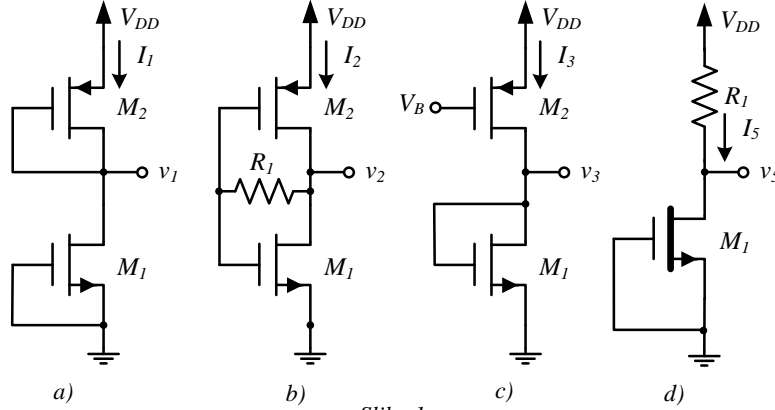


1. U kolima sa slike 1 parametri tranzistora su $\mu_n C_{ox} = 100 \mu\text{A}/\text{V}^2$, $\mu_{np} C_{ox} = 50 \mu\text{A}/\text{V}^2$, $V_{TN} = -V_{TP} = V_T = 0,7\text{V}$, $\lambda_n = \lambda_p \rightarrow 0$, $W_1 = 10 \mu\text{m}$, $W_2 = 20 \mu\text{m}$, $L_1 = L_2 = L = 1 \mu\text{m}$, dok je $V_{DD} = 3\text{V}$, $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $V_B = V_{DD}/2$ i $V_{TD} = -0,6\text{V}$ za tranzistor sa ugrađenim kanalom. Odrediti režime rada tranzistora i vrednosti obeleženih napona i struja. Ponoviti zadatak ukoliko je $R_1 = 20\text{k}\Omega$.



Slika 1

Rešenje:

a) U kolu je $V_{GS1} = 0 < V_T$, pa je tranzistor M_1 zakočen. Njegova struja drejna je praktično jednaka nuli, dakle $I_{D1} = I_{D2} = 0$, dok je realno ova struja jednaka inverznoj struji zasićenja spoja drejn-osnova. Tranzistor M_2 je, ukoliko provodi, u zasićenju, s obzirom da je $V_{GD2} = 0 > -V_T$. U zasićenju je $I_{D2} = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} W_2 / L_2 (v_{SG2} - V_T)^2 = 0$, odakle je $v_{SG2} = V_T$. Sada je $V_1 = V_{DD} - V_{SG2} = V_{DD} - V_T = 2,3\text{V}$.

b) Kako su struje gejtova nula, to kroz otpornik R_1 ne teče struja. Zbog toga su tranzistori M_1 i M_2 u zasićenju ukoliko uopšte provode, jer je $v_{GD1} = v_{GD2} = 0$. Kako je $V_{DD} > 2V_T$, to je bar jedan od tranzistora M_1 i M_2 otkočen, a time i oba (jer imaju istu struju drejna).

Sada je $I_2 = I_{D2} = I_{D1}$, pa se iz strujne karakteristike NMOS tranzistora u zasićenju $I_{D1} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} W_1 / L_1 (v_{GS1} - V_T)^2$ dobija $V_{GS1} = V_T + \sqrt{2I_2 / B_1}$, gde je $B_1 = \mu_n C_{ox} W_1 / L_1$. Sa druge strane je iz $I_{D2} = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} W_2 / L_2 (v_{SG2} - V_T)^2$ dobijeno $V_{SG2} = V_T + \sqrt{2I_2 / B_2}$, gde je $B_2 = \mu_p C_{ox} W_2 / L_2$. Pošto je $B_1 = 1\text{mA}/\text{V}^2 = B_2$, to je $V_{GS1} = V_{SG2}$.

Pošto je $V_{DD} = V_{SD2} + V_{DS1} = V_{SG2} + V_{GS1} = 2V_{GS1}$, to je $V_2 = V_{GS1} = V_{SG2} = \frac{V_{DD}}{2} = 1,5\text{V}$. Sada je $I_2 = I_{D2} = I_{D1} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} W_1 / L_1 (V_2 - V_T)^2 = 320 \mu\text{A}$.

c) Tranzistor M_1 je u zasićenju pošto su mu gejt i drejn kratko spojeni. Pretpostavimo da je M_2 u zasićenju. Tada je $V_{SG2} = V_T + \sqrt{2I_3 / B}$ i $V_3 = V_{GS1} = V_T + \sqrt{2I_3 / B}$, gde je $B = B_1 = \frac{\mu_n C_{ox} W_1}{L_1} = \frac{1\text{mA}}{\text{V}^2} = \frac{\mu_p C_{ox} W_2}{L_2} = B_2$. Odatle je $V_{GS1} = V_{SG2} = V_3$, pa je kao u prethodnom zadatku $V_3 = V_{GS1} = V_{SG2} = \frac{V_{DD}}{2} = 1,5\text{V} = V_B$. Pošto je $V_{DG2} = V_3 - V_B = 0 < -V_{TP}$ to je pretpostavka o zasićenju tranzistora M_2 ispravna. Sada je moguće sračunati $I_3 = I_{D2} = I_{D1} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} W_1 / L_1 (V_3 - V_T)^2 = 320 \mu\text{A}$.

d) Pretpostavimo da tranzistor radi u zasićenju. Tada je $I_{D4} = \frac{B}{2} (V_{GS4} - V_{TD})^2 = \frac{B}{2} V_{TD}^2 = 180 \mu\text{A}$, pa je $V_4 = V_{DD} - R_1 I_{D4} = 1,2\text{V}$. Pošto je $V_{DG4} = V_4 > -V_{TD} = 0,6\text{V}$, to je tranzistor zaista u zasićenju.

Ukoliko je $R_1 = 20\text{k}\Omega$, potrebno je samo tačku d) ponoviti.

U ovom slučaju je $V_4 = V_{DD} - R_1 I_{D4} = -0,6\text{V} < -V_{TD} = 0,6\text{V}$, pa tranzistor nije u zasićenju. Dakle, tranzistor je u triodnoj oblasti. Tada je $I_{D4} = \frac{B}{2}(2(V_{GS4} - V_{TD})V_{DS4} - V_{DS4}^2)$, $V_{DS4} = V_4$ i $I_{D4} = \frac{V_{DD} - V_{D4}}{R_2}$, odakle se dobija kvadratna jednačina

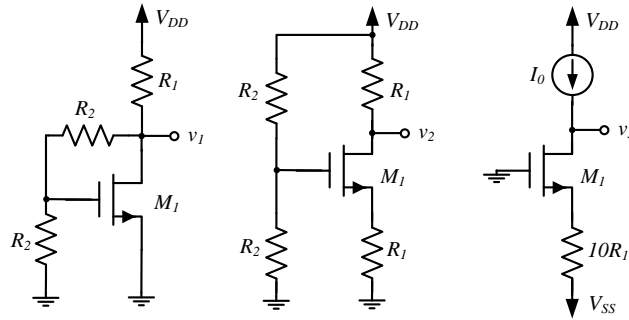
$$V_4^2 - 2V_4 \left(\frac{1}{BR_4} - V_{TD} \right) + \frac{2V_{DD}}{BR_4} = 0,$$

$$V_4^2 - 1,3V_4 + 0,3 = 0,$$

$$V_{4,1} = 0,3\text{V}, V_{4,2} = 1\text{V}.$$

Drugo rešenje je nemoguće s obzirom da je $V_{4,2} = 1\text{V} > -V_{TD} = 0,6\text{V}$, što je u kontradikciji sa tim da je tranzistor u triodnoj oblasti. Dakle $V_4 = 0,3\text{V}$, pa je $I_{D4} = \frac{V_{DD} - V_4}{R_2} = 135\mu\text{A}$.

2. U kolima sa slike 2 parametri MOS tranzistora su $B = B_n = B_p = \frac{1\text{mA}}{V^2}$, $V_T = 1\text{V}$, $\lambda \rightarrow \infty$, dok je $V_{DD} = -V_{SS} = 5\text{V}$, $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 1\text{M}\Omega$ i $I_0 = 300\mu\text{A}$. Odrediti vrednosti obeleženih napona.



Slika 2

Rešenje:

a) Zbog otpornosti R_2 drejn je uvek na većem potencijalu od gejta, pa tranzistor ako je otkočen radi u zasićenju. Pretpostavimo da je tranzistor zakočen. Tada je $V_{G1} = \frac{R_2}{R_2+R_2+R_1}V_{DD} = 2,5\text{V} > 1\text{V} = V_T$, pa tranzistor nije zakočen, dakle u zasićenju je.

Sada je $I_{D1} = \frac{1}{2}B(v_{GS1} - V_T)^2$, $V_{GS1} = \frac{V_1}{2}$ i $\frac{V_{DD}-V_1}{R_1} = I_{D1} + \frac{V_1}{2R_2}$. Odavde se dobija kvadratna jednačina po V_1 :

$$V_1^2 - 4V_1V_T - \frac{2}{B}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{2R_2}\right) + 4V_T^2 - \frac{8V_{DD}}{R_1B} = 0$$

odnosno $V_1^2 - 4V_1 - 36 = 0$, odakle se dobijaju rešenja $V_{1,1} = -8,33\text{V}$ i $V_{1,2} = 4,32\text{V}$, od kojih samo drugo ima fizičkog smisla. Pošto je $V_{GS1} = \frac{V_1}{2} = 2,16\text{V} > V_T$, to je tranzistor M_2 zaista u zasićenju i njegova struja drejna je $I_{D1} = \frac{1}{2}B(v_{GS1} - V_T)^2 = 673\mu\text{A}$.

b) Napon na gejtu je $V_{G2} = \frac{V_{DD}}{2} = 2,5\text{V}$. Pretpostavimo da je tranzistor u zasićenju. Tada je

$$V_{G2} = R_1I_{D2} + V_{GS2} = R_1I_{D2} + V_T + \sqrt{2I_{D2}/B}$$

odakle je $\left(\frac{V_{G2}-V_T}{R_1} - I_{D2}\right)^2 = \frac{2I_{D2}}{BR_1^2}$, što predstavlja kvadratnu jednačinu po I_{D2}

$$I_{D2}^2 - 2I_{D2}\left(\frac{V_{G2} - V_T}{R_1} - \frac{1}{BR_1^2}\right) + \left(\frac{V_{G2} - V_T}{R_1}\right)^2 = 0$$

odnosno $I_{D2}^2 - 5 \cdot 10^{-3} \cdot I_{D2} + 2,25 \cdot 10^{-6} = 0$, čija su rešenja $I_{D2,1} = 500\mu\text{A}$ i $I_{D2,2} = 4,5\text{mA}$. Drugo rešenje je neprihvatljivo jer je $2R_1I_{D2,2} > V_{DD}$, pa je $I_{D3} = I_{D2,1} = 500\mu\text{A}$.

Napon na drejnu je $V_2 = V_{DD} - R_1I_{D2} = 4,5\text{V}$. Tranzistor zaista radi u zasićenju pošto je $V_{DG2} = 2\text{V} > -1\text{V} = V_T$.

c) Pretpostavimo da je tranzistor u zasićenju. Tada je $V_{SS} + 10R_1I_{D3} + V_{GS3} = 0$ i $V_{GS3} = V_T + \sqrt{2I_{D3}/B}$. Odavde možemo da dobijemo kvadratnu jednačinu po I_{D3} :

$$I_{D3}^2 + I_{D3}\left(\frac{V_{SS} + V_T}{10R_1} + \frac{1}{100BR_1^2}\right) + \left(\frac{V_{SS} + V_T}{10R_1}\right)^2 = 0$$

$$I_{D3}^2 - 8,2 \cdot 10^{-4} \cdot I_{D3} + 1,6 \cdot 10^{-7} = 0$$

$$I_{D3,1} = 320\mu\text{A}, I_{D3,2} = 500\mu\text{A}.$$

S obzirom da je $V_{GS3,2} = -(V_{SS} + 10R_1 I_{D3,2}) = 0 < V_T$, to je $I_{D3} = I_{D3,1} = 320\mu\text{A}$. Međutim, pošto je u našem kolu $I_{D3} = I_0 = 300\mu\text{A} \neq 320\mu\text{A}$ tranzistor nije u zasićenju! Dakle, tranzistor je u triodnoj oblasti.

U triodnoj oblasti je $I_0 = I_{D3} = \frac{B}{2} V_{DS3} (2(V_{GS3} - V_T) - V_{DS3})$. Znamo $V_{GS3} = -(V_{SS} + 10R_1 I_{D3,2}) = 2V$ i $V_{S3} = -V_{GS3} = -2V$. Sada je $I_0 = \frac{B}{2} (V_{D3} - V_{S3}) (2(V_{GS3} - V_T) - (V_{D3} - V_{S3}))$, gde je V_{D3} jedina neopznata.

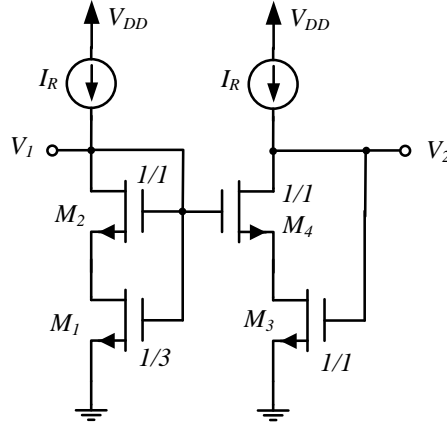
$$V_{D3}^2 + 2V_{D3}V_T - V_{GS3}(V_{GS3} - 2V_T) + \frac{2I_0}{B} = 0,$$

$$V_{D3}^2 + 2V_{D3} + 0,6 = 0,$$

$$V_{D3,1} = -1,63V, \quad V_{D3,2} = -0,37V.$$

Drugo rešenje nije moguće za tranzistor u triodnoj oblasti jer je $V_{DG3,2} = V_{D3,2} = -0,37V > -V_T = -1V$, tako da je izlazni napon $V_3 = V_{D3,1} = -1,63V$.

3. Na slici 3 je prikazano kolo koje se koristi kao generator jednosmernih napona V_1 i V_2 . Parametri tranzistora su $\mu_n C_{ox} = 110 \mu\text{A}/\text{V}^2$, $V_T = 1\text{V}$, $\lambda \rightarrow \infty$, dok je $V_{DD} = 3\text{V}$ i $I_R = 5 \mu\text{A}$. Pored svakog tranzistora je dat i odnos širine i dužine kanala. Odrediti napone V_1 i V_2 .



Slika 3

Rešenje:

Struja I_R je struja drejna tranzistora M_1 i M_2 pa oni sigurno provode. Tranzistor M_2 radi u zasićenju s obzirom da su mu drejn i gejt kratko spojeni, dok tranzistor M_1 radi u triodnoj oblasti ili u zasićenju. Da bismo odredili u kom režimu radi M_1 , treba da uporedimo napon V_{GD1} sa V_T . Kako je $V_{GD1} = V_{GS2} > V_T$, to je M_1 u triodnoj oblasti.

Znajući struju drejna tranzistora M_2 , možemo da odredimo napon $V_{GS2} = V_T + \sqrt{2I_R/B_2} = V_T + V_{OV}$, gde je sa V_{OV} označen tzv. *overdrive* napon (napon gejt-sors preko napona praga, $V_{GS}-V_T$). Kako je $B_2 = \mu_n C_{ox}(W/L)_2 = 110 \mu\text{A}/\text{V}^2$, to je $V_{OV} = \sqrt{2I_R/B_2} = 0,3\text{V}$.

Jednačina za struju drejna tranzistora M_1 glasi $I_R = I_{D1} = \frac{B_1}{2}(2(V_{GS1} - V_T)V_{DS1} - V_{DS1}^2)$. U ovoj jednakosti, nepoznati su V_{GS1} i V_{DS1} , ali je veza između njih data sa $V_{GS1} = V_{DS1} + V_{GS2} = V_{DS1} + V_T + V_{OV}$. Dakle, možemo zadržati samo napon drejna prvog tranzistora kao nepoznat

$$\frac{B_2}{2}V_{OV}^2 = I_{D2} = I_R = I_{D1} = \frac{B_1}{2}(2(V_{D1} + V_T + V_{OV} - V_T)V_{D1} - V_{D1}^2),$$

što je kvadratna jednačina po V_{D1} ,

$$V_{D1}^2 + 2V_{D1}V_{OV} - \frac{B_2}{B_1}V_{OV}^2 = 0, \quad B_2 = 3B_1,$$

$$V_{D1,1} = -3V_{OV}, \quad V_{D1,2} = V_{OV}.$$

Kako negativno rešenje nema fizičkog smisla, to je $V_{DS1} = V_{D1} = V_{OV}$. Sada je $V_1 = V_{GD2} + V_{D1} = V_T + V_{OV} + V_{OV} = 1,3\text{V}$.

Pretpostavimo da su M_4 i M_3 u zasićenju. Tada je $V_{GS2} = V_{GS4}$ pošto su tranzistori identični i struje drejna su im jednake. Kako je i $V_{G2} = V_{G4}$, to je $V_{D3} = V_{D1} = V_{OV}$. Napon gejta M_3 je $V_{G3} = V_T + V_{OV}$, pa je $V_{GD3} = V_T + V_{OV} - V_{OV} = V_T$, što znači da je M_3 na granici triodne oblasti i zasićenja.

Važi $V_2 = V_{GS3} = V_{GS2} = V_T + V_{OV}$, jer su tranzistori M_2 i M_3 identični i struje drejna su im jednake.

Da bismo potvrdili i da je M_4 u zasićenju, treba da proverimo $V_{DG4} > -V_T$. Kako je $V_{DG4} = V_{D4} - V_{G4} = V_2 - V_1 = (V_T + V_{OV}) - (V_T + 2V_{OV}) = -V_{OV} = -0,3\text{V} > -0,7\text{V} = -V_T$, to je pretpostavka da je M_4 u zasićenju potvrđena.