

6. Analóg áramkörtervezés II. - Ring-oszcillátor

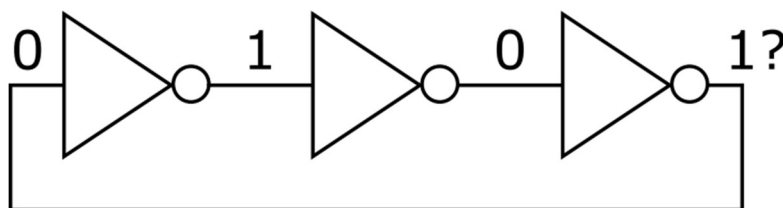
Szerző: Dr. Takács Gábor

6.1. A ring-oszcillátor felépítése és működése

Az elektronikában - így az integrált áramköri technikában is - sokszor szükséges valamilyen állandó vagy változó frekvenciájú órajelet előállítani. Korábbi tanulmányok során számos periodikus (színuszos vagy négyszög) jelet előállító kapcsolással találkoztunk (RC, Wien-hidas, Miller, Clapp, Collpits, Hartley, Meissner, Pierce, stb. [1]). Ebben a fejezetben egy, az integrált áramköri technológia előnyeit kihasználó áramkörrel, az úgynevezett ring-oszcillátorral (magyarul gyűrűs rezgéskeltővel) ismerkedünk meg.

Az oszcillációhoz két feltételnek kell teljesülnie: az áramkör hurokerősítésének nagyobb, vagy egyenlőnek kell lenni, mint egy (amplitúdófeltétel), valamint a visszacsatolásnak pozitívnak kell lennie (fázisfeltétel). A visszacsatolás frekvenciafüggése következtében csak bizonyos frekvencián teljesül az utóbbi kritérium, így az oszcillátor adott frekvenciájú jelet képes előállítani.

A ring-oszcillátor páratlan számú inverter soros kapcsolásából áll. Az inverter nemlineáris áramköri elem, az erősítése a komparálási feszültség környezetében egynél lényegesen nagyobb. A sorba kapcsolt inverterek összerősítése az egyes inverterek erősítésének szorzata (decibel-ben számolva: összege). Ha az így kapott eredő erősítés nagyobb egynél, akkor az amplitúdófeltétel teljesül. A fázisfeltételhez kielégítéséhez páratlan számú inverterre és a visszacsatoló hálózat véges késleltetésére van szükség. A páratlan számú inverter biztosítja, hogy az utolsó fokozat kimeneti jelszintje és az első fokozat bemeneti jelszintje eltérő legyen. Három fokozat esetén a jelszintek az 6-1. ábrán látható módon alakulnak.



6-1. ábra Három inverterből felépített ring-oszcillátor

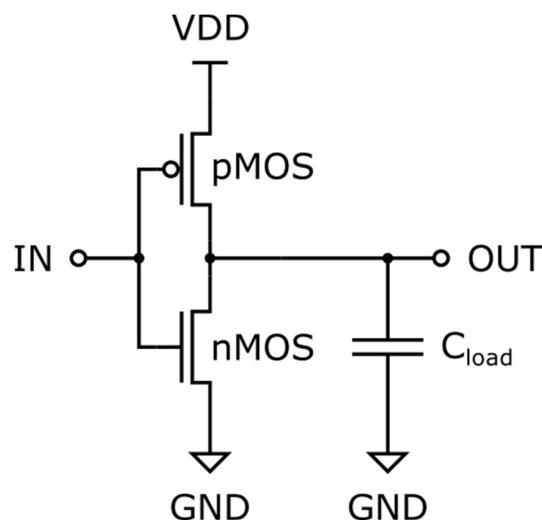
Késleltetés nélkül a jelszintek egymásnak ellentmondanak, hiszen a visszacsatoló vezeték két végén más jelszint szerepel. Az egyes fokozatok késleltetése megegyezik a fokozatokat felépítő inverterek késleltetésével, tehát az oszcilláció frekvenciája:

$$f = \frac{1}{2 \cdot n \cdot T} \quad (5 - 1)$$

ahol n a fokozatok (inverterek) száma, T a fokozatok késleltetése.

A fenti összefüggés alapján az oszcillátor frekvenciáját két paraméter befolyásolja: az inverterek száma és azok késleltetése. Mindkét paraméterrel fordítottan arányos a frekvencia. Az inverterek számának növelésével tervezéskor lehet a kívánt frekvenciát beállítani, viszont gyártás után ez a frekvencia nem változtatható.

Az inverterek teljes késleltetése azonban jóval összetettebb, több paramétertől függ. A megértéshez tekintsünk egy CMOS invertert, melynek kimenetét egy kis értékű kapacitás terheli.



6-2. ábra CMOS inverter kapacitív terheléssel a kimenetén

A bemeneti gerjesztés legyen egy egységugrás-jel, amely $t=0$ időpillanatban vált 0 V és a tápfeszültség között. A kapcsolás előtti időben, amikor a bemeneti jelszint 0 V volt, akkor az inverter kimeneti feszültsége megegyezik a tápfeszültséggel (a felső tranzisztor vezet, a kimeneti kapacitás fel van töltve tápfeszültségre). Jelváltáskor a felső tranzisztor gate-bulk kapacitásából a töltés a bemenetre kapcsolt generátor irányába távozik, míg az alsó n-csatornás tranzisztor gate kapacitása el kezd feltöltődni. Másként fogalmazva: a p-csatornás tranzisztor inverziós csatornája megszűnik, míg az alsó tranzisztor inverziós csatornája kialakul, amely hatására a drain és source kapcsok között áram kezd folyni az n-csatornás tranzisztorokban, mialatt a pMOS tranzisztorok kapcsai között szakadás alakul ki. Ez az áram fogja a kimeneten lévő kapacitást (és a MOS tranzisztor parazitakapacitásait) "kisütni". Amíg a kimeneti feszültség magasabb, mint a hatásos feszültség, addig a tranzisztor áramgenerátorként viselkedik (a kapacitáson a feszültség az idővel lineárisan csökken), viszont ahogy kisebb lesz, mint a hatásos feszültség (U_h), akkor a tranzisztor trióda tartományba kerül, a feszültség-idő karakterisztika exponenciálisan lecsengő lesz. Azt az időt, ami alatt a kimenet feszültség a tápfeszültség 0 értékét 10% -ra megközelíti nevezzük késleltetésnek. A késleltetés nagysága függ: az alkalmazott tranzisztorok gate kapacitásától, a kimenetet terhelő kapacitástól, és a tranzisztorok kisütő/töltő áramától.

6.2. A ring-oszcillátor frekvenciájának hőmérsékletfüggése

A ring oszcillátort alkotó n-csatornás és p-csatornás tranzisztorok árama hőmérsékletfüggő. Emlékeztetőül: a MOS tranzisztor drain árama szaturációs tartományban és trióda tartományban:

$$I_D = \frac{K}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot (U_{GS} - V_{th})^2 \quad (5-2)$$

és

$$I_D = K \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[(U_{GS} - V_{th}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right] \quad (5-3)$$

Hőmérsékletfüggése két paraméterből származik [1]:

1. A küszöbfeszültség hőmérsékletfüggése.

A MOS tranzisztor küszöbfeszültségét az alábbi összefüggés szerint definiáljuk:

$$V_{th} = V_{FB} + 2 \cdot \Phi_F + \gamma \cdot \sqrt{2 \cdot \Phi_F} \quad (5-4)$$

ahol V_{FB} a gate-szubsztrát kontaktpotenciállal korrigált flat-band feszültség, Φ_F pedig a Fermi-potenciál.

A Fermi-potenciál a $\Phi_F = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \frac{N_A}{n_i(T)}$ összefüggésből számítható, ahol a nevezőben

található intrinsic töltéshordozósűrűség az $n_i^2(T) = \text{const} \cdot T^3 \cdot e^{W_g/k \cdot T}$ alapján határozható meg. Ez azt jelenti, hogy a Fermi-potenciál a hőmérséklettel fordítottan arányos, így a küszöbfeszültség hőmérsékletfüggése:

$$\frac{\Delta V_{th}}{\Delta T} = -1 \dots -2 \frac{mV}{K} \quad (5-5)$$

2. Az inverziós csatornában lévő töltéshordozók mozgékonyságának hőmérsékletfüggése.

$$\frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\mu}{dT} = -0,003 \dots -0,006 \frac{1}{K} \quad (5-6)$$

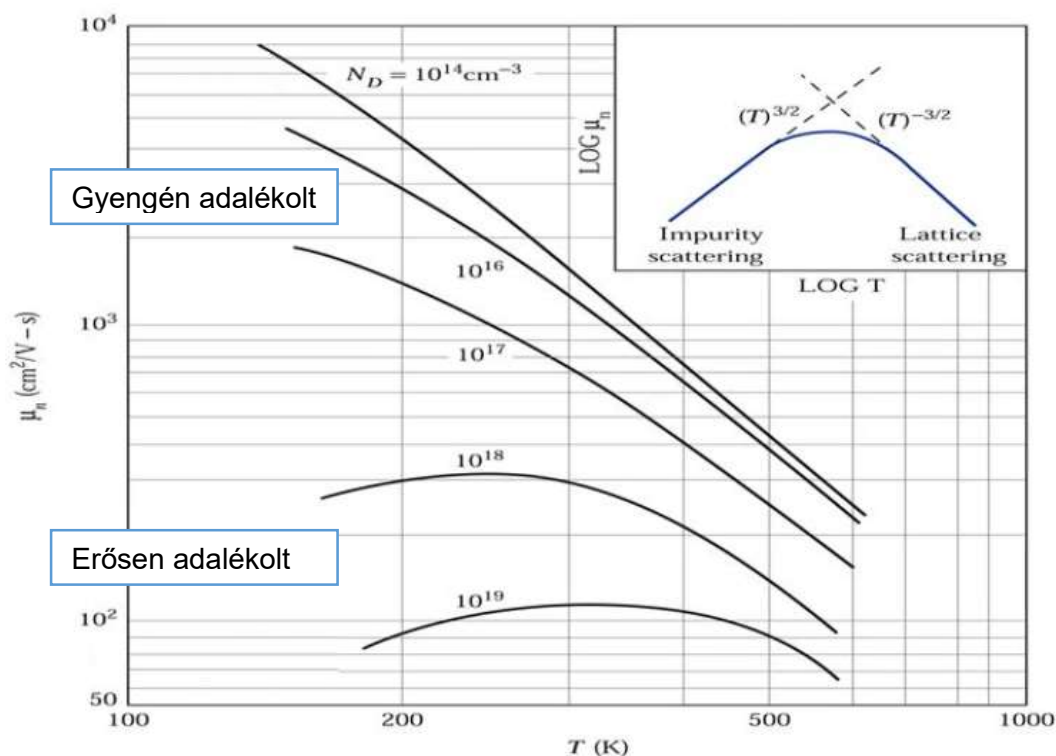
A töltéshordozók adott elektromos tér hatására történő mozgását (drift áram) a töltéshordozó-mozgékonyság ($\mu, \text{cm}^2/\text{Vs}$) adja meg. Kis és közepes nagyságú elektromos térben a driftsebesség és az elektromos térerősség között egyenes arányosság van, az arányossági tényező a mozgékonyság ($\mu = v_d/E$). MOS tranzisztorok esetén az inverziós csatornában lévő töltések mozgékonyága négy tényezőből tevődik össze: a fonon szóródásból, a felületi egyenetlenségből származó szóródásból, a bulk töltéséből származó Coulomb szóródásból és a félvezető - oxid határreteg töltéséből származó Coulomb szóródásból. A négy felsorolt paraméter mindegyike függ a hőmérséklettől. A tranzisztorok BSIM (Berkeley Short-Channel IGFET Model [2]) modelljében ezen hatások kombinációból számolódik az effektív mozgékonyság az úgynevezett Matthiessen-szabály szerint [3].

A hőmérséklet növekedésével a kristályrács rezgése nő, ezzel együtt annak a valószínűsége, hogy a töltéshordozó szóródik a kristályon nagyobb lesz. Ez azt jelenti,

hogy a töltéshordozó-mozgékonyosság a hőmérséklet növekedésével csökken az alábbi arányosság szerint

$$\mu \sim T^{-3/2} \quad (5 - 7)$$

Extrém alacsony hőmérsékleten (30 Kelvin alatt) a töltéshordozók mozgékonyága annak ellenére csökken, hogy a kristályrácsra való ütközés valószínűsége a kisebb rezgés miatt alacsony.



Az általunk vizsgált hőmérsékleti tartományban (300 Kelvin környéke) a fonon-szóródás hatása a domináns. Ez azt fogja eredményezni, hogy a tranzistor árama a hőmérséklet növekedésével csökken, amely hatására a tranzisztorból készített kapcsolás sebessége szintén csökken.

A fent említett két hatás egymással ellentétes. Az, hogy közülük melyik domináns erősen függ a felhasznált technológiától, de általánosságban elmondható, hogy a töltéshordozó-mozgékonyságának csökkenése van nagyobb hatással a modern áramkörök sebességére.

6.3. Ajánlott irodalom

- [1] Rudolf F Graf, **Oscillator circuits**. Elsevier, 1996.
- [2] Simon M. Sze, and Kwok K. Ng. **Physics of semiconductor devices**. John Wiley & Sons, 2006.
- [3] Sheu, Bing J., et al. **BSIM: Berkeley short-channel IGFET model for MOS transistors**. Solid-State Circuits, IEEE Journal of 22.4 (1987): 558-566.
- [4] Wolpert, David, and Paul Ampadu. **Managing temperature effects in nanoscale adaptive systems**. Springer Science & Business Media, 2011.