

MODULÁRAMKÖRÖK ÉS KÉSZÜLÉKEK

Moduláramkörök alapvető építőelemei

Gross Péter

Hardware fejlesztő, ARH Informatikai Zrt.



E-mail: peter.gross@arh.hu

Utoljára módosítva: 2016. 10. 09.



BMEETT
ELEKTRONIKAI TECHNOLÓGIA TANSZÉK

BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS
DEPARTMENT OF ELECTRONICS TECHNOLOGY

Az előadás tartalma

1) Félvezető eszközök

- Dióda típusok
- Bipoláris tranzisztor
- MOSFET, IGBT

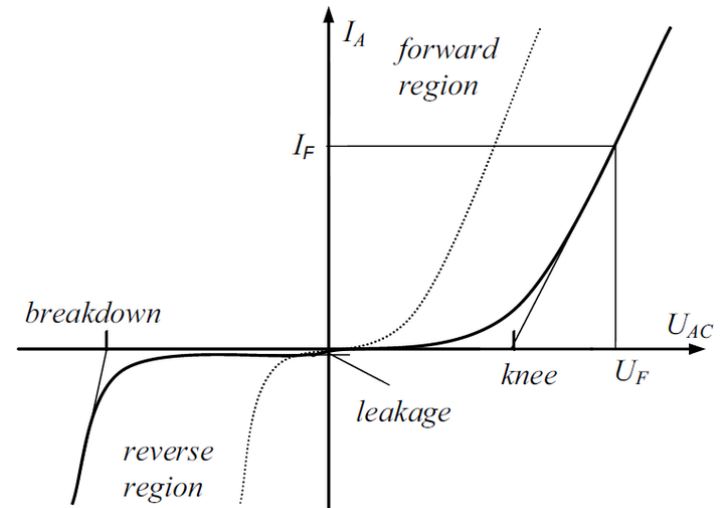
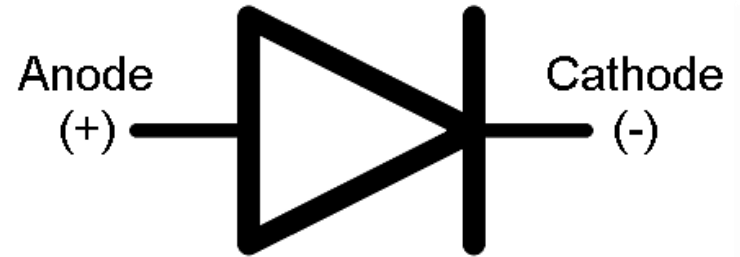
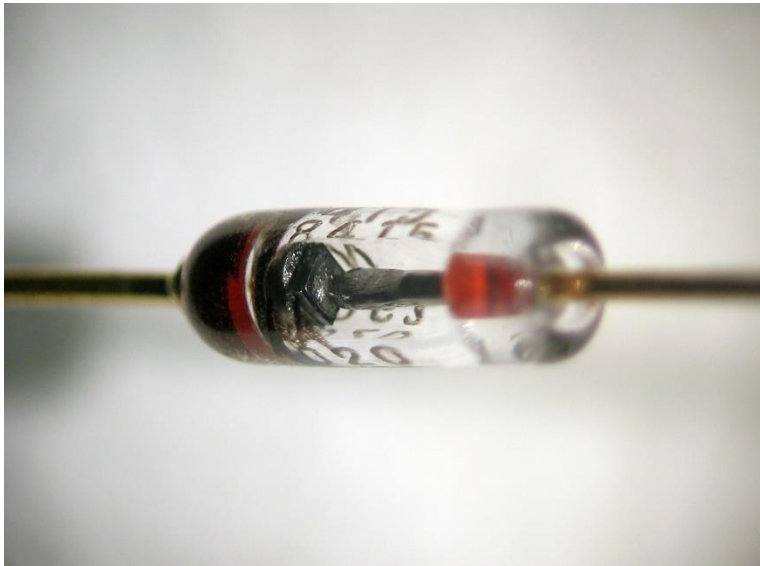
2) Tranzisztor és MOSFET alkalmazásai

- Kapcsoló üzemmód
- Lineáris üzemmód

3) Lineáris erősítők

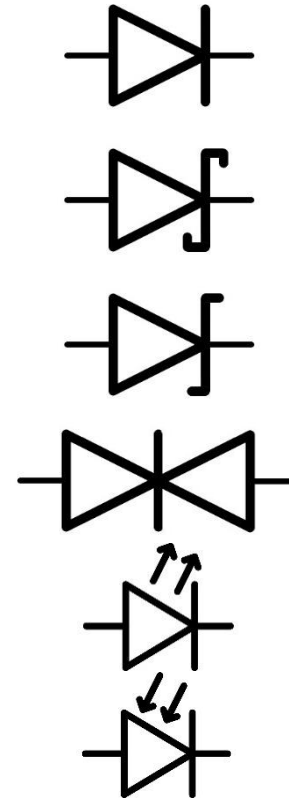
- Differenciálerősítő
- Lineáris erősítők felépítése

Félvezető eszközök: dióda



A leggyakrabban használt diódák

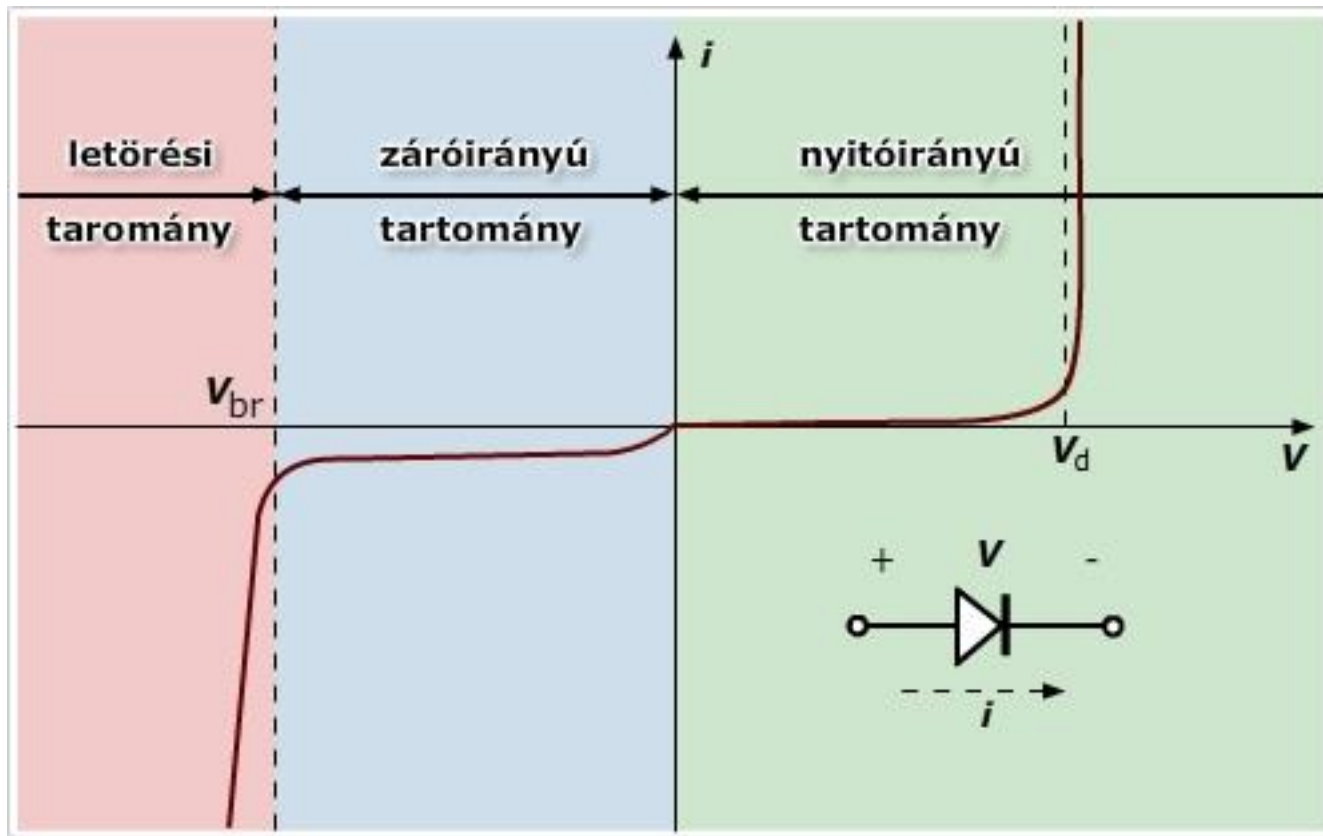
- Egyenirányító dióda
- Schottky-dióda
- Zener-dióda
- Tranziens szupresszor
- Fénykibocsátó dióda (LED)
- Fotodióda



Egyenirányító dióda

- Egy P-N átmenet
- Szilícium dióda esetén egy „P” és egy „N” típusú félvezető réteg
- 0,6-0,7V nyitó feszültség
- Akár több ezer Voltos záróirányú feszültség
- Olcsó, elterjedt
- A magas nyitó irányú feszültség miatt magas disszipáció
- Legfontosabb paraméterek: nyitófeszültség, maximális áram, maximális teljesítmény, nyitási/zárási idők

Egyenirányító dióda karakterisztika



Schottky-dióda

- A P-N átmenet egy „P” típusú félvezető és egy fém találkozásánál található
- Keskenyebb kiürített réteg
- 0,3-0,4V nyitó feszültség
- Alacsony záró irányú feszültség (maximum néhány száz Volt)
- Felépítéséből adódóan gyorsabb működés
- Főként tápegységekben használatos
- A korszerű gyártástechnológiának köszönhetően sok helyen kiváltotta a közönséges egyenirányító diódát
- Legfontosabb paraméterek: nyitófeszültség, maximális áram, maximális teljesítmény, nyitási/zárási idők

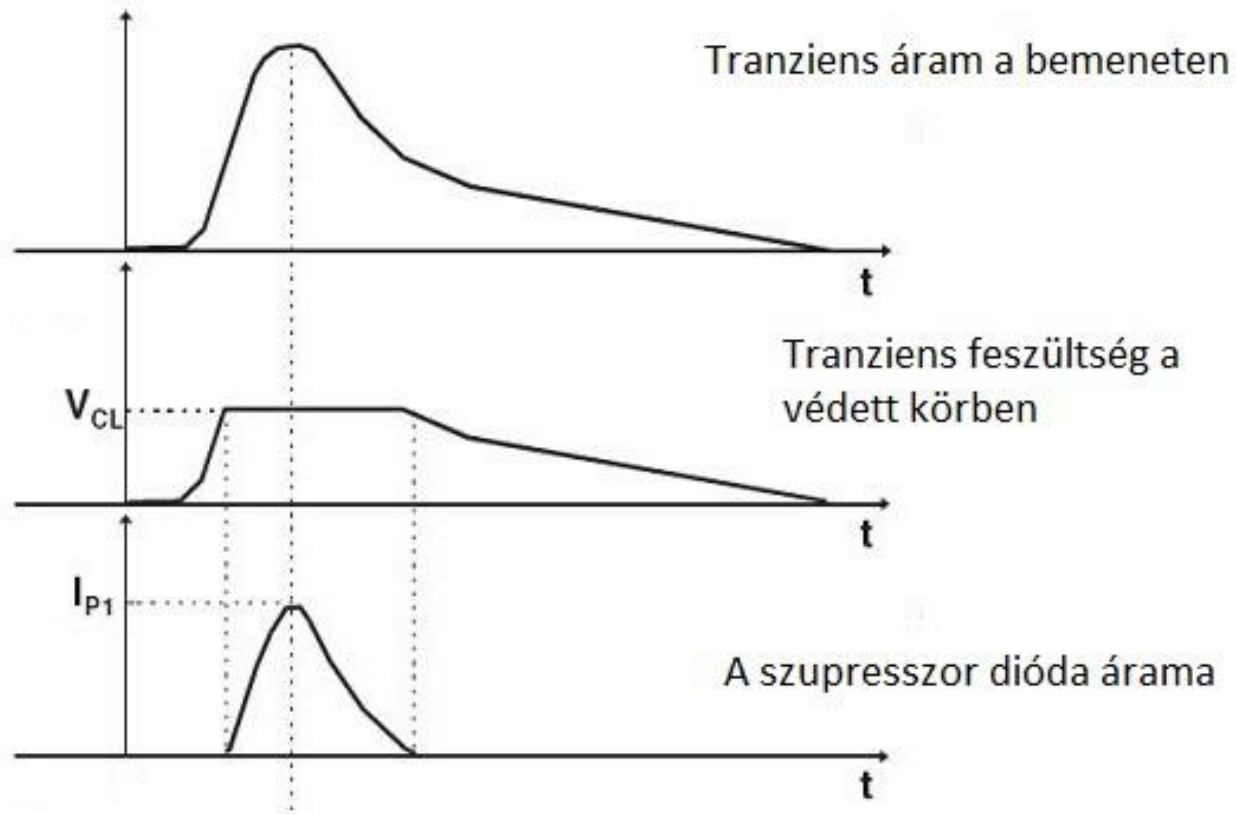
Zener-dióda

- A letörési tartományban használt P-N dióda
- A letörési feszültség a rétegek szennyezésétől függ
- Záró irányban használjuk
- Alkalmazása: feszültség referencia, feszültség korlát, egyszerű tápegységek
- Nagyobb áramerősség esetén intenzív hőtermelés
- Legfontosabb paraméterek: Zener-feszültség, maximális áram, maximális teljesítmény

Tranziens szupresszor (TVS dióda)

- TVS: Transient Voltage Suppressor
- Nagy tranziens áramok szűrésére, túlfeszültség védelemre használatos
- Két alap típus: egyirányú, kétirányú
- Egyirányú: egy nagyáramú Zener-dióda
- Kétirányú: két szembe fordított Zener-dióda
- A katalógusokban a letörési feszültség általában néhány mA áramra van megadva, nagyobb áramokra ennél lényegesen (akár több Volttal is) nagyobb lehet
- Legfontosabb paraméterek: nyitófeszültség, maximális áram, maximális teljesítmény, nyitási/zárási idők

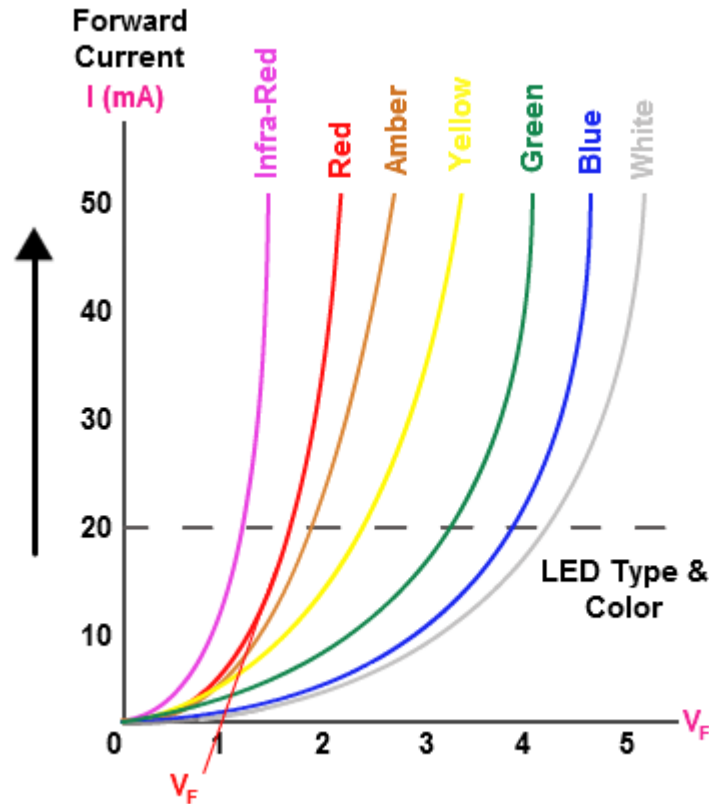
Tranziens szupresszor működése



Fénykibocsátó dióda (LED)

- Igen széles körben elterjedt fényforrás, napjaink modern világítástechnikájának alapja
- Az OLED (Organic LED) technológia terjedésével a szórakoztató elektronikában is jelentős szerepe van
- Az elektronok és „lyukak” rekombinációja során keletkező elektromágneses hullám a látható fény hullámhossz-tartományába esik, vagy egy reaktív réteg (például foszfor) gerjesztésével alakul látható fénné
- A LED-ből kilépő fény hullámhossza a félvezetőt szennyező anyagokkal és a reaktív réteggel változtatható

LED karakterisztikák



Fénykibocsátó dióda (LED)

- Elektronikai szempontból egy viszonylag nagy nyitófeszültségű (1-5V) diódának tekinthető, a különböző színhőmérsékletű LED-ek nyitófeszültsége eltérő
- Letörési feszültsége általában kis abszolút értékű (néhány Volt), egyenirányítóként nem használatos
- Alkalmazása: egészen kis teljesítménytől akár több száz Wattig
- Meghajtása: kis teljesítmény esetén előtét ellenállással, nagy teljesítmény esetén áramgenerátorral
- Legfontosabb paraméterek: nyitófeszültség, maximális áram, maximális teljesítmény, fény hullámhossza, fényerősség, fényáram

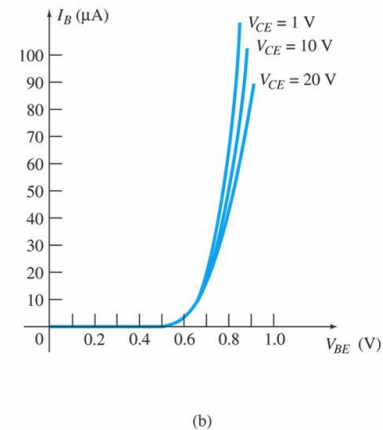
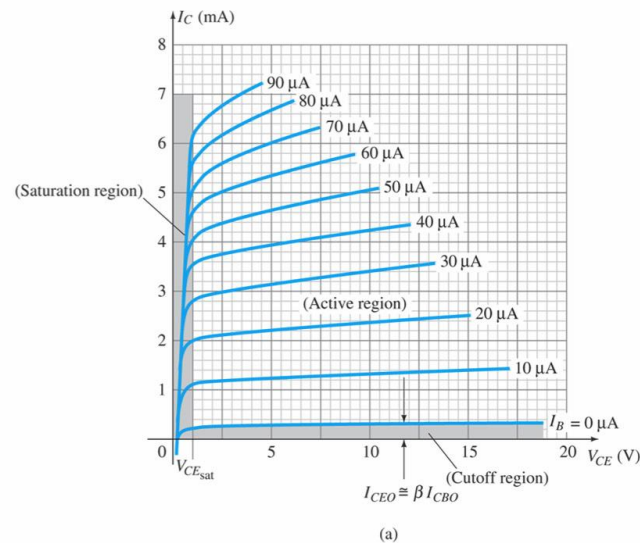
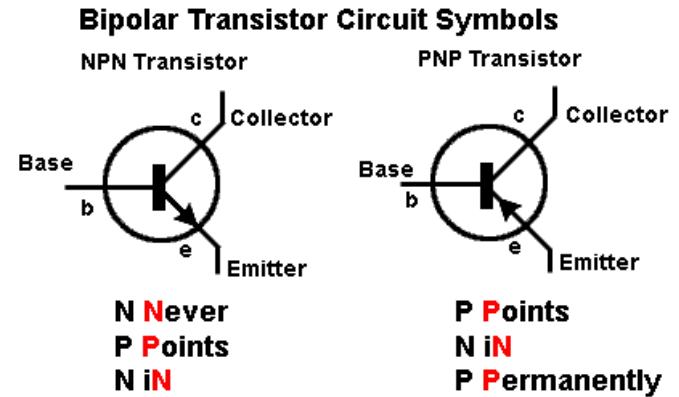
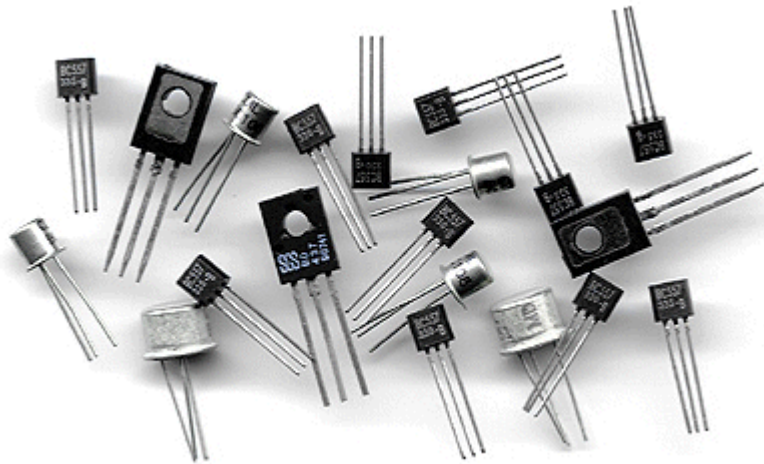
LED - Fotometriai alapok

- Szteradián: $1[\text{sr}]$ az a középponti szög, amely a gömbsugar négyzetével egyenlő gömbfelülethez tartozik
- A LED-ek fényerősségének SI mértékegysége a kandela
- Definíciója: 555nm hullámhosszú monokromatikus fény, amelynek sugárerőssége adott irányban $1,46[\text{mW}/\text{sr}]$
- A fényáram fotometriai mértékegysége a lumen
- Definíciója: 1lm az a fényáram, amelyet egy 1cd fényerősségű, izotróp fényforrás 1sr térszögbe sugároz
- Egy teljes gömbre vetítve: $1[\text{cd}] \times 4\pi[\text{sr}] = 12,57[\text{lm}]$
- A LED-ek adatlapja általában a fenti két paraméter egyikét tartalmazza

Fotodióda

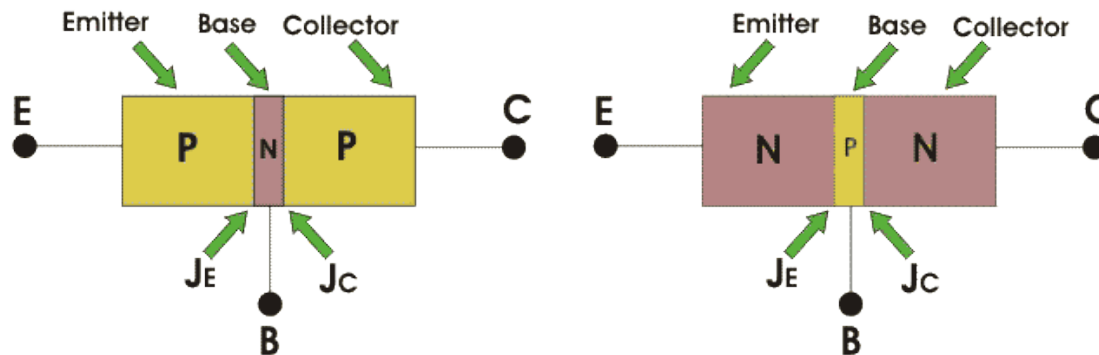
- Fényérzékeny dióda
- Fény hatására a zárórétegben a belső fényelektromos hatás miatt töltéshordozók szabadulnak fel, a dióda vezetni kezd
- Külső feszültség nélkül fényelemként működik (pl.: napelem)
- Külső feszültség alkalmazása esetén záróirányban használatos
- Alkalmazása: mérési, vezérlési feladatok (pl.: fotocella, távirányítók)
- Legfontosabb paraméterek: letörési feszültség, nyugalmi (sötét) áram, üresjárási feszültség, zárlati áram, félérzékenységhez tartozó nyílásszög

Félvezető eszközök: bipoláris tranzisztor (BJT)

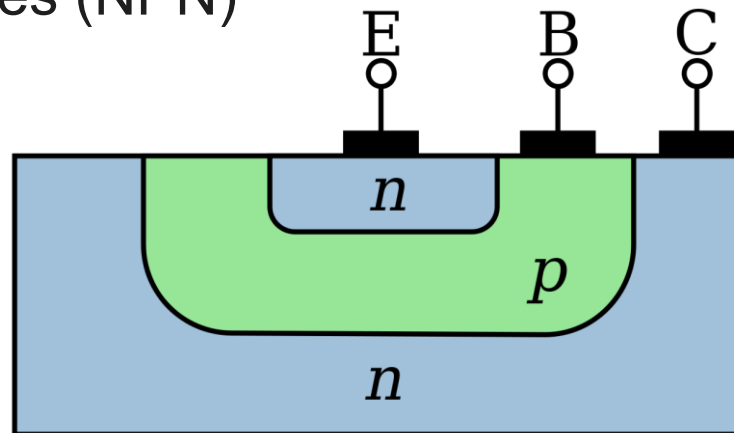


BJT: PNP-NPN

- Két alapvető típus: NPN és PNP

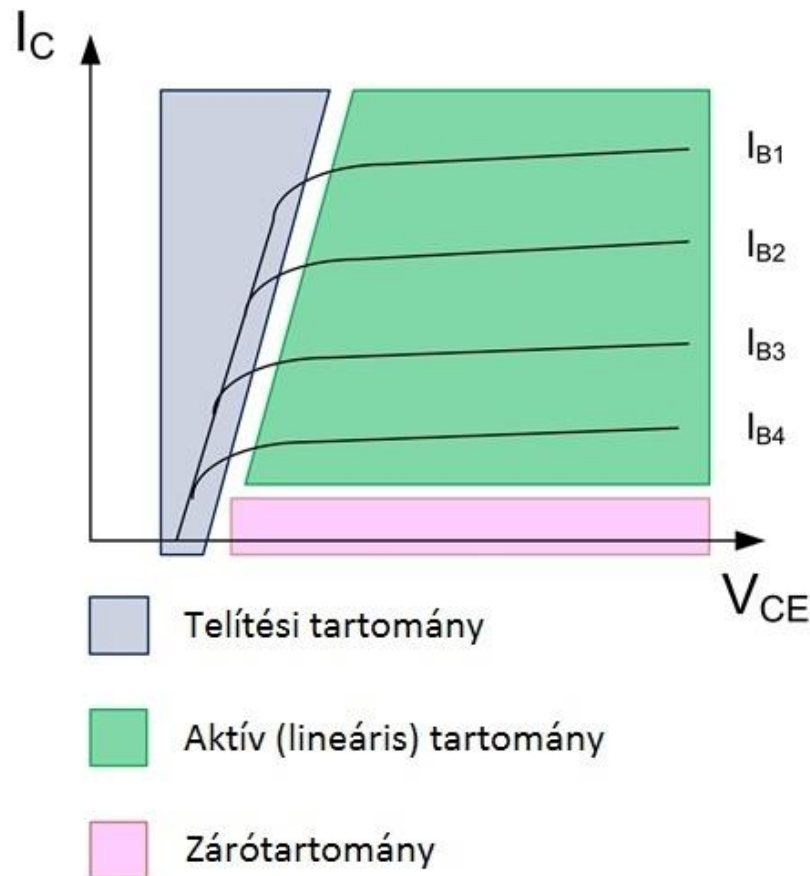


- Planáris felépítés (NPN)



NPN BJT karakterisztika

- Három tartomány: lineáris (aktív), telítési (szaturációs), zárasi tartomány



BJT működése, alkalmazásai

- A nyitott emitterdiódán az emitter és bázis közé kapcsolt feszültségtől függő áram folyik, az emitterből a bázisba kerülő töltések zöme azonban (a kialakuló töltésviszonyok miatt) a kollektoron át távozik, a bázisáram csekély
- A kollektor- és a bázisáram viszonyát β -val jelöljük, neve kisjelű áramerősítési tényező
- $I_C = \beta \times I_B$
- Két alapvető üzemmód: lineáris, kapcsoló üzemmód
- Lineáris üzemmód: erősítők, jelátalakítók
- Kapcsoló üzemmód: vezérlési feladatok, logikai áramkörök, digitális technika

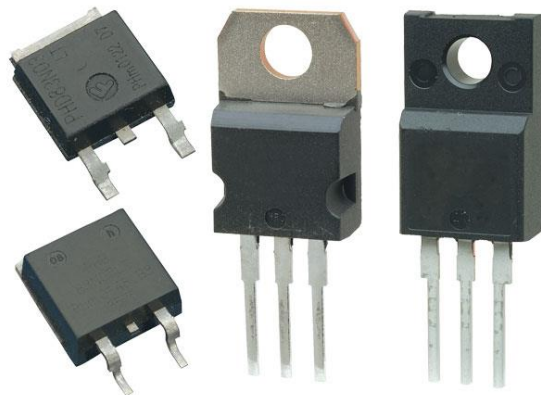
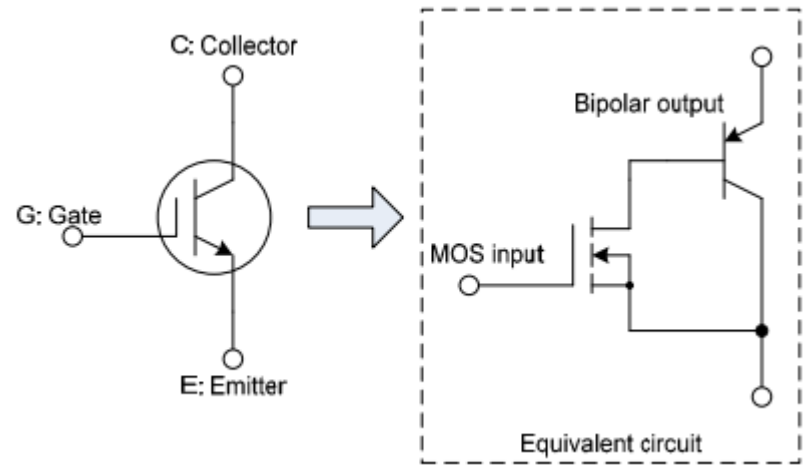
BJT paramétere

- Maximális kollektor-emitter feszültség: néhány V-tól (RF, kisjelű) akár több száz V-ig (teljesítményelektronika)
- Nyitófeszültség: a bázis-emitter dióda nyitásához szükséges feszültség, tipikus értéke 0,7V
- Maximális kollektor áram: néhány mA-tól akár több száz A-ig
- Áramerősítési tényező: tipikusan 10..1000 értékű; nagyáramú tranzisztoroknál általában alacsonyabb; függ a működési frekvenciától és a kollektor áramtól
- Maximális teljesítmény
- Szaturációs feszültség
- $\beta = 1$ értékhez tartozó frekvencia
- Parazita kapacitások

Félvezető eszközök: MOSFET, IGBT



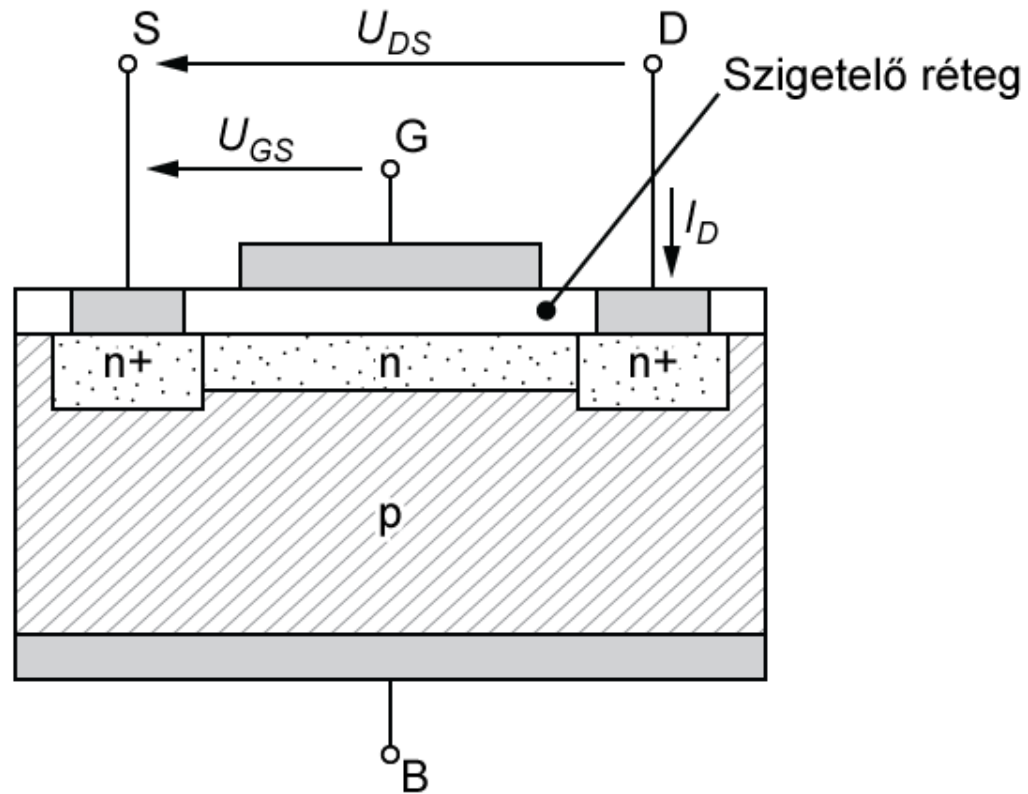
MOSFET N MOSFET P



MOSFET típusok, alkalmazásai

- MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, magyarul csak röviden tervezérlésű tranzisztor
- A modern digitális áramkörök alapját képezik (CMOS)
- Két alapvető típus: növekményes (önzáró), kiürítéses (önvezérlő)
- Diszkrét formában kapcsolóként és teljesítmény erősítőként használják
- Az iparban elsősorban a növekményes MOSFET-ek az elterjedtek, a továbbiakban csak ezzel a típussal foglalkozunk

N-csatornás MOSFET felépítése



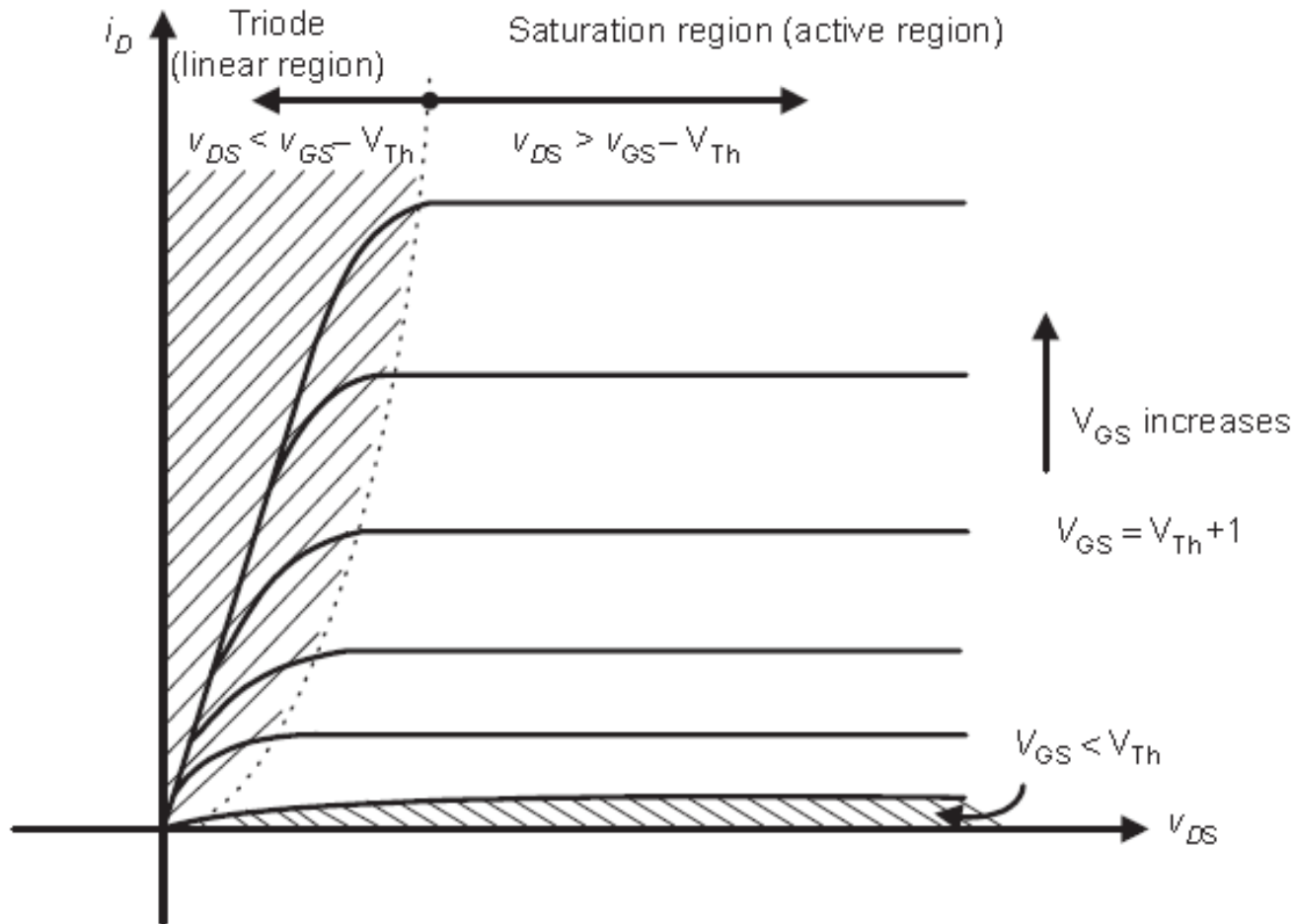
N-csatornás MOSFET működése

- A tranzisztoron belül a forrás (Source) és a nyelő (Drain) n-típusú, a Bulk p-típusú félvezető
- A vezető csatornát a kapu elektródára (Gate) adott (a forrás elektródához képesti) pozitív feszültség által létrehozott elektromos tér idézi elő az inverzió jelensége révén
- Ez a pozitív feszültség a lyukakat taszítja, így egy kiürített réteg alakul ki a Gate elektróda alatt
- A feszültséget tovább növelve a Gate tere a szigetelő réteg alá vonzza a félvezetőben lévő szabad elektronokat

N-csatornás MOSFET működése

- Az így összegyűlt inverziós töltés által kialakul a rezisztív vezető csatorna
- A tranzisztor ekkor a trióda tartományban működik, árama a Drain-Source feszültségtől lineárisan függ
- Ha U_{DS} kellően nagy, a csatorna a Drain elektródánál elzáródik, mivel U_{GD} már nem elegendő az inverziós réteg fenntartásához, a tranzisztor telítésbe kerül
- Ilyenkor U_{DS} -t tovább növelve a tranzisztor árama nem nő tovább, azt U_{GS} -sel állíthatjuk be

N-csatornás MOSFET karakterisztikája

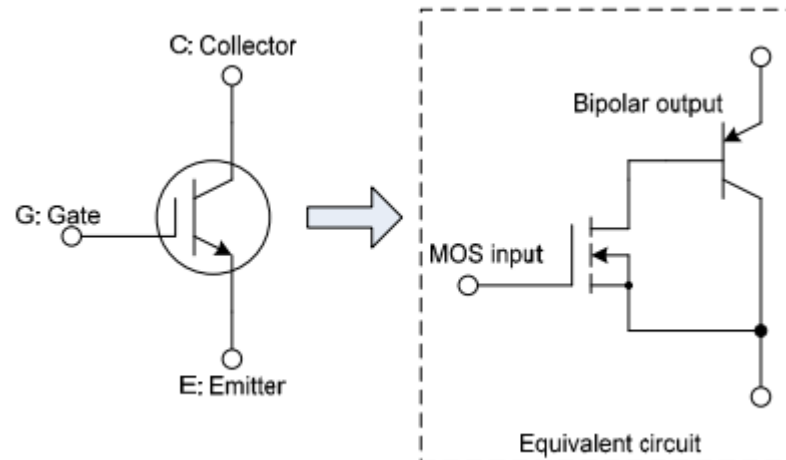


MOSFET paraméterei

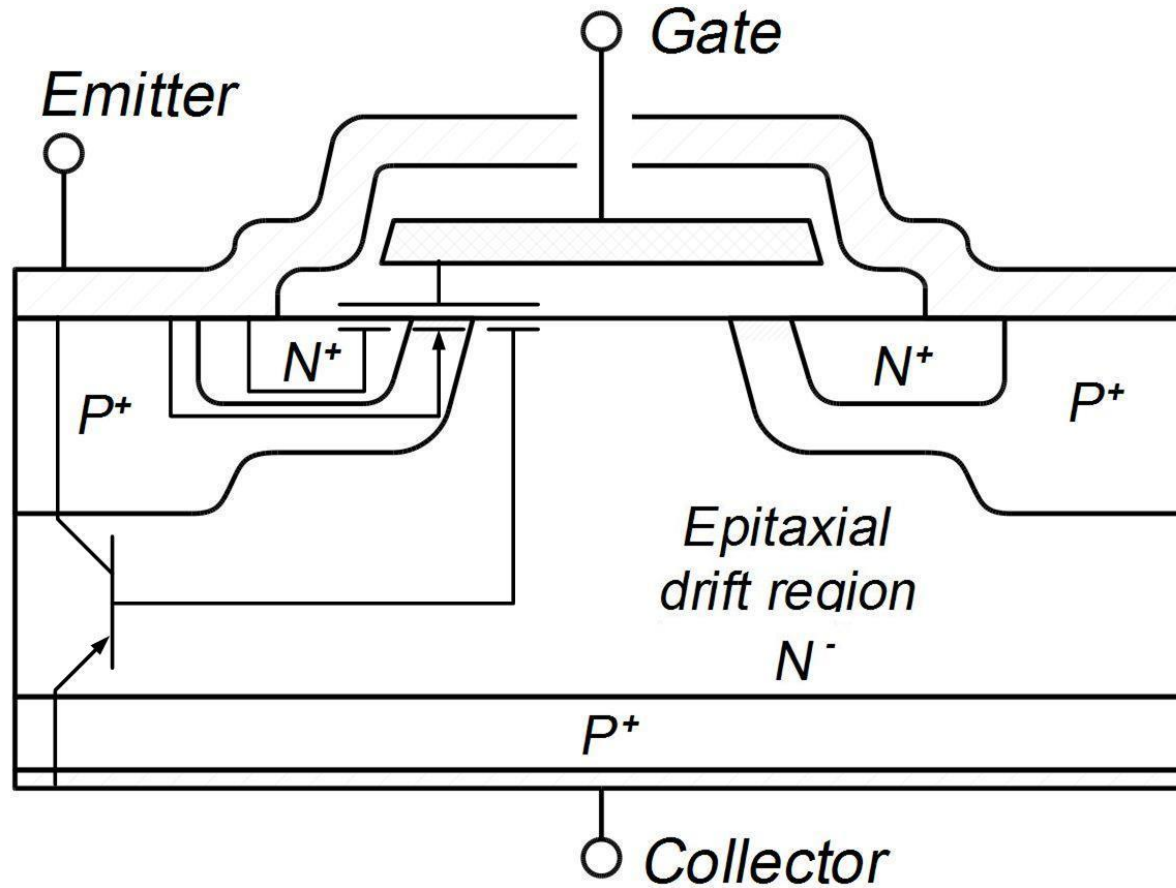
- Maximális Drain-Source feszültség: néhányszor tíz V-tól (RF, kisjelű tranzisztorok) akár több száz V-ig (teljesítményelektronika)
- Küszöbfeszültség: az inverziós csatorna kialakulásához szükséges U_{GS} , tipikus értéke 3-10V
- Maximális Gate-Source feszültség: a Gate elektróda alatti oxid réteg vastagságától függ, tipikus értéke 10-30V
- Maximális Drain áram: néhányszor tíz mA-től néhány száz Amperig
- Maximális teljesítmény
- Csatornaellenállás: függ a félvezető kialakításától és U_{GS} -től
- Parazita kapacitások

IGBT: MOSFET-BJT hibrid

- IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor, vagyis szigetelt kapu elektródás bipoláris tranzisztor
- A MOSFET-ek és a bipoláris tranzisztorok előnyös tulajdonságait ötvözi (nagy bemeneti ellenállás, kis szaturációs feszültség)
- Elsősorban nagy teljesítményű kapcsolóként használatos: villanymotorok vezérlése, inverterek



IGBT felépítése



IGBT paramétere

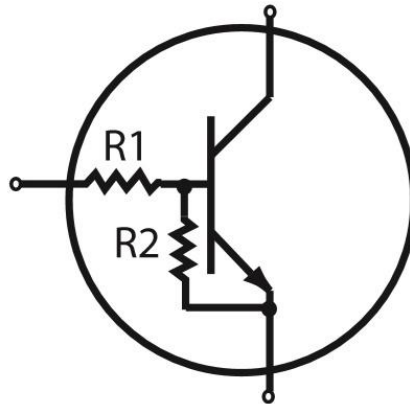
- Maximális kollektor-emitter feszültség: pár 100 V-tól 5-6 kV-ig
- Küszöbfeszültség: az inverziós csatorna kialakulásához szükséges U_{GE} , tipikus értéke 4-8V
- Maximális Gate-emitter feszültség: a Gate elektróda alatti oxid réteg vastagságától függ, tipikus értéke 10-30V
- Maximális Drain áram: néhányszor tíz A-től néhány száz A-ig
- Maximális teljesítmény
- Parazita kapacitások

Tranzisztorok üzemmódjai: kapcsoló

- Kapcsoló üzemmód: a tranzisztort felváltva a zárótartományba és a telítési (MOSFET esetén a trióda) tartományba vezéreljük, ilyenkor egyszer teljesen nyitva, egyszer pedig zárva van
- Disszipáció főleg a kettő közötti váltáskor történik (pl.: kapcsolóüzemű tápegységek, digitális áramkörök)
 - Szaturációs vagy maradék feszültség (U_{CESAT}): a bipoláris tranzisztor telítési állapotához tartozó minimális kollektor-emitter feszültség; $n \times 100..10\text{mV}$; a tranzisztor felépítésétől függ
 - Minimális Drain-Source ellenállás ($R_{DS(ON)}$): a MOSFET-ek teljesen nyitott állapotához tartozó ellenállás; $10..0,001\text{Ohm}$; a MOSFET felépítésétől és U_{GS} -től függ

BJT, mint kapcsoló

- Kapcsolóként alkalmazva fontos oda figyelni a soros bázis ellenállás meglétére: kihagyásával a kisjelű tranzisztorok bázisa már akár 10mA árammal is túlterhelhető, ez az eszköz tönkremenetelét eredményezi
- A piacon számtalan olyan eszköz kapható (NPN és PNP), amelybe ez be is van építve, például: MMUN2211



BJT, mint kapcsoló

- Kapcsolóként használva törekedjünk a földelt emitteres kapcsolás alkalmazására, ugyanis a tranzisztor disszipációja ebben a kapcsolásban lesz a legkisebb a szaturációs tartományba vezérlés miatt
- Tartsuk szem előtt U_{CE} , I_C és I_B maximális értékeit
- Sosem szabad tartósan meghaladni a tranzisztorok adatlapjában előírt disszipáció értékeket: lehet, hogy az előbb felsorolt értékek közül egyik sem lesz maximális, ám a disszipáció az előírt maximumot már túllépi

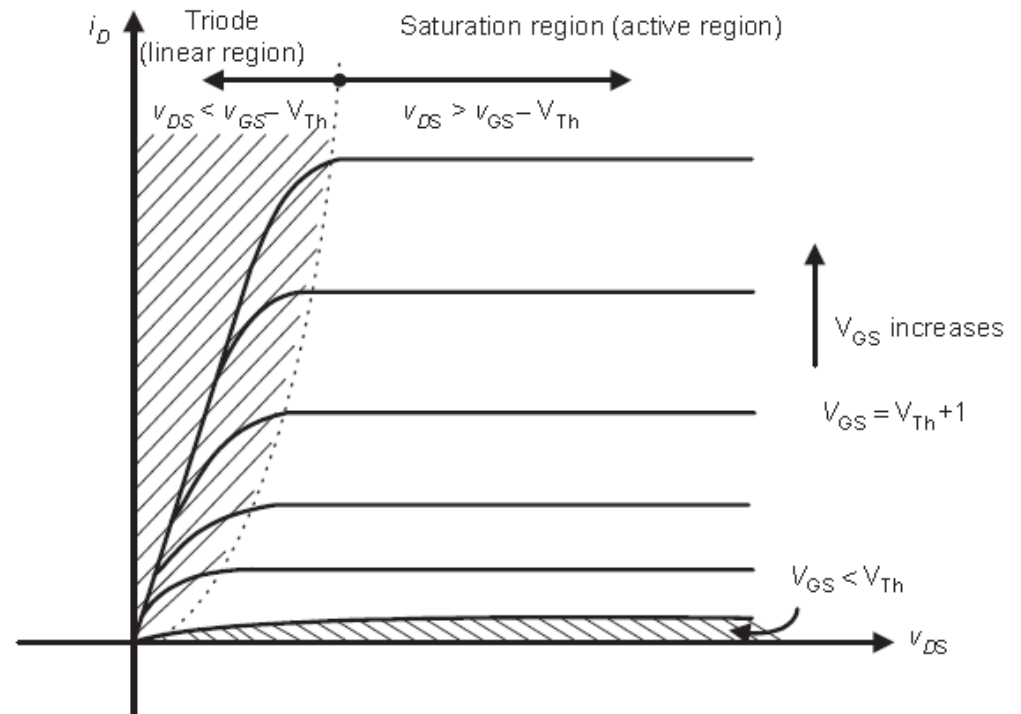
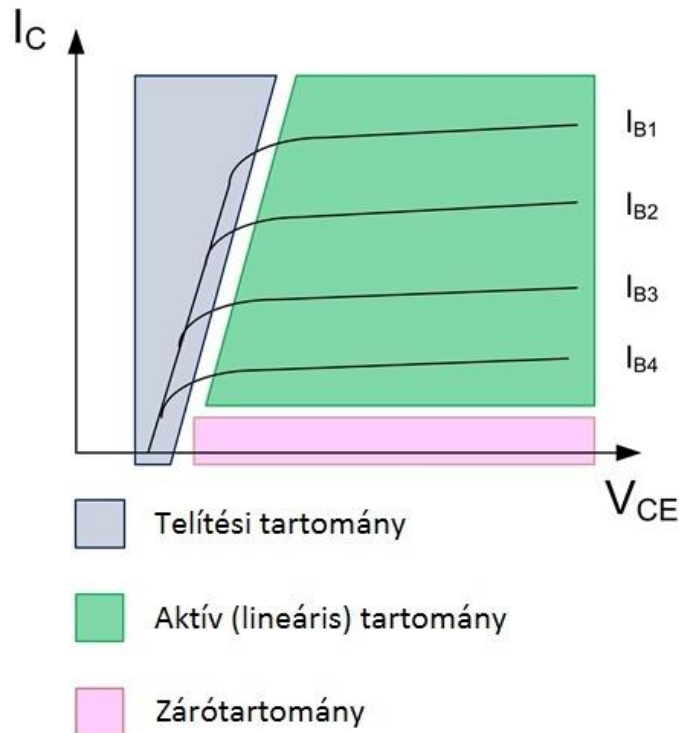
MOSFET, mint kapcsoló

- Mivel a Gate elektróda tulajdonképpen egy kapacitás, melynek értéke akár több nF is lehet, nem szabad hagyni, hogy lebegjen: Tri state képes kimenetek esetén a MOSFET a kimenet nagy impedanciába állításakor nyitva maradhat
- Célszerű a Gate elektródára a felhasználást nem befolyásoló földelő ellenállást kötni, amely az ilyen helyzetekben a töltését elvezeti
- Figyelni kell az adatlapok által előírt maximumok betartására, akár csak a bipoláris tranzisztoroknál

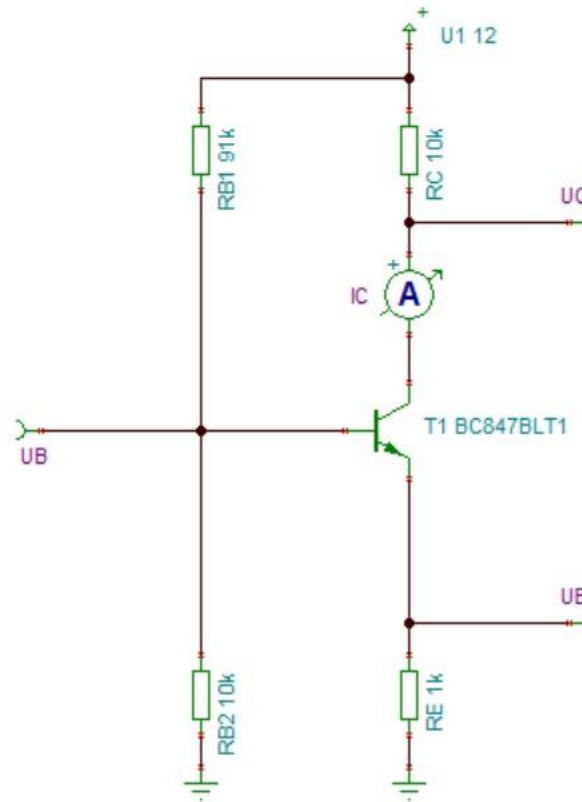
Tranzisztorok üzemmódjai: lineáris

- Lineáris üzemmód NPN BJT esetén: a tranzisztort a karakterisztika azon szakaszán használjuk, ahol:
 - A bázisáramot növelve a kollektoráram (kvázi lineárisan) növekszik, a kollektor-emitter feszültség csökken
 - A bázisáramot csökkentve a kollektoráram (kvázi lineárisan) csökken, a kollektor-emitter feszültség növekszik
 - PNP tranzisztorra ugyan ezek a szabályok érvényesek, ellentétes előjellel
- Lineáris üzemmód N MOSFET esetén: a tranzisztort a karakterisztika azon szakaszán használjuk, ahol:
 - U_{GS} -t növelve a Drain áram (kvázi lineárisan) növekszik, U_{DS} feszültség csökken
 - U_{GS} -t csökkentve a Drain áram (kvázi lineárisan) csökken, U_{DS} feszültség növekszik
 - P csatornás MOSFET esetén a szabályok ugyan ezek, ellentétes előjellel

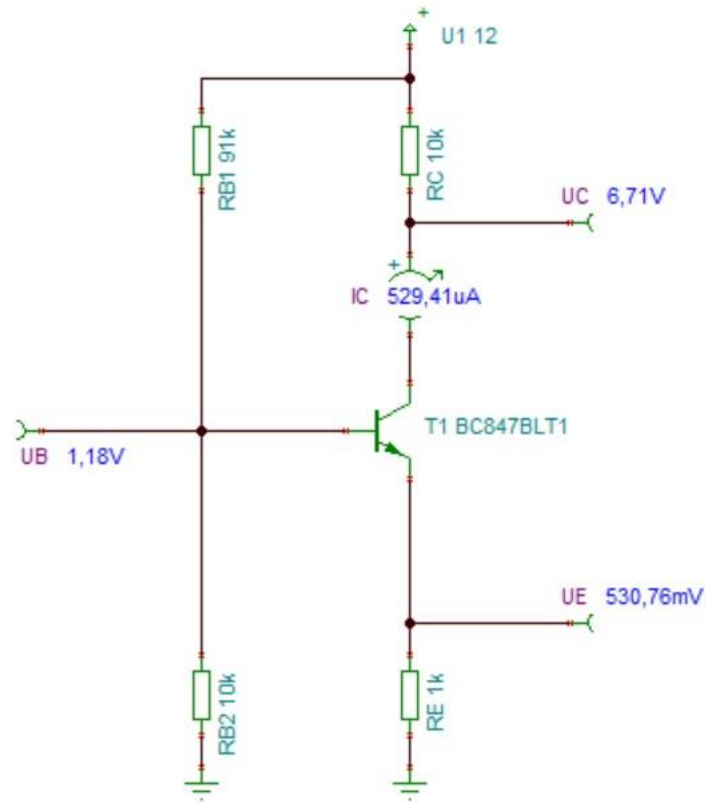
NPN BJT és N MOSFET karakterisztikák



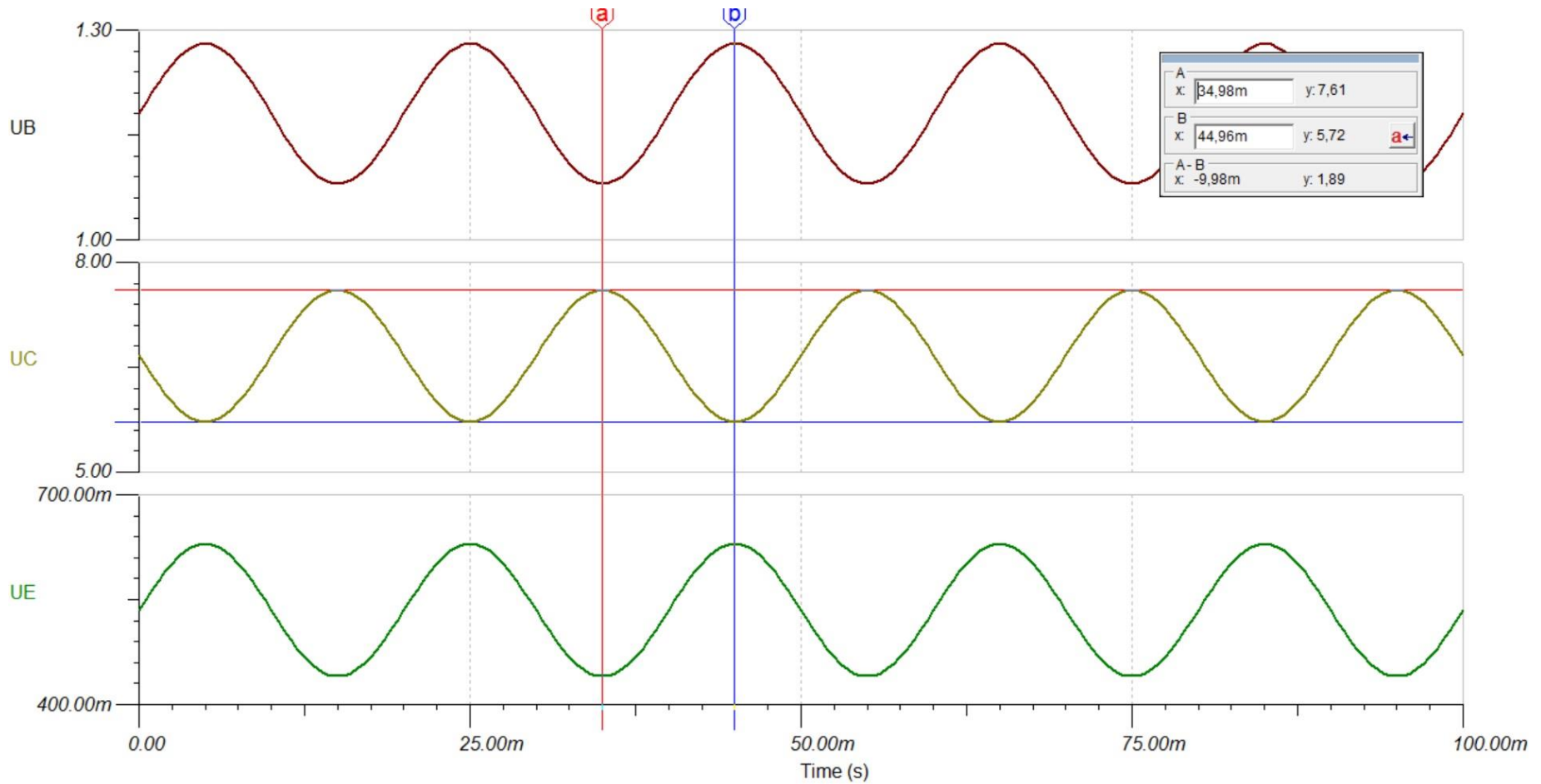
Munkapontbeállítás: BJT példa



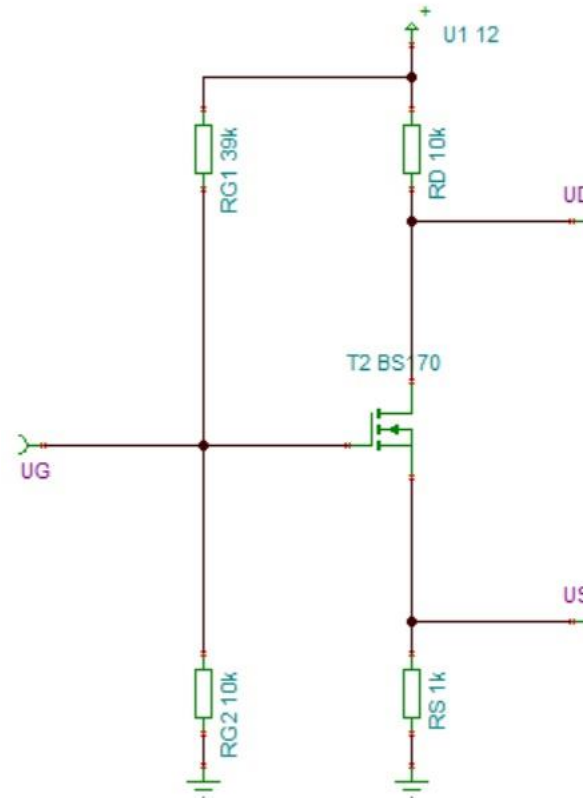
BJT DC szimuláció



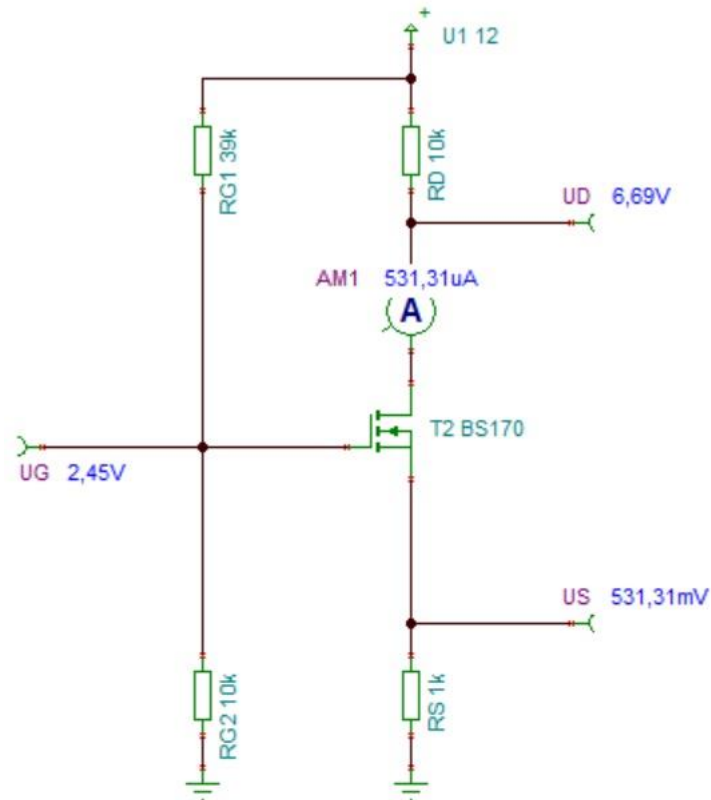
BJT AC szimuláció



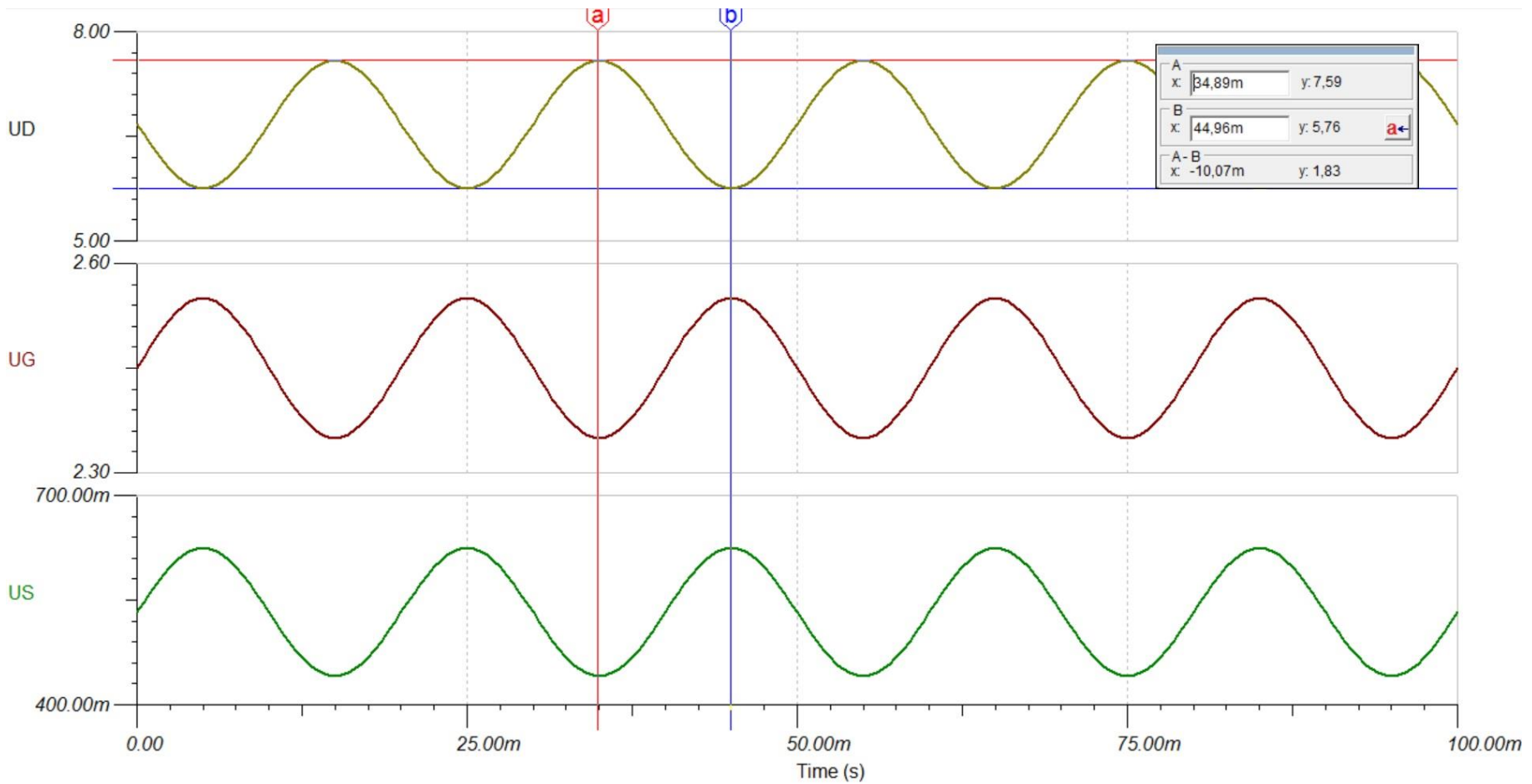
Munkapontbeállítás: MOSFET példa



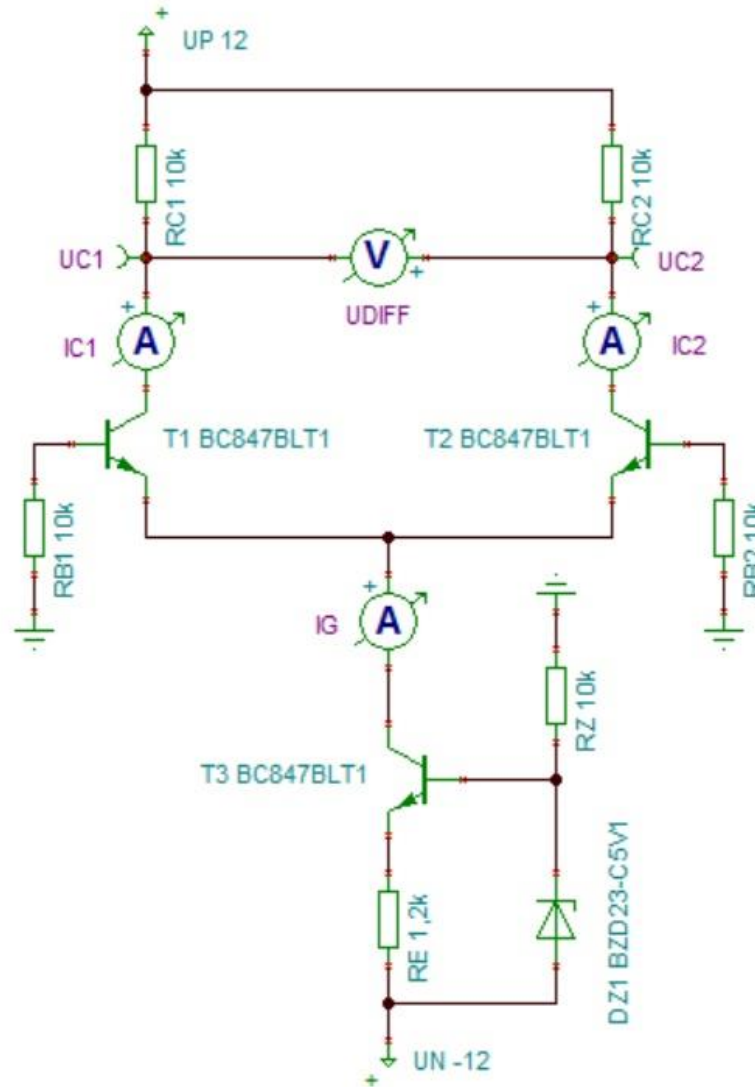
MOSFET DC szimuláció



MOSFET AC szimuláció



Lineáris erősítők: differenciálesrősítő



Differenciálerősítő működése

- Differenciálerősítő: különbségképző erősítő
- Két tranzisztor földelt bázisú kapcsolásban, emitterük közös
- A közös emittert egy DC áramgenerátor terheli, a két földelt bázisú tranzisztor mindegyikén az áramgenerátor áramának fele folyik
- Ha az egyik tranzisztor bázisát gerjesztjük, az adott tranzisztoron a kollektoráram értéke változni fog
- Mivel az áramgenerátor árama konstans, a nem gerjesztett tranzisztor árama pontosan annyival fog változni ellentétesen, amennyivel a gerjesztett tranzisztor árama növekszik vagy csökken

Differenciálerősítő működése

- A differenciálerősítő mindkét bázisa vezérelhető
- Ideális esetben, ha mindkét bázist ugyanazzal a feszültséggel gerjesztjük, a konstans áram miatt a két kollektor potenciálja közötti különbség nulla lesz (közös módusú elnyomás)
- Differenciális (bázisonként ellentétes előjelű) gerjesztés alkalmazásakor az előzőleg tárgyalt feszültség és áram viszonyok alakulnak ki
- Alkalmazásai: lineáris erősítők, műveleti erősítők, szabályozók

Differenciálerősítő munkapontja

- Az erősítő fokozat optimális működéséhez a két bemeneti tranzisztort válogatni kell, vagy monolitikus alkatrészt kell használni
- A két bemeneti tranzisztornak termikusan csatoltnak kell lenni, hogy a hőmérséklet változás miatti drift mindkettőt ugyan olyan mértékben befolyásolja
- A fokozatot úgy kell méretezni, hogy a munkapontban és a használat környezetében minden alkatrész a normál aktív tartományban működjön
- A munkapontot az előző fejezetben tárgyaltak szerint a kivezérelhetőség maximumához tartozó pontba kell állítani
- Fontos, hogy a munkapontban az erősítő két ágán folyó áram egyforma legyen – külső alkatrészekkel befolyásolható

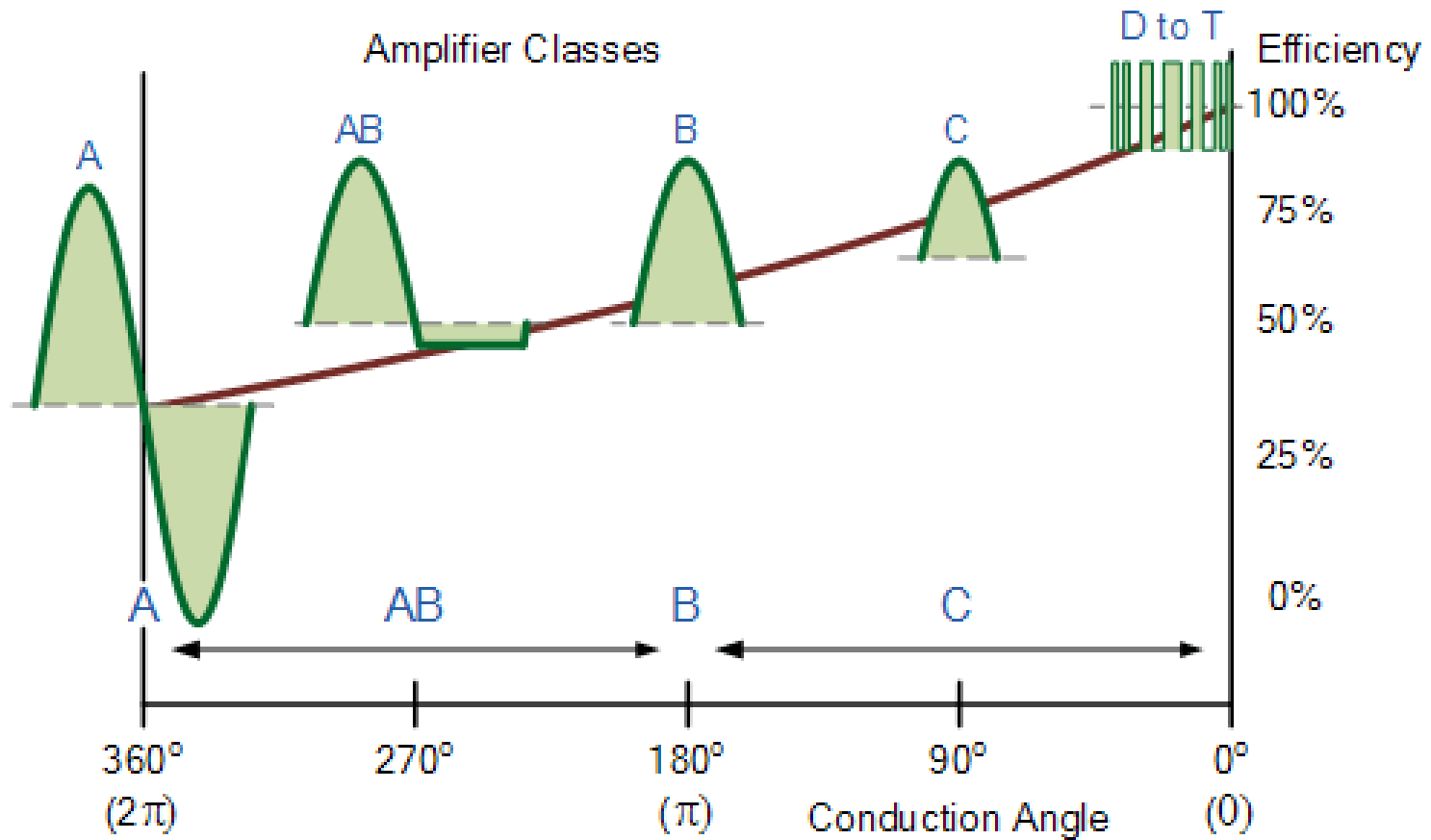
Lineáris erősítők felépítése

- Mire is használunk egy erősítőt:
 - Feszültség erősítés
 - Áram erősítés
 - Összefoglalva: alacsony teljesítményű jelek teljesítmény erősítésére
- Bemenet, vagy bemenetek: általában egy differenciálerősítő két kapcsa
- Kimenet: a bemenetnél nagyságrendekkel kisebb impedanciájú, a kimeneti teljesítmény a végerősítő fokozat határozza meg
- Egyéb kivezetések lehetnek: ofszet kompenzáció, frekvencia kompenzáció, munkaponti áram beállítás

Lineáris erősítők felépítése

- Lineáris erősítő: általában tartalmaz valamilyen szabályozást (visszacsatolást)
- A visszacsatolás szerepe:
 - Az erősítés beállítása
 - Az erősítő linearitásának biztosítása
- Lineáris erősítő fokozatok osztályozása:
 - „A”: folyamatos munkaponti áram, a tranzisztor sosem zár le teljesen, a teljes hullámperiódusban vezet
 - „B”: a munkaponti áram nulla, csak a fél hullámperiódusban vezet
 - „AB”: a munkaponti áram értéke alacsony, a maximális üzemi áram töredéke; tipikusan végfokozatok, több, mint a fél hullámperiódusban vezet
 - „C” munkaponti árama nulla, kevesebb, mint a fél periódusban vezet
 - „D-T”: digitális fokozat vagy erősítő, kapcsolóüzemben működik (impulzus-szélesség moduláció, PWM)

Lineáris erősítők osztályozása



A folytatásban...

1) Műveleti erősítők

- Alapkapcsolások
- Alkalmazások

2) Lineáris tápegységek

- Működési elv
- Tápegység méretezése

3) Kapcsolóüzemű tápegységek

- Működési elv
- DC/DC konverterek fajtái
- Tápegység méretezés