válaszfal magassága csökken. Ez elég ahhoz, hogy a legmagasabb szinten lévő elektronok szabadon vándoroljanak atommagról atommagra. És mivel nem kötődnek egyikhez sem, szabad áramlásukkal áramot vezetnek (a fémekben). Ez a vezetőképesség kvantumfizikailag a Fermi-Dirac statisztikán alapul, amely megtiltja, hogy a laza elektronok aláhulljanak a potenciálgödör mélyebb energiaszintjeire, azok ugyanis szoros kötésben állnak a maggal és teljesen be vannak telítve. Ezért állnak ellen a nyomásnak a fémek: azért szilárdak, mert a ferimonokra vonatkozó Pauli-féle kizárási elv okán az elektronok nem préselhetők egymás közelébe.

Az elektronok számára a szilárdtestben lévő energiaszintek helye a kvantummechanikai hullámegyenletekkel kiszámítható. A szorosan kötődő elektronok a vegyértéksávban, a vándorlásra képesek, pedig a vezetési sávban. Szigetelőkben az összes elektron a vegyértéksávban van, a vezetőkben viszont van néhány „fent” a vezetési sávban is. Félvezetőkben a vegyértéksáv tele van, ám ezt a sávot a vezetéstől elválasztó energiakülönbség kicsi, kb. 1 eV körüli. Így az elektronok könnyen átugorhatnak oda és vezetnek áramot. A vezetőkkel ellentétben itt a felugró elektronok lyukakat hagynak maguk után, mintha ott pozitív töltésű részecske lenne. Mindkettő képes az áram vezetésére, mindegy hogyan képzeljük el: a lyukak ellentétes irányú vándorlásaként, vagy az elektronok haladásaként.

A természetes félvezetőknek nehéz szabályozni az elektromos tulajdonságait, főleg a minőségét és az irányíthatóságot, ami a legfontosabb.

Így pl. a 4 elektronnal rendelkező tiszta germánium erős kötésben áll a szomszédjaival. Ha (gyengén) arzénnal szennyezzük, akkor a kristályrácsot még mindig a germánium határozza meg, az arzén atomok pedig bepréselik magukat és az ötödik elektronjukat a legkülső héjről a közös kristályrácsban a vezetési sávba rakják és csak négyel kötődnek a rácsban. Lyukak így nem keletkeznek a vegyérték sávban (*n-típusú* félvezető).

A másik lehetőség, ha a germániumot *p-típusúra* szennyezzük, pl. galliummal. Mivel ezeknek három elektronjuk van, olyan, mintha lyukat adtunk volna hozzá a vegyértéksávhoz, ahol az elektronok lyukról lyukra ugrálva vezetnek áramot. A történet akkor érdekes igazán, amikor két ilyen hozunk egymással kapcsolatba, közös kristályszerkezettel. A határ egyik felén a negatív, másikon a pozitív töltések lesznek túlsúlyban. Emiatt potenciálkülönbség jön létre, ami az egyik irányban segíti, másik irányban gátolja az áramlást. A diódán ezért csak egyik irányban folyik áram. Ha az elektronok rávehetők arra, hogy az n-ből a p-ben található lyukba ugorjanak, fényvillanást látunk (LED). A fordítva működő dióda fényt nyel el, és egy lyukból elektront lök át a szomszédos vezetési sávba (fotodióda). Ez az áram csak akkor folyik, ha fény esik rá (fotocella). Tranzistorokban két átmenet van, amelyben az egyik *np* felületen átfolyó gyenge elektronáram a másik felületen jóval nagyobb áramlást indít meg (erősítő). 1950 óta nem használunk vákuumcsöveket, a nyolcvanas évektől pedig az integrált áramkörök is elterjedtek. A mai mikrochipek alapanyaga a szilícium, ami gyakorlatilag

közönséges homok. Megfelelő ösztönzés hatására vezeti az áramot, anélkül viszont nem. Gyártása csak nagy mennyiségben gazdaságos és olcsó, ilyenkor a darabokat gondosan ellenőrzik a rosszakat egyszerűen eldobják, a jókat pedig túréshatár adatokkal megadva forgalmazzák.

4.2.2. Szupravezetők

A szupravezető olyan anyag, amely kimutatható ellenállás nélkül vezeti az áramot, kvázi veszteségmentes. A jelenség azzal magyarázható, hogy az elektronok párokat alkotnak egymással, és együtt mozognak. Bár minden elektronnak feles spinje van és Fermi-Dirac statisztikának engedelmeskedik, érvényes rá a kizárási elv, az elektronpár bizonyos esetekben képes egyetlen (egész spinű) részecskeként viselkedni. Erre viszont nem igaz a kizárási elv és foton módjára a Bose-Einstein statisztika szerint viselkedik.

Ehhez azonban rendkívül alacsony hőmérséklet kell. Pl. higany esetében 4,2 K körüli (-269°C). A magyarázat szerint az egyik elektron kölcsönhatásba lép a kristály atomjaival, amitől megváltozik a másik elektron kapcsolata a kristállyal. Így bár a két elektronnak el kéne távolodnia egymástól, lazán összetartoznak, ami elég ahhoz, hogy más statisztikának engedelmeskedjenek. Erre nem minden anyag képes. A legkisebb termikus hőmozgás is szétszakítja ezt az elektronpárt, ezért jellemzően csak 1-10 K között figyelhető meg, aminek előállítása nem gazdaságos. Ebből adódóan a szobahőmérsékleten jól vezetők nem a legjobb szupravezetők. A közönséges vezetőkkel ellentétben ráadásul a külső mágneses tér (zavar) be tud hatolni, viszont a szupravezetőbe nem, mert felületükön mágneses tér hatására elektromos áramok alakulnak ki, melyek taszítják és eltérítik a mágneses teret (a védőburkot erősen hűteni kell). Érdekes viszont, hogy a klasszikus képnek megfelelően, ha két szupravezetőt vékony szigetelőréteggel választunk szét, még nem garantált, hogy az ún. alagúteffektus okán ne juthatna át elektron egyikről a másikba. Az ilyen Josephson-átmeneteken akkor nem folyik áram, ha a határok között potenciálkülönbség van.

5. A pn-átmenet

Az aktív eszközök alapja az ún. pn-átmenet (angolul: junction). Az előző fejezetekben már láttuk, hogy a passzív eszközök nem igényelnek tápfeszültséget, azok vagy tárolják az energiát (veszteségesen) az elektromágneses mezőben, vagy pedig egyszerűen hő formájában disszipálják azt. Egy passzív eszköz nem képes erősítésre.

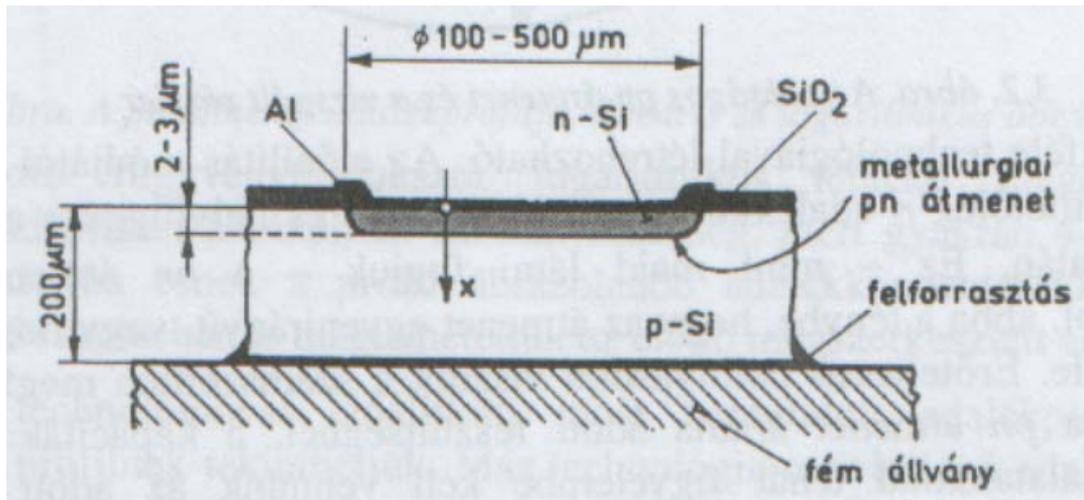
Az aktív eszközök ezzel szemben igen, cserébe energiát fogyasztanak, tápfeszültséget igényelnek. Ilyenkor egy „vezérlő” feszültség hatására megváltoztatható az eszközön átfolyó áram nagysága. A legegyszerűbb aktív eszköz a dióda kétpólus, ami egy pn-átmenetből áll. A hárompólusú aktív elem, ahol két diódát egyesítünk, a tranzisztor. Ezek részletesebb tárgyalása és működési egyenletei más tárgyhoz tartoznak, itt csak a fizikai alapok és a katalógusadatok kerülnek elő.

Az elektroncsövek és a tranzisztorok elvben különböznek az R, L, C elemektől. Először is, nem két, hanem három vagy több kapoccsal rendelkeznek, másrészt se nem passzívak, se nem aktívak. Ezeket az elemeket DC ill. AC üzemmódban külön vizsgáljuk: külső energiaforrás nélkül passzív elemként viselkednek, vagyis váltófeszültségű összetevő nincs a kapcsaikon. Ha viszont AC üzemmódban vannak, akkor további energiát képesek leadni, azaz **aktív** elemként működnek. Ezt az energiát azok az egyenfeszültségű generátorok adják, amelyek a segédáramkörökkel a kezdeti viszonyokat határozzák meg. A külső feszültségek mintegy vezérlik a belső generátorok energiáját, úgyhogy ezek az elemek vezérelhető alkatrészek is nevezhetők, amelyek aktivitása a kapcsaikra vezetett külső feszültségtől származik. Ezeket az elemeket a kétpólusoktól eltérően nem egyetlen, hanem több paraméter jellemzi. A tranzisztorok jellemzéséhez pl. négy paraméter szükséges, és nem is lineáris elem. Bizonyos közelítésekkel azonban a számítások „lineárisabb” tehetők, és egyszerűsíthetők.

A pn-átmenet nem csak egyenirányító diódaaként, hanem kapacitásként, szigetelőként is működhet. Fizikai értelemben nem más, mint egy félvezetődarab azon tartománya, ahol a közvetlen szomszédságban áll egy p-adalékolású és egy n-adalékolású rész, egykristály formájában. Ez azt jelenti, hogy maga a kristályrács nem változik, folyamatos az átmenet határán is.

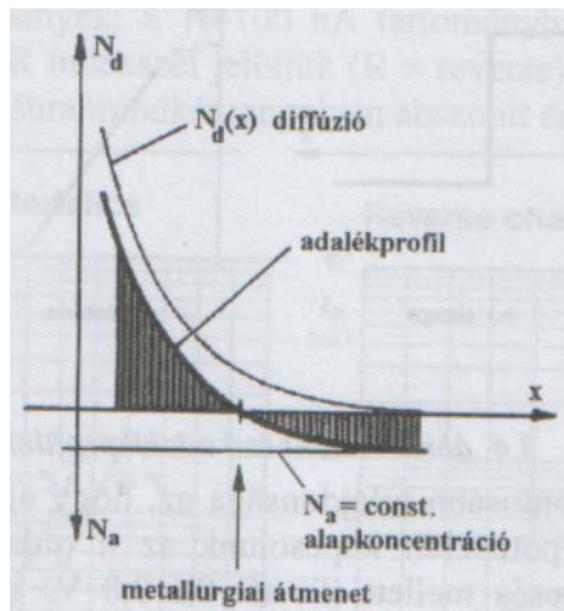
A pn-átmenet környezetében térerősség lép fel. Az n -oldalón elektronok, a p -oldalón a lyukak vannak sokan. Az átmenet közvetlen közelében azonban mindkét sűrűség lecsökken, az n -oldali elektronok átdiffundálnak a másik oldalra és a lyukak viszont. Ezért aztán a pn-átmenet mindkét oldalán többségi töltéshordozókban elszegényedett ún. *kiürített réteg* jön létre. Ne feledjük, hogy az adalékionok a rácsba beépülve helyhez kötött töltések, ugyanakkor az elektronok és lyukak mozgásképesek. Ha tehát ezek el is mozdulnak, a helyhez kötöttek „visszamaradnak”. Ez történik a pn-átmenet kiürített rétegében is, elveszíti semlegességét mert visszamaradnak az n -oldalón a pozitív töltésű donorionok, a p -oldalón a negatív akceptorionok – így a két kiürített rétegben potenciálkülönbség áll elő (tértöltés réteg).

A manapság szokásos struktúra, amiben a pn-átmenetet előállítjuk, az ún. *planáris* struktúra, planáris technológia. Itt diffúzióval hozzuk létre a különböző adalékolású részeket a félvezetőben, de más módszer is elterjedt (ld. az utolsó fejezetben): pld. az ionimplantáció, epitaxiális rétegnövesztés stb.



1. ábra. Epitaxiális kivitelű planárdiódá.

Diffúzió esetén a kiindulás egy gyengén szennyezett p-típusú (p^+) lapka. Ennek felületi 2-3 mikronos zónájában nagy hőmérsékleten donor atomot (pl. foszfort) diffundáltatunk egy kis felületen. Ezen „kis felület” azáltal lesz módosítva, hogy a diffúzióknak nem áll ellen a felületi réteg. Természetesen, egyszerre több eszköz kerül kialakításra, és ahhoz, hogy ne az egész felületen történjen meg a diffúzió, a nem kívánt részeket „le kell takarni”. Ez hasonló folyamat az útjelek festéséhez: olyan sablonokat használunk, amit egyszerűen „átfestünk” teljesen, de csak ott fog nyomot hagyni, ahol lyukat vágunk rá – így alakítjuk ki a nyilakat, számokat. Jelen esetben is pontosan ez történik, de olyan anyagot használunk takarónak, amely ellenáll a diffúzióknak. Erre alkalmas a szilícium-dioxid (SiO_2), amely védőréteget képezve *maszkolja* a hordozót. A keletkező p és n-réteg átmenetét *metallurgiai* átmenetnek hívjuk. A kezelés végén aztán a keletkezett kicsiny n-rétegű rész tetejét is bevonják a védőréteggel, és két végén fémes kivezetéseket helyeznek el (alumínium).



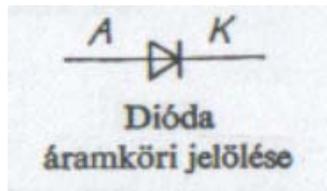
2. ábra. PN-átmenet adalékprofilja lineáris ábrázolásban.

A pn-átmenetek rétegei eltérő adalékolásúak is lehetnek, főleg tranzisztorok esetén. Ilyenkor gyakran használjuk a p és az n-betűk mellett a + ill. – jelet, ami azok erősségére utal (egymáshoz képest). A pn-átmenet adalékolásának helyfüggése az *adalékprofil*, mely jellemző az előállítás technológiájára. A diffúziós-technika pl. exponenciális jellegű adalékprofil eredményez (2.ábra), az epitaxiális pedig ugrás-szerűt (ezt nevezzük *abrupt* átmenetnek).

A pn-átmenet legfontosabb tulajdonsága, hogy *egyenirányító*. Abban az esetben, ha a p-oldalon a feszültség pozitívabb, mint az n-oldalon, a feszültségesés kicsi lesz és nagy áram fog folyni az eszközön (nyitófeszültség). Fordított esetben az eszközre zárófeszültség jut, és nem vezet. A nyitó irányú karakterisztika (forward-characteristics) megadja a pn-átmenet (praktikusan egy dióda) áramát, amennyiben rá nyitó irányban feszültséget adunk 0 V-ról növekedve. Körülbelül 0,6-0,7 V-ig nem indul meg az áramvezetés. Miután túllépjük ezt a nyitófeszültséget, az áram exponenciálisan nőni kezd, és kb. 1 V-nál már a 80 mA-t is eléri. Az áram tehát exponenciálisan-arányos a feszültséggel (lásd még (2) egyenlet):

$$I \sim e^{\frac{U}{U_T}} \quad (1).$$

A zárókarakterisztika (reverse) a pn-átmenet hibáját jellemzi, hiszen ekkor nem szabadna áramnak folynia. A valóságban ennek mértéke nA nagyságrendű, és úgy a zárófeszültség, mind a záróáram negatív irányú. A dióda, mint egy darab pn-átmenet, nyitóárama pozitív, egyirányba mutat a feszültséggel (az anód irányából a katód felé, ahogy a rajzjel is mutatja).



3. ábra. A dióda jelölése

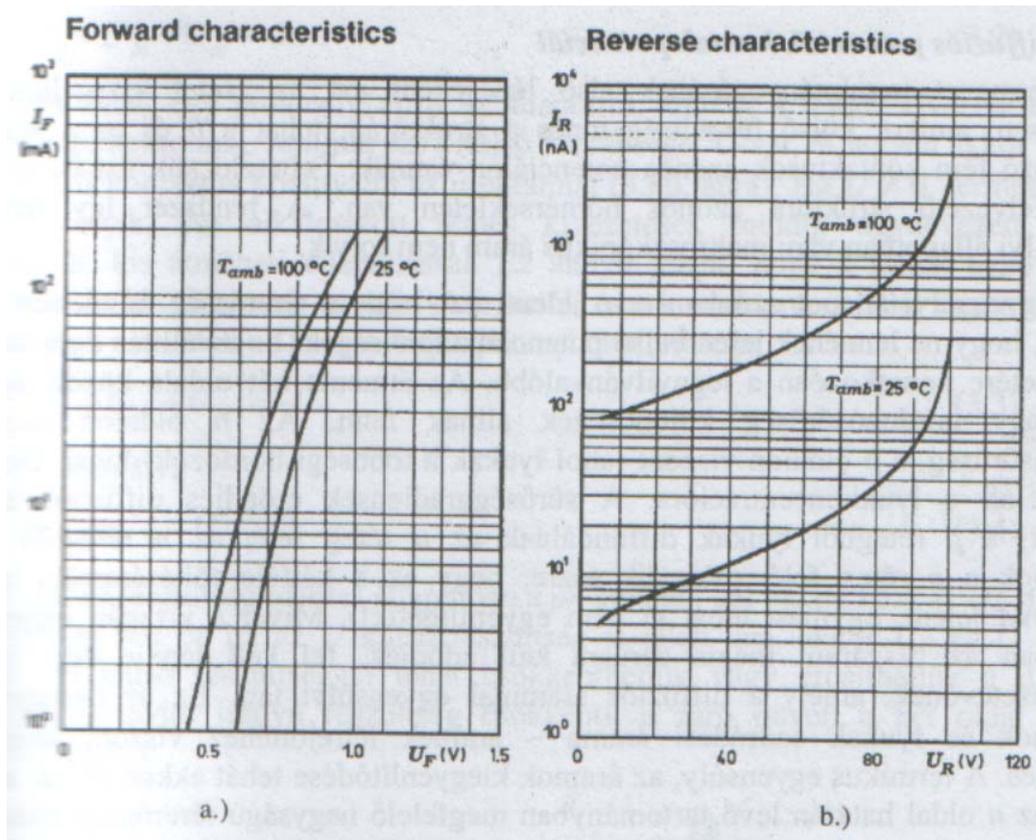
Az ideális dióda egyenlete:

$$I = I_0(e^{\frac{U}{U_T}} - 1) \quad (2)$$

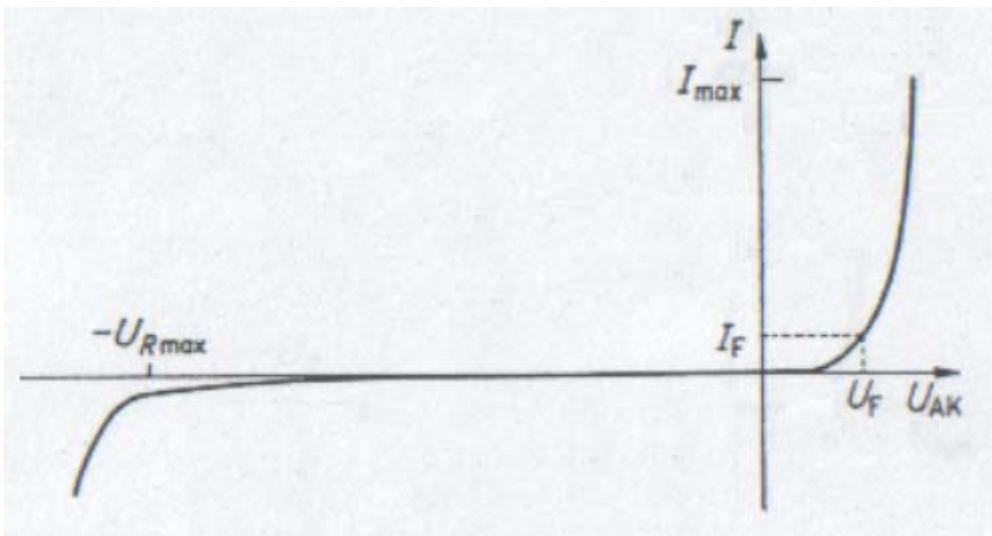
ahol I_0 a szaturációs (záróáramú) konstans, mely csak anyag- és koncentrációfüggő, értéke kb. 10^{-15} A; $U_T = 26$ mV; U pedig az anód-katód feszültség. Továbbá:

$$U_T = \frac{kT}{q}, \quad (3)$$

ahol k a Boltzmann-állandó, q az elemi töltés, T az abszolút hőmérséklet. A másodlagos hatások miatt a tényleges érték 26 és 52 mV közé esik.



4. ábra. Nyitó- és záró karakterisztika diódához két különböző hőmérsékletre (katalógusadat).



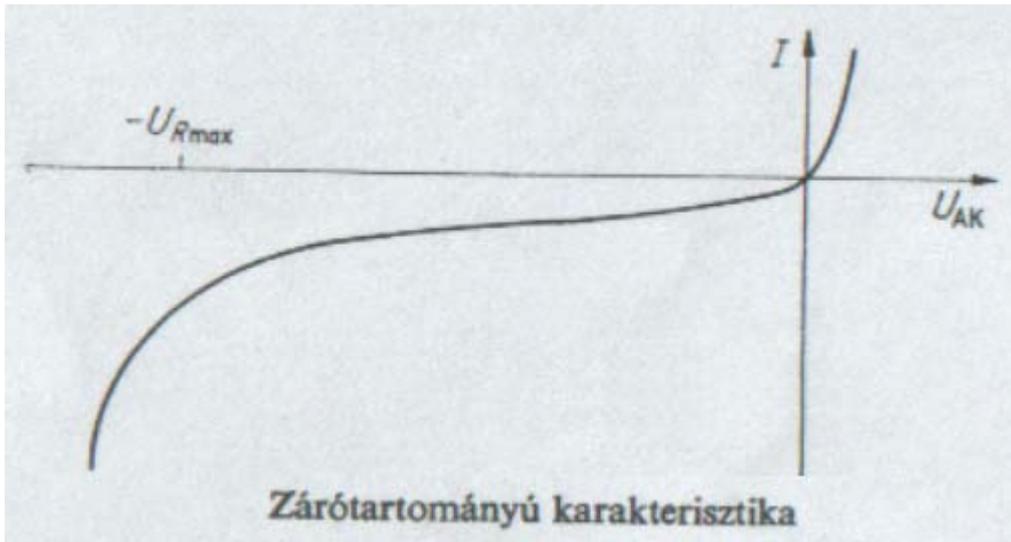
5. ábra. A dióda karakterisztikája

Az $I(U_{AK})$ karakterisztika egyértelműen megadja a diódák statikus viselkedését. A nyitóirányú áram nem léphet túl egy I_{max} értéket, mert az eszköz tönkremegy. A nyitófeszültség értékénél $I = 0,1 \cdot I_{max}$. Az 5. ábrán látszik, hogy U_{Rmax} nagy zárófeszültség felett az áteresztő áram nagyságrendjébe esik a visszáram értéke. Az általános célú diódák ebben az üzemmódban nem működhetnek, mert az erős felmelegedés tönkreteszi őket. A maximális zárófeszültség 10 V és 10 kV között van, típustól függően. A visszáram a fenti léptékben nem is látható, így a záróáramú karakterisztikát külön felrajzoljuk. Értéke μA (Ge) és nA (Si) nagyságrend.

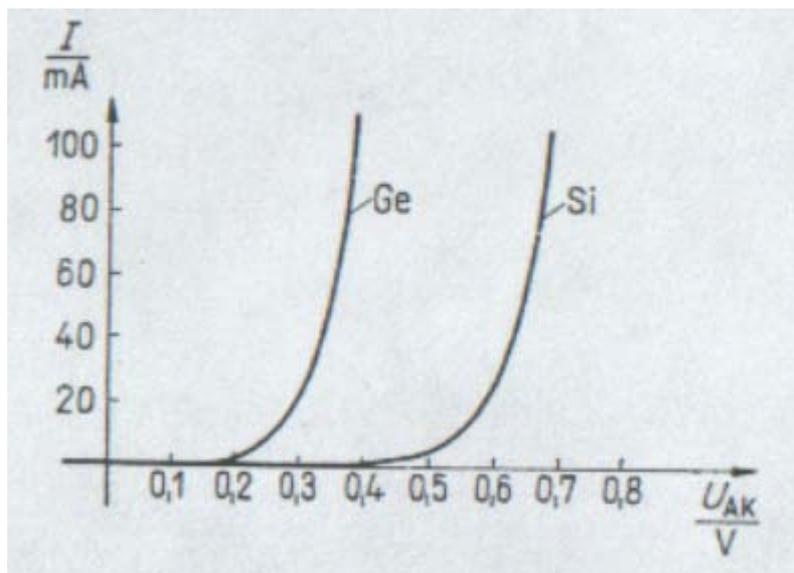
Igazából, a görbének nincs töréspontja, csak a lineáris közelítésben. A nyitófeszültség hőmérsékletfüggő. Hőmérsékleti együtthatójára a következő gyakorlati összefüggés írható fel:

$$\frac{\partial U}{\partial T} = \frac{-2mV}{^{\circ}\text{C}} + \frac{0,3mV}{^{\circ}\text{C}} \lg \frac{I}{100\mu\text{A}}, \quad (4)$$

ahol a bal oldalon a parciális deriválás szerepel. Az egyenlet Si és Ge esetén is jó közelítés. A diódák visszárama a hőmérséklet függvényében exponenciálisan emelkedik: 10 fok hatására megkétszereződik, 100 fok hatására ezerszeresére nő.



6. ábra. Zárótartományú dióda karakterisztika.



7. ábra. Germánium és szilíciumdiódák egyenlet szerinti karakterisztikája

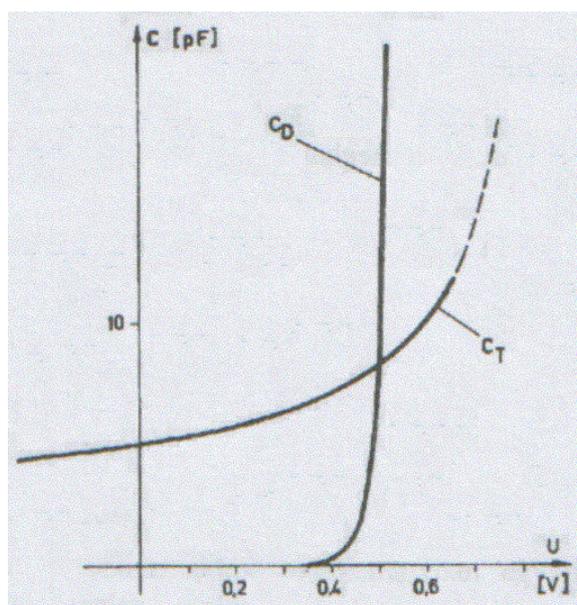
5.1 Másodlagos jelenségek

Mivel a tranzisztor első közelítésben felfogható két dióda összeragasztásából, az alapvető dióda-jellemzők rá is igazak (és annál több is). A valóságos diódák nem ideálisak, hanem veszteségesek. Éppúgy mutatnak frekvencia-, hőmérséklet-, és teljesítményfüggő jelenségeket valamint nem kívánt mellékhatásokat, ahogy a passzív eszközök.

A diódának van *soros ellenállása*, mely növeli a dióda nyitó irányú feszültségesését, miáltal az egyenirányítás romlik. Ugyanakkor csak kis áramoknál jelentős a *generációs- és a rekombinációs áram*.

Legfontosabbak az ún. *letörési* jelenségek. Záróirányban a letörési feszültség felett csak a soros ellenállása korlátozza a dióda működését, a hőmérséklet emelkedik, és áramkorlátozásra van szükség ahhoz, hogy a pn-átmenet ne menjen tönkre, ne üssön át. A két legismertebb jelenség a lavina letörés és a Zener-letörés, melyet a Zener-diódákban előnyünkre fordíthatunk.

Hátrányosak még nem kívánt, járulékos kapacitások az átmenetek határán. Sajnos, minden pn-átmenet egyben egy kis kondenzátor is, és ezekkel a parazitakapacitásokkal számolnunk kell: diffúziós (C_D) és tértöltési kapacitás (C_T).



8. ábra. A tértöltés- és a diffúziós kapacitás feszültségfüggése.

5.2 Dióda

A dióda, mint egyetlen pn-átmenet felfogható egy feszültségpolarizáció-vezérelt kapcsolóként: megfelelő irányban kapcsolt feszültségre vezet, ellentétesre szigetel. Ez még a valóságos diódánál is jó közelítés, gyakorlatilag ideális kapcsolónak tekinthető. A pn-átmenet nagyon erős hőmérsékletfüggést mutat a kisebbségi töltéshordozók koncentrációjának jelentős hőmérsékletfüggése miatt. Nyitó irányú feszültség esetén, az adott áramhoz tartozó nyitófeszültség 2 mV-al csökken 1°C növekedés hatására. Ugyanakkora változás záróirányban 7-10%-os záróáram-változást okoz.

A parazita kapacitások lassítják a működést. C_D értéke kis teljesítményű diódáknál nF nagyságrendű, nagy teljesítményű eszközöknél μF körüli, és semmire nem tudjuk felhasználni. C_T értéke 1-10 pF körüli, de hangolásra felhasználható, amivel változtatható kapacitású eszköz készíthető. A dióda abból a szempontból nem ideális, hogy a kapcsolása időt vesz igénybe, nem végtelen gyorsan zajlik le, és vannak tranziensek is (kapcsoló üzem). A diódák vizsgálatában is modelleket használunk, melyben a fenti jelenséget koncentrált áramköri elemekkel helyettesítjük. A két legfontosabb modell a nagyjelű és a kisjelű. A nagyjelűt a munkaponttól távol, erős kivezérlés mellett használjuk. Nem lineáris modell, így kézi számolásra nem alkalmas, csak számítógépes szimulációra. Idő- és frekvenciafüggést tartalmaz, a DC viselkedést is leírja. A kisjelű modell a munkapont körül használható, lineáris közelítés, kézi számítások lehetségesek. Szintén tartalmaz idő- és frekvenciafüggést. Ha egy nyitóirányban előfeszített diódára hirtelen zárófeszültséget adunk, bizonyos időre van szükség a „lezáráshoz”. A feléledési idő egyenesen arányos a nyitóirányú áram nagyságával és fordítva arányos a záróirányú feszültséggel. Pl. egy jellemző feléledési érték, hogy egy adott dióda a minimális 400 k Ω -os záróirányú ellenállását maximálisan 1 μs alatt veszi fel, ha 30 mA-es nyitóirányú áramvezetés esetén 35 V-os záróirányú feszültséget alkalmazunk. Diódákat különböző célokra készítenek, pl. nagysebességű kapcsolóáramkörökbe. Az egyenirányítókat nagyáramú és nagy teljesítményű felhasználásra tervezik. A kapcsolódiódák záróirányú feléledési tulajdonságai jók, záróáramuk kicsi, vezetési jellemzőik jók. Ezek kis nyitófeszültség esetén is nagy áramokat vezetnek.

5.2.1 Adatlap

Európában a félvezető eszköz típusjele két részből áll: a betűjel (két vagy három betű) és 2-4 számjegy, ami tetszőlegesen megválasztható a gyártó által. A betűk adnak tájékoztatást a rendeltetésről és anyagról:

Első betű	A	Germánium
	B	Szilícium
	C	Intermetallikus félvezető (GaAs)
Második betű	A	Dióda
	B	Varicap dióda
	C	Kisteljesítményű tranzisztor
	D	Kisfrekvenciás nagyteljesítményű tranzisztor
	E	Tunnel dióda
	F	Kisteljesítményű, nagyfrekvenciás tranzisztor
	P	Sugárzásra érzékeny eszköz (fotodióda)
	Q	Sugárzást kibocsátó eszköz (LED)
	S	Kapcsolótranzisztor
	U	Nagyteljesítményű kapcsolótranzisztor
	Y	Egyenirányító dióda
	Z	Zener dióda

1. táblázat. A diódák katalógusjelében szereplő betűk jelentése.

A katalógusok többsége angol vagy német nyelvű. Az adatlap tartalmazza a típusjelet és esetleg szöveges információt is röviden. A legfontosabbak a *határadatok*: áram, feszültség és disszipáció határok, ameddig károsodás nélkül az eszköz használható.

Hővezetési ellenállás alatt egy érték szerepel. *Statikus jellemzők*: az egyenáramú karakterisztika jellemzői, mint a nyitó feszültség, záróáram, letörési feszültség határértékek (minimum és maximum) adott hőmérsékletre.

Dinamikus jellemzők: itt a (tértöltés) kapacitás és kapcsolási idők jelennek meg, rögzített mérési körülmények között (feszültség, frekvencia). A második adat a záróirányú feléledési idő, ahol nagyon fontos a mérési környezet adatait is megnézni. A harmadik dinamikus adat az egyenirányítási hatásfok. Ez a kimenő feszültség és a bemenő nagyfrekvenciás mérőjel csúcsertékének hányadosa. A számszerű értékek után a karakterisztikák jönnek: megengedett disszipáció a hőmérséklet függvényében, a nyitó karakterisztika (áramban logaritmus, több környezeti hőmérsékletre is megadva, tűréshatárokkal), záróáram adott zárófeszültségnél a hőmérséklet függvényében, zárókarakterisztika két hőmérsékletre és végül a tértöltés-kapacitás a záró feszültség függvényében.

A legfontosabb dióda jellemzők: max. üzemi zárófeszültség, max. nyitóáram, max. szivárgási áram, nyitó áram-feszültség karakterisztika, hőmérséklet karakterisztika (a hőmérsékleti együttható kb. $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$).

5.2.2 Zener-dióda

Meghatározott záróirányú feszültség esetén minden dióda átüt, és áramot vezet záróirányban. Az átütési feszültség elérése után nagyon kis zárófeszültség-növekedés is jelentős áramot indíthat el (A Zener-, ill. lavinaeffektus következtében). A közönséges diódáknak nincs meghatározott záróirányú jellemzői.

A Zener-dióda záróirányú átütési módban üzemel, ahol az impedancia kisebb és a letörési jelenség jól definiált (erősen török a görbe a záróáram-zárófeszültség függvényében). A zárófeszültség változása nagy záróáram esetén is kicsi. Névleges feszültség 2,5-200 V, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$; teljesítmény 0,25-50 W. Ennél nagyobb terhelés esetén hűtőborda kell. Mivel a hőmérséklettényező nagy, egyes típusok hőmérséklet kompenzáltak. Alapanyaga szilícium. Záróirányú ellenállása igen nagy, visszárama μA nagyságú, amíg el nem érjük a letörési feszültséget.

A Z-diódák visszárama egyenletes oszlik el a félvezetőben. Mindaddig nem mennek tönkre, amíg veszteségi teljesítményük záróirányban nem nagyobb, mint a nyitóirányú maximális. Azt a feszültséget, ahol a visszáram meredeken emelkedni kezd U_Z -vel jelöljük. Ha a dióda letörési feszültsége 5,7 V alatt van, a meredek emelkedés a Zener-effektuson alapul, ha felette, akkor a lavina effektuson.

Nagy feszültséglökötű áramkörben, ahol nem megy tönkre a dióda lavinadiódákat alkalmazunk. A 200V-nál kisebbeket főleg feszültségstabilizálásra használjuk (Z-diódák). Elve, hogy nagy áramváltozás is csak kis feszültségváltozást okoz. A stabilizáló hatás annál nagyobb, minél meredekebb a zárótartományú karakterisztika, azaz a *differenciális belső ellenállás*:

$$r_z = \frac{\Delta I}{\Delta U}. \quad (5)$$

A Zener-hatás negatív 5,7 V alatt, így ezen felül a lavinahatás pozitív hőmérsékleti együtthatója érvényesül (kb. egy ezrelék/fok nagyságban).

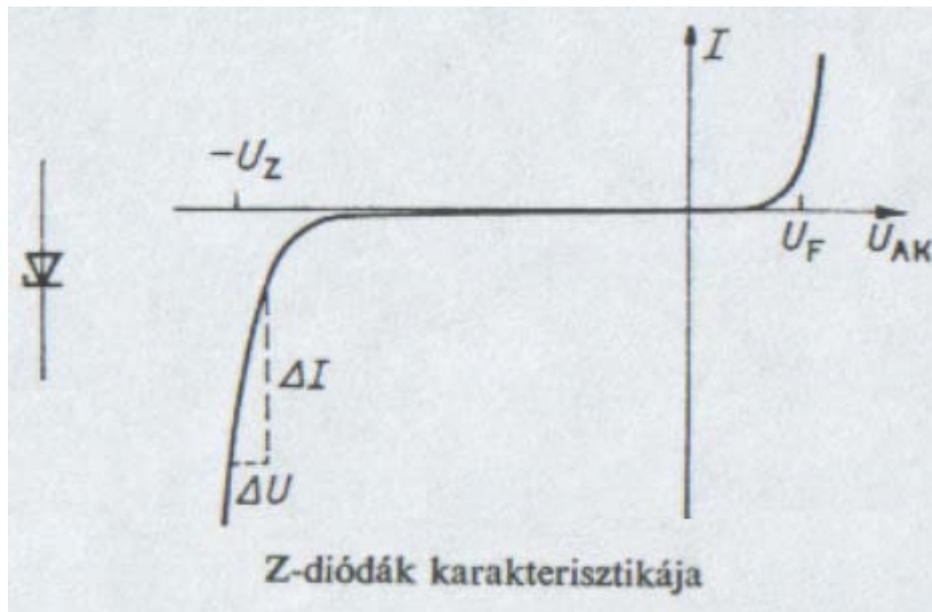
Ha egy Z-diódával sorba kötünk egy hagyományos diódát, a lavina effektus pozitív és a dióda nyitó irányú feszültségének negatív tényezőjét kiegyenlíthetjük. Ezt referencia elemnek is nevezzük, melynek együtthatója $10^{-5}/^\circ\text{C}$ -nál is kisebb lehet.

Váltófeszültség határolására szimmetrikus Z-diódákat alkalmazunk, ahol a karakterisztika a nullapontra szimmetrikus (két ellentétes polaritással sorbakapcsolt Z-dióda).

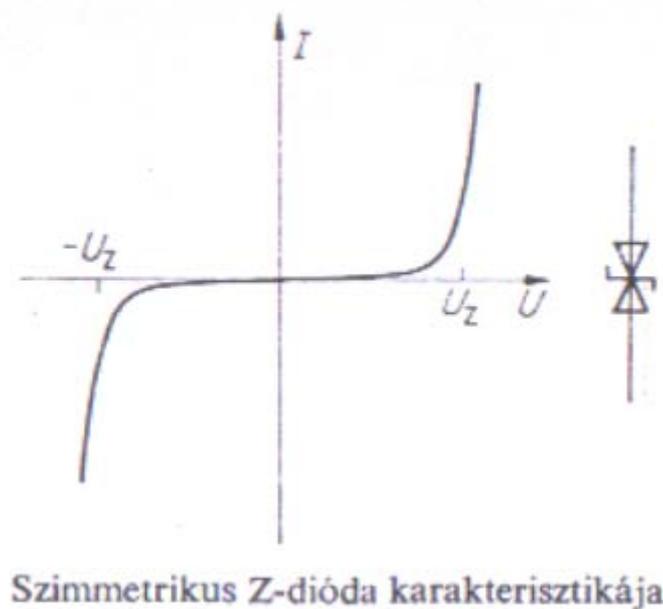
A konstrukciós követelmények a Zener-diódákkal szemben:

- a letörési feszültséget pontosan tartásák a gyártás során,
- a letörési karakterisztika minél meredekebb legyen,
- a letörési feszültség minimális hőmérsékletfüggést mutasson.

A Z-diódák letörési feszültség szerinti értéksorban kaphatók, 5 és 10% pontossággal. Az értéktartomány 2,5-40 V közötti.



9. ábra. A Zener-dióda rajzjele és karakterisztikája



10. ábra. Szembe kapcsolt Zener-diódák rajzjele és karakterisztikája.

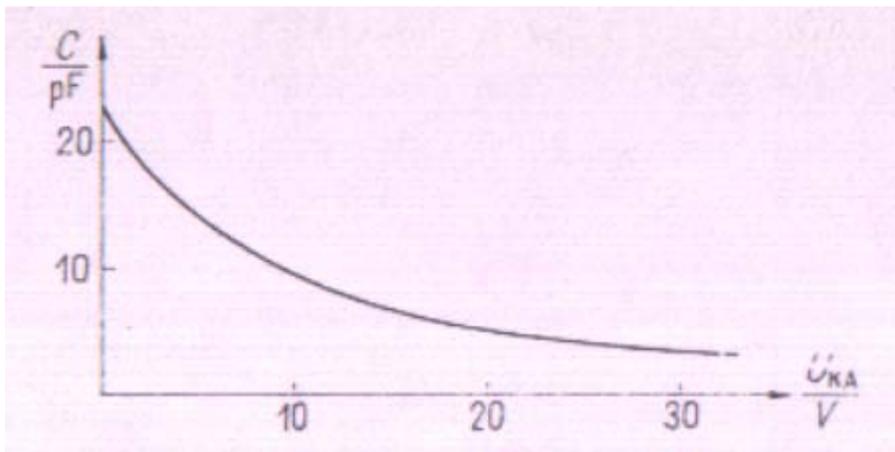
5.2.3 Varicap-dióda

A diódák kapacitása a zárófeszültség nagyságától függ. Ahogy neve is mutatja, a kapacitása széles határok között variálható a zárófeszültség függvényében. Ilyenkor a tértöltés kapacitást használjuk ki és mindig a záró tartományban dolgoznak. A nyitó karakterisztika nem érdekes. A soros ellenállás és induktivitás kicsi, általában epitaxiális előállítással készül. Vezérelhető frekvenciájú oszcillátor és automatikus frekvenciaszabályozó (AFC) készíthető segítségükkel. Lehetőség van a frekvencia sokszorozására és erősítésére is. Megfelelő dióda alig néhány dB veszteséggel képes teljesítményt konvertálni egyik frekvenciáról a másikra. Az erősítéshez szükséges teljesítmény forrása nem DC, hanem egy nagyfrekvenciás („pumpáló”) jel, és az erősítés mindig az erősített jel frekvenciájának transzponálásával jár. Ezeket mikrohullámon használjuk (varactor diódák).

A nagy jóságú tényező és nagy kapacitásátfogás elvárt:

$$CS = \frac{C_T(U_{Rmin})}{C_T(U_{Rmax})}. \quad (6)$$

Mivel az alkalmazás GHz alatti, a konvencionális tokozás általában megfelelő. Varaktor diódák koaxiális tokozásúak, kis induktivitású menettel. Alapanyaga GaAs, mely általában drága, így profi berendezésekben használják (sok száz GHz-ig).



11. ábra. Kapacitásdióda karakterisztikája

5.2.4 Tokozás

A tokozás megválasztásánál az alábbi szempontok jelentősek: a toknak alkalmasnak kell lennie a hővé alakuló elektromos teljesítmény elvezetésére a környezet felé (akár 10-100 W tartományban is). A toknak illeszkednie kell a szereléstechnológiához (furatszerelés, SMD, NYÁK, hibrid technológia). Nagy frekvencia esetén egyedi szempontoknak is meg kell felelnie.

A tokozás legfontosabb feladata a hőelvezetés. Ez nem jelent problémát mW nagyságrendben, de 1-10 W esetén már annál inkább. Magas hőmérsékleten nem csak a paraméterek változhatnak, de tönkre is mehet az eszköz (a Si 125-150 fok környékén)

1. Kisteljesítményű: Üvegházhas diódatest, a dióda egy hengeres üvegcsőben van, hőelvezetés a lábakon történik. Általános rendeltetésű, NYÁK-ba használható de SMD-ben nem. Ide tartozik az ún. SOT23 jelű kettős dióda, melyek közös tokban vannak, műanyag bevonattal és SMD-hez is felhasználhatók.

2. Nagyteljesítményű: vörösréz ház, így ez is ad le hőt. Általában csavarmentes kivitelű és hűtőbordára szerelhetők.

3. Nagyfrekvenciás (mikrohullám): Nincs drótkivezetés, mert az a GHz tartományban túlságosan induktív lenne. Felépítés hengersizmetrikus így mikrohullámú rezonátorba vagy négyszögletes csőtápvonalba illeszthető.

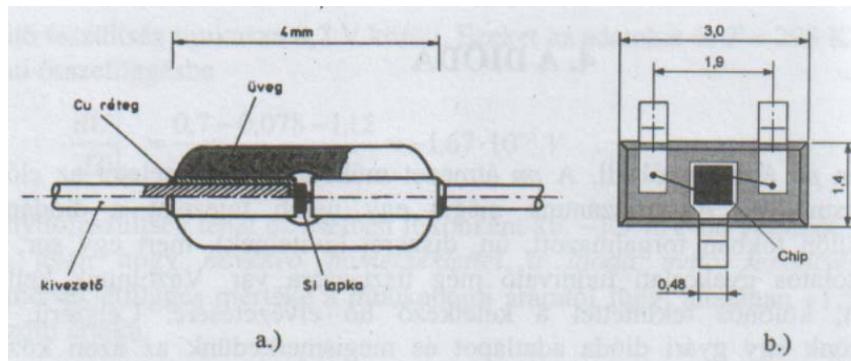
A belső hőátadást a felhasználó nem befolyásolhatja, ellentétben a külső hűtési módszerekkel (bordázat).

A hővezetési ellenállás:

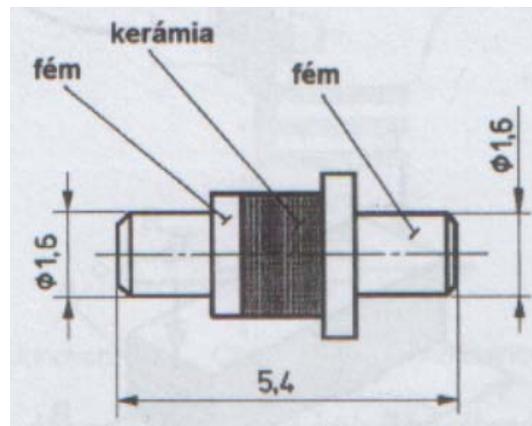
$$R_{th} = \frac{L}{\lambda A}, \quad (7)$$

ahol L az áramjárta eszköz hossza, A a keresztmetszete, a mértékegység pedig $^{\circ}\text{C}/\text{W}$. A λ hővezetési együttható mértékegysége $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$.

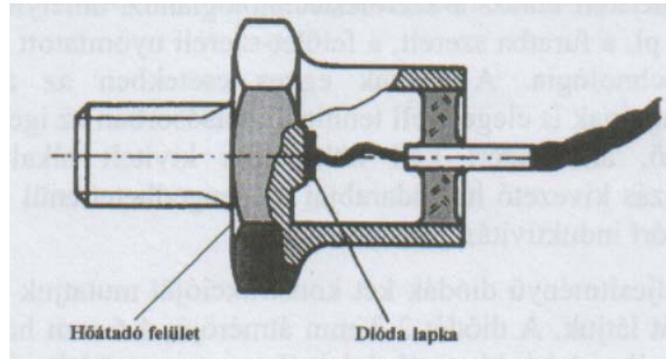
Impulzus gerjesztés esetén a keletkező hő kisebb, mint stacionárius esetben, mert a hőmérsékletváltozás nem képes azonnal követni a fizikai gerjesztést. Ezért az adatlapokon külön adják meg diagram formájában az impulzusos hővezetési ellenállást: $Z_{th}(t_p)$. Itt a maximális tranziens hőmérséklet van előírva.



12. ábra. Kisteljesítményű félvezető diódák.



13- ábra. Mikrohullámú dióda.



14. ábra. Nagyteljesítményű dióda.

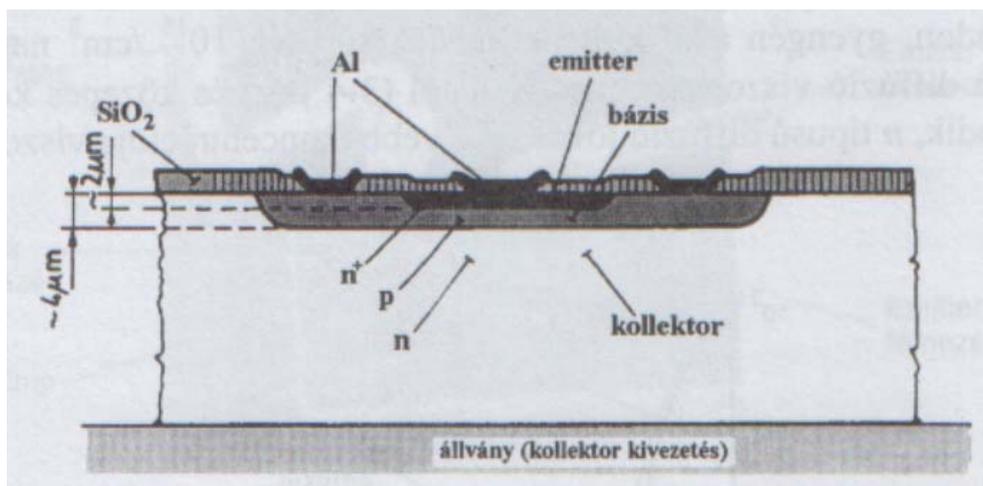
5.3 Tranzisztor

A tranzisztoroknak két fajtáját vizsgáljuk: a bipoláris és a térvezérelt tranzisztorokat. Három elektródája van és tápfeszültség hatására aktív eszközként működik, erősítésre képes. Leggyakrabban germánium és szilícium alapúak.

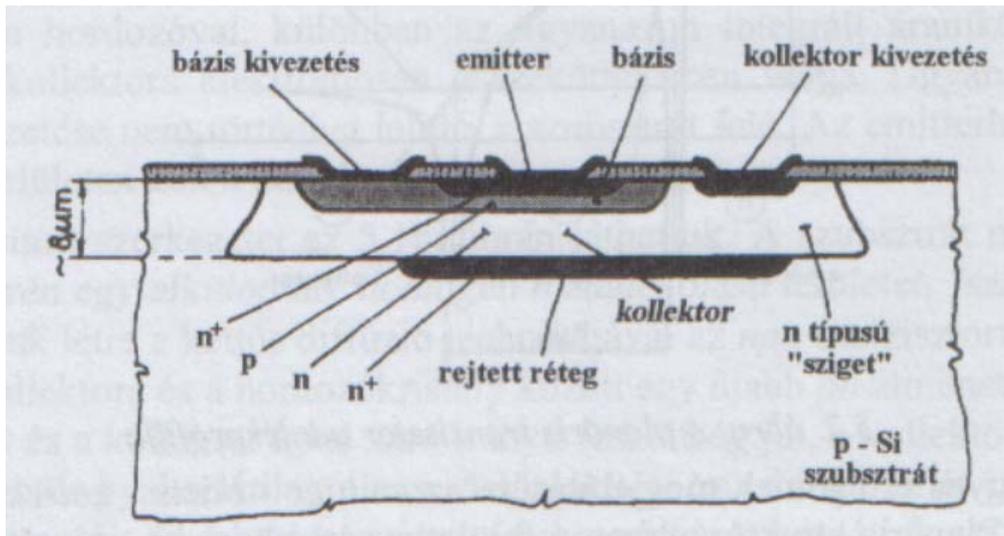
5.3.1 Bipoláris tranzisztor

A bipoláris tranzisztor két pn-átmenetből áll. A két átmenet igen közel, néhány mikron távolságra helyezkedik el, így nem tekinthetők független diódaként. Befolyásolják egymás áramát, *vezérelni* képesek egymást.

A két leggyakoribb kiviteli formán látható a felépítése. Az első a *planáris* struktúra (15. ábra), a másik az *integrált* áramkörökben használt (16. ábra, szintén planáris).

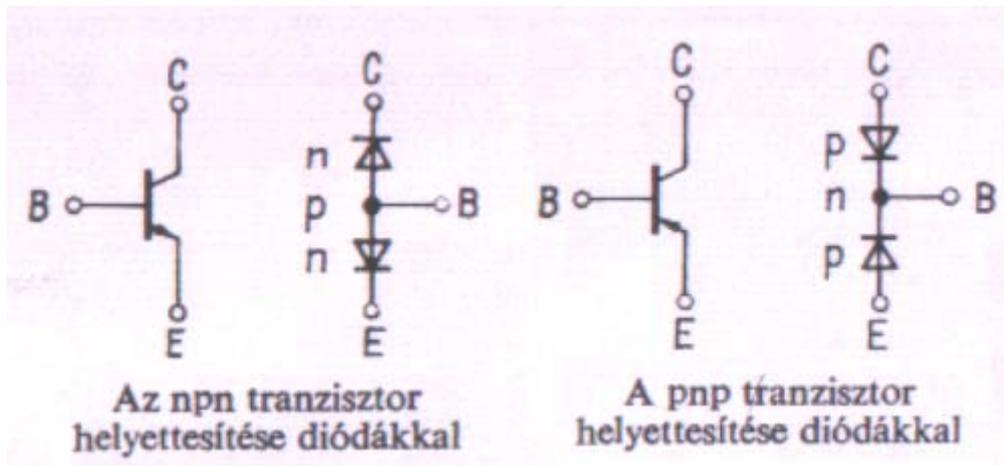


15. ábra. Planáris tranzisztor keresztmetszete.



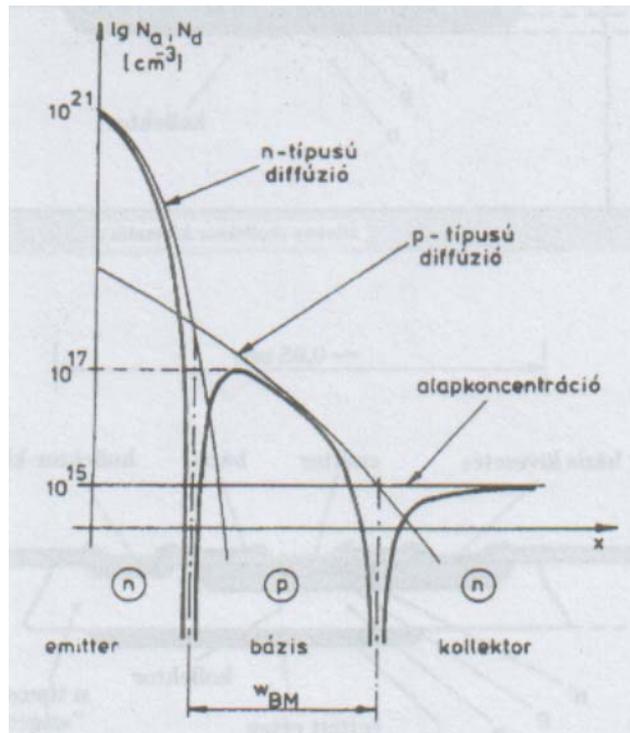
16. ábra. IC tranzisztor keresztmetszete.

A planár tranzisztort *kettős diffúzióval* állítják elő: az alaplemez (az ún. *szubsztrát*, vagy más néven hordozó) homogén, n-adalékolású szilícium. Ebbe először p-típusú adalékot diffundálnak azon a területen, ahol a SiO₂ ablakot hagy, és nem maszkol. Ez a mélyebben fekvő pn-átmenet. Az újabb diffúzió n-adalékkal történik egy kisebb mélységben. Az oxidrétegen nyitott ablak ekkor még kisebb. Az így létrehozott tranzisztor *npn-típusú*, és amennyiben pnp-t kívánunk létrehozni, a folyamat fordított.



17. ábra. Tranzisztorok helyettesítése diódákkal.

Már a pn-átmenetnél is láttuk, hogy fontos jellemző az adalékeloszlás mélységi függvénye, az adalékprofil. Mivel ez a felületi geometria ismeretében megengedi minden elektromos tulajdonság kiszámítását, a bipoláris tranzisztornál is fontos adat (18.ábra).



18. ábra. A planáris tranzisztor adalékprofilja.

Az n-alaplemez homogén, gyenge adalékolású ($10^{15} / \text{cm}^3$). Az első p-réteg mélyre hatol (3-4 mikron) és közepes koncentrációjú. A második n-réteg jóval sekélyebb, koncentrációja viszont nagy. Planáris struktúrában a felülethez legközelebb eső réteg az *emitter*, a két pn átmenet közti zóna a *bázis*, és az alaplemez a *kollektor*. Rajzábrán az emitter a nyíllal ellátott kivezetés, mely npn-tranzisztornál kifelé mutat. Az emittert és a bázist is a tranzisztorlapka felső felületén vezetjük ki alumínium fémmezéssel. A kollektor kivezetése a lapkának a tokra való felforrasztásával történik („állvány”).

Integrált áramkörben is planáris tranzisztort használunk, kis módosítással. A kollektor nem lehet azonos a hordozóval, különben ugyanazon integrált áramkörben kialakított eszközök kollektora elektromos kapcsolatban lenne. Ugyanezen ok miatt a kollektor kivezetése nem lehet lefele a szubsztrát felé, csak felfelé. Ekkor az eljárás annyival bővül, hogy a szubsztrát p-típusú, amelyben egy n-típusú szigetet hozunk létre és abban a kettős diffúziót. Így létrejön még egy pn-átmenet. Ha ide a szubsztrát és a kollektor közé záró irányú feszültséget kapcsolunk, áramvezetés gyakorlatilag nincs – szigetelés jön létre. Tekintettel arra, hogy a kollektorzóna gyengén adalékolts és a kivezetés áramútja hosszú, a kivezetés túl nagy soros ellenállást mutatna. Ezért kiegészítjük a struktúrát egy eltemetett (rejtett) réteggel, ami erős n-adalékolású és erőteljesen csökkenti a kollektoráram oldalirányú útjába eső ellenállást.

Integrált áramkörben sűrűn vannak az eszközök, így a négyzetes alak a kedvelt. Diszkrét eszközöknél a hengeres is használatos.

A hasznos terület a két pn-átmenet: az emitter és a bázis valamint a bázis és a kollektor közötti. Ez a zóna a *belső* (intrinsic) tranzisztor. A valóságos tranzisztorban vannak parazita hatások is.

5.3.1.1 Másodlagos jelenségek

A kollektor-bázis átmenetnek csak egy része áll szemben az emitter-bázis átmenettel, a többi része haszontalan, csak mint *kollektor-bázis parazita dióda* van jelen. Integrált kivitelnél a járulékos pn-átmenet a mélyben is káros hatású (lezárt állapotban is *van tértöltés kapacitás*, és egy pnp *parazita tranzisztort* is képez önmagában), valamint a *soros ellenállások*.

Ahhoz, hogy a két pn-átmenet ne legyen független és az eszköz tranzisztorként viselkedjen feltétele, hogy

- legalább az egyik szélső réteg (emitter) sokkal erősebben legyen adalékolt, mint a középső,
- a középső (bázis) réteg sokkal vékonyabb legyen, mint a kisebbségi töltéshordozók ún. diffúziós hosszúsága.

A legfontosabb másodlagos hatások tehát: CB parazita dióda, soros ellenállások, visszahatás (Early hatás), áramerősítés munkapontfüggése, áramkiszorítás, parazita kapacitások, és az erős frekvenciafüggés.

5.3.1.2 Tranzisztorhatás

Ha a fentiek teljesülnek, a „két dióda” együttese több lesz, mint két független pn-átmenet, működése. *Tranzisztorhatásnak* nevezzük azt, amikor az egyik pn-átmenet nyitó árama befolyásolja a másik átmenet záróáramát. A leggyakoribb üzemmódja a tranzisztornak a *normál aktív*. Ekkor az emitter oldali pn-átmenet nyitott, a másik lezárt.

A működés során az emitter által a bázisba injektált elektronok egy része rekombinálódik és csak a maradék jut el a kollektor-bázis (CB) átmenetig. A tranzisztorhatás akkor erős, akkor jó a tranzisztor, ha ez az áramösszetevő nagy, lehetőleg nem sokkal kisebb, mint a teljes emitter áram. E két áram hányadosa a legfontosabb paraméter: a (közös bázisú egyenáramú) *áramerősítés*:

$$A = \frac{I_{Cn}}{I_E}. \quad (8)$$

Cél, hogy A minél jobban közelítse 1-et. A kollektorban tehát egy, az emitterárammal arányos összetevő lép fel.

Veszteség, hogy az emitteráramból egy csekély mennyiség kifolyik a bázison. Ráadásul a bázisáram is juttat töltéshordozót az emitterbe (bár ez a kollektor áramra egyáltalán nem hat). Ez nagyságrendekkel kisebb az emitter által beinjektált hasznos árammal, de e kettő egymás ellen dolgozik. Mivel ez koncentrációfüggő, az emitter adalékolása jóval nagyobb kell legyen a bázisnál. Az *injektálási hatásfok* (*emitter hatásfok*) megadja, hogy a teljes emitter áram hogyan viszonyul a bázisba injektálttal:

$$\eta_e = \text{bázisba injektált elektronáram/teljes emitteráram}. \quad (9)$$

A kollektor felé tartó áram második problémája, hogy a bázisban egy része rekombinálódik. Ha a távolság túl nagy, akkor sok: ezért kell a bázisnak vékonynak lennie. A bázison áthaladó mennyiség a hasznos, ami elveszik az veszteség. Ezt számszerűen a *transzport hatásfok* adja meg:

$$\eta_{tr} = \text{kollektorig eljutott elektronáram/bázisba injektált elektronáram} \quad (10).$$

Az áramerősítés e kettő szorzata:

$$A = \frac{I_{Cn}}{I_E} = \eta_e \eta_{tr}. \quad (11)$$

A kérdés, mitől mozognak az elektronok a bázisban, mi készíti őket arra, hogy az emitterből a kollektor felé haladjanak? Ha az emitter elektronokat injektál a bázisba, ott az emitter felőli oldalon elektronsűrűség jön létre, ami diffúziós áramot indít meg. Az injektált elektronáram tehát diffúzióval halad. A lezárt kollektor-bázis átmenet az érkező kisebbségi töltéshordozókat átsodorja a túloldalra. A bázis kollektor felé eső részén ezért az elektronkoncentráció zérus, a két széle között a bázisban pedig lineárisan csökken. A bázisban felhalmozott elektrontöbblet töltését *diffúziós töltésnek* hívjuk. Járulékosan diffúziós kapacitáshoz is vezet, ami lassítja a működést. A gyorsaság kulcsa tehát a bázis keskeny mívolta, valamint ha „gyorsítjuk” az áramlást: térerősséget hozunk létre (ezzel sodródási áramot okozunk).

Hogyan hozunk létre térerősséget a bázisban? A tranzisztor kapcsaira adott feszültség az EB és CB pn-átmeneten fogynak megjelenni, a bázis belseje térerőmentes marad. Megoldás, hogy a bázis adalékolása inhomogén (helyfüggő): az adalékkoncentráció az emittertől a kollektorig csökken. A planáris gyártástechnológiánál ez automatikusan előáll (ld. adalékprofil). Járulékosan megszűnik a lineáris eloszlás a bázisban.

A tranzisztor kétféle konstrukcióban készülhet: *homogén* és *inhomogén* bázis adalékolással. Homogén esetben kizárólag a diffúzió hajtja át az elektronokat a bázison. Inhomogén esetben van sodródási áram is. Utóbbi előnyösebb, mert kisebb a bázisban a töltés, amitől az eszköz gyorsabb lesz, kisebb a diffúziós kapacitás és nagyobb az áramerősítés, jobb a transzport hatásfok.

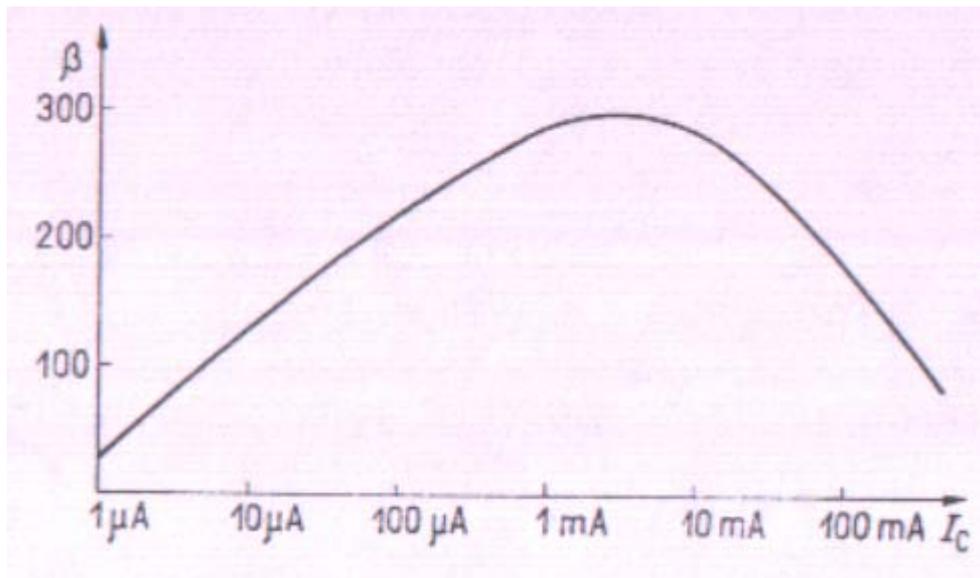
A tranzisztor lényeges tulajdonsága, hogy a kollektoráram a bázisáram többszöröse. Az erre bevezetett áramerősítési tényező a B (illetve a β):

$$B = \frac{I_C}{I_B}. \quad (12)$$

A B az egyenáramú, β pedig a *kisjelű áramerősítési* tényező:

$$\beta = \left. \frac{\partial I_C}{\partial I_B} \right|_{U_{CE}=\text{konst}}. \quad (13)$$

Általában B és β kissé tér el egymástól, azaz a kollektor és bázisáram között arányosság van. Kisáramú tartományban a kollektor áram valamivel gyorsabban emelkedik a bázisáramnál, de nagyobb áramoknál elmarad. Ebből adódik a jellemző karakterisztika.



19. ábra. Kisteljesítményű tranzisztorok áramerősítési tényezőjének jellegzetes áramfüggése (tipikus görbe).

Nagyobb frekvencián csökken az áramerősítési tényező. Azt a frekvenciát, ahol a tényező 3 dB-vel kisebb a kisfrekvenciás értéknél f_β határfrekvenciának nevezzük. Ezen felül az áramerősítés 20 dB/dekáddal csökken. Azt a frekvenciát, amelyen az áramerősítés egységnyi lenne f_T tranzitfrekvenciának hívjuk.

$$\beta_0 = \frac{f_T}{f_\beta}. \quad (14)$$

Az áramerősítési tényező kisebb frekvencián β_0 értékű. A tranzit frekvencia a kollektor áramtól függ, maximuma ott van, ahol β -nak is maximuma van. Az áramerősítés és a frekvencia szorzata az ún. *gain bandwidth product* (βf), amely f_β felett meggyezik a tranzit frekvenciával.

5.3.1.3 Üzem módok

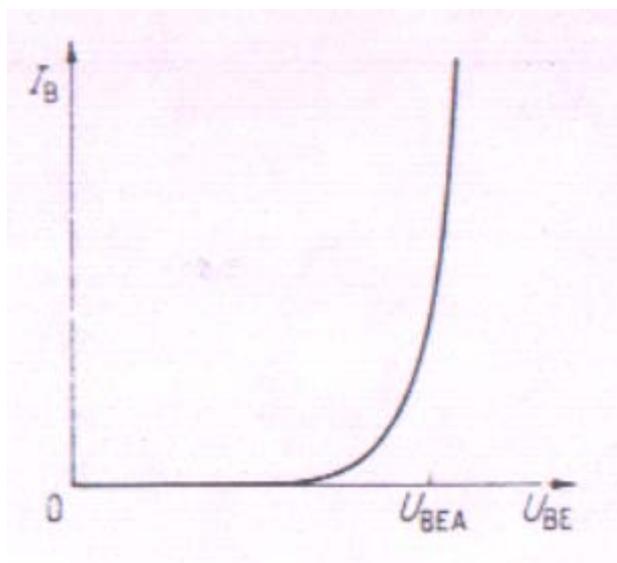
Már láttuk az *aktív, normál* működést a fentiekben. Fordított működéskor a kollektor-bázis nyitott és innen történik az injektálás: ez az *inverz aktív* üzemmód. Gyakorlatban az adalékolás meghatározza a struktúrát és a rétegek „szerepét”, elrontja a szimmetriát: nem működtetjük a planáris tranzisztorokat így.

Ha mindkét átmenet nyitó feszültséget kap, a tranzisztor *telítésben* van. Ilyenkor mindkét oldal injektál a bázisba elektront, ahol erős felhalmozódás jön létre, és kölcsönösen jut áram mindkét kivezetésre. Az eredő áramlás attól függ, melyik injekció volt erősebb, melyik nyitó feszültség volt a nagyobb.

Ha mindkét átmenet le van zárva, akkor *lezárásban* van a tranzisztor. Ilyenkor nincs tranzisztorhatás, nincs működés.

5.3.1.4 Karakterisztikák

A bemeneti karakterisztika összefüggést teremt a I_B bázisáram és az U_{BE} bázis-emitter feszültség között. Ez megfelel egy dióda nyitó karakterisztikájának.



20. ábra. A tranzisztor bemeneti karakterisztikája

Ez a diagram kevésbé függ a kollektor-emitter feszültségtől. Ez utóbbi hatást a v_r feszültségvisszahatási tényezővel jellemezzük. Megadja, hogy mekkora az U_{EB} megváltozása állandó bázisáram esetén, ha U_{CE} változik:

$$v_r = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} = \left. \frac{\partial U_{BE}}{\partial U_{CE}} \right|_{I_B = konst} \quad (15)$$

A gyakorlatban értéke elhanyagolható ($10^{-4} \dots 10^{-6}$). A *differenciális bemeneti ellenállás* megadja, hogy a tranzisztor mennyire terheli a vezérlőgenerátort:

$$r_{BE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \left. \frac{\partial U_{BE}}{\partial I_B} \right|_{U_{CE} = konst} \quad (16)$$

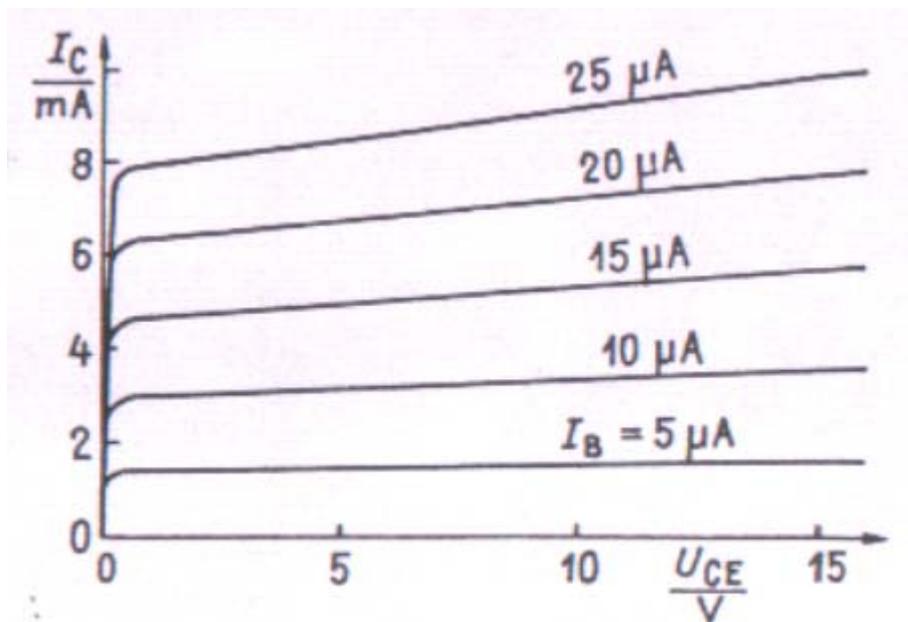
Növekvő bázisárammal ez az érték csökken, általában 400Ω - $400 \text{ k}\Omega$ körüli. Kiszámítása U_T -vel:

$$r_{BE} = \frac{U_T}{I_B} \quad (17)$$

A dióda működéséből adódóan a bázis-emitter feszültség hőmérsékleti tényezője:

$$\left. \frac{\partial U_{BE}}{\partial T} \right|_{I_B = konst} = 2 \dots 3 \frac{mV}{^\circ C} \quad (18)$$

A kimeneti karakterisztika a kollektor I_C árama és az U_{CE} kollektor-emitter feszültség között létesít kapcsolatot.



21. ábra. A tranzisztor kimeneti karakterisztikája

A görbesereg paramétere I_B , mivel I_C tőle függ. A kimeneti ellenállás igen nagy, és növekvő kollektorárammal csökken:

$$r_{CE} = \left. \frac{\partial U_{CE}}{\partial I_C} \right|_{I_B = \text{konst}} \quad (19)$$

Kisteljesítményű eszközöknél az értéke 10 kΩ-1MΩ.

5.3.2 Térvezérelt tranzisztorok

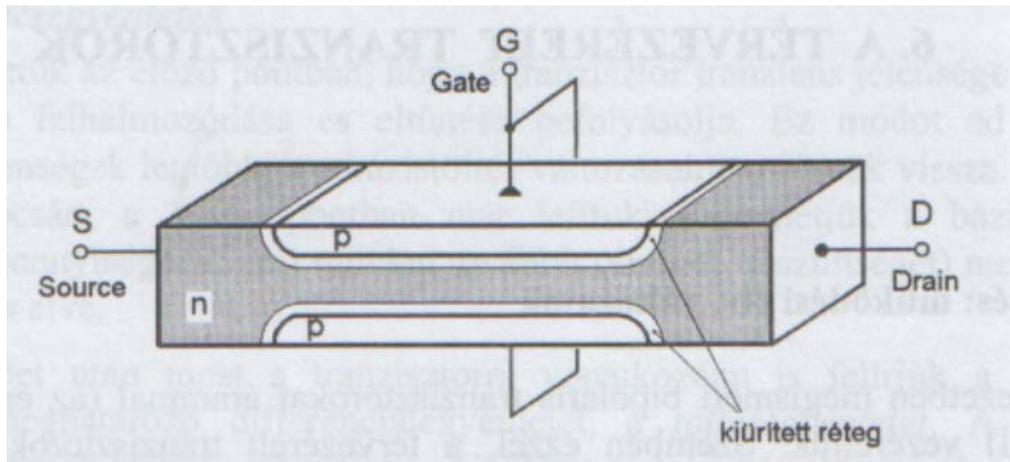
A bipoláris tranzisztort árammal (bázis vagy emitter) vezéreljük. Ezzel szemben a térvezérelt eszközt elektromos térerősség, feszültség vezérli. Ezek olyan ellenállásnak tekinthetők, amelynek keresztmetszetét, vagyis az ellenállásértékét egy az áramlásra merőleges térrel szabályozni tudjuk. Szemléletes hasonlat egy gumicsőben áramló víz, melynek áramlási sebességét, mennyiségét az áramlásra merőleges erővel szabályozhatjuk, ha ujjunkkal elszorítjuk a csövet.

5.3.2.1 J-FET

Lássuk, miként valósíthatjuk meg ezt félvezető szerkezettel. Vegyünk egy n-vezetési félvezető hasábot, a két végén ohmos kontaktussal (kivezetéssel). Ez egy félvezető ellenállás. Ha az ellenállás alsó és felső oldalán p-típusú réteget hozunk létre, azok kiürített rétege

leszűkíti az ellenállás keresztmetszetét, de áram még folyhat. Ha azonban a pn-átmenetre záró feszültséget adunk, akkor a kiürített réteg kiszélesedik és az áramvezetés keresztmetszete szűkül. Elegendően nagy feszültséggel az áram útját teljesen elzárhatjuk. Ehhez vékony szerkezet kell, mert a kétoldali kiürített rétegnek össze kell érnie. Az a gate-source feszültség, amelynél ez éppen bekövetkezik az eszköz *elzáródási feszültsége*, jele általában U_0 , értéke 2-4 V.

Az áram útjának azt a részét, ahol a keresztirányú erőtér hatást fejt ki, *csatornának* nevezzük. A csatorna egyik végén lévő kontaktus, ahonnan a töltéshordozók jönnek a forrás (*source*). A másik vége, ahol távoznak, a nyelő (*drain*). A vezérlőelektróda a *gate*.



22. ábra. Záróréteges tervezérelt tranzisztor elvi felépítése (J-FET).

A vezérlés az áramlásra merőleges térrel történik, jogos tehát a tervezérelt tranzisztor elnevezés (Field Effect Transistor = FET). A vezérlés gyakorlatilag nem igényel teljesítményt, a vezérlő pn-átmenet árama szinte elhanyagolható, ez eszköz bemeneti ellenállása 100 M Ω felett van.

A tervezérelt tranzisztorban a többségi töltéshordozók játszanak szerepet, ezért *unipoláris* tranzisztoroknak is nevezik (a bipolárisnál mindkét töltéshordozó mennyiség szerepet játszik). Ennek előnye, hogy a FET-ek hőmérséklet függése gyengébb.

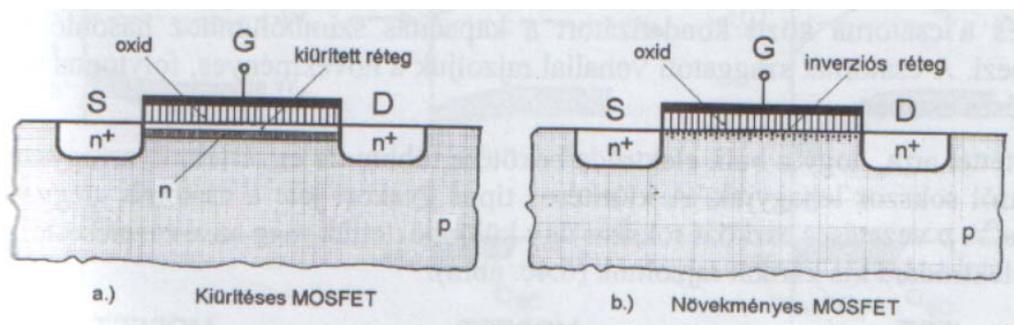
Az ábrán látható eszközben elektronok szállítják az áramot, ezért *n* vezetéses FET-nek hívjuk. A fordított elrendezés p-csatornával, n vezérlőelektródával a *p*-vezetéses FET. Az itt bemutatott FET az ún. *záróréteges (junction) J-FET*, ahol a vezérlést egy pn-átmenet látja el.

5.3.2.2 MOS-FET

A tervezérelt tranzisztorok másik fajtája a MOS-FET. Ekkor a vezérlés szerepét a pn-átmenettől átveszi egy *fém-oxid-félvezető kondenzátor* (metal-oxide-semiconductor, MOS). A 23. ábra/(a) ábrán látható struktúrában a p-szubsztráton n^+ diffúzióval hozzák létre a source és drain elektróda területét. Közöttük jóval gyengébb adalékolású *n* diffúziós csatorna készül. Ez idáig egy félvezető ellenállás. A csatorna felett azonban igen vékony szigetelő oxid és afelett vezetőelektróda van. Ez utóbbi most a gate. Ha rá negatív feszültséget adunk, taszítani fogja a csatornában az elektronokat, kiürített réteget hoz létre. Elegendően nagy feszültséggel a teljes csatorna elzárható, a tranzisztor nem vezet. Ezt itt is elzáródási feszültségnek nevezzük. Az

elv tehát ugyanaz, de most egy MOS-szerkezet hozza létre a kiürített réteget. Mivel a vezérlés a csatorna kiürítésével történik, *kiürítéses* (depletion mode) tranzisztornak nevezzük.

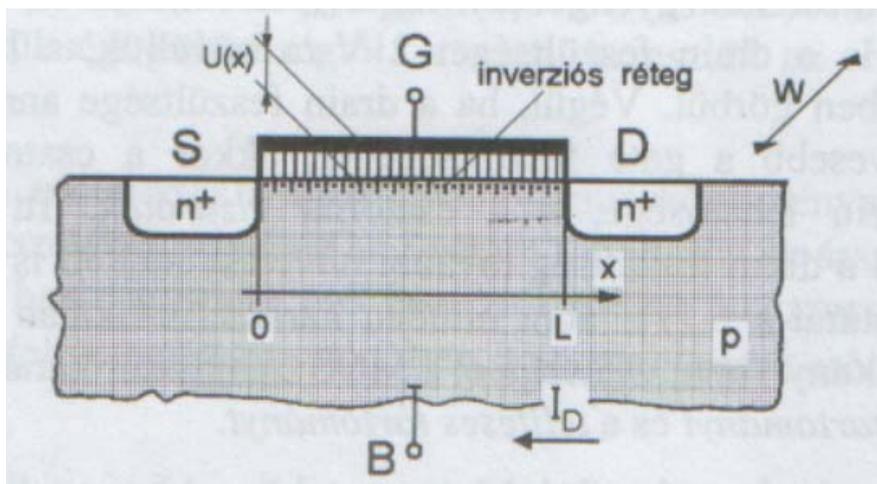
A 23. ábra/(b) ábrán a másik lehetséges kivitel látható. A különbség annyi, hogy nem hozunk létre a source és a drain között csatornát, de ez nem jelenti azt, hogy áram nem folyhat! Az áramfolyás lehetséges a félvezető eszközök egy különleges felületi jelensége, az *inverzió* folytán (ennek fizikai alapjait nem tárgyaljuk). Ha a vezérlőelektrodára elegendően nagy pozitív feszültség jut, a felületen, közvetlenül az oxid alatt olyan potenciálviszonyok alakulnak ki, hogy az eredetileg *p*-típusú anyagban az elektronok lesznek többségben. Az n^+ adalékolású source és drain területről a gate terület alatt igen gyorsan felgyűlnek az elektronok és kialakul a gate által indukált csatorna. Azt a gate feszültséget, ahol ez bekövetkezik *küszöbfeszültségnek* nevezzük (V_T). Értéke 0,4-0,7 V körüli. Ezt a változatot *növekményes* (enhancement mode) MOS-nak hívjuk, és manapság ez az elterjedtebb. Növekményes MOS-nál $U_{GS}=0$ esetén a csatorna zárt, kiürítésesnél nyitott.



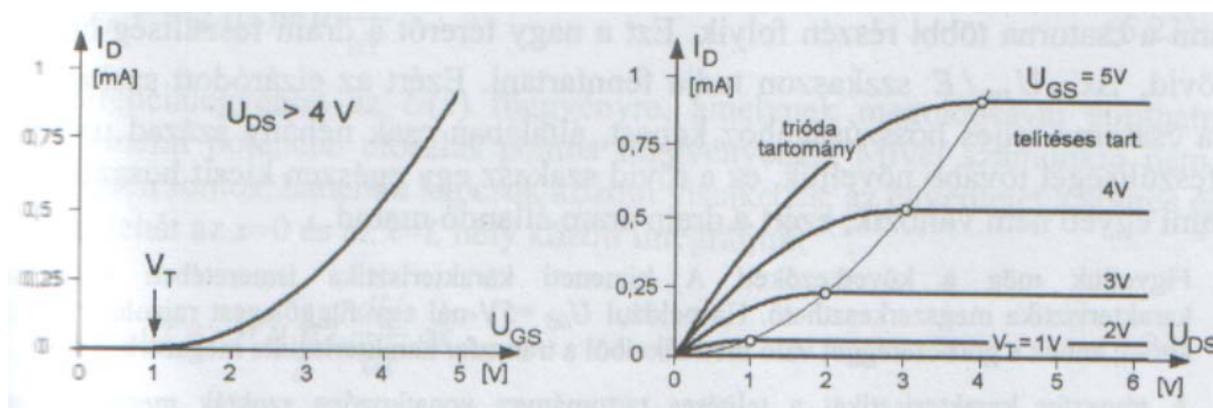
23. ábra. A kétféle MOS struktúra

A MOS nagy előnye, hogy még a J-FET-nél is nagyobb a bemeneti ellenállása. A gate alatti szilíciumdioxid szinte tökéletes szigetelő, így akár $10^{12} \Omega$ is lehet a bemeneti ellenállás. Ennek veszélye, hogy a gate az elektrosztatikus feszültségeket nem tudja levezetni, és az oxid átütésekor az eszköz tönkremegy (védő áramkörök szükségesek). A MOS szélsőségesen kicsi méretben is előállítható, a mai digitális áramkörök MOS csatorna hosszúsága 0,3-0,8 mikron, és várhatóan tovább csökken. Ügyeljünk arra, hogy a MOS eszköznek négy elektródája van, mert a szubsztrát (B, bulk) potenciálja is befolyásolja a működést.

A 24 és 25. ábrákon az n-vezetésű, növekményes MOS tranzisztor metszeti rajza, valamint karakterisztikái láthatók. Az első görbe a *transzfer* karakterisztika, amely a kimenet I_D áramát adja meg a U_{GS} vezérlő feszültség függvényében. A második a *kimeneti* karakterisztika, I_D árama most a kimeneti U_{DS} függvényében látható. Mivel ezek a vezérlő feszültségtől függenek, U_{GS} -el vannak paraméterezve.



24. ábra. N-vezetésű, növekményes MOS tranzisztor metszete.



25. ábra. N-vezetésű, növekményes MOS tranzisztor karakterisztikái.

A transzfer karakterisztikán $U_{GS} < V_T$ esetén az áram természetesen zérus, hiszen inverziós réteg nincs, felette nem-lineárisan nő, nagyjából négyzetesen. A kimeneti görbék jellegzetessége, hogy áthaladnak az origón, és annak néhány tizedvolts környezetében egyenesnek tekinthetők. Ekkor a csatorna ohmos ellenállásként viselkedik, melynek nagyságát a gate alatti inverziós réteg befolyásolja, ez pedig U_{GS} függvénye. A csatorna elzáródásakor megszűnik az inverzió, a görbe vízszintessé válik. A két pont közötti részeket egy vonallal összekötve megkapjuk a működés két fontos részét: a *trióda* és a *telítési* tartományt.

A MOS működési sebességét a kapacitásai korlátozzák, melyből legfontosabb a pn átmenetek töltés kapacitása. További parazitahatás: a pn-átmenet, mint dióda, a küszöb feszültség geometriafüggése és az ún. csatornarövidülés. A hőmérsékletfüggés általános érvényű állítása, hogy nagyobb hőmérsékleten a transzfer karakterisztika jobbra tolódik el, de egyben a küszöb feszültség kisebb lesz. A kiürítési eszköz csak annyiban különbözik ettől, hogy a küszöbfeszültség negatív, a transzfer karakterisztikát balra kell eltolni úgy, hogy $U_0 = -3$ V környékére essen.

5.3.3 Tranzisztorok jelölési rendszere

Európában manapság a szórakoztató készülékekben használatos diszkrét (nem integrált áramköri) eszközök jelölése két betűből és három számból áll. Az ipari és egyéb

felhasználáshoz három betűből és két számból. Az első betű itt is az alapanyagra utal (A germánium, B szilícium), a második a frekvencia viszonyokra (C hangfrekvenciás, D hangfrekvenciás végerősítő, F rádiófrekvencia, L rádiófrekvenciás teljesítmény, S kapcsoló, U kapcsoló-teljesítmény). A harmadik betű és a számok csupán megkülönböztetésre szolgálnak. Amerikában és más földrészen ettől eltérő a számozás.

5.3.3.1 A hőelvezetés

A tranzisztor zárórétegében hővé átalakult veszteségi teljesítményt a termikus egyensúly fenntartása miatt a környezetbe el kell vezetni. Kisebb veszteségi teljesítményű tranzisztoroknál általában elegendő a tok és a környezeti levegő közötti természetes hőátadás. Nagyobb veszteségek esetén hűtőlemezt, hűtőcsillagot vagy más hűtőtestet kell alkalmazni. A zárórétegben keletkezett hő főként a tokfelület vagy tokfenék révén kerül elvezetésre. A hővezetésre itt is a termikus ellenállást használjuk jellemzésre.

A tranzisztor megengedett *veszteségi teljesítményét* a maximálisan megengedett (záróréteg)hőmérsékletből, a fellépő maximális környezeti hőmérsékletből és a hőmérsékleti ellenállásból (R_{th}) határozhatjuk meg:

$$P_{tot\ max} = (T_{réteg\ max} - T_{környezet\ max}) / R_{thja} \quad (20)$$

A teljes egészében hővé alakuló *veszteségi teljesítmény*:

$$P_{tot} = I_C * U_{CE} + I_B * U_{BE} \quad (21)$$

Sok esetben az $I_B * U_{BE}$ tag elhanyagolható.

Az alábbi katalógus adatok jelenhetnek meg a tranzisztornál:

Üzemi hőmérséklet az a környezeti-, hűtőfelületi- vagy tokhőmérséklet, amelynél a tranzisztor elektromosan igénybe van véve.

Tokhőmérséklet a tranzisztor tokfelületének meghatározott helyén mért hőmérséklet termikus egyensúlyban.

Záróréteg hőmérséklet a tranzisztor zárórétege üzemben felvett hőmérsékletének térbeli középértéke. Lényegében a kollektorra vonatkozik, amelynek saját felmelegedése a legnagyobb.

Tárolási hőmérséklet a szállítás, raktározás, elektromos igénybevétel nélküli hőmérséklet.

Környezeti hőmérséklet a tranzisztor környezetének vagy önmelegedésének hatására a levegő termikus egyensúlyában mért hőmérséklet.

Hőmérsékleti ellenállásból háromféle létezik: záróréteg-környezeti (R_{thja}), záróréteg-tok (R_{thjc}) és tok-környezeti (R_{thc}), mindhárom termikus egyensúly esetén.

A katalógusok az első oldalakon elmagyarázzák, hogyan kell használni és a táblázatok milyen adatokat tartalmaznak.

5.3.3.2 A tirisztor

A tirisztorok kezdetben csak erősáramban kerültek felhasználásra, manapság gyengeáramban is. A hagyományos, ipari eszközök 100-1000 A értékűek és több ezer voltot is elbírnak 10 μ sec kapcsolási idővel. A gyengeáramú verzió 10 mA alatti vezérlőáramot igényelnek. (A triak lényegében két ellenkapcsolású tirisztor integrált változataként fogható fel).

Villamos határadatok:

- zárt állapotú és záróirányú ismétlődő csúcsfeszültség
- nyitott állapotú ismétlődő csúcsáram
- nyitott állapotú átlagáram határértéke
- nyitott állapotú áramlökés
- nyitott állapotú áram kritikus növekedési sebessége
- zárt állapotú feszültség kritikus növekedési sebessége

Villamos üzemi adatok

- nyitott állapotú áram átlagértéke
- nyitott állapotú áram effektív értéke
- nyitott állapotú minimális feszültség
- Tartóáram
- Gyűjtő feszültség és áram
- Bekapcsolási idő

Termikus adatok

- réteghőmérséklet
- Tokhőmérséklet
- Környezeti
- Üzemi
- Raktározási
- Belső hőellenállás
- Külső hőellenállás

Mechanikai adatok, körvonalrajz, tömeg, rázásállóság

Jelleggörbék:

- nyitott állapotú jelleggörbe
- veszteség görbe
- veszteség hőmérsékletfüggése
- bekapcsolási idő – áram jelleggörbe

Tokozás:

- műanyag
- hűtőtestre csavarozható műanyagtok
- fémtok
- tárcsatokozás (nagy telj)
- vízhűtött tok (nagy telj)

6. Mikroelektronika és technológia

6.1. Bevezetés

A gyártástechnológia az eszközök tulajdonságai szempontjából meghatározó. Láttuk a korábbiakban, hogy a felhasznált anyagok (anyagállandók: ρ , ϵ , μ) és a felületi kiépítés, geometriai méretek alapján határozzák meg az ellenállás, induktivitás, kapacitás értékét és az anyagok minősége döntő a pontosság és tűrés értékek szempontjából is.

Általánosan igaz, hogy annál drágább egy eszköz, minél jobb minőségű. Jobb minőséget pedig precízebb gyártástechnológiával lehet elérni.

Az eszközeinket már sok szempont alapján csoportosítottuk. A gyártás szempontjából a két leglényegesebb csoport a méret és a hordozóanyag alapján: a *diszkrét* elemek és az *integrált* áramköri elemek. A diszkrét elemeket mindenki jól ismeri, kezdetben csak így tudtunk eszközöket előállítani: hengeres ellenállás, téglalap alakú kondenzátor, hatalmas tekercsek, két- háromlábú aktív eszközök. Természetesen, a teljesítmény viszonyok erősen befolyásolják a technológiát: nagyfeszültségű technikához több kV-os tekercseket és ellenállásokat csak diszkrét elemekkel valósíthatunk meg. Ahogy a tudomány és a technológia fejlődött, létrejöttek az integrált áramköri elemek. Jellemzőjük, hogy nagyon kicsik, így a számítógépek miniaturizálásában és a mikroprocesszor (IC-k, chipek) kifejlődésében döntő jelentőségű volt (ld. bevezető: LSI, VLSI). Kezdetben a szoba méretű csöves számítógépekkel dolgoztunk, manapság a laptopok világában több milliószorosára nőtt a teljesítmény és számításkapacitás. Ezt az tette lehetővé, hogy a tranzisztort le tudtuk kicsinyíteni (a tranzisztor kapcsolóként szerepel és a négyzetcentiméterre eső száma határozza meg a technológia és a teljesítmény fokát). Manapság milliárdos nagyságú tranzisztort tudunk kialakítani egy cm^2 szilícium lapkából. A sűrűsödéssel együtt jár a melegezés is, manapság a processzorok hűtőventilátor nélkül nem képesek üzemelni!

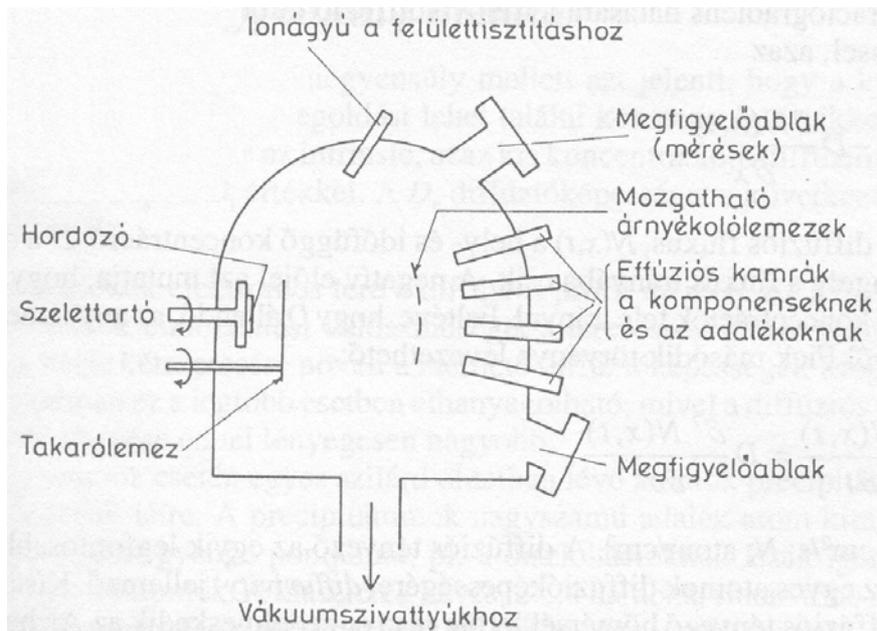
Az előző fejezetben már bemutattunk a planáris technológiával készült bipoláris- és tervezérelt tranzisztort, tekintettel arra, hogy manapság ez a legelterjedtebb. A fenti csoportosításban nem használtuk az aktív és passzív kifejezést. Ennek oka, hogy aktív és passzív eszköz egyaránt előállítható integrált áramkörben és diszkrét elemként is. Ne feledjük azonban, hogy a félvezetőgyártás és a félvezető alapú elemek technológiája az *aktív elemekre optimalizált*, így az a tény, hogy járulékosan milyen minőségű és méretű ellenállást, kondenzátort tudunk létrehozni – másodlagos. Ebben a fejezetben röviden megismerkedünk a félvezetőgyártás alapjaival, anyag- és felületkezelési eljárásaival, tokozási módokkal, alkatrészkészlettel és a passzív elemek kialakíthatóságával.

6.2 Félvezetőgyártás

A félvezetőgyártás négy technológiai lépése: adalékolás, rétegfelvitel, litográfia, és rétegeltávolítás.

Az adalékolás célja a tiszta félvezető donor- ill. akceptor atomokkal való feldúsítása. Ez történhet *diffúzióval* vagy *ionimplantációval*. A diffúzió során az atomok „bediffundálnak”, beszivárognak a szilícium kristályba. Ehhez viszonylag nagy hőmérséklet (1000°C) szükséges. A hordozólap azon részét, ahol nem kívánjuk a diffúziót létrehozni (ld. előző fejezet ábrái) ún. *maszk* réteget kell felvinni, ami a SiO_2 . Ahol tehát a szilícium-dioxid nem maszkolja a felületet és nem áll ellen a diffúzióknak, ott az adalékolás megvalósulhat. Ionimplantáció esetén az ionizált atomokat úgy hozzák létre a kristályban, hogy gyorsítóval

„belövik” az anyagba. Pontossága jobb, a hőmérséklet is kisebb, de roncsolhatja és károsítja a kristályt.



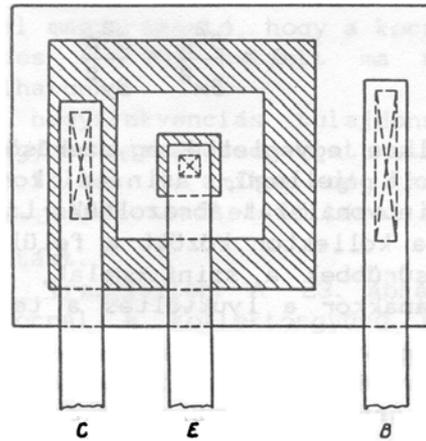
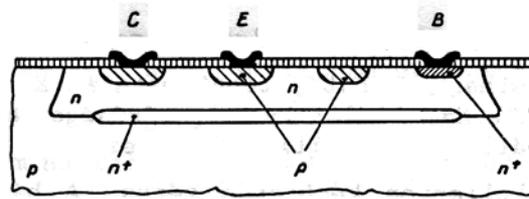
1. ábra. Berendezés ionágyúval.

A rétegfelvitel két eljárása: az *oxidáció* és az *epitaxiális rétegnövesztés*. Az oxidáció a kémiából már jól ismert jelenség. Bizonyos anyagok megfelelő hőmérsékleten (ez lehet szobahőmérséklet is) oxidréteget hoznak létre a külső felületükön, azaz a levegőben található oxigént megkötik. Ezek az oxidrétegek általában sötétes elszíneződést és villamos szigetelést hoznak létre. A szilícium felületén (dúsított) oxigén környezetében kb. 1000°C fokon tökéletes szigetelő anyag, SiO_2 jön létre. Felhasználjuk ennek következtében szigetelésre, MOS-technikában dielektrikumként (vékony oxid) valamint a fenti eljárásban maszkolóként (vastag oxid). Az epitaxiális rétegnövesztés jelentése: a felületen olyan Si-réteg növesztése (1200°C), ami az ún. „egykristályos” szerkezetet folytatja, de ugyanakkor kisebb adalékolású. Az egykristály kifejezés azt jelenti, hogy a kristály „egyben van”, abban kristályhatárok, élesen elkülönülő felülethatárok és szabályosság-ugrások nincsenek. A minősége nagyon jó.

A *litográfia* a mikroelektronikában azon technológia eljárások összessége, amelyekkel az áramkörök rajzolatait készítjük. A *mester adatforrásból* (ami lehet szoftveres vagy fizikailag elkészített ún. mestermaszk) *képátviteli* eljárással dolgozunk, ami lehet fény, elektron, röntgen vagy ionsugár. Lényegében arról van szó, hogy ahol a felületet nem maszkoljuk le fény ellen, ott a megvilágítással anyagváltozást tudunk elérni. Ez hasonlít a NYÁK-laborokban alkalmazott eljáráshoz, csak itt sokkal kisebbben zajlik az eljárás és az nem (csak) látható fényvel történik. Az áramkör felületén lévő rétegbe exponáljuk bele az ábra 1:1 másolatát (megvilágításra érzékeny lakkbevonat van a felületen). Legfontosabb technológiai jellemző a felbontás és a vonalszélesség.

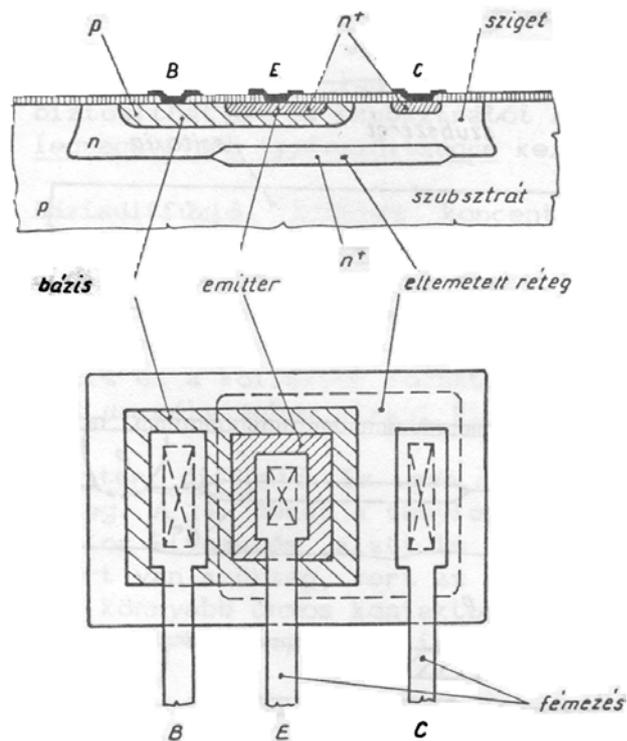
A rétegtávolítás gyakorlatilag *maratás*. Először a felületet meg kell tisztítani. Ezután következhet a felesleges technológiai réteg(ek) eltávolítása teljes egészében. Ha több, egymáson lévő réteg van, a szelektív eltávolítás során esetleg újabb marás elleni maszkot kell alkalmazni. Jellemzőek a HF-tartalmú (hidrogén-fluorid) marószerek, melyek a SiO_2 -t képesek úgy leoldani, hogy a Si-t nem bántják. A maszk leoldásához azonos sebességű marás kell, ami lehet ún. izotróp (minden anyagban azonos sebességgel) vagy anizotróp (irányfüggő sebességű marás). A marás lehet ezentúl nedves kémiai (folyadék marószerezrel) vagy száraz

marás. A száraz marás vagy fizikai, ahol nagy energiájú nemesgáz ionokkal bombázzuk a felületet illetve lehet reaktív, ahol ionizált vegyület a maró anyag és a reakciótermék illékony.



Lateralis pnp tranzisztor

2. ábra. Egy laterális pnp-tranzisztor rajza.



3. ábra. Tranzisztor kialakítása félvezetőlapka adalékolásával..

6.3 Fémes kontaktusok kialakítása

A diszkrét elemeknél a lábak a természetes kivezetések, melyek vezető anyagból vannak és létrehozzák a fémes kapcsolatot a hálózattal. Integrált áramkörökben nem csupán a hordozólapon belül, hanem a külvilág felé is létre kell hozni kapcsolatot (pl. más diszkrét elemekhez kell kapcsolódnia). Ez utóbbit a fémes kontaktusok kialakításával érjük el, és a feladat nem más, mint egy megfelelő fém-félvezető réteg létrehozása.

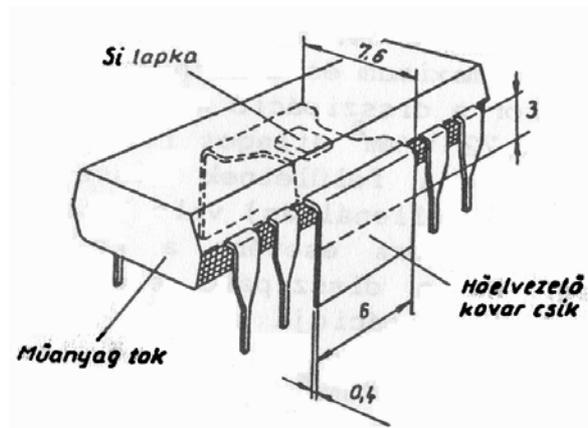
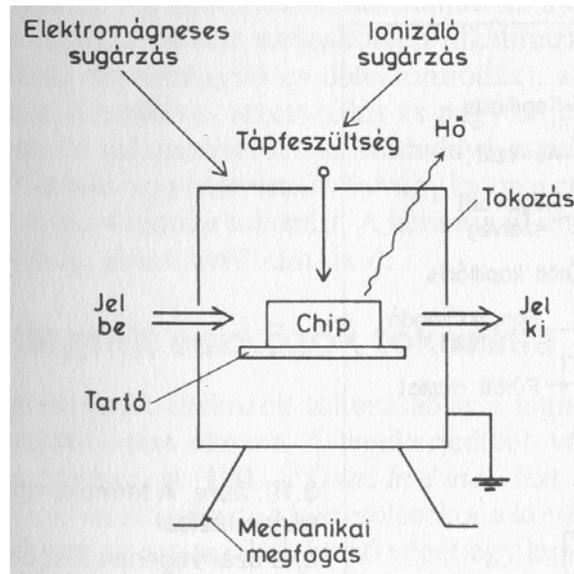
Ez a rétegekialakítás történhet párologtatással, porlasztással, kémia leválasztással, valamint molekulásugaras epitaxiával. A felhasznált fémes anyagok fémes jellegű nitridek vagy szilicidok. A kontaktus villamos szempontból lehet egyenirányító-jellegű (ún. Schottky kontaktus) vagy nem egyenirányító-jellegű (ún. ohmos). Ez utóbbihoz komolyabb technológiai felkészültség és lépések kellenek, így drágább eljárás.

A Schottky-kontaktusok elterjedtebbek. Kiválóak mikrohullámú felhasználásban, impulzusüzemben és nagy teljesítményű áramkörökben. Tulajdonságait az ún. potenciálgát magassága szabja meg. Jellemzője az I-U-karakterisztika, ami erősen hőmérsékletfüggő, valamint a C-U adalékfüggő karakterisztika.

Az ohmos kontaktus I-U karakterisztikája lineáris, szimmetrikus, ellenállása kicsi. A fém-félvezető átmenet az eszköz belsejében eltérő sávszerkezetű lehet: vagy ún. keskeny Schottky-gátas vagy olyan, ahol a Schottky-gát teljesen meg is szűnik. A keskeny gátas az elterjedtebb, mely szobahőmérsékletű felhasználáshoz nagy koncentrációjú adalékolást és hőkezelést igényel.

6.4. Tokozás

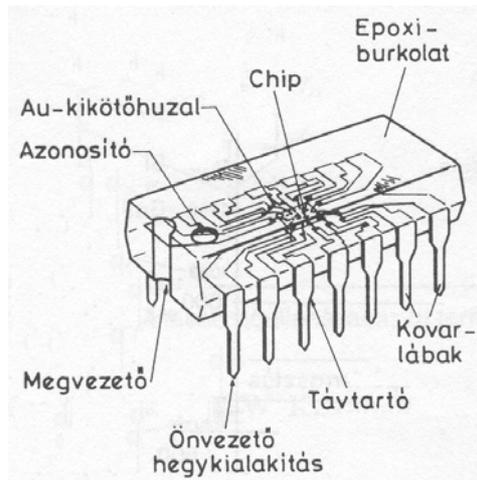
A tokozás feladata többszörös. Szerves része a gyártástechnológiának és a tervezésnek. Fontos továbbá, mert az árat alapjában határozza meg, előfordulhat, hogy a tok ára sokszorosa a chip árának! Kevés szabvány létezik. A tok anyaga lehet aktív eszközök számára üveg, fém, műanyag, fém-kerámia (AlO). Integrált eszközökhöz jellemzően a chip-kivetelű ún. Dual-In-Line (DIL) tokozást alkalmazzuk, az eszköz két oldalán álló láb-sorozattal. Amennyiben tartóra is szereljük a chipet, „kiszereles”-ben kaphatók az eszközök. A legfontosabb paramétere a toknak a *hővezetési ellenállása*, hiszen ezen keresztül kell leadni a hőt. Természetesen, ahogy a 4. ábra is mutatja, ellen kell állnia a külső elektromos és ionizáló sugárzásnak, valamint biztosítani kell a megfelelő jel, tápfeszültség, földelés kivezetéseket is.



4. ábra. A tokozás szerepe és megvalósítása chipek esetén.

6.5 Az integrált áramkörök alkatrészkészlete

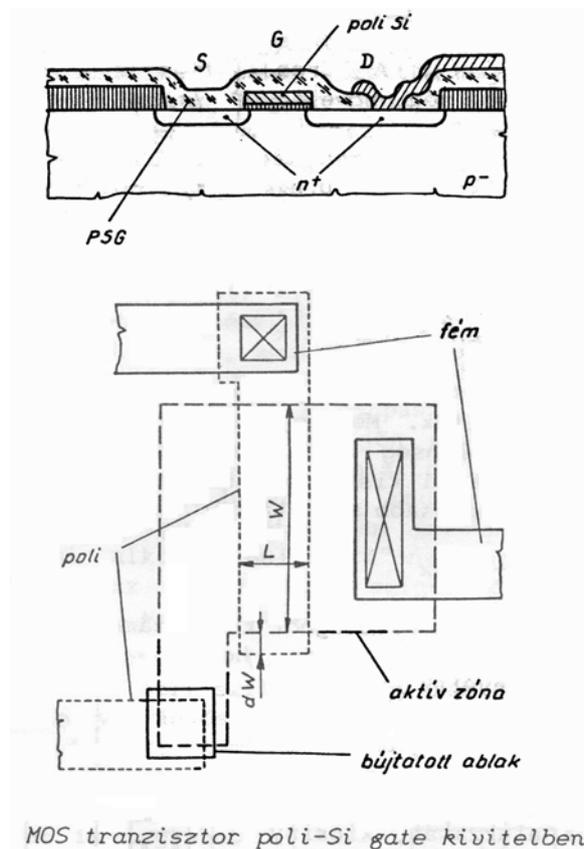
A már megismert planáris technológia Si-lap felületén alakítja ki az alkatrészeket. A készletek korlátozottabb értéktartománnyal bírnak, mint diszkrét elemek esetén. Külön tárgyalandók a MOS-alapú és a bipoláris alapú alkatrészek.



5. ábra. Integrált áramköri chip-tok.

6.5.1 MOS alapú alkatrészek

A tranzisztorok jellemzően nagyon kicsik, a többi elem nagy. Kapacitás a 0,1-10 pF tartományban hozható létre, ellenállásokat csak speciális esetekben alakítunk ki. A technológia jellemzője, hogy *szinte minden feladatot a tranzisztorok látnak el*, így nagyon sok kell és van is belőlük. Ebből következően a technológia optimalizálása is erre történik. A gate elektróda jellemzően fémes vagy ún. polyszilícium-gate elektróda (6.ábra).



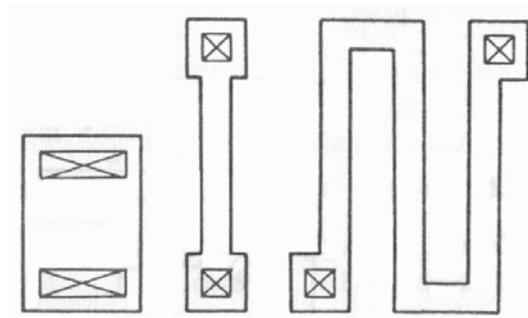
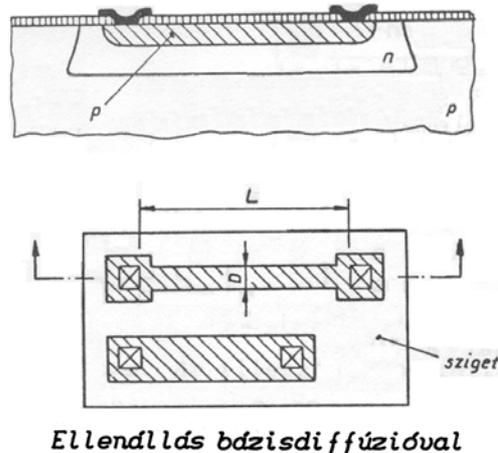
6. ábra. MOS tranzisztor polyszilícium-gate kivitelben.

A kondenzátor dielektrikuma a már megismert SiO_2 . A felső fegyverzet a fémezés, az alsó fegyverzet az n-diffúziós réteg (p^- a szubsztrát). Egy cm^2 -re kb. 400 pF esik. A méretekre jellemző, hogy egy darab 4 pF-os kondenzátor helyére több száz tranzisztor alakítható ki. A SiO_2 soros ellenállásával valamint a pn-réteg közötti parazita pn-átmenettel számolni kell (C_T) A vezetékek szerepét a belső fémezés vagy polyszilícium látja el. A szórt kapacitás és a soros ellenállás nagy lehet ($\text{k}\Omega$), amely tranziens működésben gondot okozhat. Tekintettel a kis méretekre és nagy sebességre a késleltetési idők fontosak lehetnek (ns-nál nagyobb már zavart okozhat).

6.5.2 Bipoláris alapú alkatrészek

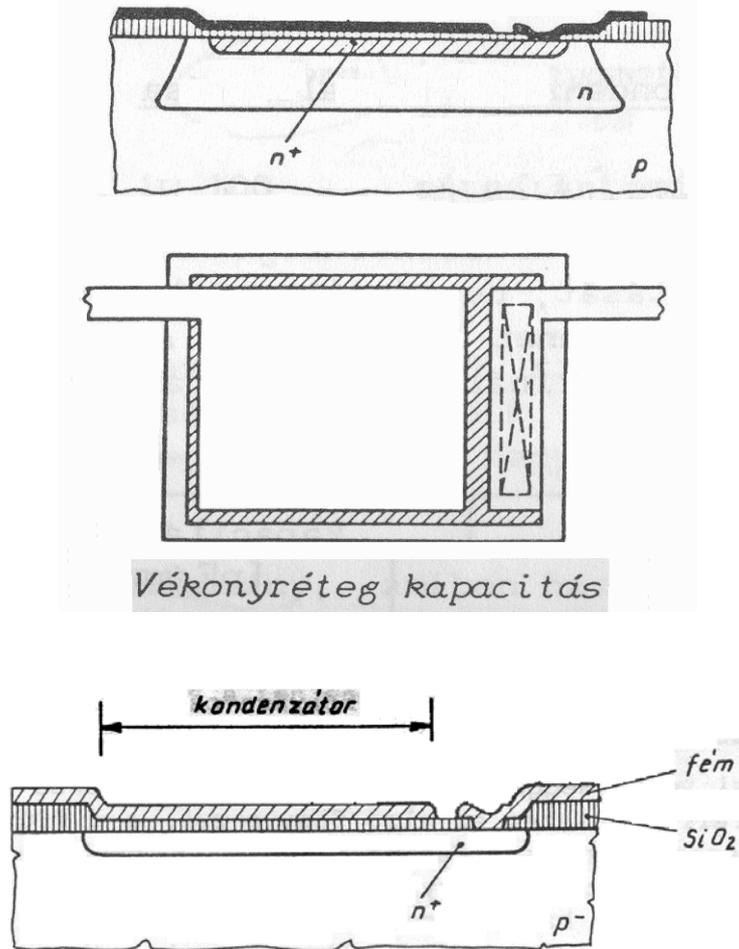
Ellenállás, kondenzátor és aktív eszközök alakíthatók csak ki, induktivitás nem. Tekintettel arra, hogy a tekercs szerepét a legtöbbször kiválthatjuk kondenzátorral is, induktivitásokat soha nem állítunk elő integrált áramkörökben.

Az optimalizálás npn-tranzisztorra történik, a többi eszközt ezzel a technológiával alakítják ki. Diódához a tranzisztor pn-átmeneteit használják ki. Ellenállást bázisdiffúzióval hozunk létre. Minősége nem túl jó. Az n-rétegbe egy p-típusú csíkot hozunk létre diffúzióval, melynek két végét kivezetjük, a pn-átmenetet pedig lezárjuk. Értékét a geometria határozza meg (a hosszúság). Jellemzően a „négyzetes ellenállást” szokták megadni értéknek: adott felületnek mekkora az ellenállása. Az elérhető értékek $50\Omega - 10\text{ k}\Omega$ között vannak. A kialakítás lehet egyenes „csont” alakú illetve *meander*.



7. ábra. Meander és ellenállás kialakítás bázisdiffúzióval.

Kondenzátort egy lezárt pn-átmenet C_T kapacitásból hozunk létre. Ez lehet az emitter-bázis között (jobb) vagy a kollektor-bázis között (kicsi). A kialakítás másik lehetősége a vékonyréteg kondenzátor, fém-oxid dielektrikummal. A felső fegyverzet ekkor a fémezés, az alsó a jól vezető emitter diffúzió. Maximum 10 pF érhető el, kb. 300-500 pF/mm² felületegységi kapacitás mellett.



8. ábra. Kondenzátor és kapacitás kialakítása integrált áramkörben.

6.6. Integrált tranzisztorok villamos tulajdonságai

Diszkrét alkatrészeket planáris technológiával állítunk elő. Integrált áramköri elemnek nevezzük a chip-kivitelű, IC tranzisztorokat, amelyekből tipikusan többet alakítunk ki egyszerre és helyezünk el egy tokban (belső villamos összeköttetéseket is kialakítva).

MOS eszközöknél különböző elnevezéssel illetjük a Si felületén kialakított oxidrétegeket vastagságuk és céljuk alapján. A csatorna feletti oxidréteg neve *gate-oxid*, vastagság 0,1 μm alatti, ezért nevezzük „vékonyoxid”-nak is. Az oxid réteg az aktív zónán kívül vastagabb, 0,6-1 μm vastag. Célja, hogy az aktív rétegen kívül ne legyen parazita tranzisztor, rövidzár. Ez a „vastagoxid” ellenáll még a 30-40 V feszültségnek is, neve *field-oxid*.

Amennyiben a tipikus, alumínium-gate elektródás fajtákat vizsgáljuk, megállapíthatjuk, hogy a tranzisztor küszöb feszültsége elég nagy, 2-3 V körüli. Ehhez a szokásosnál nagyobb, 9-12 V körüli tápfeszültségre van szükség, ami ahhoz vezet, hogy a TTL-áramkörökkel ezek az eszközök nem kompatibilisek.

A két legfontosabb geometriai méret a W csatornaszélesség és az L csatornahosszúság. A tranzisztor árama a W/L viszonytal, míg gate kapacitása a XL szorzattal arányos. Két parazita dióda található meg: egyrészt a source és a szubsztrát, másrészt a drain és a szubsztrát között. Noha ezek üzemi állapotban lezártak, a C_T feszültségfüggő tértöltés kapacitás miatt lassítják a működést.

Bipoláris tranzisztoroknál a maximális áramot az áramkiszorítás határozza meg. Az emitter mérete döntő jelentőségű, mert annak hasznos (bázis felé eső) élére kb. 1,5 A/cm eshet. *Kisáramú* tranzisztor emitterméretét a technológia csíkszélessége szabja meg. Például a 6 μm csíkszélességhez mA alatti áramok tartoznak. *Közepes* áramú tranzisztoroknál az emitter hosszú csík formájú, mindkét végén báziskivezetéssel, ezzel is növelve a hasznos felületet. Az elérhető maximális áram 12 mA. Nagyáramú tranzisztoroknál több, egyforma hosszú emitter csík kerül kialakításra, melyeket villamosan párhuzamosan kapcsolunk. Minden csíknak két báziskivezetése van a végén. A báziscsíkok és az emitter csíkok „fésűsen” vannak elhelyezve a jobb érintkezés céljából. A bipoláris tranzisztorok felső határfrekvenciája nem túl magas, 200-500 MHz. A letörési feszültséget a bázis-emitter határozza meg, melynél az érték jóval kisebb, mint a kollektor-bázis között. Oka a sokkal erősebb adalékolás a bázis és az emitter között. Előbbi 6-8 V, míg utóbbi 40-50 V körüli, így ez a nagy érték ritkán léphető át. A legfontosabb parazitahatások: C-B dióda, amely rontja a kapcsolási tulajdonságokat; a kollektor-szubsztrát közötti lezárt pn-átmenet tértöltés kapacitása; a kollektor soros ellenállása, mely a határfrekvenciát rontja; és a szubsztrát felé eső parazita, járulékos pnp-tranzisztor (amennyiben npn-t gyártottak).

A pnp-tranzisztor kialakítása analóg áramkörökhöz indokolt, míg digitális, logikai-kapu IC-hez az optimális npn-tranzisztor is elégséges. Ezek nem komplementer eszközök, a pnp-típus sokkal rosszabb minőségű: az áramerősítése kisebb, nagy a bázisvastagság és rosszak a nagy frekvenciás tulajdonságok is. Az ún. *laterális* pnp-tranzisztoroknál az npn-gyártásánál „oldalirányban” létrejövő járulékos pnp-rétget használják ki. Ennek kollektora gyűrűbe veszi az emittert, mert az minden irányban injektál, és így több elektron fogható be. A transzport hatásfok javítható, ha a bázisszélességet és/vagy az emitter méretet csökkentjük, valamint az epitaxiális rétegvastagságot növeljük. Mindezek hatására mára, a korai alig 10 körüli β értéke 40-50 körülre növelhető. A másik lehetséges kiviteli forma a *vertikális* pnp-eszköz, ahol a szubsztrát felé eső, az előbbieken parazitának tekintett részt használjuk ki. Helycsökkentés céljából előfordul még a *több kollektoros* fajta is, például közös emitterrel és bázissal rendelkező két kollektoros tranzisztor-pár, amelyet áramtükörnek lehet használni.

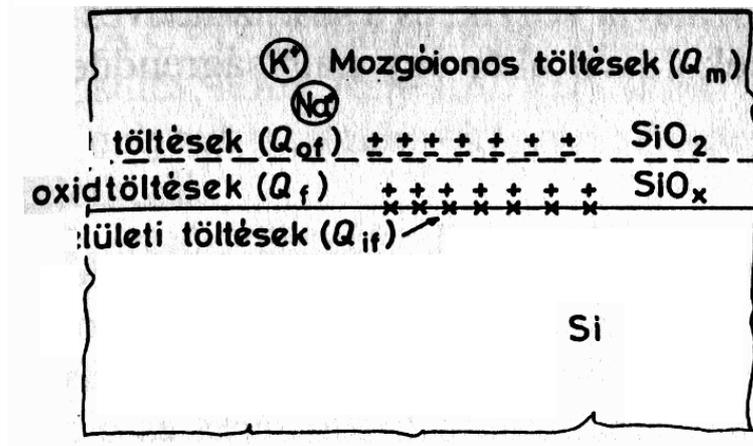
6.7. A SiO_2 tulajdonságai

Láthattuk, hogy a szilícium-dioxid felhasználhatósága sokoldalú. Lényegében amorf (nem szabályos alakú) kvarcüveg, termodinamikailag instabil, de az átkristályosodás 1000 fok alatt nem jelentős. Kiváló dielektrikum, kemény, sűrű, kémiailag stabil és a Si-hoz jól tapad.

Elsősorban *maszkoló* anyagnak használjuk fel. Szelektív diffúzióhoz „letakarja” a megfelelő felületet néhány száz nm vastagságban. Azonos hőmérséklet és idő alatt alig megy át rajta adalékatom. Amennyiben nem szelektív a maszkolás, ügyelnünk kell arra, hogy alumínium és gallium ellen nem maszkol.

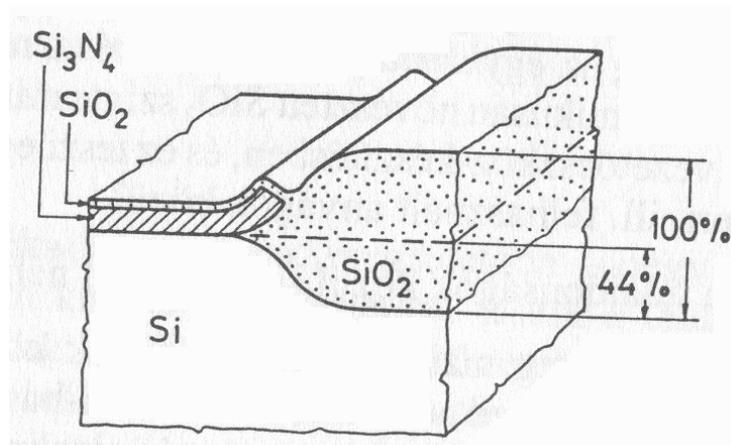
Az *elektromos tulajdonságait* a határfelületi töltések szabják meg. Ezek a Si tiltott sávjában vannak és kölcsönhatnak a szilíciummal (az oxidáció által le nem kötött szabad kötések).

Léteznek a fix oxidtöltések is, melyek pozitívak és a Si-SiO₂ határán vannak. A mozgó oxidtöltések szintén pozitívak, feszültség hatására mozognak is, így őket le kell kötni. Az oxidba fogott töltés lehet negatív és pozitív is. Az oxid károsodhat nagy áram vagy ionizáció során.



9. ábra. Mozgóionos töltések: oxid- és felületi töltések.

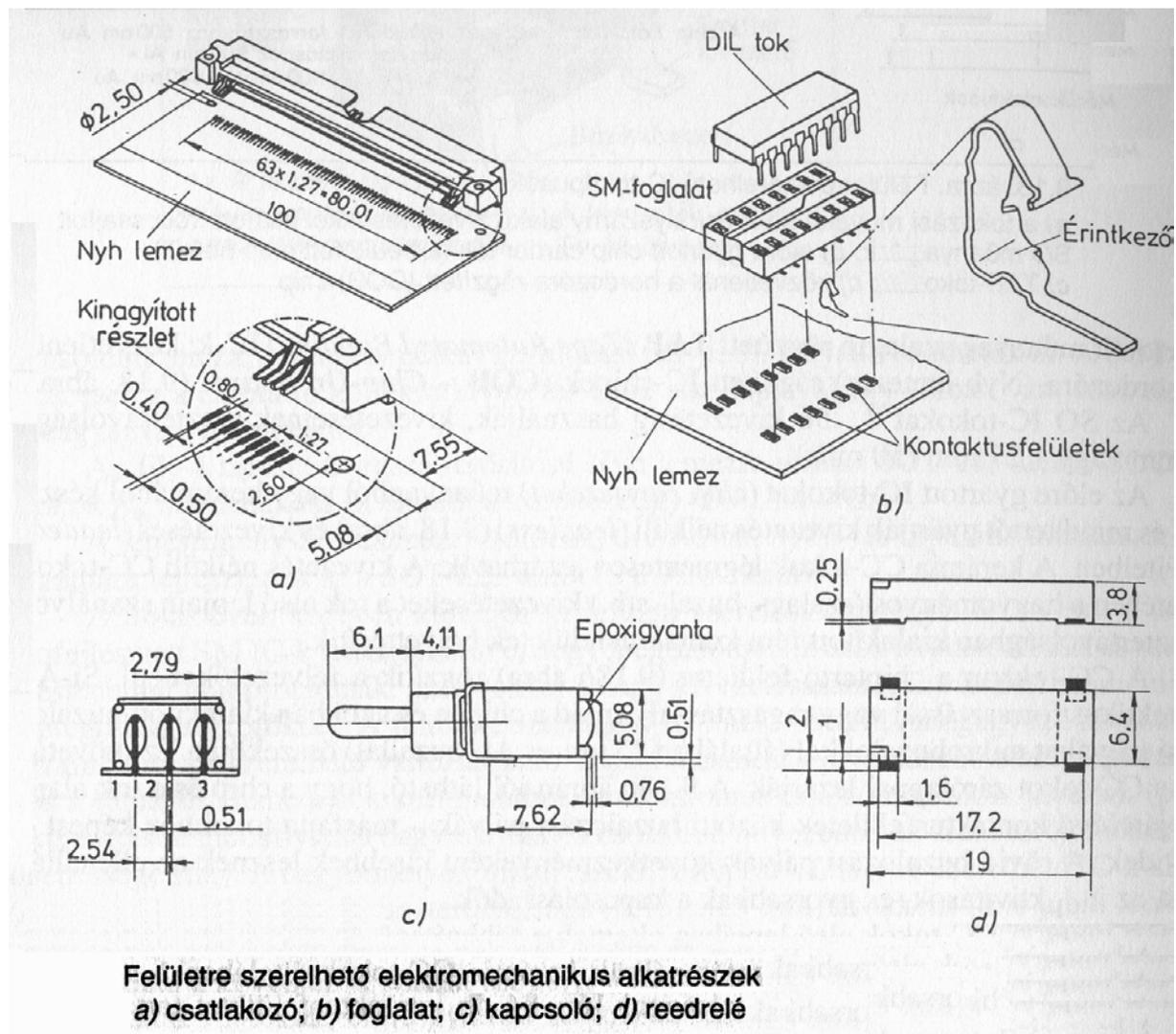
A termikus oxidáció következtében a Si-SiO₂ határfelület elmozdul a Si belseje felé és ez a Si adalékatomok *újraeloszlásához* vezet. A határ két oldalán lévő adalékkoncentráció aránya a szegregációs állandó. A határfelület dúsulhat is (foszfor esetén) vagy ritkulhat (bór). A jelenség függ a diffúzió sebességétől és az oxidnövelés sebességétől is. Az elektromos tulajdonságok romolhatnak az oxidáció okozta illeszkedési illetve kristályrácshibák okán (pl. a pn-átmenet növekvő záróárama zajt okoz).



10. ábra. Szilícium-dioxid kialakítása a felületen.

6.8. Csomagolás, szállítás

Az eszközöket függetlenül attól, hogy diszkrét vagy aktív, gyártás után csomagolni és szállítani kell. Ezek különböző lehetőségeit mutatja az alábbi két ábra. Látható, hogy elsősorban nem a funkció, hanem a méret, elrendezés, lábázat kialakítása a meghatározó.

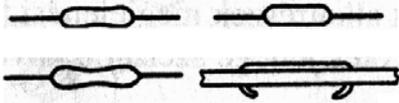


11. ábra. SMD (felületre szerelhető) alkatrészek képe.

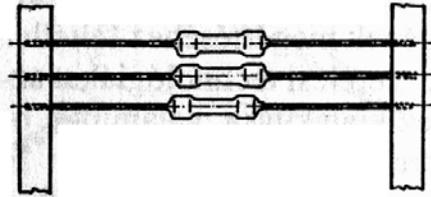
Alkatrésztípus

Csomagolásmód

Axiális kivezetésű



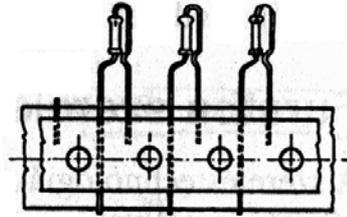
Kétoldalas hevederezés



Radiális kivezetésű



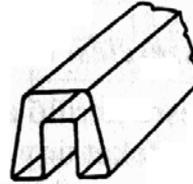
Egyoldalas hevederezés



Integrált áramkör



Csőtár



A huzalkivezetéses alkatrésztípusok csomagolási módja

12. ábra. Különböző csomagolási módok.

7. Irodalomjegyzék

- [1] Tóth, G. *Bevezetés a kvantummechanikába*. Műegyetemi Kiadó, 1993. (J4-958)
- [2] Gribbin, J. *Schrödinger macskája - kvantumfizika és valóság*. Talentum Tudományos Könyvtár, Akkord kiadó, 2001.
- [3] Simonyi, K. *Elektronfizika*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1965.
- [4] Pach, Zs.P. *Komplex függvénytan*. Műegyetemi Kiadó, 1994. (J5-901).
- [5] Moldoványi, Gy. *Elektrotechnikai számítások*. Táncsics kiadó, Budapest, 1969.
- [6] Long, J. D. *Korszerű elektronikus áramkörök tervezése*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1972.
- [7] Valkó, I.P., Tarnay, K., Székely, V. *Elektronikus eszközök I*. Műegyetemi Kiadó, 1993. (J5-1367)
- [8] Székely, V. *A monolitikus integrált áramkörök alkatrészei*. Műegyetemi Kiadó, 1992. (J5-5003)
- [9] Mojzes, I. *Mikroelektronika és elektronikai technológia*. Műszaki könyvkiadó, 1995.
- [10] Hainzmann J., Varga, S., Zoltai, J. *Elektronikus áramkörök*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1992. (J-44570)
- [11] Fodor Gy. *Hálózatok és rendszerek analízise*. Műegyetemi Kiadó, 1993. (J-55014, 15, 16)
- [12] Géher, K. *Lineáris hálózatok*. Műszaki Könyvkiadó, 1968.
- [13] Magyar, B. *Tranzisztor-atlasz*. Műszaki Könyvkiadó, 1976.
- [14] Lambert, M. *Tirisztor- és Triakatlasz*. Műszaki Könyvkiadó, 1987.
- [15] Székely, V: *Elektronika I. Félvezető Eszközök*. Műegyetemi Kiadó, 2001. (J-55054).
- [16] Siemens Halbleiter-Datenbuch (Industrie Typen)
- [17] Siemens Datenbuch Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren
- [18] Siemens Datenbuch Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren
- [19] U. Tietze, Ch. Schenk: *Analóg és digitális áramkörök*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.