

PRÁCTICA 4: EL TRANSISTOR MOSFET.

Simulación con Pspice.

Objetivos

Estudiar diferentes aspectos del transistor Mosfet de acumulación.
Para ello se usará la simulación electrónica con Pspice.
El estudio se focalizará en el transistor Mosfet de canal N, que es el que más se utiliza actualmente.

Índice

1. Curvas del transistor
2. Circuito de polarización

Material

PC y programa de simulación PSpice para Windows, de Orcad. Existe una versión de estudiante en PoliformaT.

Desarrollo

Inicie PSpice haciendo doble clic sobre el icono PSPICE del escritorio y guarde los archivos en W:\TCO\Prac4.

MUY IMPORTANTE: cuando guardéis el circuito, ponga un nombre de archivo distinto a schematic1, schematic2, etc.

1. Curvas del transistor

1.1 En primer lugar vamos a generar las **curvas características de drenador** $I_{DS}=f(V_{DS})$ de un transistor NMOS. Para ello iniciamos *Schematics* y editamos el circuito que se muestra en la figura 1.

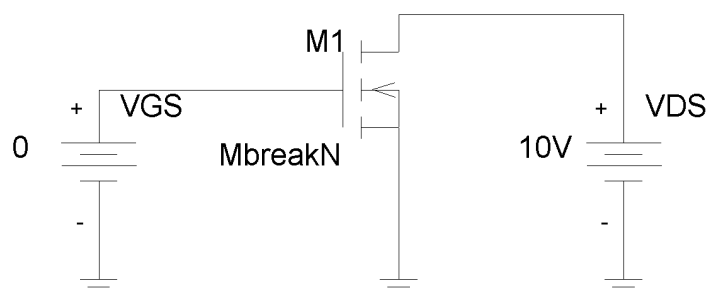


Figura 1. Circuito para dibujar las curvas características de drenador.

Utilizamos el comando **Draw/Get New Part** para obtener los distintos componentes: **VDC** para las fuentes de tensión, **EGND** para la masa y **MbreakN3** para el transistor NMOS. Asigne nombre a las dos fuentes: **V_{GS}** y **V_{DS}**.

Para especificar los parámetros del transistor (V_T y K), hacemos clic primero en el símbolo del NMOS (se pone de color rojo), y luego usamos el comando **Edit/Model/Edit Instance Model (Text)**. Especifique como parámetros: **Kp = 2m**, **Vto = 2V** en la ventana de edición (ver figura 2).

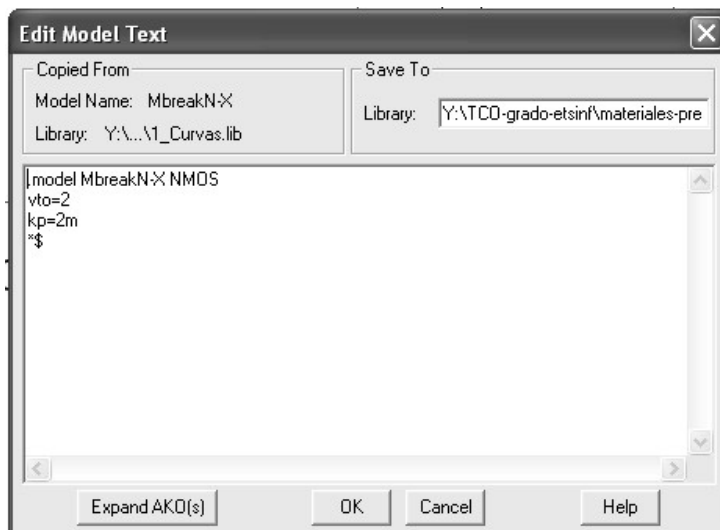


Figura 2. Ventana de edición de modelos.

Además, haga doble clic en el símbolo del NMOS y escriba los valores del largo y ancho del canal: **L = 1u**, **W = 2u**. Recordemos que la terminación *u* indica *micro* (10^{-6}). La terminación *m* indica *mili* (10^{-3}).

Aclaración: La relación de los parámetros utilizados en el cálculo analítico (V_T y K) con los parámetros del PSpice (V_{to} , K_p , W , L) es la siguiente: V_T coincide con V_{to} , y K está relacionada con K_p por la expresión: **$K = (W/L) K_p/2$** .

Cuestión 0. Calculad el valor de K para los parámetros dados.

Queremos que los voltajes de V_{GS} y V_{DS} varíen para analizar el comportamiento del MOSFET y poder reproducir sus curvas.

Para ello, usamos el comando **Analysis/setup/dc sweep** para acceder a la ventana **DC Sweep** (variación de voltaje de continua). Elegimos V_{DS} como variable principal de barrido (debe coincidir con el nombre que le hemos dado a la esa fuente, es decir **VDS**), y establecemos un barrido de **0 a 10V**, con incrementos de **0.1V**.

Luego hacemos clic en el botón **Nested sweep** para definir un segundo anidamiento, donde elegimos V_{GS} como variable (secundaria) y establecemos un valor inicial de **0**, un valor final de **5V**, y un incremento de **1V**.

IMPORTANTE: hay que asegurarse de hacer clic en la casilla **Enable Nested Sweep**, y elegir **Voltage Source** y **Linear**.

Finalmente, usamos el comando **Analysis/simulate (F11)** para iniciar la simulación, tras lo cual arranca automáticamente PROBE. Utilice el comando **Trace/ Add Trace** (o tecla **Insert**) para seleccionar la corriente de drenador I_D . En la pantalla deben aparecer las curvas características del MOSFET.

Cuestión 1: ¿Cuántas curvas se ven? ¿A qué valores de V_{GS} corresponden? Justificad la respuesta. ¿Por qué las curvas tienen una separación desigual?

Cuestión 2: Apunte los valores (V_{DS} e I_{DS}) de los puntos que marcan el paso de saturación a óhmica en cada curva (justo entre la línea horizontal y el codo).

Verifique que, en todos ellos, se cumple la condición $V_{DS} = V_{GS} - V_T$

Cuestión 3: Calcule el valor de K a partir de una curva cualquiera empleando la expresión de saturación: $I_{DS} = K (V_{GS} - V_T)^2$. Compruebe que coincide aproximadamente con el valor de K calculado anteriormente en la **Cuestión 0**.

En la zona óhmica, se observa primero una “casi” recta desde el origen con una cierta pendiente (como una resistencia) y luego un codo para enlazar con la zona horizontal (zona de saturación \rightarrow fuente de corriente $I_D=f(V_{GS})$). En la zona “casi” recta se podría utilizar para un cálculo analítico aproximado la expresión óhmica simplificada (de la cual se deduce R_{ON}), mientras que en el codo se debe utilizar la expresión óhmica completa:

$$I_{DS} = K [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2]$$

Cuestión 4: Para la curva en que $V_{GS} = 5$, estímesese la pendiente de la zona “casi” recta, muy cerca del origen (utilizando Zoom y Cursores en el **probe**). La resistencia es inversa a la pendiente:

$$R_{ON} \approx \frac{1}{\text{pendiente}} = \frac{1}{\Delta y / \Delta x} = \frac{x}{y}$$

Donde **X** es V_{DS} en voltios e **Y** es I_{DS} en mA. La ventana del cursor nos indica estos valores: A1 (valor x) (valor y).

Compruébese que el valor es aproximadamente el mismo que podemos obtener analíticamente mediante la expresión de R_{ON} :

$$R_{ON} \approx \frac{1}{2 \cdot K(V_{GS} - V_T)}$$

Cuestión 5: ¿Será la misma R_{ON} para otras curvas? Justifique la respuesta.

1.2 Recta de Carga. Cuando estamos visualizando las curvas, podemos representar la recta de carga de cualquier circuito hipotético. Nosotros representaremos la malla de drenador del circuito que veremos en el apartado 2 (ver Figura 3). Para ello haga **Add Trace** (Insert) para luego introducir la expresión de la recta de carga:

$$(10 - V(V_{DS})) / 1k$$

Que corresponde a:

$$I_{DS} = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} \quad \text{Con } V_{DD} = 10V \text{ y } R_D = 1k$$

Cuestión 6: Anótese los puntos de trabajo que tendríamos para $V_{GS} = 3$, $V_{GS} = 4V$ y $V_{GS} = 5V$. ¿En qué zona de funcionamiento está el transistor en cada caso?

Cuestión 7: ¿Los puntos de corte con el eje X y eje Y son los esperados atendiendo a los valores de V_{DD} y R_D ?

1.3 Modifique el valor de W/L: $W=1u$ y $L=1u$. Simule y visualice las curvas de nuevo.

Cuestión 8: ¿Cómo afecta el valor de W/L al valor de la corriente de drenador I_{DS} ?

Restablecer de nuevo los parámetros a $W=2u$ y $L=1u$.

1.4 Se desea generar la **parábola de saturación** $I_{DS} = K (V_{GS} - V_T)^2$. En este caso, solo varía la variable V_{GS} que aparecerá en el eje X en lugar de V_{DS} en la gráfica, ya que $I_D = f(V_{GS})$. Para ello, en primer lugar, vaya al circuito y fije $V_{DS} = 10V$.

A continuación, vaya a **Analysis/setup/dc sweep** y fije como primera variable V_{GS} de 0 a 5V, con incrementos de 0.1V (en lugar de V_{DS}). En este caso, no hay una segunda variable, por lo que desactivamos el **DC Nested Sweep**.

Cuestión 9. La expresión de saturación $I_{DS} = K (V_{GS} - V_T)^2$ se debe cumplir para cualquier punto de la curva con $V_{GS} > V_T$. Compruébese para al menos dos valores de V_{GS} .

Nótese que esta curva nos indica la corriente de saturación (máxima) que puede circular por el transistor para una V_{GS} dada. La corriente real en un circuito podría ser menor a este valor en caso de estar en zona óhmica. Este caso no lo podemos apreciar en esta parábola, sino en las curvas de drenador.

2. Circuito de polarización

Queremos analizar el funcionamiento del circuito de polarización de la figura 3. Los parámetros del transistor son los mismos del apartado 1: $K_p = 2m$, $V_{to} = 2V$, $L = 1\mu$, $W = 2\mu$.

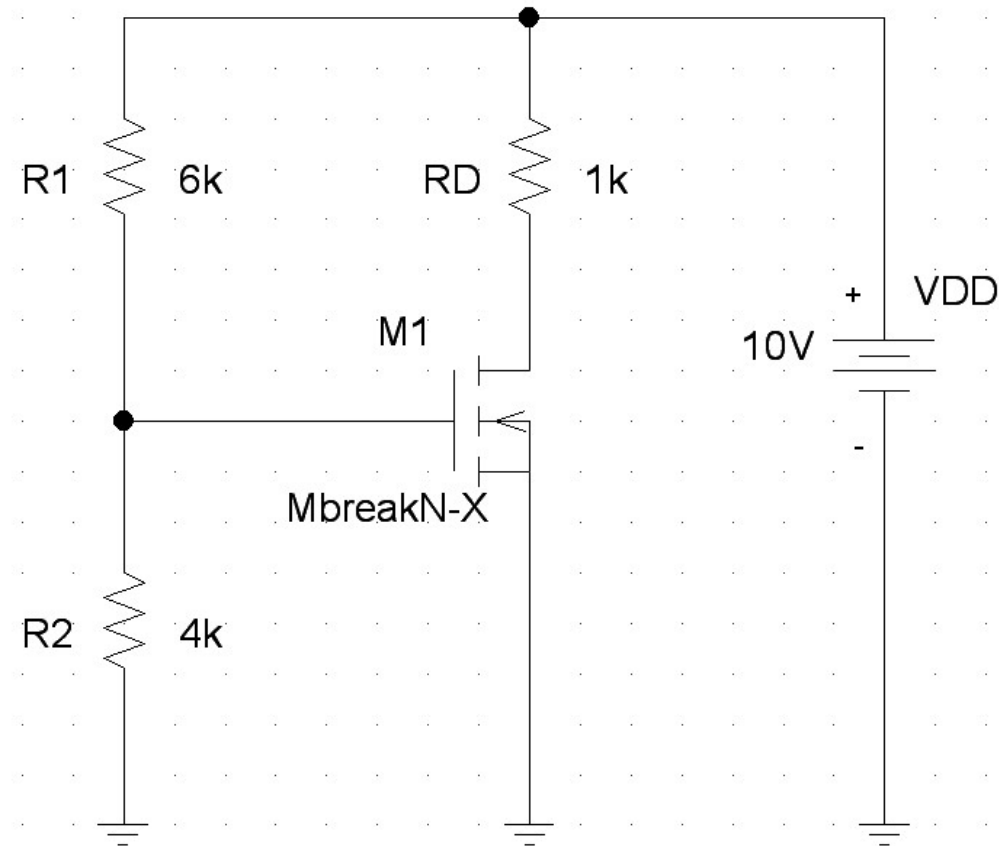


Figura 3. Circuito de polarización con divisor resistivo en la puerta del transistor.

2.1 Edite el circuito en el *Schematics*. Especifique los parámetros siguiendo los pasos que se han indicado en el apartado 1.1. El símbolo de las resistencias es **R** y se pueden girar con **CTRL-R** o **Edit/rotate**. La fuente de tensión será un componente **VDC**. Los componentes que ya se han utilizado antes se pueden obtener directamente del desplegable que hay en la barra de herramientas.

2.2 Como se trata de un circuito de continua (CC), la simulación implicará calcular las tensiones y corrientes del punto de trabajo Q. Para ello especifique una simulación **Bias Point Detail** en **Analysis Setup**.

2.3 Ejecute **Analysis/Simulate (F11)**. En la ventana inferior izquierda del PROBE debe aparecer un mensaje indicando el éxito (o fracaso!) de la simulación.

2.4 Los resultados no se van a ver en este caso en forma de gráfica, pues las variables no dependen del tiempo. Son tensiones y corrientes constantes. La forma de visualizarlas es volver al *Schematics* y activar los **botones V** e **I**.

Aparecerán los valores en los distintos nodos del circuito. Una forma alternativa es usar el comando **Analysis/ Examine Output**. Así visualizamos el fichero de salida, producto de la simulación. Desplazándonos hacia abajo, encontramos los parámetros del transistor y las distintas tensiones y corrientes que buscamos.

Cuestión 10: Indique el punto de trabajo Q del transistor: V_{GS} , V_{DS} e I_{DS} . Compruebe que coincide con el punto Q que determinamos gráficamente para $V_{GS} = 4V$. ¿En qué zona de trabajo se encuentra el transistor?

Cuestión 11: ¿Qué valor tiene la corriente I_G ? ¿Cuál es la corriente por el divisor resistivo de puerta?

Cuestión 12: Compare la simulación con el cálculo analítico. Para hacer los cálculos, utilice los mismos parámetros del NMOS: $V_T = 2V$, $K = 2 \text{ mA/V}^2$.

Nótese que, de igual modo, se podría simular cualquier circuito de polarización visto en las clases teóricas, para así conocer mejor su funcionamiento.