

Trabajo Práctico

MOSFET

Objetivos

Se estudiará un dispositivo MOSFET canal N de la tecnología de fabricación TSMC 180 nm con dimensiones $W = 36 \mu\text{m}$; $L = 3,6 \mu\text{m}$ y $L_{\text{dif}} = 0,5 \mu\text{m}$ a partir del modelo de simulación provisto en la librería `tsmc_scn018.txt`.

En el *software* LTSpice, incluir la librería mencionada con el comando `.include tsmc_scn018.txt` e instanciar un componente `nmos4`. Establecer el modelo del transistor CMOSN, así como sus parámetros constructivos ancho del canal (W), largo del canal (L), área de *Drain* (AD), área de *Source* (AS), perímetro de *Drain* (PD) y perímetro de *Source* (PS), siendo el área y el perímetro:

$$A = W \times L_{\text{dif}}$$

$$P = 2 \times (W + L_{\text{dif}})$$

respectivamente.

Los objetivos del trabajo son:

- Simular las curvas características corriente–tensión de un transistor MOSFET canal N.
- Obtener a partir de los resultados de simulación, algunos de los parámetros característicos del transistor.
- Calcular a partir de los parámetros obtenidos y utilizando el modelo de pequeña señal, las figuras de mérito del transistor.
- Obtener a partir de simulaciones, las figuras de mérito del transistor.

Parte 1: Curvas características

El modelo a utilizar es el modelo de carga superficial:

$$I_D = \begin{cases} \mu_n C'_{ox} \frac{W}{L} (m-1) V_{th}^2 \exp\left(\frac{V_{GS}-V_T}{m V_{th}}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{V_{DS}}{V_{th}}\right)\right] & V_{GS} \leq V_T \quad (\text{Subumbral}) \\ \frac{\mu_n C'_{ox}}{2m} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 \left(1 + \frac{V_{DS}}{V_A}\right) & V_{GS} > V_T; V_{DS} \geq V_{DS(\text{sat})} \quad (\text{Saturación}) \\ \mu_n C'_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T - \frac{m}{2} V_{DS}) V_{DS} \left(1 + \frac{V_{DS}}{V_A}\right) & V_{GS} > V_T; V_{DS} < V_{DS(\text{sat})} \quad (\text{Triodo}) \end{cases} \quad (1)$$

donde

$$V_{DS(\text{sat})} = \frac{V_{GS} - V_T}{m} \quad (2)$$

y las dependencias de los parámetros con V_{BS} son:

$$V_T(V_{BS}) = V_{T0} + \gamma(\sqrt{-V_{BS} - 2\psi_B} - \sqrt{-2\psi_B}) \quad (3)$$

$$m(V_{BS}) = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{-V_{BS} - 2\psi_B}} \quad (4)$$

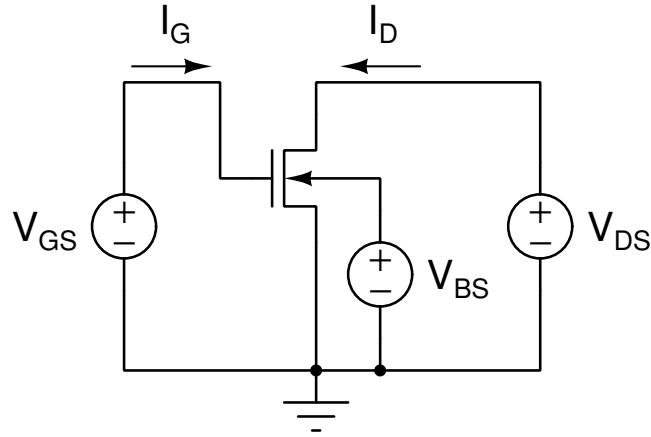


Figura 1: Circuito esquemático para la simulación de las curvas características del transistor.

Curvas de transferencia

Simular en LTSpice el circuito de la figura 1 para $V_{DS} = 1,8 \text{ V}$, variando la tensión $V_{GS} = \{0 \text{ V}; 1,8 \text{ V}\}$ de a pasos de 1 mV (comando `.dc`) con $V_{BS} = \{0 \text{ V}; -0,9 \text{ V}; -1,8 \text{ V}\}$ como parámetro y exportar para su procesamiento y análisis la corriente I_D .

A partir de los resultados de las simulaciones se debe:

1. Realizar un gráfico de la curva de transferencia en **escala lineal** para $V_{DS} = 1,8 \text{ V}$ con V_{BS} como parámetro [FIG01].
2. Realizar un gráfico de la curva de transferencia en **escala semilogarítmica** para $V_{DS} = 1,8 \text{ V}$ con V_{BS} como parámetro [FIG02].
3. A partir de un ajuste lineal de $\ln(I_D)$ en régimen subumbral, debe estimarse el valor del **Subthreshold Swing** (S), y el parámetro m para cada V_{BS} .

$$\ln(I_D) = \ln(I_0) + \frac{V_{GS} - V_T}{m V_{th}} = a V_{GS} + b \quad (5)$$

con $a = (m V_{th})^{-1}$ y $b = \ln(I_0) - \frac{V_T}{m V_{th}}$. Recordar que S se define según $\log(I_D)$, por lo que $S = \frac{\ln(10)}{a}$. Considerar $T = 27^\circ\text{C}$ para el cálculo de V_{th} . Indicar claramente los rangos de tensión utilizados para cada uno de los ajustes.

4. Con los valores de m , a partir de un ajuste lineal de $\sqrt{I_D}$, estimar los parámetros $k'_n = \mu_n C'_{ox}$ y V_T para cada valor de V_{BS} . Suponiendo despreciable el efecto de modulación del largo del canal:

$$\sqrt{I_D} = \sqrt{\frac{\mu_n C'_{ox} W}{2m L}} (V_{GS} - V_T) = a V_{GS} + b \quad (6)$$

con $a = \sqrt{\frac{\mu_n C'_{ox} W}{2m L}}$ y $b = -\sqrt{\frac{\mu_n C'_{ox} W}{2m L}} V_T$.

Indicar claramente los rangos de tensión utilizados para cada uno de los ajustes.

5. En la figura [FIG01], graficar con distintas líneas punteadas las curvas de ajuste correspondiente a cada V_{BS} .
6. Realizar un gráfico de $\sqrt{I_D}$ mostrando los resultados de la simulación junto con las curvas de ajuste correspondiente a cada V_{BS} en línea punteada [FIG03].

7. Para $V_{BS} = 0$ calcular el parámetro g_m a partir de las diferencias finitas de la corriente I_D :

$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \approx \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$$

y realizar dos gráficos:

- Un gráfico de g_m vs. I_D [FIG04].
- Un gráfico de g_m/I_D vs. I_D en escala semilogarítmica para la corriente [FIG05]. Analizar en qué región el valor se mantiene constante y en qué valor. ¿Cómo se relacionar con el TBJ?

Con los parámetros estimados:

8. Realizar un gráfico de V_T en función de V_{BS} [FIG06].
9. Realizar un gráfico de m en función de V_{BS} [FIG07].
10. Realizar un gráfico de k'_n en función de V_{BS} [FIG08]. Discutir si la movilidad se mantiene constante.

Curvas de salida

Simular en LTSpice el circuito de la figura 1 para $V_{GS} = \{0,6\text{ V}; 1,0\text{ V}; 1,4\text{ V}; 1,8\text{ V}\}$, $V_{BS} = 0$, variando la tensión $V_{DS} = \{0\text{ V}; 1,8\text{ V}\}$ de a pasos de 1 mV (comando `.dc`) y exportar para su procesamiento y análisis la corriente I_D .

1. Realizar un gráfico [FIG09] de la corrientes I_D en función de V_{DS} para todos los valores de V_{GS} .
2. A partir de [FIG09], estimar los valores de $V_{DS(sat)}$ para cada valor de V_{GS} .
3. Para cada valor de V_{GS} , se debe obtener el parámetro V_A a partir de un ajuste lineal de la corriente I_D en régimen de saturación considerando que:

$$\begin{aligned} V_A + V_{DS} &= I_D \left(\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right)^{-1} \\ \Rightarrow I_D(V_{DS} = 0) &= \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} V_A \\ \Rightarrow I_D &= I_D(V_{DS} = 0) + \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} V_{DS} = I_D(V_{DS} = 0) \left(1 + \frac{V_{DS}}{V_A} \right) = a V_{DS} + b \end{aligned} \quad (7)$$

con $a = \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}}$ y $b = I_D(V_{DS} = 0)$, entonces

$$V_A = \frac{I_D(V_{DS} = 0)}{\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}}} = \frac{b}{a} \quad (8)$$

Además:

$$r_o = \frac{V_A + V_{DS}}{I_D} = \frac{V_A}{I_D(V_{DS} = 0)} = \frac{1}{a} \quad (9)$$

Indicar claramente los rangos de tensión V_{DS} utilizados para cada uno de los ajustes.

4. En la figura [FIG09], graficar con distintas líneas punteadas las curvas de ajuste correspondiente a cada uno de los V_{GS} .

Realizar una tabla [TAB01] comparativa para cada valor de V_{GS} indicando los valores correspondientes de I_D [FIG01]; g_m [FIG04]; $V_{DS(sat)}$ estimado; $V_{DS(sat)}$ calculado a partir de la ecuación 2; V_A y r_o [FIG09].

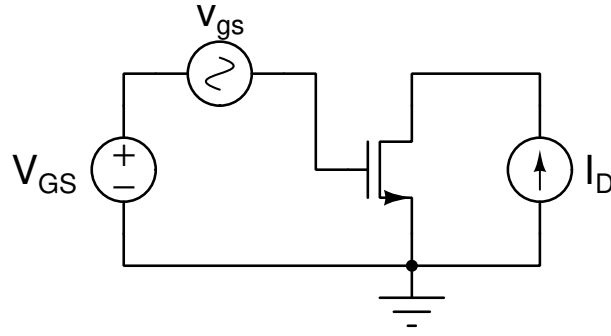


Figura 2: Circuito esquemático para la simulación de las de la ganancia intrínseca.

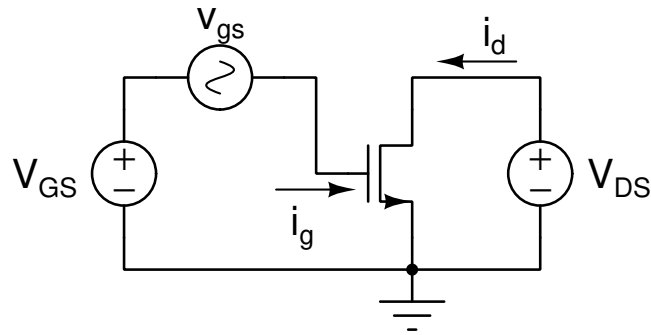


Figura 3: Circuito esquemático para la simulación de las de la respuesta en frecuencia.

Parte 2: Modelo de pequeña señal

A partir del modelo de pequeña señal, se calcularán los parámetros intrínsecos del transistor: ganancia intrínseca (a_v) y la máxima frecuencia de trabajo (f_T).

1. A partir de los datos calculados en la Parte 1, calcular la ganancia intrínseca del transistor (a_v) para cada valor de I_D de la tabla [TAB01].
2. Realizar una simulación del tipo transitorio (comando `.tran`) del circuito de la figura 2 para cada valor de V_{GS} e I_D de la tabla [TAB01]^[1]. Utilizar una fuente de señal de tensión senoidal con amplitud 1 mV y frecuencia $f = 1$ kHz.
3. Realizar un gráfico temporal [FIG07] de las señales $v_{gs}(t)$ (común para toda I_D) y de cada $v_{ds}(t)$ correspondiente a cada I_D . A partir de los valores picos de las señales, calcular la ganancia intrínseca para cada valor de I_D .
4. Simular el circuito de la figura 3 para cada valor de V_{GS} de la tabla [TAB01] y para $V_{DS} = 1,8$ V. Utilizar una fuente de tensión en AC de amplitud 1, en un rango de frecuencias $f = \{1 \text{ kHz}; 100 \text{ GHz}\}$ simulando 100 puntos por década. Al observar la relación de las corriente i_d/i_g se obtiene como resultado $\beta(f)$.
5. Realizar un gráfico de Bode (escala logarítmica en ambos ejes) mostrando la variación de $\beta(f)$ [FIG08]. Determinar el valor de la frecuencia de trabajo (f_T) a partir de la frecuencia a la cual se obtiene $\beta = 1$.

^[1] Acomodar el valor de I_D de forma tal que la tensión $V_{DS} \approx 1,8$ V.

6. Repetir la simulación anterior, pero cambiando el tamaño del transistor a $W = 1,8\mu\text{m}$; $L = 0,18\mu\text{m}$. Volver a realizar un gráfico de Bode de $\beta(f)$ [FIG09], y determinar los nuevos f_T . Relacionar el cambio en la frecuencia f_T con el cambio en la longitud de canal.

Realizar una tabla [TAB02] comparativa para cada valor de V_{GS} indicando los valores correspondientes de I_D [FIG01]; a_v calculado; a_v simulado [FIG07], f_T [FIG08] y f_T para el tamaño mínimo [FIG09].

Condiciones de entrega

- La entrega debe ser a través del Aula Virtual en el Campus Posgrado FIUBA (<https://campusposgrado.fi.uba.ar>) en la fecha y horario publicadas en la misma Aula Virtual.
- La entrega debe ser un único documento .pdf.
- La entrega debe ser exclusivamente a través del Aula Virtual en el Campus Posgrado FIUBA. Ante cualquier inconveniente, deben comunicarse por correo electrónico a ds_v02@cursoscapse.com. No se recibirán informes en casillas de mail personales.