

## Tutoría 8

PROBLEMA 1. Las características de salida de un transistor NMOS se dan en la figura 1. ¿Cuáles son los valores de  $K$  y  $V_{TH}$  para este transistor? ¿Se trata de un transistor de enriquecimiento o de empobrecimiento? Si  $K' = 25 \mu A/V^2$ , ¿cuál es el valor de  $W/L$  para este dispositivo?

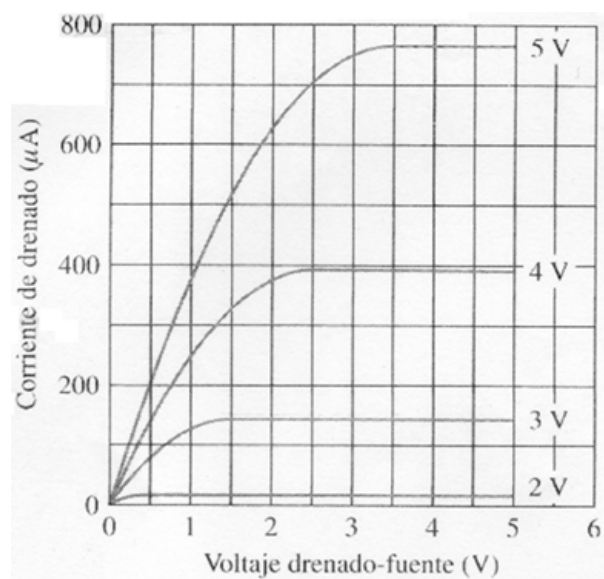


FIGURA 1. Característica de salidad para el problema 1.

SOLUCIÓN. Es de enriquecimiento.

En saturación:

$$I_D = \frac{1}{2}K(V_{GS} - V_{TH})^2$$

En la curva del lugar geométrico de  $V_{DS,sat}$

$$V_{DS} = V_{DS,sat} = V_{GS} - V_{TH}$$

Leyendo los puntos del lugar geométrico

$$\left. \begin{array}{ll} V_{GS} = 3V & V_{DS} = 1.5V \\ V_{GS} = 4V & V_{DS} = 2.5V \\ V_{GS} = 5V & V_{DS} = 3.5V \end{array} \right\} V_{TH} = 1.5V$$

Leyendo un punto en la zona de saturación

$$I = \frac{1}{2}K(V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$\approx 400\mu A @ V_{DS} = 1V, V_{GS} = 5V$$

$$\Rightarrow K = \frac{2I}{(V_{GS} - V_{TH})^2} = \frac{2 \cdot 400\mu A}{(5V - 1.5V)^2} = 65.3\mu A$$

$$\text{con } K' = 25\mu A/V^2$$

$$\Rightarrow \frac{K}{K'} = \frac{65.3\mu A}{25\mu A} = 2.61 = \frac{W}{L}$$

□

PROBLEMA 2. Considere el circuito de la figura 2. El transistor tiene las siguientes características:  $V_{TH} = 0.7V$ ,  $K' = 100\mu A/V^2$ ,  $L = 1\mu m$ ,  $W = 32\mu m$ ,  $\lambda = 0$ . Dimensione  $R_D$  y  $R_S$  para que para que  $I_D = 0.6mA$ ,  $V_D = 0.6V$

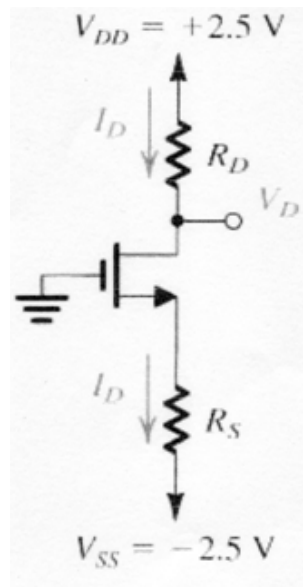


FIGURA 2. Circuito para el problema 2.

SOLUCIÓN.

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{2.5V - 0.6V}{0.6mA} = 3.16k\Omega$$

$$V_{GS} = 0 - (V_{RS} - (-V_{SS}))$$

$$V_{DS} = V_D - (V_{RS} - (-V_{SS}))$$

$$V_{GS} - V_{TH} < V_{DS}$$

$$-V_{RS} - V_{SS} - V_{TH} < V_D - V_{RS} - V_{SS}$$

$$-V_{TH} < V_D$$

Por lo tanto está en saturación

$$I_D = \frac{1}{2}K(V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$\Rightarrow V_{GS} = \sqrt{\frac{2I_DL}{K'W}} + V_{TH}$$

$$V_{GS} = \sqrt{\frac{2(0.6\text{mA})(1\mu\text{m})}{(100\mu\text{A/V}^2) \cdot (32\mu\text{m})}} + 0.7\text{V}$$

$$V_{GS} = 0.612\text{V} + 0.7\text{V} = 1.312\text{V}$$

$$V_{GS} = V_G - V_S$$

$$\Rightarrow V_S = -1.312\text{V}$$

$$\Rightarrow R_S = \frac{V_S - (-V_{SS})}{I_D} = \frac{-1.312\text{V} - (-2.5\text{V})}{0.6\text{mA}}$$

$$R_S = 1980\Omega$$

□

PROBLEMA 3. Considere el circuito de la figura 3. El voltaje de umbral del transistor es 1 V.

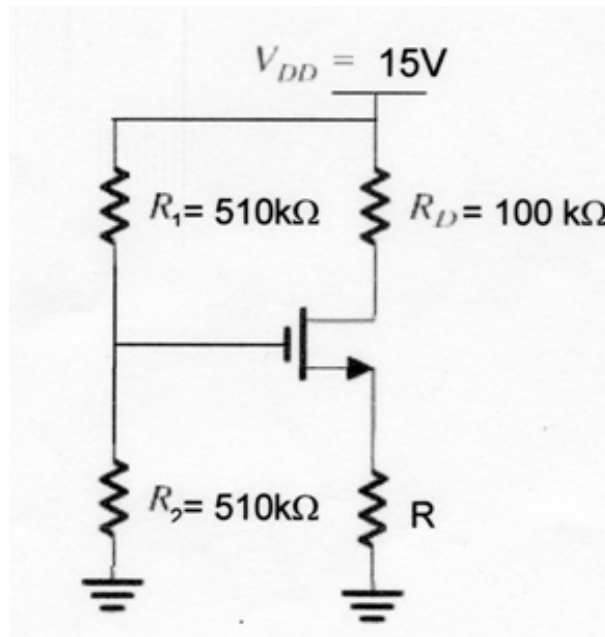


FIGURA 3. Circuito para el problema 3.

Calcule:

- a) El voltaje máximo en  $R$  para que el transistor esté activo (no opere en la región de corte)
- b) La corriente de drenador máxima para que el transistor opere en la región de saturación
- c) El valor mínimo de  $R$  para cumplir las condiciones de los puntos a y b

SOLUCIÓN. a)

$$V_G = \frac{V_{DD}}{2} = 7.5V$$

Para que el transistor esté activo:

$$V_{GS} \geq V_{TH}$$

$$V_G - V_S \geq V_{TH}$$

$$-V_S \geq V_{TH} - V_G$$

$$V_S \leq V_G - V_{TH}$$

$$V_S \leq 7.5V - 1V = 6.5V$$

$$\Rightarrow V_R \text{ no puede ser mayor que } 6.5V$$

b) Saturación  $\Rightarrow V_{GS} - V_{TH} \leq V_{DS}$

$$V_{GS} = \frac{V_{DD}}{2} - V_R$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I(R + R_D)$$

$$\Rightarrow \frac{V_{DD}}{2} - IR - V_{TH} \leq V_{DD} - IR - IR_D$$

$$-V_{TH} \leq \frac{V_{DD}}{2} - IR_D$$

$$\frac{V_{TH} + \frac{V_{DD}}{2}}{R_D} \geq I$$

$$I_{\max} = \frac{7.5V + 1V}{100k\Omega}$$

$$I_{\max} = 85\mu A$$

c) El valor mínimo de R para cumplir las condiciones de los puntos a y b

$$85\mu A \geq I$$

$$\frac{6.5V}{R} \geq I$$

$$85\mu A \geq \frac{6.5V}{R}$$

$$R \geq \frac{6.5V}{85\mu A}$$

$$R \geq 76.47k\Omega$$

□

PROBLEMA 4. En una tecnología para la cual el espesor del óxido de la compuerta es de 20 nm.

a) Encuentre el valor de NA para  $\gamma = 0.5V^{1/2}$

b) Si la concentración de dopado se mantiene constante pero el espesor del óxido de la compuerta aumenta a 100 nm, ¿cuál será el valor de  $\gamma$ ?

c) Si  $\gamma$  se mantiene constante a  $0.5V^{1/2}$ , ¿a qué valor debe cambiarse la concentración de dopado?

SOLUCIÓN. a)

$$\gamma = \frac{\sqrt{2qN_A\epsilon_S}}{C_{ox}}$$

$$N_A = \frac{(\gamma C_{ox})^2}{2q\epsilon_S} = \frac{\left(\gamma \frac{3.9\epsilon_0}{t_{ox}}\right)^2}{2q\epsilon_S}$$

$$N_A = 2.225 \times 10^{22} \text{m}^{-3}$$

$$N_A = 2.225 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$$

b)

$$N_A = 2.225 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$$

$$t_{ox} = 100 \text{nm}$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{2qN_A\epsilon_S}}{3.9\epsilon_0} t_{ox}$$

$$\gamma = 2.5 \text{V}^{1/2}$$

c)

$$N_A = \frac{2.225 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}}{25}$$

$$N_A = 8.9 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$$

□

PROBLEMA 5. En una aplicación, un MOSFET de canal n opera con VSB en el intervalo de 0 a 4 V. Si VTH0 es nominalmente 1 V.

a) Encuentre el valor de VTH que se obtiene si  $\gamma = 0.5 \text{V}^{1/2}$  y  $2\phi_B = 0.6 \text{V}$ .

b) Si el espesor del óxido de la compuerta se aumenta por un factor de 4, ¿cuál será el voltaje de umbral?

SOLUCIÓN. a)

$$V_{TH} = V_{TH0} + \gamma \left[ \sqrt{2\phi_B + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_B} \right]$$

Al sustituir los valores dados en la ecuación anterior, se obtiene

$$V_{SB} = 0 \text{V} \Rightarrow V_{TH} = 1 \text{V}$$

$$V_{SB} = 4 \text{V} \Rightarrow V_{TH} = 1.685 \text{V}$$

$$1V \leq V_{TH} \leq 1.685V$$

b) Si el espesor del óxido de la compuerta se aumenta por un factor de 4, ¿cuál será el voltaje de umbral?

$$t_{ox2} = 4t_{ox1} \rightarrow \gamma_2 = 4\gamma_1$$

Al evaluar en el rango de  $V_{SB}$ , se obtiene

$$V_{SB} = 0V \Rightarrow V_{TH} = 1V$$

$$V_{SB} = 4V \Rightarrow V_{TH} = 3.74V$$

$$1V \leq V_{TH} \leq 3.74V$$

□

PROBLEMA 6. Un transistor de canal  $P$  opera en saturación con un voltaje de fuente de 3 V menor que el voltaje de sustrato. Para  $\gamma = 0.5V^{1/2}$ ,  $2\phi_B = 0.75V$  y  $V_{TH0} = -0.7V$ , encuentre  $V_{TH}$ .

SOLUCIÓN.

$$|V_{TH}| = |V_{TH0}| + \gamma \left[ \sqrt{2\phi_f + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_f} \right]$$

$$|V_{TH}| = |-0.7V| + 0.5V^{1/2} \left[ \sqrt{0.75 + 3} - \sqrt{0.75} \right]$$

$$|V_{TH}| = |-0.7V| + 0.5352V$$

$$|V_{TH}| = 1.235V$$

□

PROBLEMA 7. Considere la compuerta lógica de la figura 4. Complete la tabla de verdad indicando el valor de la salida para las combinaciones de entradas mostradas en la tabla.

X	Y	Z	Salida
0	0	0	
0	1	0	
1	1	0	
1	1	1	

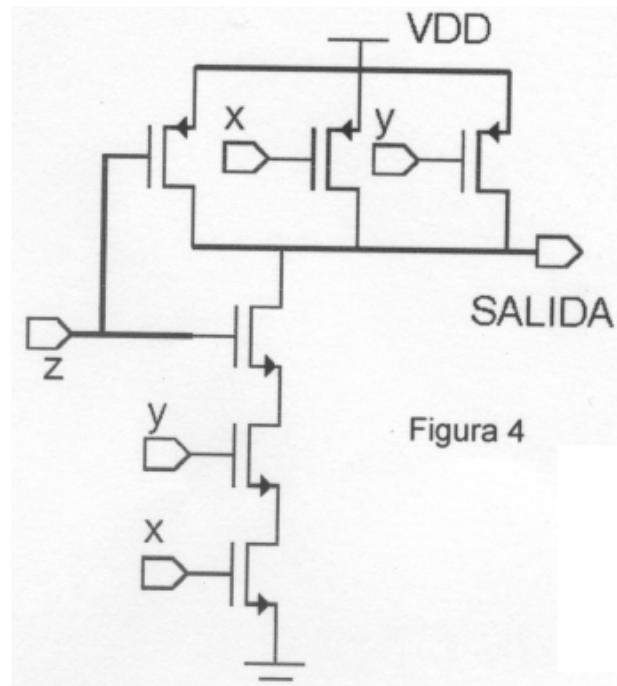


FIGURA 4. Circuito para el problema 7.

SOLUCIÓN. NAND de tres entradas:

X	Y	Z	Salida
0	0	0	VDD
0	1	0	VDD
1	1	0	VDD
1	1	1	GND

□

PROBLEMA 8. Los transistores del circuito de la figura mostrada son de enriquecimiento y tienen el mismo valor de  $K$  y la misma magnitud de tensión de umbral. Asuma que  $\lambda=0$  para ambos transistores. Encuentre expresiones para las corrientes  $I_{DS}$  de ambos transistores y la tensión de salida para los siguientes valores de la tensión de entrada: a) 0 V, b) 2.5 V, c) -2.5 V.



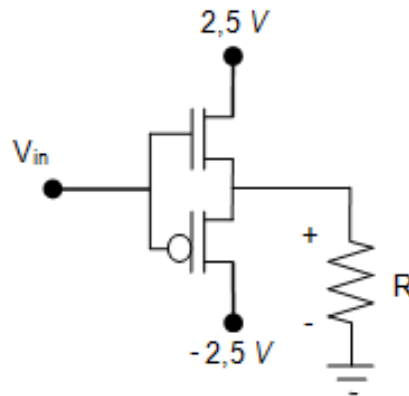
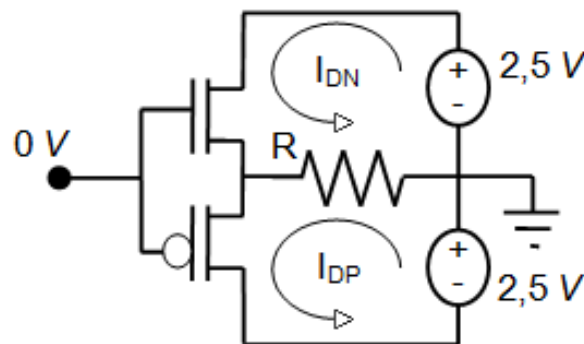


FIGURA 5. Circuito para el problema.

SOLUCIÓN. a)  $V_{in} = 0V$



Si sólo condujera N  $\rightarrow V_G = 0V$ ,  $V_S = V_O$ ,  $V_{GS} = 0 - V_O$

La única posibilidad de que N conduzca es, entonces, que  $V_O$  sea negativo. Si  $V_O$  es negativo, tiene polaridad opuesta a la mostrada en la figura. Lo único que puede lograr esto es la conducción del PMOS.

PMOS:  $V_G = 0V$ ,  $V_S = V_O \rightarrow V_{SG} = V_O - 0V$

La única forma de lograrlo, es que  $V_O$  sea positivo. Esto puede lograrse solo si NMOS conduce.

Se requerirá que los 2 conduzcan a la vez pero, ¿Qué pasaría en este caso?

El circuito es simétrico puesto que  $|V_{DD}| = |V_{SS}|$  y

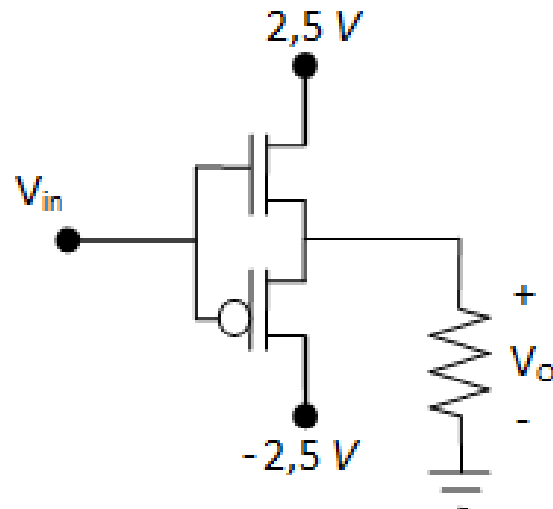
$$K_P' \frac{W_P}{L_P} = K_N' \frac{W_N}{L_N}$$

y las salidas y entradas son comparadas  $\Rightarrow |I_{DN}| = |I_{DP}|$  pero con direcciones opuestas  $\Rightarrow V_O = R(I_{DN} - I_{DP})$ .

La resta de  $I_{DN}$  e  $I_{DP}$  da cero

$\Rightarrow V_O = 0V$  pero esto significa que  $V_{GSN} = 0V$  y  $V_{GSP} = 0V$  ningún transistor conduce.

b)  $V_{in} = 2.5V$



$V_{in}$  igual al voltaje de alimentación más alto del circuito

$$V_G = V_{DD} = V_{in}$$

$$V_S = V_O$$

$V_{GS} = V_{in} - V_O$  conduce NMOS

Si NMOS conduce, la corriente fluye de  $V_{DD}$  a través de NMOS y hacia tierra en la resistencia. Siempre va a haber una caída de tensión entre D y S, por lo que  $V_O$  siempre es menor que  $V_{DD}$ , ya que  $V_O = V_{DD} - V_{DSN}$ .

Al ser  $V_{in} = 2.5V$  el voltaje de alimentación más alto siempre va a ser mayor o igual que el voltaje en cualquiera de las terminales del transistor.

$$V_S = V_O$$

$$V_G = V_{in} = V_{DD}$$

$$V_{SG} = V_O - V_G \Rightarrow < |V_{THP}|$$

Transistor P no conduce

Por otra parte, si el transistor P condujera y contribuyera así a disminuir el potencial en la salida, se empeoraría la diferencia de potencial entre G y S, S sería aún más negativo que G y el transistor no puede conducir.

Si NMOS conduce, debe conducir en zona lineal o saturación.

$$V_{DS} = V_{DD} - V_O$$

$$V_{GS} = V_{DD} - V_O$$

Solo opera en saturación

$$\Rightarrow I = \frac{1}{2} K_N' \frac{W_N}{L_N} (V_{DD} - V_D - V_{THN})^2$$

Con  $I = V_D/R$  se resuelve para  $V_D$  y se encuentra  $I_{DN} = V_D/R$

Por otra parte, si el transistor opera en la zona lineal  $V_{DS}$  sería (muy) pequeño  $\Rightarrow V_D \uparrow \Rightarrow V_{GS} \downarrow \Rightarrow$  podría llevar a un voltaje  $V_{GS}$  menor que  $V_{TH}$  y sacar al transistor de conducción.

c)  $V_{in} = -2.5V = V_{SS} =$  el voltaje de alimentación más bajo del circuito

$$V_G = V_{SS} = V_{in}$$

$$V_S = V_O$$

$V_S$  siempre va a ser mayor o igual a  $-V_{SS}$

$\Rightarrow V_G - V_S = V_{SS} - V_O$  siempre va a ser cero o negativo  $\rightarrow$  NMOS no conduce

Si asumimos que conduce, contribuye a hacer  $V_O$  más positivo, compensando la diferencia de potencial (polarización) y sacando al transistor de conducción.

$$V_S = V_O$$

$$V_G = V_{in} = V_{SS}$$

$$V_{SG} = V_O - V_{SS}$$

Sabemos que  $V_O$  siempre va a ser mayor que  $V_{SS}$ , ya que si  $V_O = V_{SS}$ , no podría fluir corriente por el transistor PMOS; además al estar el transistor activo hay una caída de potencial  $V_{DS}$  que cambia  $V_O$  y no permite que sea igual a  $V_{SS}$ . Además aunque  $V_D$  sea negativo, no existe ningún potencial menor que  $V_{SS}$  en el circuito, por lo que el transistor conduce.

