

1a) Piihin, jossa on fosforiatomeja $5,0 \times 10^{16} / \text{cm}^3$, tehdään diodi lisäämällä materiaalin pintaosaan ioni-istutuksella booriatomeja $2,5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$. Silloin materiaaliin muodostuu pinnasta sisään katsoen pn-raja. Kuinka suuri on syntyneen diodin (pn-rajana) sisäinen rajajännite?

Pinnassa on fosforia $5,0 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ ja booria $2,5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ } syntyy p-piikku, jossa akseptorien määrä = erotus = $N_A = 2,0 \times 10^{17} / \text{cm}^3$

Nyt
$$\phi_i = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = \frac{8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K} \cdot 300 \text{ K}}{q} \ln \left(\frac{2,0 \times 10^{17} / \text{cm}^3 \cdot 5 \times 10^{16} / \text{cm}^3}{(1,45 \times 10^{10} / \text{cm}^3)^2} \right)$$

$$= 0,0259 \text{ V} \cdot 31,5 = \underline{0,81 \text{ V}}$$

1b) Oheisen kytkennän transistorista tiedetään seuraavaa: kynnysjännite on $V_m = 0,50 \text{ V}$, $k_n = 0,40 \text{ mA/V}^2$ ja $\lambda = 0$. Laske lähde- ja nielu-jännitteet, kun hilajännite on $1,3 \text{ V}$. Perustelee lyhyesti ollaanko saturaatioissa.

V_D saadaan suoraan $V_D = 5,0 \text{ V} - 20 \text{ k}\Omega \cdot 1,4 \text{ mA} = 2,2 \text{ V}$

Oletetaan, että trans. on saturaatioissa

$$N_{ov} = \sqrt{\frac{2I_d}{k_n}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4 \text{ mA}}{0,4 \text{ mA/V}^2}} = \pm 2,65 \text{ V}$$

Tonisaalta $N_{ov} = N_{gs} - N_{fn}$

$$= N_g - N_s - N_{fn}$$

$$\Rightarrow N_s = N_g - N_{ov} - N_{fn} = (1,3 - 2,65 - 0,5) \text{ V} = \begin{cases} 3,45 \\ -1,85 \end{cases}$$
 ei kyy, koska $N_{gs} < V_m$ ei konoava!

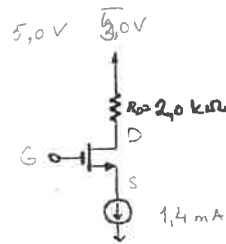
Ollaanko saturaatioissa? OLLAAN!

$$N_{gd} = (1,3 - 2,2) \text{ V} = -0,90 \text{ V} \leq N_{fn}$$

tai $N_{ds} = 2,2 - (-1,85) = 4,05 \text{ V} > N_{ov}$

$$V_D = 2,2 \text{ V}$$

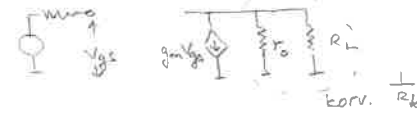
$$V_s = -1,8 \text{ V}$$



2) NMOS-tyyppisestä yhteislähdevahvistimesta (common-source) tiedetään seuraavaa: $g_m = 5,0 \text{ mA/V}$, $r_o = 4,0 \text{ k}\Omega$, $C_{gs} = 40 \text{ fF}$ ja $C_{gd} = 35 \text{ fF}$. Kuorma on resistiivinen $R_L = 4,0 \text{ k}\Omega$, ja signaalilähteen sisäinen resistanssi on 350Ω .

- Piirrä kytkennän piensignaali malli, jossa näkyy myös parasiittiset kapasitanssit. Lisäksi laske kytkennän DC-jännitevahvistus.
- Laske kapasitanssien aiheuttamat aikavakiot avoimen piirin aikavakio -menetelmällä. Kapasitanssien "näkemät" resistanssit on johdettava.
- Laske kytkennän 3 dB:n taajuus. Selitä lyhyesti, mitä tämä 3 dB:n taajuus tarkoittaa?

a) DC-vahvistus (ei kapasitansseja)



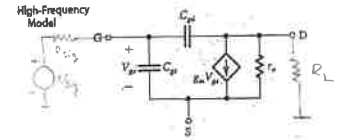
$v_{gs} = N_{sig}$, laske mikä ei kulje!

Korvataan nimian olevat r_o ja R_L R_k illa ($= \frac{r_o R_L}{r_o + R_L}$) = $2 \text{ k}\Omega$

Silloin $N_o + R_k g_m v_{gs} = 0$

$\Rightarrow N_o = -R_k g_m v_{gs}$

vahv. = $\frac{N_o}{N_{sig}} = -R_k g_m = -20 \text{ k}\Omega \cdot 5,0 \text{ mA/V} = -10 \text{ V/V}$



b) OCT-menetelmä: yksi kapasitanssi kerrallaan (muut aukot ja jännitelähteet sinuolijohdettu)

C_{gs} : $r_{gs} = r_{sig} \Rightarrow \tau_{gs} = 350 \Omega \cdot 40 \times 10^{-15} \text{ F} = 14 \text{ ps}$



np: $N_{gs} + I_x r_{sig} = 0 \Rightarrow N_{gs} = -I_x r_{sig}$

op: $N_o - (I_x - g_m v_{gs}) R_k = 0$

$N_o = N_{gs} + N_x$

$\Rightarrow -I_x r_{sig} + N_x - I_x R_k + g_m (-I_x r_{sig}) R_k = 0$

$\Rightarrow \frac{I_x}{V_x} = r_{sig} + R_k + g_m r_{sig} R_k$

$R_{gd} = 350 + 2 \text{ k} + 5,0 \text{ mA/V} \cdot 350 \Omega \cdot 2 \text{ k}\Omega = 5,25 \text{ k}\Omega$

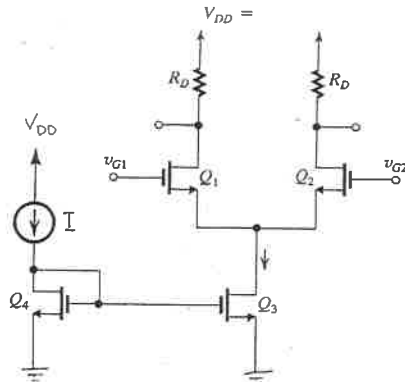
$\Rightarrow \tau_{gd} = 5,25 \times 10^3 \Omega \cdot 35 \times 10^{-15} \text{ s/V} = 205 \text{ ps}$

$\Sigma \tau_i = 14 \text{ ps} + 205 \text{ ps} = 219 \text{ ps}$

3dB:n taajuus = $\frac{1}{2\pi \Sigma \tau_i} = \frac{1}{2\pi \cdot 219 \times 10^{-12} \text{ s}} = 727 \times 10^6 \text{ Hz} = 730 \text{ MHz}$



Ensimmäisen kuvan differentiaaliaparin transistorien "mitat" ovat seuraavat: kaikkien transistorien leveys on $10 \mu\text{m}$. Transistorien pituudet ovat järjestyksessä Q_1, Q_2, Q_3 ja Q_4 $1,0 \mu\text{m}, 1,0 \mu\text{m}, 2,0 \mu\text{m}$ ja $8,0 \mu\text{m}$. Lisäksi tiedetään, että $V_1 = 0,50 \text{ V}$, $k'_n = 250 \mu\text{A/V}^2$, $I = 100 \mu\text{A}$, kuormavastukset $R_D = 2,0 \text{ k}\Omega$ ja käyttöjännite $V_{DD} = 3,3 \text{ V}$. Differentiaaliaparille tuodaan yhteismuotoinen jännite V_{CM} eli $V_{G1} = V_{G2}$.



a) Laske V_{GS} ja V_{OV} transistorille $Q_1 - Q_4$, kun $V_{CM} = 2,0 \text{ V}$.

b) Laske transistorien Q_1 ja Q_2 yhteisen lähdesolmupisteen jännite V ja lähtöjännitteet V_{D1} ja V_{D2} , kun $V_{CM} = 2,0 \text{ V}$.

c) Laske vahvistimen yhteismuotoisen signaalin V_{CM} jännitealue, jolla kaikki transistorit ovat kyllästystilassa.

a) Q_4 diiodikykyetty \rightarrow on saturoituneena, $v_{GS4} = 0$
 $I_4 = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} V_{OV4}^2 \Rightarrow V_{OV4} = \sqrt{\frac{2 \cdot 100 \mu\text{A}}{250 \mu\text{A/V}^2 \cdot \frac{10}{8}}} = 0,80 \text{ V}$
 $\Rightarrow V_G = V_S + V_{OV4} + V_{tn} = 0,80 + 0,50 = 1,3 \text{ V}$

Q_3 : I_3 on $2 \mu\text{m}$, joten jos Q_2 on saturoituneena (diff. parissa on) niin $I_3 = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS3} - V_{tn})^2 = \frac{1}{2} 250 \mu\text{A/V}^2 \cdot \frac{10}{2} (0,80)^2 = 400 \mu\text{A}$
 $400 \mu\text{A}$ jakautuu miten, että $I_1 = I_2 = 200 \mu\text{A}$
 $V_{OV1} = V_{OV2} = \sqrt{\frac{2 \cdot 200 \mu\text{A}}{250 \mu\text{A/V}^2 \cdot \frac{10}{4}}} = 0,40 \text{ V}$
 $V_{GS1} = 0,40 \text{ V} + 0,50 \text{ V} = 0,90 \text{ V} = V_{GS1} - V_{tn1}$

b) $V_{S1} = V_{S2}$ saadaan edellisestä
 $V_{S1} = V_{S2} = V_{GS1} - V_{OV1} - V_{tn} = 2,0 - 0,40 - 0,5 = 1,1 \text{ V}$
 $V_{D1} = V_{D2} = 3,3 \text{ V} - 0,2 \text{ mA} \cdot 2 \text{ k}\Omega = 2,9 \text{ V}$

c) V_{CM} -alue
 minimi, kun Q_3 ja Q_4 ovat lin./sat.-rajalla
 Q_3 : $V_{DS} = V_{OV} = 0,80 \text{ V}$
 Q_1 : $V_{OV} = V_{GS} - V_{tn} \Rightarrow V_{GS1} = V_{OV} + V_{tn} = 0,40 + 0,50 = 0,90 \text{ V}$
 yhteensä $V_{CM \text{ min}} = 0,80 + 0,90 = 1,7 \text{ V}$
 maksimi, kun Q_1 on saturoituneena
 $V_{GS1} = V_{tn} \Rightarrow V_{GS1} = V_{tn} + V_{D1} = 0,50 + 2,9 = 3,4 \text{ V}$
 $\therefore 1,7 \text{ V} \leq V_{CM} \leq 3,4 \text{ V}$

4a) Erillisellä paperilla on piirretty takaisinkytkentään liittyvät vahvistus- ja vaihe-erokäyrät. Jos takaisinkytketyn vahvistimen vahvistus on 60 dB , niin kuinka suuri on takaisinkytkentäkerroin β ja kuinka suuret ovat vahvistusvara ja vaihevara? Piirrä tähän oheiseen kuvaan ja liitä se vastauspaperiisi.

