

ELEKTRONİĞE GİRİŞ 2008 – 2009 BAHAR UYGULAMA 6

Örnek1: Taban katkı yoğunluğu $N_D = 2.10^{16} \text{cm}^{-3}$ oksit-yarıiletken ara yüzey yük yoğunluğu $N_{ox} = 3.10^{10} \text{cm}^{-2}$, oksit kalınlığı $t_{ox} = 300 \text{\AA}$ olan n^+ poli-Si geçitli bir pMOS transistorün eşik gerilimini bulunuz.

$$V_{T0} = V_{FB} - 2\phi_{Fn} - \frac{Q_B}{C_{ox}}$$

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

$$\phi_{MS} = \frac{1}{q}(q\phi_M - q\phi_S)$$

MOSFET'in geçit malzemesi n^+ poli Si olduğuna göre $q\phi_M = q\chi_{Si} = 4,15 \text{eV}$ dir. Yarıiletkenin iş fonksiyonu ise:

$$q\phi_S = q\chi_{Si} + \frac{E_g}{2} + \Delta E_{Fn}$$

$$\Delta E_{Fn} = -kT \ln \frac{N_D}{n_i} = -0,367 \text{eV} \quad ; \quad \phi_{Fn} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i} = 0,367 \text{V}$$

$$q\phi_S = 4,15 + \frac{1,12}{2} - 0,367 = 4,343 \text{eV}$$

$$\phi_{MS} = \frac{1}{q}(q\phi_M - q\phi_S) = \frac{1}{q}(4,15 \text{eV} - 4,343 \text{eV}) = -0,193 \text{V}$$

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

$$Q_{ox} = q \cdot N_{ox} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{10} = 4,8 \cdot 10^{-9} \text{ A.s / cm}^2 \quad ; \quad C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = \frac{3,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{300 \cdot 10^{-8}} = 1,15 \cdot 10^{-7} \text{ F / cm}^2$$

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = -0,193 \text{V} - \frac{4,8 \cdot 10^{-9}}{1,15 \cdot 10^{-7}} = -0,235 \text{V}$$

$$Q_{BM} = \sqrt{2\epsilon_{Si} q N_D \cdot 2\phi_{Fn}} = \sqrt{2 \cdot 1,04 \cdot 10^{-12} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{16} \cdot 2 \cdot 0,367} = 7 \cdot 10^{-8} \text{ A.s / cm}^2$$

$$\frac{Q_{BM}}{C_{ox}} = \frac{7 \cdot 10^{-8}}{1,15 \cdot 10^{-7}} = 0,608 \text{V}$$

$$V_{T0} = V_{FB} - 2\phi_{Fn} - \frac{Q_{BM}}{C_{ox}} = -0,235 - 2 \cdot 0,367 - 0,608 = -1,577 \text{V}$$

ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLERİN KÜÇÜK GENLİKLİ İŞARETLER İÇİN GEÇERLİ EŞDEĞER DEVRELERİ

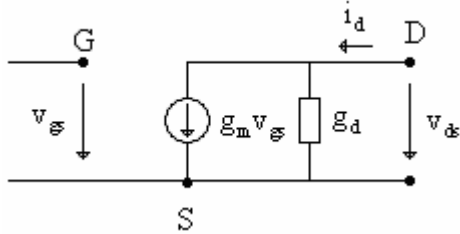
Girişe doğru gerilimin yanında küçük genlikli alternatif gerilim uygulanması durumunda yani $V_{GS}(t) = V_{GSQ} + v_{gs}(t)$ olması durumunda I_D akımı da belli bir doğru genliğin üzerindeki alternatif işaret şeklinde $I_D(t) = I_{DQ} + i_d(t)$ ile değişecek, dolayısıyla V_{DS} gerilimi de aynı şekilde $V_{DS}(t) = V_{DSQ} + v_{ds}(t)$ ile değişecektir. $v_{gs}(t)$, $v_{ds}(t)$ ve $i_d(t)$ arasındaki değişim küçük işaret eşdeğer devresi ile verilir. $I_D = f(V_{GS}, V_{DS})$ olduğuna göre i_d 'nin v_{gs} ve v_{ds} 'ye göre değişimini bulmak için I_D ifadesi I_{DQ} civarında Taylor serisine açılırsa:

$$I_D(t) = I_{DQ} + i_d(t) = I_{DQ} + \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}=sbt} \cdot \Delta V_{GS} + \underbrace{\dots\dots\dots}_{\text{yuksek dereceli terimler}} + \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{GS}=sbt} \cdot \Delta V_{DS} + \underbrace{\dots\dots\dots}_{\text{yuksek dereceli terimler}}$$

$$i_d(t) = \underbrace{\left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}=sbt}}_{g_m} \cdot \underbrace{\Delta V_{GS}}_{v_{gs}(t)} + \underbrace{\left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{GS}=sbt}}_{g_d} \cdot \underbrace{\Delta V_{DS}}_{v_{ds}(t)}$$

$$i_d(t) = g_m \cdot v_{gs}(t) + g_d \cdot v_{ds}(t)$$

g_m ve r_d ($r_d = 1/g_d$) büyüklüklerine k.g.a.i. için geçerli E.D. elemanları denir. Yukarıdan da görüleceği gibi bu büyüklükler çalışma noktasının fonksiyonudur. $i_d(t)$ ifadesi iki akım teriminin toplamı olduğuna göre bunu paralel bir devre ile modelleyebiliriz. Akım ifadesinin ilk terimi başka bir koldaki gerilimle kontrol edildiğinden onu bir gerilim kontrollü akım kaynağı ile gösterebiliriz, ikinci terim ise kendi uçlarındaki gerilimle kontrollü akım kaynağı olduğundan onu basitçe bir iletkenlik olarak gösterebiliriz. Böylece k.g.a.i. için geçerli E.D.



Doğrusal bölgede g_m ve r_d (g_d)

Doyma bölgesinde g_m ve r_d (g_d)

$$I_D = \beta \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}=sbt} = \beta V_{DS}$$

$$g_d = \frac{1}{r_d} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{GS}=sbt} = \beta [V_{GS} - V_T - V_{DS}]$$

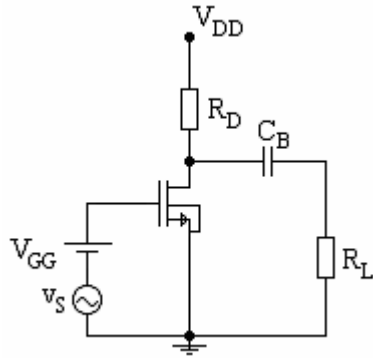
$$I_D = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}=sbt} = \beta (V_{GS} - V_T) (1 + \lambda V_{DS}) = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_T)}$$

$$g_d = \frac{1}{r_d} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{GS}=sbt} = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_T)^2 \lambda = \frac{I_D}{V_{DS} + \frac{1}{\lambda}}$$

Örnek2: nMOSFET'in parametreleri $\beta = 2\text{mA}/\text{V}^2$; $\lambda = 0,05$; $V_T = 1\text{V}$ olan şekildeki nMOSFET'li yükselteç devresinde

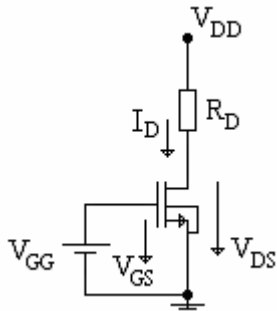
- $V_{GG} = 4\text{V}$ için çalışma noktasını bulunuz, devrenin k.g.a.i. için geçerli eşdeğer devresini çiziniz ve gerilim kazancını hesaplayınız.
- $V_{GG} = 3\text{V}$ için çalışma noktasını bulunuz, devrenin k.g.a.i. için geçerli eşdeğer devresini çiziniz ve gerilim kazancını hesaplayınız.



$$V_{DD} = 10\text{V}$$

$$R_D = 1\text{k}\Omega, R_L = 5\text{k}\Omega$$

- Öncelikle DC analiz yaparak devrenin çalışma noktası bulunur. $V_{GG} = 4\text{V}$ için:



$$(1) V_{GG} = V_{GS} = 4\text{V}$$

$$(2) V_{DD} = I_D R_D + V_{DS}$$

$$I_D = -\frac{1}{R_D} V_{DS} + \frac{1}{R_D} V_{DD} \quad \text{SYD}$$

Üçüncü olarak da MOSFETin akım-gerilim ifadesini yazacağız ancak doğrusal bölge ve doyma bölgesinde karakteristik farklı olduğundan önce bir bölgede çalışıyor kabul edeceğiz ve çalışma noktasını bulacağız, sonra bu değerlerin çalışma bölgesi şartını sağlayıp sağlamadığını kontrol edeceğiz. Şart sağlanıyorsa varsayımımız doğrudur aksi taktirde devre diğer bölgede çalışıyor kabul edip ona göre tekrar çözüm yapılır. FET doymada çalışıyor kabul edelim:

$$(3) I_D = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

(2) ve (3) denklemlerinden

$$\frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$$\frac{10 - V_{DS}}{1 \cdot 10^3} = \frac{1}{2} 2 \cdot 10^{-3} (4 - 1)^2 (1 + 0,05 V_{DS})$$

$$10 - V_{DS} = 9 + 0,45 V_{DS}$$

$$V_{DS} = \frac{1}{1,45} = 0,6897V$$

Devre doymada çalışıyor ise $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ olmalı. Ancak $0,6897V < 3V$. O halde başlangıçtaki doymada çalışıyor varsayımımız doğru değildir. Devre lineerde çalışıyor kabul edelim. Bu durumda (3) denklemi:

$$(3) I_D = \beta \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] \text{ olur. (2) ve (3) den}$$

$$\frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} = \beta \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

$$\frac{10 - V_{DS}}{1 \cdot 10^3} = 2 \cdot 10^{-3} \left[3V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

$$V_{DS}^2 - 7V_{DS} + 10 = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} V_{DS1} = 2V \\ V_{DS2} = 5V \end{array} \right\} \text{ lineer bölgede } V_{DS} \leq V_{GS} - V_T \text{ olmalı. Dolayısıyla } V_{DSQ} = 2V$$

$$I_{DQ} = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} = \frac{10 - 2}{1k} = 8mA$$

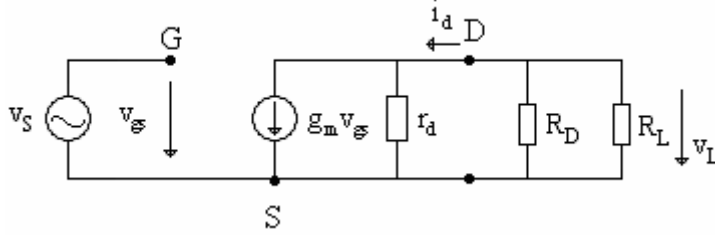
$$Q(V_{GSQ} = 4V, I_{DQ} = 8mA, V_{DSQ} = 2V)$$

Çalışma noktası bulunduktan sonra bu nokta civarındaki alternatif değişimleri inceleyeceğiz. Bunun için FET'in k.g.a.i. ED parametreleri:

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}=sbt} = \beta V_{DS} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{A}{V^2} \cdot 2V = 4 \frac{mA}{V}$$

$$g_d = \frac{1}{r_d} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{GS}=sbt} = \beta [V_{GS} - V_T - V_{DS}] = 2 \cdot 10^{-3} [4 - 1 - 2] = 2 \frac{mA}{V}; \quad r_d = 500\Omega$$

Devrenin k.g.a.i. için geçerli ED'si



$$k_u = \frac{v_L(t)}{v_g(t)}$$

$$v_L(t) = -g_m v_{gs} \cdot r_d // R_D // R_L$$

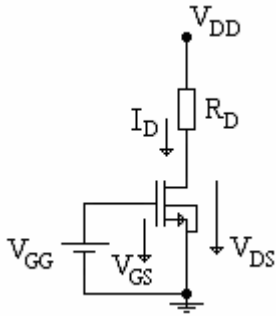
$$v_g(t) = v_{gs}$$

$$k_u = \frac{v_L(t)}{v_g(t)} = \frac{-g_m v_{gs} \cdot r_d // R_D // R_L}{v_{gs}} = -g_m \cdot \underbrace{r_d // R_D // R_L}_{R_y}$$

$$R_y = r_d // R_D // R_L = 500 // 1k // 5k = 312,5\Omega$$

$$k_u = -g_m R_y = -4 \cdot 10^{-3} \cdot 312,5 = -1,25$$

b. $V_{GG} = 3V$ için:



$$(1) V_{GG} = V_{GS} = 3V$$

$$(2) V_{DD} = I_D R_D + V_{DS}$$

$$I_D = -\frac{1}{R_D} V_{DS} + \frac{1}{R_D} V_{DD} \quad \text{SYD}$$

FET doymada çalışıyor kabul edelim:

$$(3) I_D = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

(2) ve (3) denklemlerinden

$$\frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$$\frac{10 - V_{DS}}{1 \cdot 10^3} = \frac{1}{2} 2 \cdot 10^{-3} (3 - 1)^2 (1 + 0,05 V_{DS})$$

$$10 - V_{DS} = 4 + 0,2 V_{DS}$$

$$V_{DSQ} = \frac{6}{1,2} = 5V$$

Devre doymada çalışıyor ise $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ olmalı. $5V > 2V$. O halde varsayımımız doğrudur.

$$I_{DQ} = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} = \frac{10 - 5}{1k} = 5mA$$

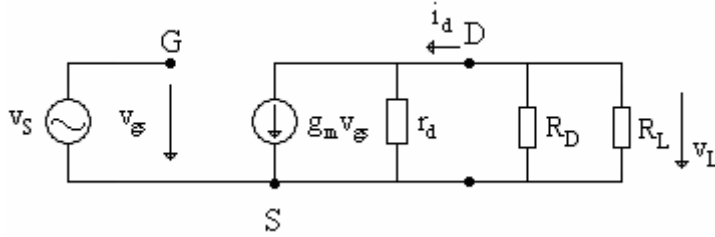
$$Q(V_{GSQ} = 3V, I_{DQ} = 5mA, V_{DSQ} = 5V)$$

Doymada çalışan FET'in k.g.a.i. ED parametreleri:

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}=sbt} = \beta (V_{GS} - V_T) (1 + \lambda V_{DS}) = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_T)} = \frac{10mA}{2V} = 5 \frac{mA}{V}$$

$$g_d = \frac{1}{r_d} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{GS}=sbt} = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_T)^2 \lambda = \frac{1}{2} 2 \cdot 10^{-3} (3 - 1)^2 0,05 = 0,2 \frac{mA}{V}; \quad r_d = 5k\Omega$$

Devrenin k.g.a.i. için geçerli ED'si



$$k_u = \frac{v_L(t)}{v_g(t)}$$

$$v_L(t) = -g_m v_{gs} \cdot r_d // R_D // R_L$$

$$v_g(t) = v_{gs}$$

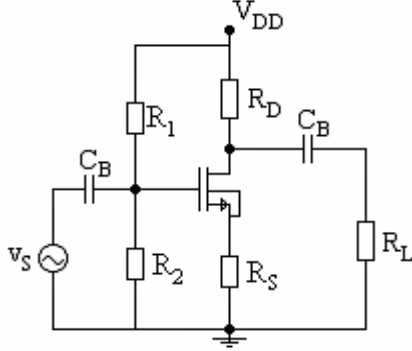
$$k_u = \frac{v_L(t)}{v_g(t)} = \frac{-g_m v_{gs} \cdot r_d // R_D // R_L}{v_{gs}} = -g_m \cdot \underbrace{r_d // R_D // R_L}_{R_y}$$

$$R_y = r_d // R_D // R_L = 5k // 1k // 5k = 714,3\Omega$$

$$k_u = -g_m R_y = -5 \cdot 10^{-3} \cdot 714,3 = -3,571$$

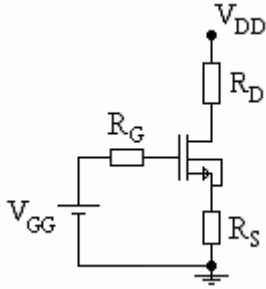
Örnek 3: Şekilde $V_{T0} = 0.8V$; $\beta = 5mA/V^2$; $\lambda = 0,02$ değerleri ile tanımlanan n-MOS transistörlü bir yükselteç devresi verilmektedir.

- Çalışma noktasını (V_{DSQ} , I_{DQ}) bulunuz.
- Transistörün verilen çalışma noktasındaki küçük genlikli alternatif işaretler için geçerli eşdeğer devre elemanlarını hesaplayınız.
- Devrenin k.g.a.i. için geçerli ED'sini çiziniz ve gerilim kazancını bulunuz.



$$\begin{aligned} V_{DD} &= 10V \\ R_1 &= 700k\Omega, R_2 = 300k\Omega \\ R_D &= 1k\Omega, R_S = 100\Omega, R_L = 4k\Omega \\ C_B &\rightarrow \infty \end{aligned}$$

- Çalışma noktası için DC analiz:



$$V_{GG} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} = 3V; \quad R_G = R_1 // R_2 = 210k\Omega$$

$$(1) V_{GG} = V_{GS} + I_D R_S; \quad V_{GS} = 3 - 100I_D$$

$$(2) V_{DD} = I_D R_D + V_{DS} + I_D R_S = I_D (R_D + R_S) + V_{DS}; \quad V_{DS} = 10 - 1100I_D$$

$$I_D = -\frac{1}{R_D + R_S} V_{DS} + \frac{1}{R_D + R_S} V_{DD} \quad \text{SYD}$$

FET doymada çalışıyor kabul edelim:

$$(3) I_D = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

(1), (2) ve (3) denklemlerinden

$$I_D = \frac{1}{2} 5 \cdot 10^{-3} (3 - 100I_D - 0,8)^2 [1 + 0,02(10 - 1100I_D)]$$

$$2,5 \cdot 10^{-3} (2,2 - 100I_D)^2 (1,2 + 22I_D) - I_D = 0$$

$$I_{DQ} = 6,422mA$$

$$V_{GSQ} = 3 - 100I_D = 3 - 0,6422 = 2,3578V$$

$$V_{DSQ} = 10 - 1100I_D = 10 - 1,16,422 = 2,936V$$

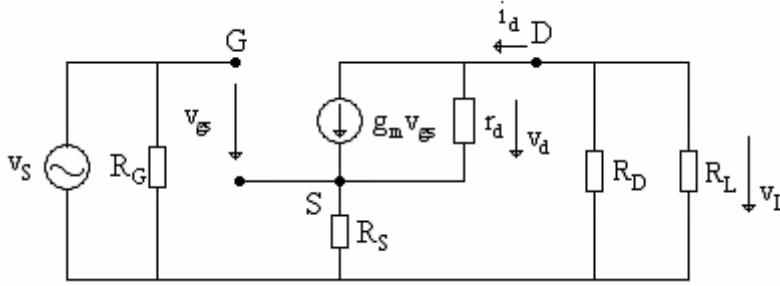
Devre doymada çalışıyor ise $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ olmalı. $2,936V > 1,5578V$ o halde varsayımımız doğrudur.

b. K.g.a.i. için geçerli ED elemanları:

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}=sbt} = \beta(V_{GS} - V_T)(1 + \lambda V_{DS}) = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_T)} = \frac{2.6,422mA}{1,5578V} = 8,245 \frac{mA}{V}$$

$$g_d = \frac{1}{r_d} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{GS}=sbt} = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_T)^2 \lambda = \frac{1}{2} 5.10^{-3} (1,5578)^2 0,02 = 0,12 \frac{mA}{V}; \quad r_d = 8,24k\Omega$$

c. Gerilim kazancı



$$(1) v_L = -i_d \cdot R_D // R_L = v_d + i_d \cdot R_S$$

$$(2) v_d = (i_d - g_m v_{gs}) \cdot r_d$$

(1) ve (2)'den

$$(i_d - g_m v_{gs}) \cdot r_d + i_d R_S = -i_d R_D // R_L$$

$$i_d (r_d + R_S + R_D // R_L) = g_m r_d v_{gs}$$

$$v_{gs} = \frac{(r_d + R_S + R_D // R_L)}{g_m r_d} i_d$$

$$v_s = v_{gs} + i_d R_S = \left[\frac{(r_d + R_S + R_D // R_L)}{g_m r_d} + R_S \right] i_d$$

$$v_L = -i_d R_D // R_L$$

$$k_U = \frac{v_L}{v_s} = - \frac{g_m r_d \cdot R_D // R_L}{r_d + R_D // R_L + (1 + g_m r_d) R_S}$$

$$k_U = - \frac{8,245 \cdot 8,24 \cdot 0,8k}{8,24k + 0,8k + (1 + 8,245 \cdot 8,24) \cdot 0,1k} = -3,411$$