

7. Analóg áramkörtervezés III. - MOS-FET tranzisztoros alapkapcsolások

Szerző: Dr. Bognár György, Dr. Takács Gábor

Az alábbi fejezetben MOS tranzisztorokból felépülő egyszerű erősítő áramkörök működését foglaljuk össze, továbbá egy nMOS-FET alapú, földelt source-ú erősítő alapkapcsolás méretezési kérdéseivel foglalkozunk.

7.1. Egytranzisztoros alapkapcsolások

Gyakran találkozhatunk ún. egytranzisztoros alapkapcsolásokkal. Leginkább a szenzorika területén, közvetlenül az érzékelő mellett valósítanak meg ilyen áramköröket, főleg jelkondicionálás céljából (feszültségerősítés, illesztés). Egyes rádiófrekvenciás (RF) áramkörök bemeneti fokozatában (LNA - Low Noise Amplifier) is találkozhatunk hasonló – első ránézésre egyszerűnek tűnő – áramköri kapcsolásokkal. Természetesen ez utóbbi esetben, magas frekvenciákon (több GHz) a parazita elemekkel, azaz a szándékosan nem odatervezett áramköri elemekkel (szórt és csatoló kapacitások, induktivitások, soros ellenállások, stb.) is számolnunk kell. Ilyen részletességgel, továbbá a másodlagos és harmadlagos hatások figyelembe vételével „kézzel”, papíron nem tudjuk a fontos paramétereit az „egyszerű” alapkapcsolásunknak (erősítés, sáv szélesség, jelterjedési idő, stb.) meghatározni. Ebben a feladatban – ahogy már említettük is – az áramköri szimuláció nyújt segítséget.

Vizsgálataink során a munkapont meghatározásra (DC szimuláció) és alacsony frekvenciás, váltakozó kisjelű (AC szimuláció) számításokra és szimulációra támaszkodunk. Legelső lépésben tisztázni kell, hogy milyen alapkapcsolásaink vannak és mire is lehet ezeket alkalmazni. Fontos tisztáznunk, hogy a tranzisztor mindegyik kapcsolásban a fizika és kvantummechanika törvényeinek megfelelően működik és fogalma nincs arról, hogy „Ő” milyen alapkapcsolásba került. Az alapkapcsolások gyakorlatilag általunk – a működés könnyebb megértése és a működés egyszerűbb leírásának érdekében – felvett önkényes mérőpontok

Az alapkapcsolások aszerint vannak elnevezve, hogy az áramkörben lévő tranzisztor melyik kapcsa van *földpotenciálra* kötve. A földpotenciál kifejezés alatt azt állandó potenciálú pontot értjük, amely az áramkör normális működése során konstans feszültségértékkel rendelkezik. Ilyen pont lehet a tápfeszültség pozitív kapcsa vagy földpontja, de lehet egy feszültségosztó segítségével beállított feszültségpont is. Lényeges, hogy ez a pont váltakozó áramú szempontból földpotenciál legyen. Mivel a tranzisztornak három kapcsa van, ezért három különböző konfiguráció lehetséges.

Bipoláris tranzisztor esetén:

- Földelt emitteres
- Földelt bázisú,
- Földelt kollektoros,

alapkapsolás.

Térvezérlésű tranzisztor esetén pedig:

- Földelt source-ú
- Földelt gate-ű,
- Földelt drain-ű,

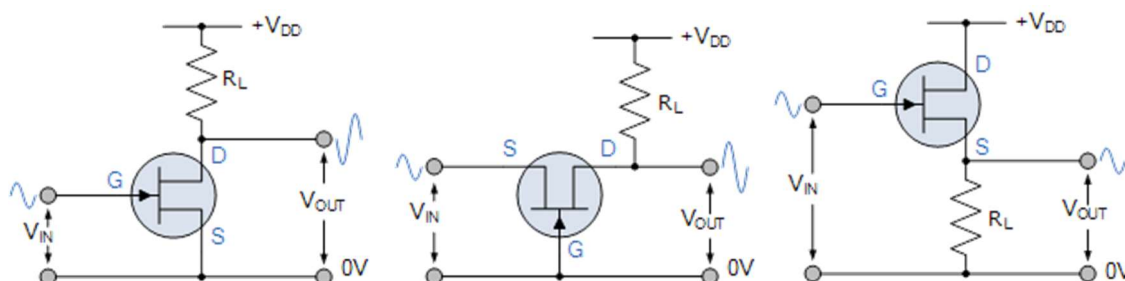
alapkapsolás.

A továbbiakban a tervezérlésű tranzisztoros alapkapsolásokkal foglalkozunk. A tranzisztor áramkörbeli szerepének felismeréséhez segítséget nyújt, ha ismerjük a másik két kapocs szerepét. Bemeneti pont a gate vagy a source lehet, a drain viszont soha!

Így a három alapkapsolás esetén a tranzisztor három kapcsának szerepe:

- Földelt gate-ű alapkapsolás esetén:
 - gate - földpotenciál,
 - source – bemenet,
 - drain - kimenet
- Földelt drain-ű alapkapsolás:
 - drain - földpotenciál,
 - gate – bemenet,
 - source - kimenet
- Földelt source-ú alapkapsolás:
 - source - földpotenciál,
 - gate – bemenet,
 - drain – kimenet

A három alapkapsolás elvi kapcsolási rajzát és a jellemzőit az 7-1. ábrán foglaltuk össze.



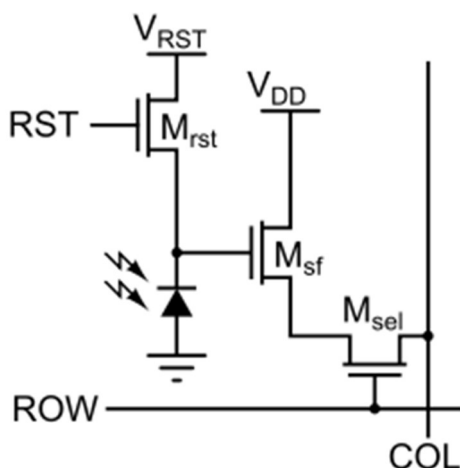
Common source	Common gate	Common drain
Nagy bemeneti impedancia	Kicsi bemeneti / nagy kimeneti impedancia	Nagy bemeneti / kicsi kimeneti impedancia
Jó feszültségerősítés	~1x áramerősítés	~1x feszültségerősítés
Audió erősítők, nagy impedanciájú bemeneti fokozatok	Nagyfrekv. eszközökben (alacsony zaj), impedancia illesztés	Buffer erősítők
180° fázistolás	0° fázistolás	0° fázistolás

7-1. ábra különböző FET tranzisztoros alapkapsolások és azok jellemzői

Fontos felhívni a figyelmet arra, hogy például a közös gate alkapcsolásnál a közel egyszeres áramerősítés (hasonlóan a bipoláris tranzisztornál a közös bázisú alkapcsolás kb. 0,99x áramerősítési tényezőjére) nem azt jelenti, hogy az „erősítő” csak megismételni tudja a jelet (hiszen egyszeres az „erősítése”), hanem valójában feszültség-, azaz teljesítményerősítésre képes. Nagy bemeneti impedancia a feszültséggel vezérelt bemenetet jelenti, ami például egy szenzor kiolvasásánál nagyon fontos, hiszen a nagy impedenciás bemenettel nem terheljük meg a szenzor kimenetét (a gate elektródán át nem folyik áram), így – legalábbis elviekben – nem módosítjuk a mérendő mennyiséget. Természetesen a különböző parazitahatások, másodlagos jelenségek (pl.: szivárgási áram) azért árnyalja a képet. Például jellegzetes felhasználási területe a közös drain alkapcsolásnak (nagy bemeneti impedanciájú, egyszeres feszültségerősítő kapcsolás) a képérzékelő CMOS szenzorok kiolvasó áramköre, mint buffer erősítő. Minden egyes pixelben a képérzékelő fotodióda mellé egy-egy ilyen egy tranzisztoros alkapcsolás kerül (M_{sf} jelű tranzisztor lásd. 7-2. ábra) kialakításra.

7.2. Földelt drain-ú alkapcsolás

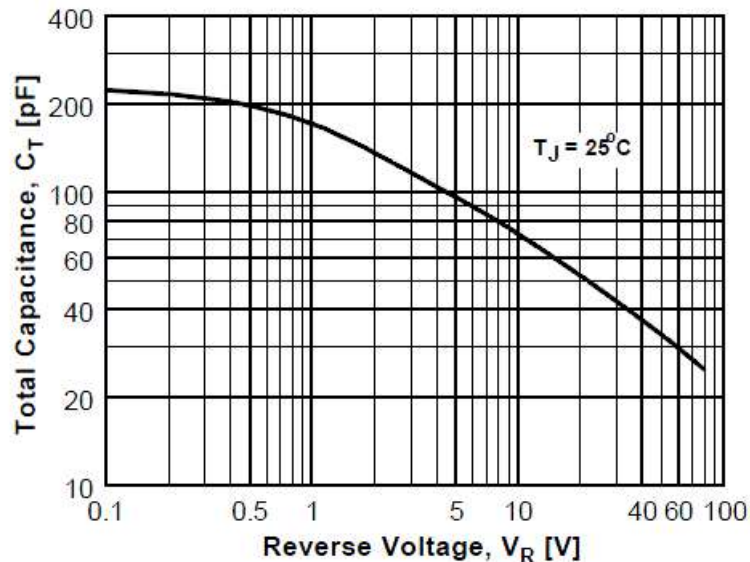
Alkalmazzuk a fent leírtakat az 7-2. ábrán látható elvi kapcsolási rajzban lévő tranzisztorokra! Kapcsolási rajz alapján állapítsuk meg tehát a tranzisztorok szerepeit az áramköri működésben!



7-2. ábra APS képérzékelő cellakapcsolási rajza

A kapcsolás egy CMOS képérzékelő szenzor egy pixeljének áramkörét mutatja (APS Active-Pixel Structure felépítés). A beeső fény a záróirányban előfeszített fotodióda fotoáramát fogja meghatározni. Minél nagyobb a fény intenzitása, annál nagyon lesz a fotoáram. A M_RST tranzisztor és az M_SEL tranzisztor kapcsolóként működik (azaz túlvezért erősítőnek tekinthetjük). Az M_RST feladata az, hogy képkészítés előtt az áramkört kezdeti állapotba állítsa, azaz a fotodióda n oldalát (ez a dióda katódja) tápfeszültségre (V_{RST}) húzza, azaz záróirányban előfeszíti. A záróirányban előfeszített dióda PN átmenetének közvetlen környezetében kiürített réteg alakul ki. Ebben a tartományban a tértöltéskapacitás a domináns.

Valójában a záróirányú feszültség változtatásával a dióda PN átmenetének közvetlen környezetében a kiürített réteg szélessége is változik (növekvő záróirányú feszültség, növekvő kiürített réteg szélességet eredményez, leginkább a gyengébben adalékolt oldalon), azaz lényegében a dióda tértöltéskapacitásának értéke is változik (csökken, mert „távolabb kerülnek” a kapacitás fegyverzetei). Sajnos ez a nemlineáris változás (7.3 ábra), mint másodlagos effektus jelentkezik. A képérzékelés folyamatában ezzel számolnunk kell.



7-3. ábra Tértöltéskapacitás feszültségfüggése

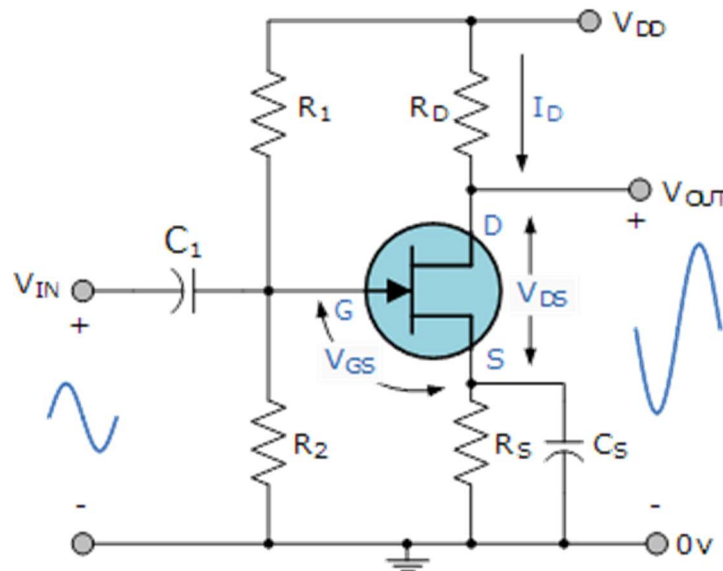
A kép készítésekor (az ún. integrálási idő alatt) a beérkező fotonok generációjának köszönhetően szabad töltéshordozók generálódnak, amiket a beépített tér azonnal szétválaszt. Záróirányú előfeszítésben a kisebbségi töltéshordozók átkerülnek a másik oldalra: például a p oldalon található kisebbségi töltéshordozók, az elektronok átsodródnak a másik, n adalékolású oldalra. Ezt úgy érzékelhetjük, hogy a tértöltés kapacitást folyamatosan sűjtjük ki egy ún. fotóárammal, azaz a dióda záróirányú feszültségértéke folyamatosan csökken.

Az integrálási idő végén, az aktuális diódán eső záróirányú feszültség és az eredeti záróirányú feszültség értékének (ami a kezdeti állapotban tápfeszültség volt – M_RST tranzisztoron keresztül kapcsoltuk tápfeszültségre) különbsége arányos a beeső fotonok mennyiségével, lényegében a generálódott töltéshordozó párok számával. (Alapműködés tárgyalása során eltekintünk a spontán generációtól és a sötétáram jelenségétől!)

$$V_{INT} = V_{RST} - U_{INT} = V_{RST} - \frac{Q_{INT}}{C_{tértöltés}} = V_{RST} - \frac{I_{photo} \cdot t_{INT}}{C_{tértöltés}}$$

Szeretnénk ezt a feszültségértéket folyamatosan nyomon követni tehát, de úgy, hogy a dióda katódját az integrálási idő alatt biztosan leválasszuk a külvilágtól (ne terhelje a kiolvasó áramkör bemeneti fokozata, azaz ne folyjon arra el a generálódott záróirányú áram, ne terhelje további parazitakapacitás). Ennek legjobb módja, ha egy kis helyet foglaló (a teljes képszenzor felületéből keveset kitakaró) követő erősítőt helyezünk el a dióda

katódjához csatlakoztatva: ez a közös drain-ű alapkapsolás, ami nagy bemeneti impedanciát (MOS FET eszközöknél tényleg szakadás) biztosít és a fotodióda tértöltés kapacitás értékéhez képest kis értékű szórt/parazita kapacitású. Így az FD alapkapsolás kimeneten egy fázistolás mentes, kb. egyszeresen felerősített (lényegében megismételt) értékét kapjuk a fotodióda feszültségének, ami már terhelhető is.



7-4. ábra Földelt Source-ú alapkapsolás kapcsolási rajza

7.3. Földelt source-ú alapkapsolás

Talán a leggyakrabban alkalmazott egytranzisztoros erősítő alapkapsolás a földelt source-ú kapcsolás (7-4. ábra). Ha röviden szeretnénk leírni a működését, akkor egy a gate elektródára bejövő kis amplitúdójú feszültségváltozás (U_{GS}) a tranzisztor áramában (I_D) változást okoz. A tranzisztoron átfolyó áram a drain körbe elhelyezett ún. terhelő ellenálláson (R_{Load} vagy R_D) is átfolyik. Ezen az ellenálláson az átfolyó áram feszültséget ejt, így a kimeneti feszültség az alábbiak szerint alakul:

$$U_{OUT} = I_D \cdot R_L = f(U_{GS}) \cdot R_L$$

Ha a bemenő és kimeneti feszültség között (közel) lineáris kapcsolatot szeretnénk elérni, akkor az áramkör tervezőjének okosan kell megválasztania azt a karakterisztika szakaszt és tartományt, ahol a tranzisztor várhatóan működni fog. Földelt source alapkapsolás esetén a telítésszerű tartományban szeretnénk, ha a tranzisztor működne.

Az I_D áram és az U_{GS} közötti összefüggést már ismerjük (csatornarövidülés, egyéb másodlagos hatásokat most elhanyagolva):

$$i_D = K \cdot \frac{W}{L} \cdot (u_{GS} - V_T)^2$$

Az transzfer karakterisztika meredekségét egy adott munkapont körüli kis tartományban (linearizálás) meghatározhatjuk az i_D kifejezés u_{GS} szerinti deriválásával. Így kapjuk meg a transzkonduktancia (g_m) értékét:

$$g_m = \frac{di_D}{du_{GS}} = 2 \cdot K \cdot \frac{W}{L} \cdot (u_{GS} - V_T) = 2 \cdot \frac{i_D}{u_{GS} - V_T}$$

Ezzel azt határoztuk meg, hogy adott munkapontban a bejövő u_{GS} feszültségváltozás mekkora i_D áramváltozást idéz elő. Az értéke körülbelül 1...10 mS nagyságrendű (szemben a bipoláris tranzisztor 10...100mS értékével). Fontos kiemelnünk, hogy a FET tranzisztorok óriási előnye, hogy a g_m értéke is a csatorna geometria függvényében (W és L értékek) változtatható, a tervező kvázi szabad paraméterként (természetesen a gyártástechnológia által meghatározott tartományokon belül, technológiai szórások figyelembevételével) használhatja.

A kisjelű feszültségerősítés (ha elhanyagoljuk a g_{ds} csatornavezetést) könnyen az alábbi összefüggéssel határozható meg:

$$A_U = -\frac{u_{OUT}}{u_{GS}} = -\frac{u_{GS} \cdot g_m \cdot R_D}{u_{GS}} = -g_m \cdot R_D$$

Tehát a feszültségerősítés a meredekség és a terhelő ellenállás függvényében szabadon növelhető. Azonban mégsem tudunk 100dB erősítést elérni egy egyszerű egy tranzisztoros alapkapsolással. A g_m –et befolyásolhatjuk a W érték növelésével, de ekkor növekszik a tranzisztor parazita kapacitása, ami a működés lassulásához vezet (erősítés sáv szélessége is változik!). R_D növelésével elérhető ugyan nagyobb feszültségerősítés, de vigyázni kell, hogy a telítési tartományon belül maradjunk illetve, hogy a terhelő ellenálláson eső feszültség ne legyen nagyobb, mint a tápfeszültség és a U_{DS} értékének különbsége! Gondoljunk bele 1mA drain árammal számolva egy 10KΩ ellenálláson 10V feszültség esik. Legrosszabb esetben sem nagyobb a tápfeszültség 3.3V értéké! Továbbá az integrált áramköri ellenállások is rendelkeznek jelentős szórt kapacitás értékkel, ami ugyancsak befolyásolja a fázismenetet!

A R_D növelésének egy lehetséges módja, ha oda nem integrált áramköri ellenállást (ezt hívjuk egyébként passzív terhelésnek), hanem egy másik tranzisztort helyezünk el a helyére. Ebben az ún. aktív terheléses megoldásban akár 50dB erősítést is elérhetünk. A R_D helyére ilyenkor a terhelő tranzisztor $1/g_{ds}$ csatorna ellenállás értéke kerül.

Kérdés, hogy a munkaellenállásként szereplő tranzisztor gate elektródáját, milyen feszültségre kapcsoljuk? Hogyan tudunk hőmérséklet és tápfeszültség változásától, ingadozásától független referencia feszültség értéket előállítani? (BandGap, LDO, stb.)

De ezekre a kérdésekre már az **Analóg integrált elektronika** című választható tárgy keretében keresünk választ ☺