

# EL42A - Circuitos Electrónicos

## Clase No. 11: Transistores de Efecto de Campo (2)

Patricio Parada  
pparada@ing.uchile.cl

Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Universidad de Chile

8 de Septiembre de 2009

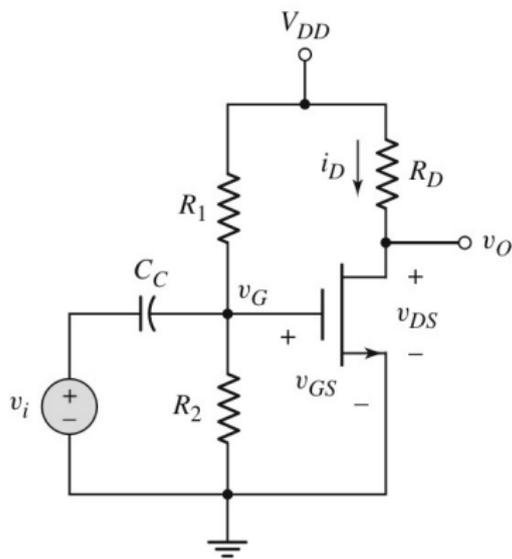
## Capítulo 3: Transistores

### Transistores MOSFET

- ▶ El objetivo de esta sección es realizar análisis rápidos y simples de circuitos MOSFETs operando en régimen de voltajes continuos.
- ▶ En lo que sigue no consideraremos la modulación del canal ( $\lambda = 0$ ), trabajaremos directamente con el voltaje de overdrive,  
$$V_{OD} = v_{GS} - V_t.$$
- ▶ Recordar que para NMOS,  $V_{OD}$  y  $V_t > 0$  y para PMOS,  $V_{OD}$  y  $V_t < 0$ .
- ▶ El análisis DC de estos circuitos está íntimamente ligado al análisis y diseño de amplificadores.
- ▶ En general, estos circuitos combinan MOSFETs con resistencias.
- ▶ En la práctica, las resistencias son reemplazadas por otros MOSFETs por lo que el circuito completo sólo contiene transistores.

## Circuito de Fuente Común I

- ▶ Es una de las configuraciones más utilizadas.
- ▶ El terminal Fuente (S) se encuentra conectado a tierra y es el terminal común entre la entrada y salida del circuito.
- ▶ El condensador  $C_C$  es un **condensador de acoplamiento** se utiliza para acoplar la señal de voltaje  $v_I$  en la compuerta del MOSFET, sin afectar el punto de operación del circuito.



- ▶ En el circuito, tenemos que  $I_G = 0$ ; por lo tanto,

$$V_G = V_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD}. \quad (1)$$

- ▶ Asumiendo el modo activo de operación, tenemos

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$$

- ▶ Finalmente, la curva de carga del circuito podemos determinarla haciendo LVK en el loop de salida:

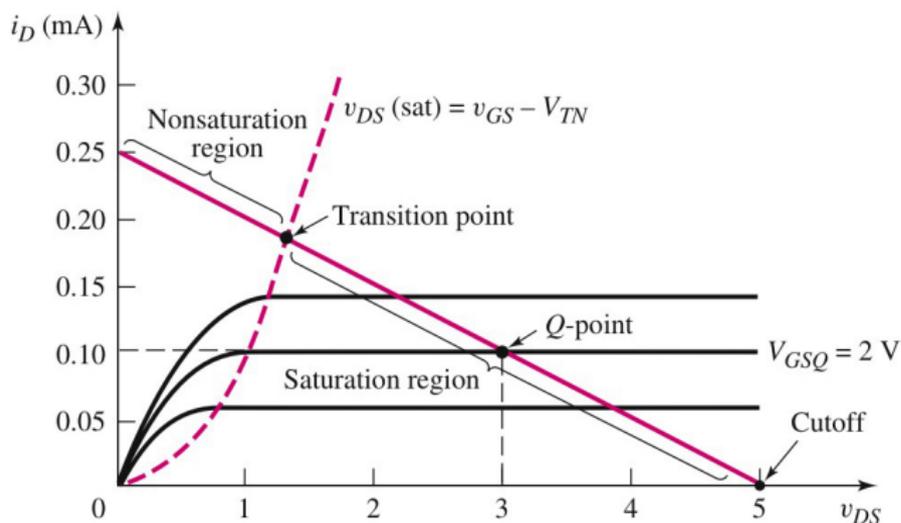
$$V_{DD} = R_D I_D + V_{DS} \quad (2)$$

## Recta de Carga

- ▶ Al igual que con circuitos BJT, la recta de carga es útil para determinar el punto y el modo de operación del transistor MOSFET.
- ▶ La ecuación de la recta de carga se puede plantear como

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D \quad (3)$$

para  $0 \leq V_{DS} \leq V_{DD}$ .



## Procedimiento para Realizar Análisis DC de Circuitos MOSFET

Analizar un circuito MOSFET requiere que conozcamos la condición de polarización del transistor (saturación o triodo). En algunos casos resulta directo pero en la mayoría no hay suficiente información para saberlo con certeza. En estos casos uno puede asumir la condición de operación activa y comprobar que se cumplen las condiciones necesarias.

1. Asumir que el transistor está polarizado en la región de saturación en cuyo caso

$$V_{GS} > V_t; I_D > 0; V_{DS} \geq V_{DS}(\text{sat}).$$

2. Analizar el circuito utilizando las relaciones de voltaje-corriente del modo saturado.
3. Evaluar la condición resultante de polarización del transistor. Si
  - ▶  $V_{GS} < V_t$  el transistor está en corte
  - ▶  $V_{DS} < V_{DS}(\text{sat})$  el transistor está polarizado en la región de triodo.
4. Si la suposición original está incorrecta basta con aplicar las ecuaciones del modo apropiado y repetir el análisis.

## Ejemplo 1

### Ejemplo de Diseño

Diseñe la polarización de un circuito MOSFET para producir la corriente  $I_D = 0,5$  mA. Los parámetros del MOSFET son:

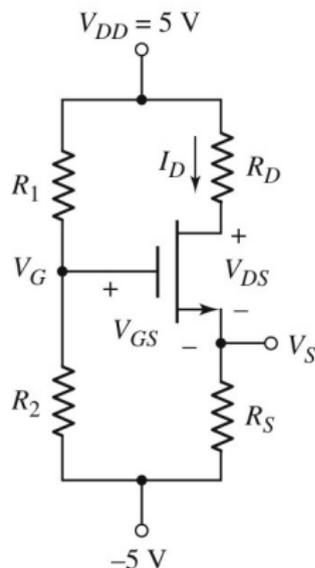
$$V_t = 2 \text{ V}$$

$$k'_n = 80 \mu\text{A}/\text{V}^2$$

$$W/L = 4.$$

Determine  $R_1$  y  $R_2$  de forma que la corriente en las resistencias sea un 10% de  $I_D$ .

Considere que  $R_D = 10 \text{ k}\Omega$  y  $R_S = 2 \text{ k}\Omega$ .



## Ejemplo 1 - Solución I

- ▶ Asumiremos que el transistor está operando en el modo de saturación. Tenemos entonces

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$$
$$0,5 = \frac{1}{2} 0,08 \times 4 (V_{GS} - 2)^2$$

Por lo tanto

$$V_{GS} = 3,77 \text{ V.}$$

- ▶ La corriente a través de las resistencias es 0,05 mA. Por lo tanto

$$R_1 + R_2 = \frac{10}{0,05} = 200 \text{ k}\Omega.$$

- ▶  $R_2$  puede ser determinado de

$$V_{GS} = V_G - V_S = \left[ \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times 10 - 5 \right] - (I_D R_S - 5).$$

## Ejemplo 1 - Solución II

- ▶ Por lo tanto,

$$R_2 = 95,4 \text{ k}\Omega; R_1 = 104,6 \text{ k}\Omega.$$

- ▶ En un caso realista, deberíamos utilizar resistencias disponibles en el mercado. En particular, las resistencias más cercanas son

$$R_2 = 100 \text{ k}\Omega; R_1 = 110 \text{ k}\Omega.$$

- ▶ Como  $V_{DS} = 4 \text{ V}$ , tenemos que

$$V_{DS} > V_{DS}(\text{sat}) = V_{GS} - V_t = 3,77 - 2 = 1,77 \text{ V}.$$

## Ejemplo 1 - Solución III

- ▶ Si incorporamos las incertidumbres propias de las resistencias, es posible que el punto de operación varíe. Si el diseño está bien realizado, este cambio no debería alterar el modo de operación del transistor.
- ▶ Por ello, una práctica habitual es seleccionar el punto  $Q$  relativamente lejos de la curva de transición.
- ▶ Al igual que en el caso de transistores BJT, la incorporación de una resistencia  $R_S$  al terminal de fuente ayuda a dar estabilidad al punto de operación frente a variaciones de los parámetros del transistor.

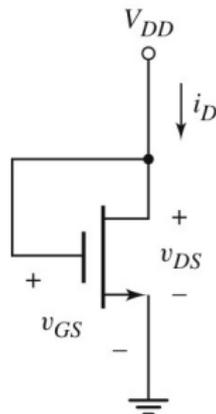
## Resistencia No-Lineal

- ▶ Consideremos el circuito de la figura. En este caso, tenemos el transistor en una configuración especial denominada dispositivo de carga mejorado.
- ▶ Si el transistor es NMOS mejorado, entonces  $V_t > 0$ . Además

$$V_{DS} = V_{GS} > V_{DS}(\text{sat})$$

Por lo tanto, el dispositivo está siempre saturado.

- ▶ A veces uno conecta el dispositivo de carga mejorado con otros transistores.



## Ejemplo 2

### Ejemplo

Determine  $R_S$  y  $R_D$  de forma que  $I_D = 0,4[mA]$  y  $V_D = +0,5[V]$  en el circuito de la figura.

El transistor NMos tiene las siguientes características:

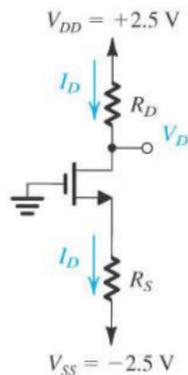
$$V_t = 0,7[V]$$

$$k'_n = 100[\mu A/V^2]$$

$$L = 1[\mu m]$$

$$W = 32[\mu m]$$

Asuma  $\lambda = 0$ .



## Ejemplo 2 - Solución I

- ▶ Primero determinemos en qué región está operando el NMOS:

$$V_D = 0,5[V], \quad V_G = 0[V]$$

$$V_t = 0,7[V]$$

$$v_{GS} + R_S I_D = V_{SS}$$

$$v_{GD} = V_D, \quad v_{GS} = V_S$$

$$v_{DS} = v_{GD} + v_{GS}$$

- ▶ Condición de saturación:

$$v_{DS} \geq v_{GS} - V_t = V_{OD}$$

## Ejemplo 2 - Solución II

- ▶ Por lo tanto,

$$\frac{V_s - V_{SS}}{R_S} = I_D \Rightarrow \frac{V_S - V_{SS}}{I_D} = R_S.$$

- ▶ Dado que  $V_D = 0,5[V] > V_G$  implica que el NMos está en la zona de saturación, y por lo tanto usamos la expresión de  $i_D(v_{DS})$  en la región de saturación para determinar  $V_{GS}$ :

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \\ &= \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} V_{OD}^2 \\ \Rightarrow V_{OD} &= \sqrt{\frac{2I_D L}{k'_n W}} \end{aligned}$$

## Ejemplo 2 - Solución III

► Luego,

$$\begin{aligned} &= \sqrt{\frac{2 * 0,4 * 10^{-3} * 1 * 10^{-6}}{100 * 10^{-6} * 32 * 10^{-6}}} \\ &= \sqrt{\frac{1}{4}} \\ &= 0,5[V] \end{aligned}$$

► Finalmente,

$$\Rightarrow V_{GS} = V_t + V_{OV} = 0,7 + 0,5 = 1,2[V]$$

## Ejemplo 2 - Solución IV

Como  $V_G = 0$  y  $V_{GS} = 1,2[V] \Rightarrow V_S = -1,2[V]$

$$R_S = \frac{-1,2 - (2,5)}{0,4 * 10^{-3}} = 3,25[k\Omega]$$

Para establecer el voltaje  $V_D = 0,5[V]$

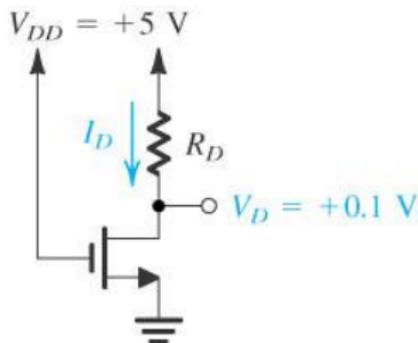
$$\begin{aligned} R_D &= \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} \\ &= \frac{2,5 - 0,5}{0,4} \\ &= 5[k\Omega] \end{aligned}$$

### Ejemplo 3

#### Ejemplo

Determine  $R_D$  de modo de establecer un voltaje  $V_D = 1[V]$  ?Cuál es la resistencia efectiva entre drenado y fuente en este punto de operación?

Considere  $V_t = 1[V]$ ,  $k'_n \left( \frac{W}{L} \right) = 1[mA/V^2]$ .



## Ejemplo 3 - Solución I

- ▶ Dado que  $V_{DS} = 0,1[V]$ ,  $V_{GS} = 5[V]$  y  $V_t = 1[V]$ ,  
 $\Rightarrow V_{DS} \leq V_{GS} - V_t$ .
- ▶ Por lo tanto el MOSFET está en la zona de triodo.
- ▶ Utilizaremos la característica de corriente en esta situación:

$$\begin{aligned} I_D &= k'_n \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_t)V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2 \right] \\ &= 1 * 10^{-3} \left[ (5 - 1) * 0,1 - \frac{1}{2}0,1^2 \right] \\ &= 0,395[\text{mA}] \end{aligned}$$

## Ejemplo 3 - Solución II



$$\begin{aligned}R_D &= \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} \\ &= \frac{4,9}{0,395 * 10^{-3}} \\ &= 12,4[k\Omega]\end{aligned}$$

► La resistencia efectiva es:

$$\begin{aligned}r_{DS} &= \frac{V_{DS}}{I_D} \\ &= \frac{0,1}{0,395} \\ &= 253[\Omega]\end{aligned}$$

## Ejemplo 4

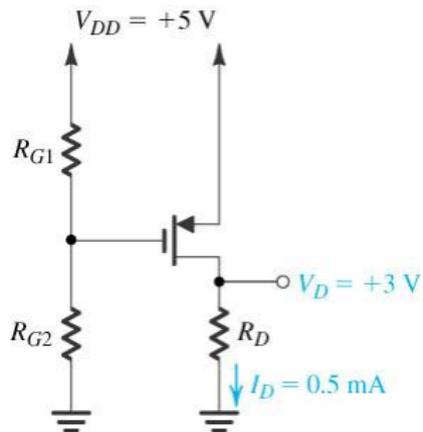
### Ejemplo

Diseñe un circuito de forma que el transistor opere en la zona de saturación con  $I_D = 0,5[mA]$  y  $V_D = +3[V]$ . Para ello considere un transistor PMOS de tipo mejorado con  $V_t = -1[V]$ , y

$$k'_p \left( \frac{W}{L} \right) = 1[mA/V^2]$$

Asuma  $\lambda = 0$  ¿Cuál es el valor máximo que  $R_D$  puede tomar de forma de mantener la condición de saturación?

## Ejemplo 4



## Ejemplo 4 - Solución I

- ▶ Dado que el MOSFET está en saturación

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{1}{2} k_p' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \\ &= \frac{1}{2} k_p' \frac{W}{L} V_{OD}^2 \end{aligned}$$

- ▶ Sustituyendo  $I_D = 0,5[mA]$ ,  $k_p' \frac{W}{L} = 1[mA/V^2]$  y recordando que para un PMOS  $V_{OV} < 0$ , entonces:

$$\begin{aligned} \frac{0,5[mA]}{\frac{1}{2} 1[mA/V^2]} &= V_{OD}^2 \\ \Rightarrow V_{OD} &= -1[V] \\ \Rightarrow V_{GS} = V_t + V_{OD} &= -1 - 1 = -2[V] \end{aligned}$$

## Ejemplo 4 - Solución II

- ▶ Dado que  $V_{DD} = 5[V] \Rightarrow V_G = 3[V]$ . Esto puede ser logrado recordando que  $i_G = 0$ , lo que implica que

$$V_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD}$$

- ▶ Elegir  $R_{G1} = 2[M\Omega]$ ,  $R_{G2} = 3[M\Omega]$

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{3}{0,5} = 6[k\Omega]$$

- ▶ La saturación puede ser mantenida hasta que  $V_D$  exceda a  $V_G$  por  $|V_t|$ , esto es:

$$V_D = V_G + |V_t| = 3 + 1 = 4[V]$$

## Ejemplo 4 - Solución III

► En este caso

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{4[V]}{0,5[mA]} = 8[k\Omega]$$

- ▶ La curva característica de transferencia depende de la región en la que opere el MOSFET
- ▶ Distinguiamos tres regiones:
  - (a) Segmento asociado a la región de corte:

$$v_I \leq V_t \Rightarrow v_O = V_{DD} \quad (i_D = 0)$$

- (b) Segmento asociado a la región de saturación:

$$i_D = \frac{V_{DD} - v_O}{R_D}$$

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_I - V_t)^2$$
$$\Rightarrow v_O = V_{DD} - \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_I - V_t)^2 R_D$$

- Definimos la ganancia voltaje  $A_v$  como:

$$A_v \equiv \left. \frac{dv_O}{dv_I} \right|_{v_I=v_{eq}} = -k'_n \frac{W}{L} (V_{eq} - V_t) R_D \quad (4)$$

- El fin de la zona de saturación se alcanza cuando  $v_{DS} = v_{GS} - V_t$ , es decir, cuando

$$v_O = v_I - V_t$$

- Las coordenadas exactas se obtienen resolviendo en forma simultánea:

$$\begin{aligned} v_O &= v_I - V_t \\ v_O &= V_{DD} - \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_I - V_t)^2 R_D \\ \Rightarrow v_O &= V_{DD} - \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} v_O^2 R_D \end{aligned}$$

(c) Segmento asociado a la región del triodo. Nuevamente reemplazamos:

$$v_O = V_{DD} - i_D R_D$$

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \left[ (v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{v_{DS}^2}{2} \right]$$

$$= k'_n \frac{W}{L} \left[ (v_I - V_t) v_O - \frac{v_O^2}{2} \right]$$

$$\Rightarrow v_O = V_{DD} - R_D k'_n \frac{W}{L} \left[ (v_I - V_t) v_O - \frac{v_O^2}{2} \right]$$

Si  $v_0$  es pequeño

$$v_O \cong V_{DD} - R_D k'_n \frac{W}{L} (v_I - V_t) v_O$$
$$\Rightarrow v_O = \frac{V_{DD}}{1 + R_D k'_n \frac{W}{L} (v_I - V_t)}$$

- Recordando que cerca del origen (zona óhmica)  $i_d - v_{DS}$  tiene un comportamiento lineal y  $v_{DS} = r_{DS} \cdot i_D$ ; con

$$r_{DS} = \frac{1}{k'_n \frac{W}{L} (v_I - V_t)}$$
$$\Rightarrow v_O = V_{DD} \frac{r_{DS}}{r_{DS} + R_D}$$

Lo cual tiene sentido: cuando  $v_O$  es pequeño, el MOSFET actúa como una resistencia  $r_{DS}$ , y por lo tanto,  $v_O$  es sólo divisor de tensión entre  $R_D$  y  $r_{DS}$ .

- ▶ Aún más, si  $r_{DS} \ll R_D$

$$\Rightarrow v_O \cong V_{DD} \frac{r_{DS}}{R_D} \quad (5)$$

- ▶ La curva de transferencia es:

# Expresiones Analíticas para la Curva Característica de Transferencia VI

