

Entregable

Ejercicio 1.- Si consideramos un transistor NMOS fabricado sobre Si tal que el óxido de la puerta tiene un espesor de 15nm. El óxido de puerta es SiO_2 con $\epsilon_r = 3,9$. La movilidad de e^- en el canal es $\mu_n = 550 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$. La relación entre la anchura y la longitud es $W/L = 20$. La tensión umbral es $V_T = 2,3 \text{ V}$. Además $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$, $k = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox}$

- Determinar el valor de V_{DS} para que el transistor opere en saturación con $I_D = 0,2 \text{ mA}$.
- ¿Para qué rango de la tensión V_{DS} el transistor operará en las condiciones de a)?
- Determina la corriente I_D para $V_{DS} = 20 \text{ mV}$. Comprobar la validez de la aproximación lineal.

En primer lugar C_{ox} es la capacidad de óxido por unidad de área.

Si A es el área del óxido entonces

$C_{ox} = \frac{C_{PP}}{A}$ siendo C_{PP} la capacidad de un condensador de placas plano paralelas con las características del óxido. Esto es

$$C_{PP} = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 A}{d} \Rightarrow C_{ox} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{A \cdot d} = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{d}$$

Por tanto en nuestro problema $C_{ox} = \frac{3,9 \cdot 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}}{15 \text{ nm}} = 2,30 \cdot 10^{-7} \frac{\text{F}}{\text{cm}^2}$

12

a) Para que el transistor opere en saturación, debe haber canal y se tiene que cumplir la condición $V_{GS} - V_{DS} \leq V_t$

En saturación, la relación entre I_{DS} y V_{GS} viene dada por

$$I_{DS} = \frac{k}{2} (V_{GS} - V_t)^2$$

Como hay canal $V_{GS} > V_t$ así que despejamos V_{GS}

$$(V_{GS} - V_t)^2 = \frac{I_{DS} 2}{k} \Leftrightarrow V_{GS} = V_t + \sqrt{\frac{2 I_{DS}}{k}} = V_t + \sqrt{\frac{2 I_{DS}}{\frac{W}{L} \cdot \mu_n C_{ox}}}$$

$$V_{GS} = 2,3V + \sqrt{\frac{2 \cdot 0,2mA}{20 \cdot 550 \frac{cm^2}{Vs} \cdot 2,30 \cdot 10^{-7} \frac{F}{cm^2}}} = 2,7V$$

b) Para que el transistor opere en saturación, se tiene que verificar la condición $V_{GS} > V_t$ (que haya canal) y que $V_{GS} - V_{DS} < V_t$

$$\Rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_t$$

$$\text{Para los datos de a) } V_{DS} > 2,7V - 2,3V = 0,4V$$

$$\Rightarrow V_{DS} > 0,4V \Leftrightarrow \text{el transistor está en saturación con } V_{GS} = 2,7V.$$

c) Si $V_{DS} = 20mV \Rightarrow$ estaremos en la zona lineal si

$$V_{GS} - 20mV > 2,3V \Leftrightarrow V_{GS} > 2,32V$$

$$\begin{aligned} \text{Ahora } I_{DS} &= k (V_{GS} - V_{th}) V_{DS} = 20 \cdot 550 \frac{cm^2}{Vs} \cdot 2,3 \cdot 10^{-7} \frac{F}{cm^2} (V_{GS} - 2,3V) \cdot 20mV = \\ &= V_{GS} \cdot 5,06 \cdot 10^{-5} - 1,1638 \cdot 10^{-4} \quad (\text{Aproximación lineal}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{DS} &= k \left((V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right) = V_{GS} \cdot 5,06 \cdot 10^{-5} - 1,1638 \cdot 10^{-4} - k \frac{V_{DS}^2}{2} = \\ &= V_{GS} \cdot 5,06 \cdot 10^{-5} - 1,1686 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

3

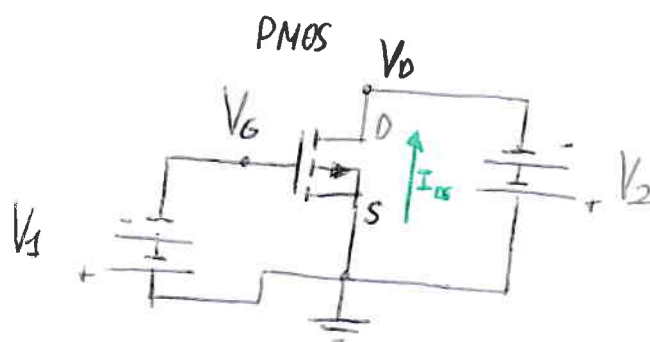
Si sustituimos para el valor

$$V_{GS} = 2,7V \Rightarrow I_{DS} = 2,02 \cdot 10^{-5} A \text{ (Aproximación lineal)}$$
$$I_{DS} = 1,97 \cdot 10^{-5} A$$

Se puede ver que la aproximación es bastante buena.

Ejercicio 2 - El transistor está caracterizado por $V_T = -3V$ y $k = 0,05 A/V^2$. Determina en qué región opera el transistor y calcula V_{GS} , V_{DS} e I_{DS} para:

- a) $V_1 = 2V, V_2 = 5V$
- b) $V_1 = 3,5V, V_2 = 4V$
- c) $V_1 = 5V, V_2 = 1V$



$$V_G = -V_1, V_D = -V_2 \text{ y } V_S = 0V$$

En general, el transistor está en corte si $V_G > V_T \Leftrightarrow -V_1 > -3V \Leftrightarrow V_1 < 3V$

Si no está en corte, ($V_1 > 3V$) entonces

estará en la zona lineal si $V_{GS} - V_{DS} < V_T \Leftrightarrow$

$$\Leftrightarrow -V_1 + V_2 < V_T \Leftrightarrow V_2 - V_1 < -3V \Leftrightarrow V_1 - V_2 > 3V$$

y estará en saturación si $V_1 - V_2 > 3V$.

Por tanto

$$\text{Corte} \Leftrightarrow V_1 < 3V$$

$$\text{Lineal} \Leftrightarrow V_1 > 3V \text{ y } V_1 - V_2 > 3V$$

$$\text{Saturación} \Leftrightarrow V_1 > 3 \text{ y } V_1 - V_2 < 3V$$

a) Como $V_1 < 3V \Rightarrow$ Estamos en corte y $V_{GS} = -2V, V_{DS} = -5V, I_{DS} = 0A$

b) Como $V_1 > 3V$ y $V_1 - V_2 < 3V \Rightarrow$ Estamos en saturación y $V_{GS} = -3,5V, V_{DS} = -4V$

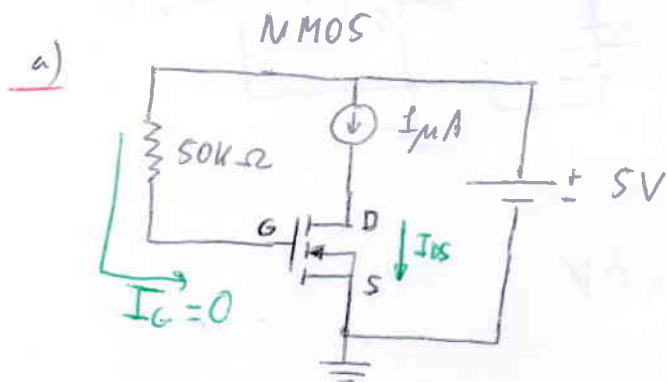
$$y I_{DS} = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{0,05 \frac{A}{V^2}}{2} (-3,5 + 3)^2 = 6,25 \cdot 10^{-3} A = 6,25 mA.$$

c) Como $V_1 > 3V$ y $V_1 - V_2 > 3V \Rightarrow$ Estamos en la zona lineal y

$$V_{GS} = -5V, V_{DS} = -1V \text{ y}$$

$$I_{DS} = K (V_{GS} - V_T) V_{DS} = 0,05 \frac{A}{V^2} (-5V + 3V)(-1) = 0,1 A$$

Ejercicio 3.- Para los circuitos determina en qué región opera el transistor y los valores de V_{GS}, V_{DS} e I_D para $V_T = 2,5V, k = 0,01 \frac{A}{V^2}$.



Podemos decir que $I_{DS} = 1\mu A$ porque $I_G = 0$ y

$$V_{GS} = 5V - I_G \cdot 50k\Omega = 5V > V_T = 2,5V$$

Podemos suponer, ya que sabemos que el transistor no está en corte, que está en la zona lineal.

$$\Rightarrow I_{DS} = k (V_{GS} - V_T) V_{DS} \Rightarrow V_{DS} = \frac{I_{DS}}{k (V_{GS} - V_T)} =$$

$$= \frac{1\mu A}{0,01 \frac{A}{V^2} (5V - 2,5V)} = 4 \cdot 10^{-5} V \text{ que verifica que}$$

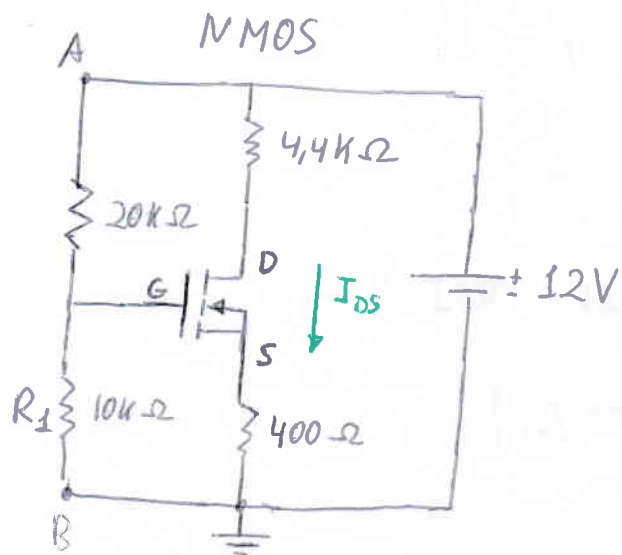
$$V_{GS} - V_{DS} > V_T \text{ (condición zona lineal).}$$

(Si hubiéramos supuesto que estábamos en saturación)

$$\Rightarrow I_{DS} = 1\mu A \neq \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2 = 0,03125 A !!$$

\Rightarrow	Zona lineal
	$I_{DS} = 1\mu A$
	$V_{GS} = 5V$
	$V_{DS} = 4 \cdot 10^{-5} V$

b)



Se tiene que $V_A = 12V$ y $V_B = 0V$

$$V_G = V_{R_1} = R_1 \cdot I_{R_1} = R_1 \cdot \frac{V_A}{R_1 + R_2} =$$

$$= 12V \cdot \frac{10}{20+10} = 4V$$

$$\Rightarrow V_G = 4V > V_T = 2,5V$$

Por tanto hay probablemente canal N.

$$V_S = I_{DS} \cdot 400\Omega$$

Suponemos que estamos en la zona de saturación y la ecuación es:

$$I_{DS} = \frac{k}{2} (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{0,01 \frac{A}{V}}{2} (4V - I_{DS} \cdot 400\Omega - 2,5V)^2 =$$

$$= 0,005 (1,5V - 400 I_{DS})^2 = 800 I_{DS}^2 - 1,6 I_{DS} + 0,01125$$

$$\Rightarrow I_{DS} = \frac{1,7 \pm \sqrt{7^2 - 4 \cdot 800 \cdot 0,01125}}{2 \cdot 800} = \frac{7 \pm 3,61}{1600} =$$

$$= 6,63 \cdot 10^{-3} A$$

$$= 2,12 \cdot 10^{-3} A$$

Solución no válida porque sería $V_{GS} = 4V - I_{DS} \cdot 400\Omega = 1,35V < V_T$ y estaríamos en corte.

Para la solución $I_{DS} = 2,12 \cdot 10^{-3} A$

$$\Rightarrow V_{GS} = 3,15V > V_T$$

$$V_{DS} = V_A - 4,4k\Omega \cdot I_{DS} - 400\Omega \cdot I_{DS} =$$

$$= 12V - (4,4k\Omega + 400\Omega) I_{DS} = 1,824V$$

$\Rightarrow V_{GS} - V_{DS} < V_T$ (Zona de saturación) Solución coherente.

Si hubieramos supuesto la zona lineal

$$\Rightarrow V_{DS} = 12V - 4800 I_{DS}$$

$$y \quad I_{DS} = K(4V - 400 I_{DS} - 2,5V)(12V - 4800 I_{DS}) =$$

$$= 0,01(1,5 - 400 I_{DS})(12 - 4800 I_{DS}) =$$

$$= 19200 I_{DS}^2 - 120 I_{DS} + 0,18$$

$$\Rightarrow I_{DS} = \frac{120 \pm \sqrt{120^2 - 4 \cdot 19200 \cdot 0,18}}{2 \cdot 19200} = \frac{120 \pm 28,58}{38400} =$$

$$= \begin{cases} 2,41 \cdot 10^{-3} A \\ 3,97 \cdot 10^{-3} A \end{cases}$$

Para $I_{DS} = 3,97 \cdot 10^{-3} A$

$$\Rightarrow V_S = 0,4k\Omega \cdot I_{DS} = 1,56V \quad y \quad V_D = 12V - 4,4k\Omega \cdot I_{DS} = -5,16V \quad y$$

esto es una contradicción.
porque $V_{DS} > 0$

Para $I_{DS} = 2,41 \cdot 10^{-3} A$

$$\Rightarrow V_S = 0,964 \quad , \quad V_D = 1,396 \quad \rightarrow V_{DS} = 0,432V$$

$$V_{GS} = 4 - 0,964 = 3,036V$$

$$V_{GS} - V_{DS} = 2,604V > 2,5V = V_T$$

Por tanto se verifica la ecuación de la zona lineal.

17

Como tenemos 2 posibles soluciones coherentes nos planteamos que la errónea puede ser la de la aproximación lineal.

Si planteamos la ecuación de la zona lineal como

$$I_{DS} = k(V_{GS} - 2,5V)V_{DS} - \frac{kV_{DS}^2}{2} \quad \text{y sustituimos } V_{GS} = 4 - 400I_{DS}$$
$$V_{DS} = 12 - 4800I_{DS}$$

$$\Rightarrow I = k(1,5 - 400I)(12 - 4800I) - k \frac{(12 - 4800I)^2}{2} =$$
$$= 19200I^2 - 120I + 0,18 - 115200I^2 + 576I - 0,72$$

$$\Rightarrow 0 = 96000I^2 - 456I + 0,54$$

$$I = \frac{456 \pm \sqrt{456^2 - 4 \cdot 96000 \cdot 0,54}}{2 \cdot 96000} = \frac{456 \pm 24}{192000} \begin{cases} = 2,5 \cdot 10^{-3} A \\ = 2,25 \cdot 10^{-3} A \end{cases}$$

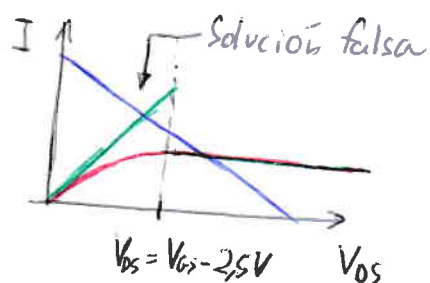
Para $I_{DS} = 2,5 \cdot 10^{-3} A$

$$\Rightarrow V_S = 0,4k\Omega \cdot I_{DS} = 1V \quad V_D = 1V \Rightarrow V_{DS} = 0V \quad \text{Contradicción.}$$

Para $I_{DS} = 2,25 \cdot 10^{-3} A$

$$\Rightarrow V_S = 0,4k\Omega \cdot I_{DS} = 0,9V \quad V_D = 0 \Rightarrow V_{DS} < 0 \quad \text{Contradicción.}$$

En efecto, como sospechábamos la aproximación lineal es mala y nos ofrece una solución que, considerando el comportamiento real, es imposible. Esto sucede porque



18

Cuestión 1.- Justifica por qué la corriente de puerta de un MOSFET es prácticamente nula.

El funcionamiento de la puerta es como el de un condensador. Si estamos tratando con un semiconductor de tipo P, al cargar positivamente la zona metálica de la puerta podemos forzar una zona N a través de aplicar un voltaje positivo en la puerta. Cuando esté cargado, al funcionar como un condensador, no va a haber corriente entre la puerta y la zona N que hemos forzado.

Cuestión 2.- Define o explica qué es la tensión umbral de un MOSFET.

Es el voltaje que hay que aplicarle a la puerta para que la zona N que se genera localmente en el semiconductor P esté tan dopado de e^- como la zona P de h^+ . (Análogo para PMOS). Cuando el voltaje aplicado a la puerta es mayor que el voltaje umbral, se forma un canal N donde hay corriente de e^- . Los e^- se mueven de Source a Drain y la corriente eléctrica tiene el sentido contrario.

Cuestión 3.- ¿Qué cambia en la estructura física entre un transistor NMOS y un transistor PMOS? ¿Y qué cambia en la manera de crear el canal de conducción?

La estructura del NMOS es tal y como se ha descrito en las cuestiones 1 y 2, es decir, un semiconductor tipo P con exceso de h^+ , una puerta a la que se le aplica un voltaje positivo mayor que el umbral y la creación de un canal N de e^- enfrente a la puerta donde hay corriente entre el Drain y el Source.

Análogamente, en un PMOS el semiconductor es de tipo N con exceso de e^- , a la puerta se le aplica un voltaje negativo (respecto a Source) y si es menor que la tensión umbral se forma un canal P de huecos que van de S a D (igual que la corriente eléctrica).