

# **Amplificadores Diferenciales**

(3a parte)

**Dr. José Ernesto Rayas Sánchez**

Algunas de las figuras de esta presentación fueron tomadas de la página de internet de los autores del texto:

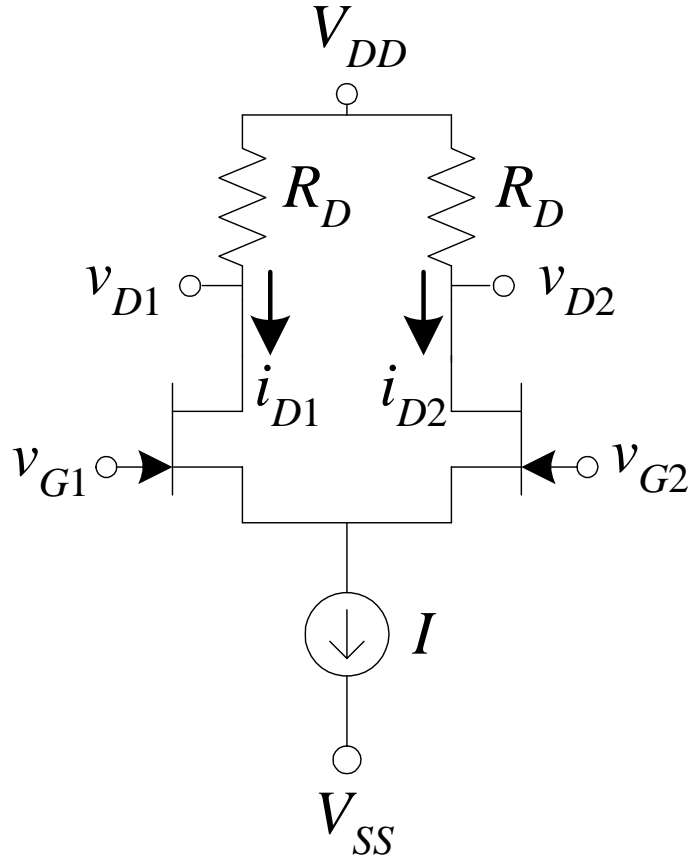
A.S. Sedra and K.C. Smith, *Microelectronic Circuits*. New York, NY: Oxford University Press, 1998.

# Amplificadores Diferenciales

---

- Introducción ✓
- Par diferencial BJT ✓
- Operación en señal pequeña del amplificador diferencial BJT ✓
- Polarización en C.I. ✓
- Amplificador diferencial con carga activa ✓
- Par diferencial JFET
- Amplificadores diferenciales MOS

# Par Diferencial JFET



$$i_{D1} = K(v_{GS1} - V_t)^2 \quad i_{D2} = K(v_{GS2} - V_t)^2$$

$$v_{id} = v_{GS1} - v_{GS2}$$

$$\sqrt{i_{D1}} - \sqrt{i_{D2}} = \sqrt{K}v_{id} \quad i_{D1} + i_{D2} = I$$

resolviendo simultáneamente,

$$i_{D1} = \frac{I}{2} + \sqrt{2KI} \left( \frac{v_{id}}{2} \right) \sqrt{1 - \frac{(v_{id}/2)^2}{(I/2K)}}$$

$$i_{D2} = \frac{I}{2} - \sqrt{2KI} \left( \frac{v_{id}}{2} \right) \sqrt{1 - \frac{(v_{id}/2)^2}{(I/2K)}}$$

## Par Diferencial JFET (cont.)

---

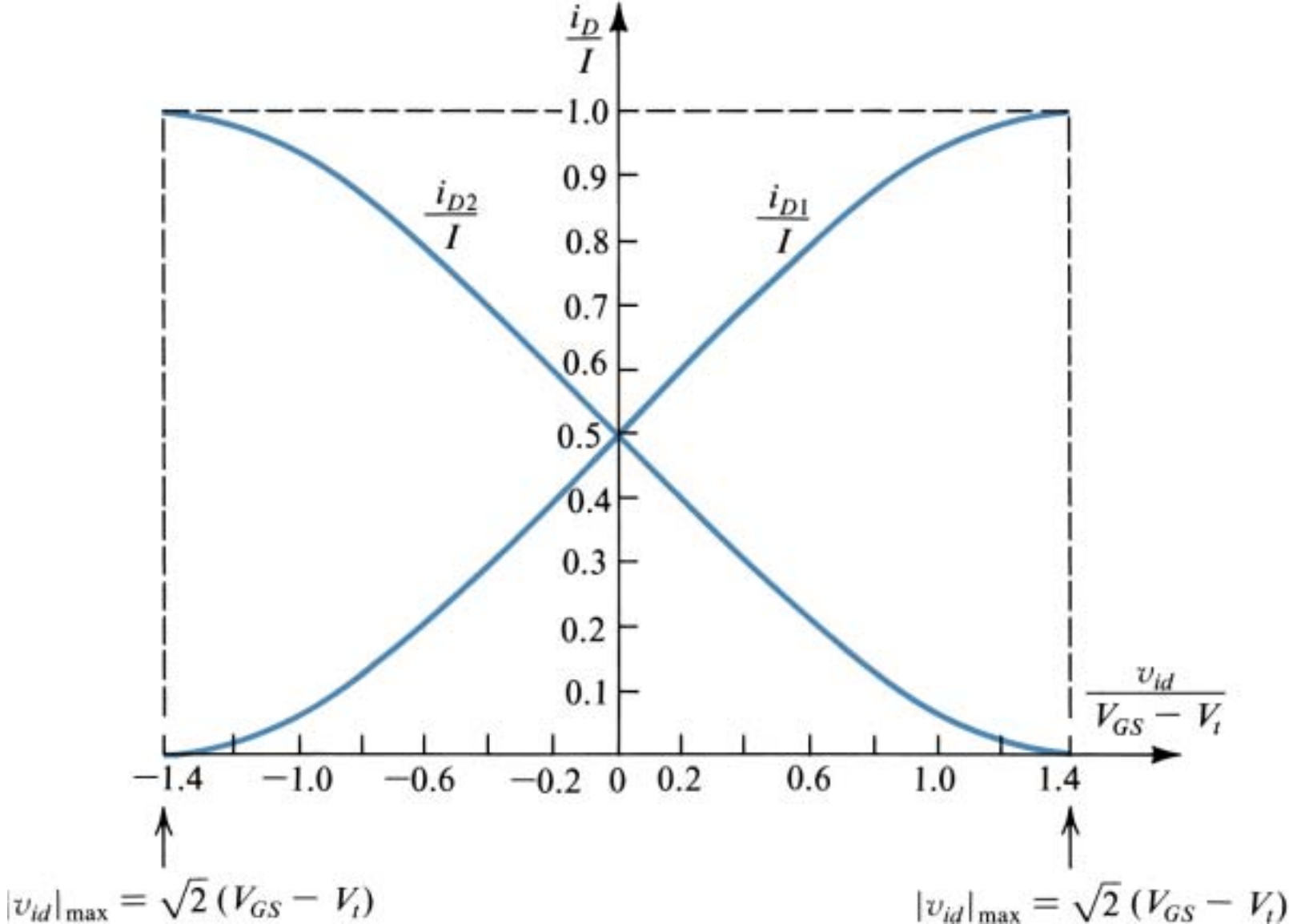
$$i_{D1} = \frac{I}{2} + \sqrt{2KI} \left(\frac{v_{id}}{2}\right) \sqrt{1 - \frac{(v_{id}/2)^2}{(I/2K)}} \quad i_{D2} = \frac{I}{2} - \sqrt{2KI} \left(\frac{v_{id}}{2}\right) \sqrt{1 - \frac{(v_{id}/2)^2}{(I/2K)}}$$

$$\frac{I}{2} = K(V_{GS} - V_t)^2, \quad 2K = \frac{I}{(V_{GS} - V_t)^2}, \quad I/2K = (V_{GS} - V_t)^2$$

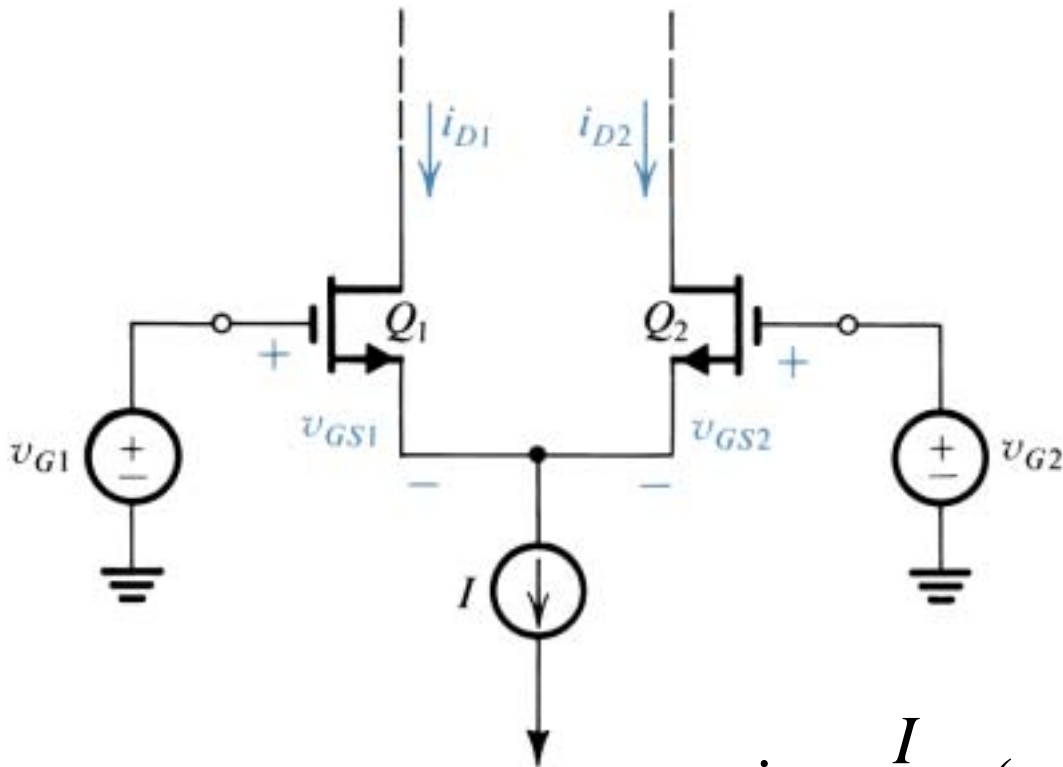
$$i_{D1} = \frac{I}{2} + \left(\frac{I}{V_{GS} - V_t}\right) \left(\frac{v_{id}}{2}\right) \sqrt{1 - \frac{(v_{id}/2)^2}{(V_{GS} - V_t)^2}}$$

$$i_{D2} = \frac{I}{2} - \left(\frac{I}{V_{GS} - V_t}\right) \left(\frac{v_{id}}{2}\right) \sqrt{1 - \frac{(v_{id}/2)^2}{(V_{GS} - V_t)^2}}$$

# Curva de Transconductancia



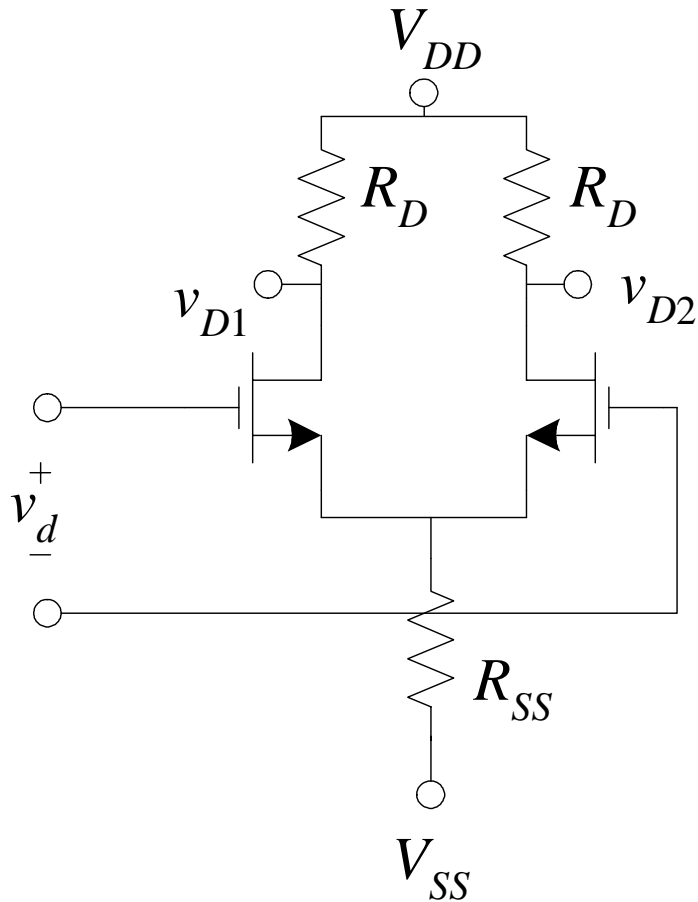
# Par Diferencial E-MOS



$$i_{D1} = \frac{I}{2} + \left( \frac{I}{V_{GS} - V_t} \right) \left( \frac{v_{id}}{2} \right) \sqrt{1 - \frac{(v_{id}/2)^2}{(V_{GS} - V_t)^2}}$$

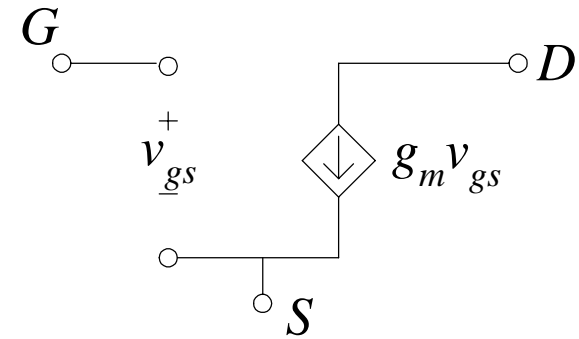
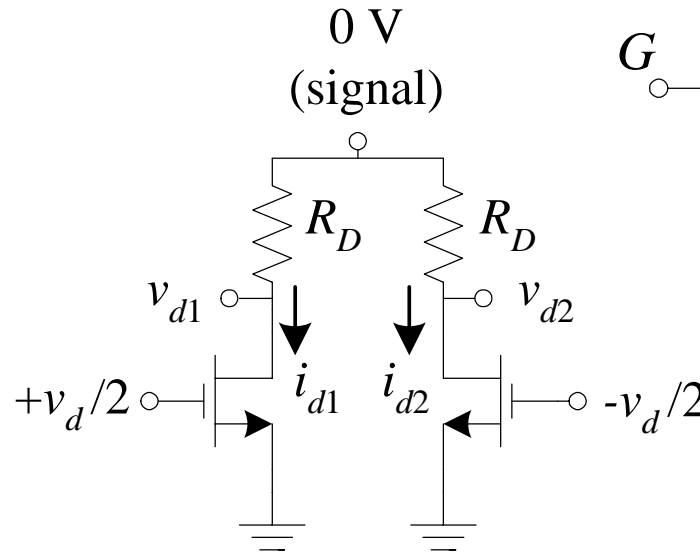
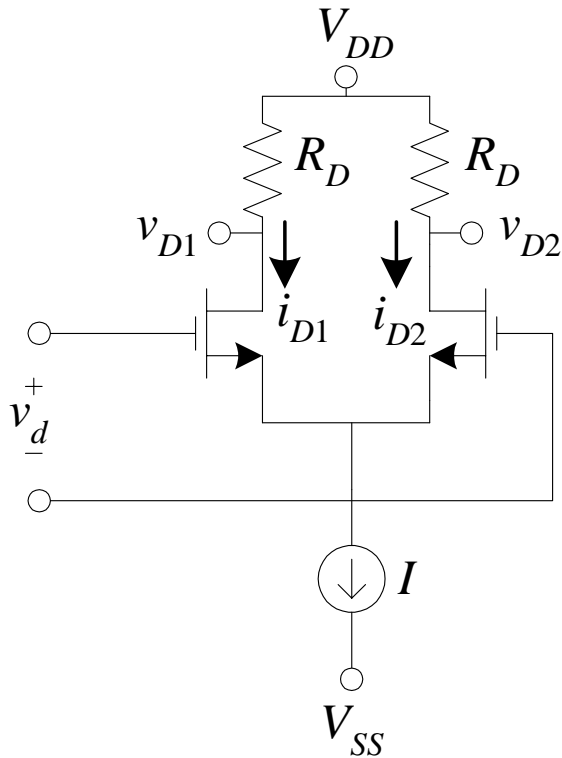
$$i_{D2} = \frac{I}{2} - \left( \frac{I}{V_{GS} - V_t} \right) \left( \frac{v_{id}}{2} \right) \sqrt{1 - \frac{(v_{id}/2)^2}{(V_{GS} - V_t)^2}}$$

# Ejemplo



Suponiendo  $v_d = 0V$ ,  $V_{DD} = 10V$ ,  
 $V_{SS} = -5V$ ,  $R_{SS} = 1K\Omega$ ,  $R_D =$   
 $2.2K\Omega$ ,  $V_t = 1.5V$  y  $K = 250$   
 $\mu A/V^2$  para  $M_1$  y  $M_2$ , calcular  $v_{D1}$   
y  $v_{D2}$

# Análisis en Señal Pequeña (Modo Diferencial)



$$v_{d1} = -g_m R_D \frac{v_d}{2}$$

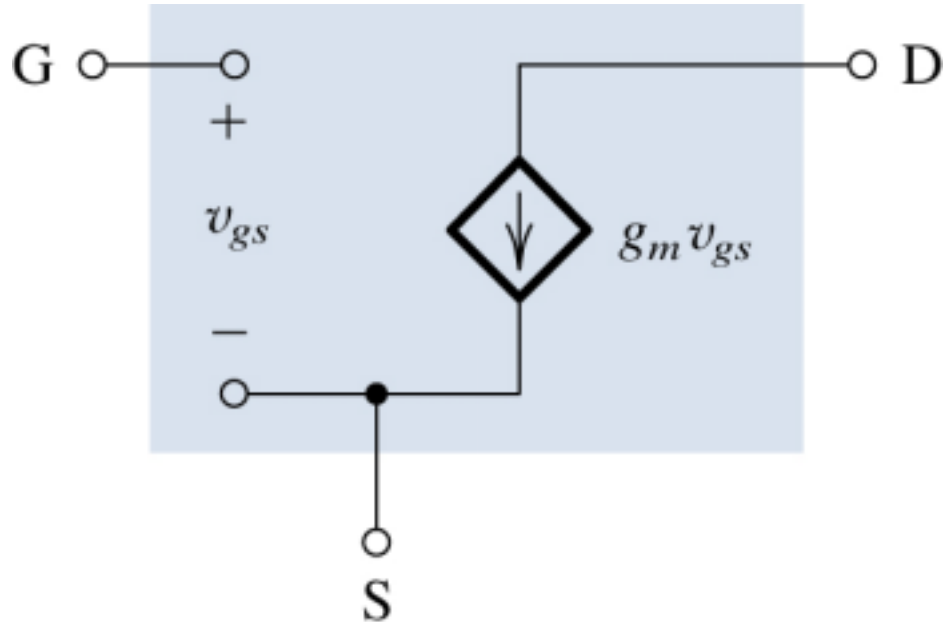
$$v_{d2} = g_m R_D \frac{v_d}{2}$$

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I}{2}$$

$$A_d = \frac{v_{d1} - v_{d2}}{v_d} = -g_m R_D$$

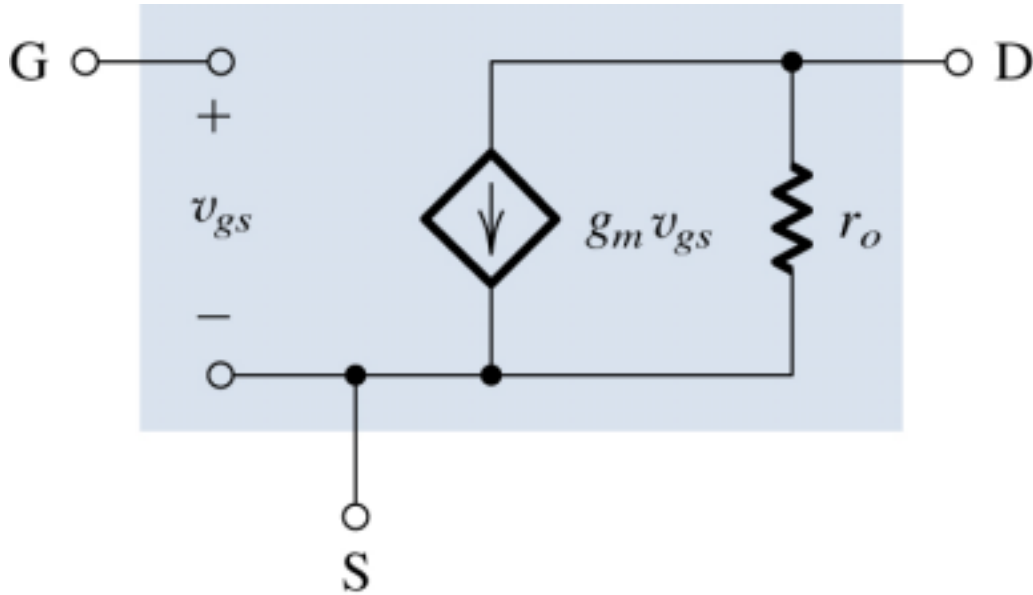


# Modelo del FET para Señal Pequeña



$$g_m = 2K(V_{GS} - V_t)$$

# Modelo del FET para Señal Pequeña (cont)



$$g_m = 2K(V_{GS} - V_t)$$

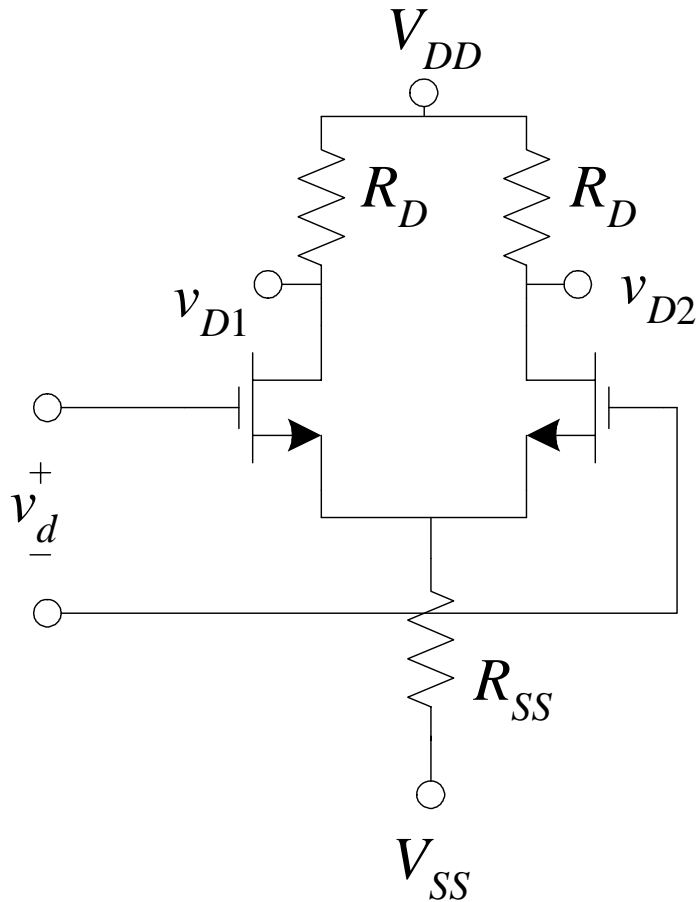
$$r_o = \frac{|V_A|}{I_{DS}}$$

$$V_A = 1/\lambda$$

$\lambda$ : factor de modulación de la longitud del canal

tip.  $10\text{K}\Omega \leq r_o \leq 1\text{M}\Omega$

# Problema



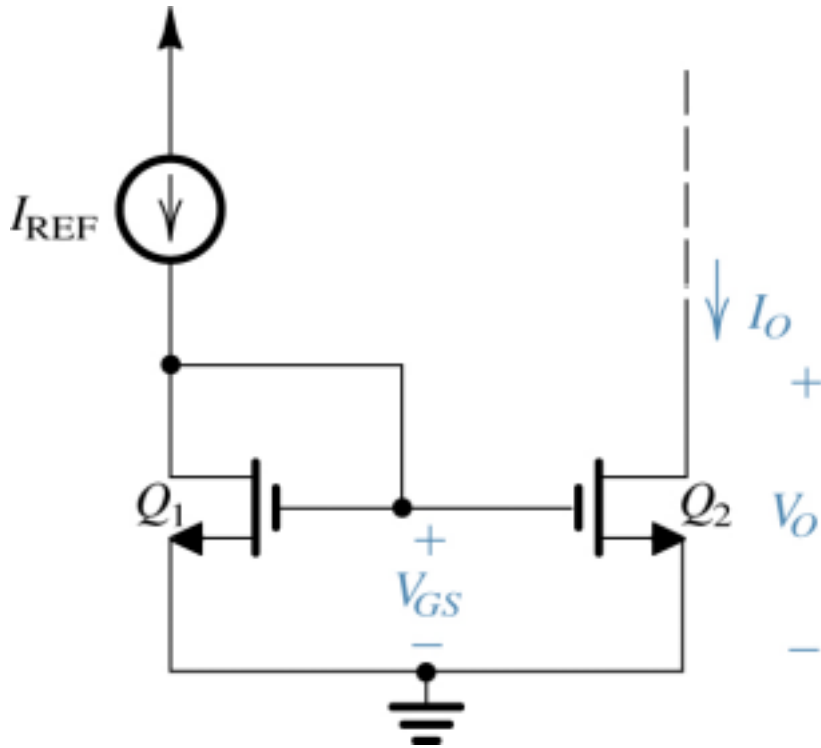
Suponiendo  $V_{DD} = 10\text{V}$ ,  $V_{SS} = -5\text{V}$ ,  $R_{SS} = 1\text{K}\Omega$ ,  $R_D = 2.2\text{K}\Omega$ ,  $V_t = 1.5\text{V}$  y  $K = 250 \mu\text{A}/\text{V}^2$  para  $M_1$  y  $M_2$ , calcular  $A_d$

# Ejercicios de Tarea

---

Resolver problemas 6.80 y 6.82 del libro de texto

# Espejo de Corriente E-MOS



$$I_{REF} = K_1 (V_{GS} - V_t)^2$$

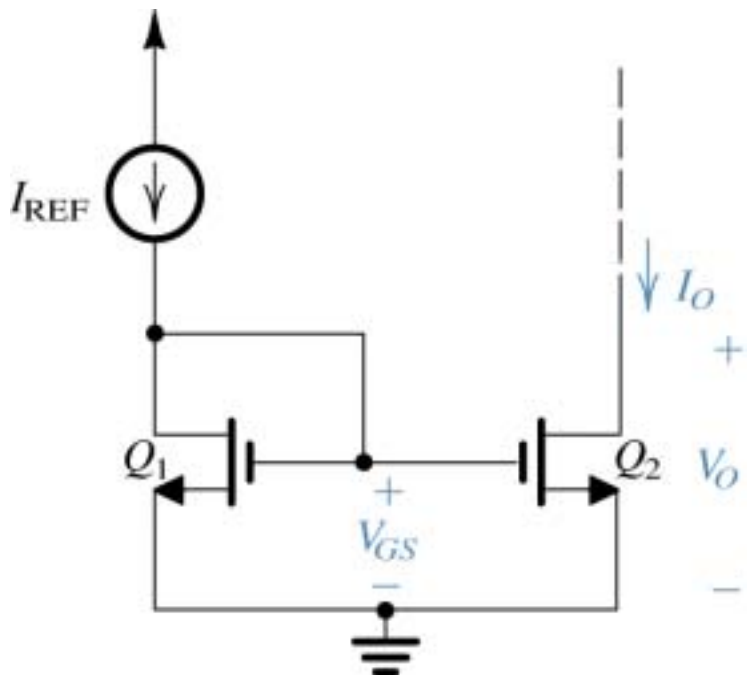
$$I_O = K_2 (V_{GS} - V_t)^2$$

$$I_O = I_{REF} \left( \frac{K_2}{K_1} \right)$$

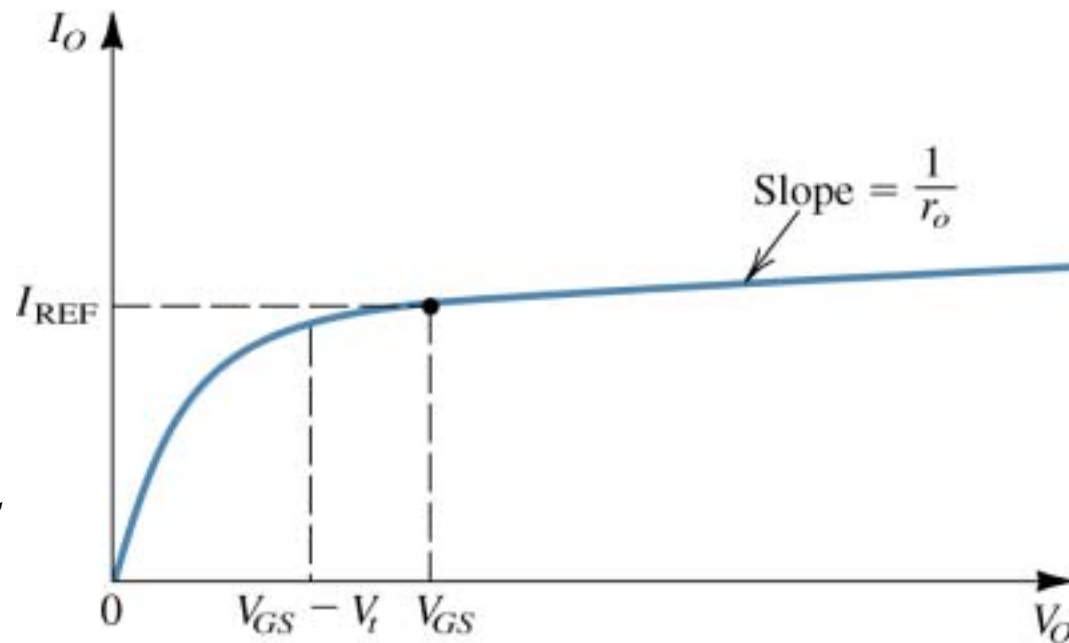
como 
$$K = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \left( \frac{W}{L} \right)$$

$$I_O = I_{REF} \left( \frac{W_2 / L_2}{W_1 / L_1} \right)$$

# Espejo de Corriente E-MOS (cont)



si  $\frac{W_2 / L_2}{W_1 / L_1} = 1$

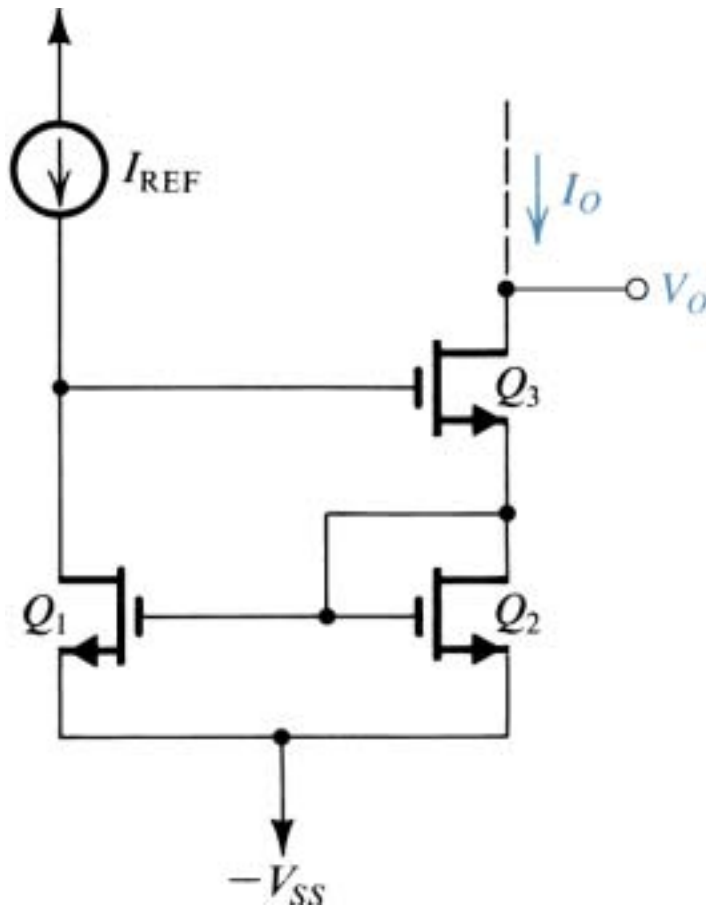


como  $V_{DS2} = V_O \neq V_{DS1} = V_{GS}$

$$I_O \approx I_{REF} \left( \frac{W_2 / L_2}{W_1 / L_1} \right)$$

(efecto de la modulación de la longitud del canal)

# Espejo de Corriente E-MOS tipo Wilson



$Q_1$  y  $Q_2$  forman el espejo de corriente

$$I_{REF} = I_{DS1}$$

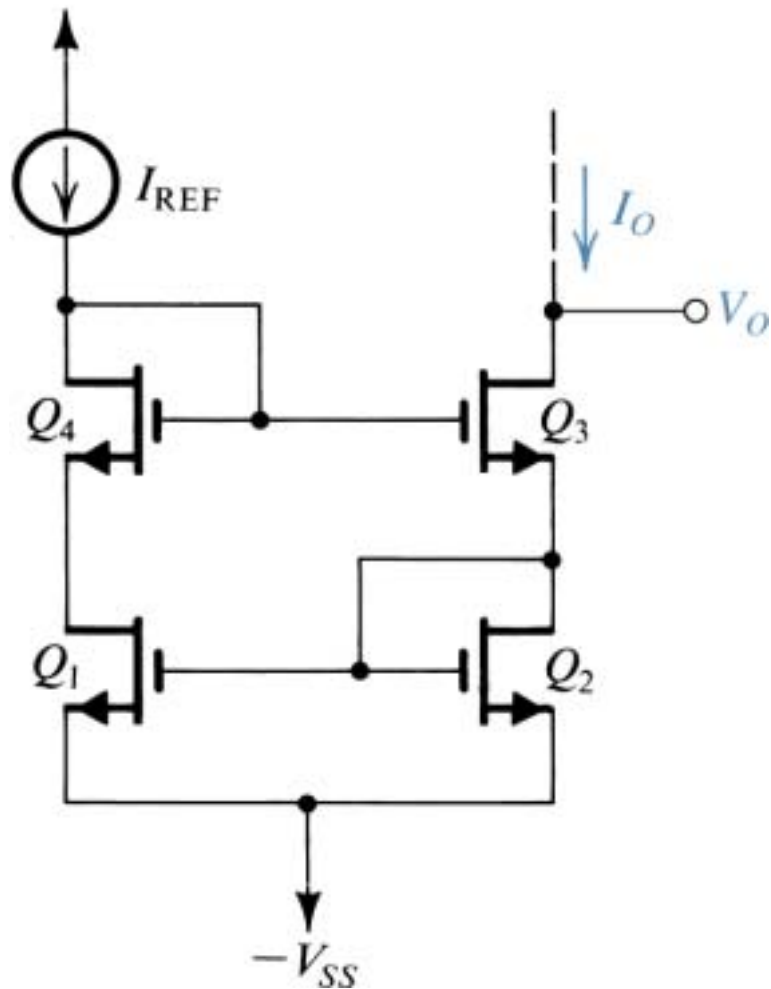
$$I_O = I_{DS3} = I_{DS2}$$

$$V_{DS1} = 2V_{GS}$$

$$V_{DS2} = V_{GS}$$

$$I_O = I_{REF} \left( \frac{W_2 / L_2}{W_1 / L_1} \right)$$

# Espejo de Corriente tipo Wilson modificada



$Q_1$  y  $Q_2$  forman el espejo de corriente ( $K_1 = K_4$ ,  $K_2 = K_3$ )

$$I_{REF} = I_{DS4} = I_{DS1}$$

$$I_O = I_{DS3} = I_{DS2}$$

$$V_{DS2} = V_{GS}$$

$$V_{D4S1} = 2V_{GS} \quad V_{DS4} = V_{GS}$$

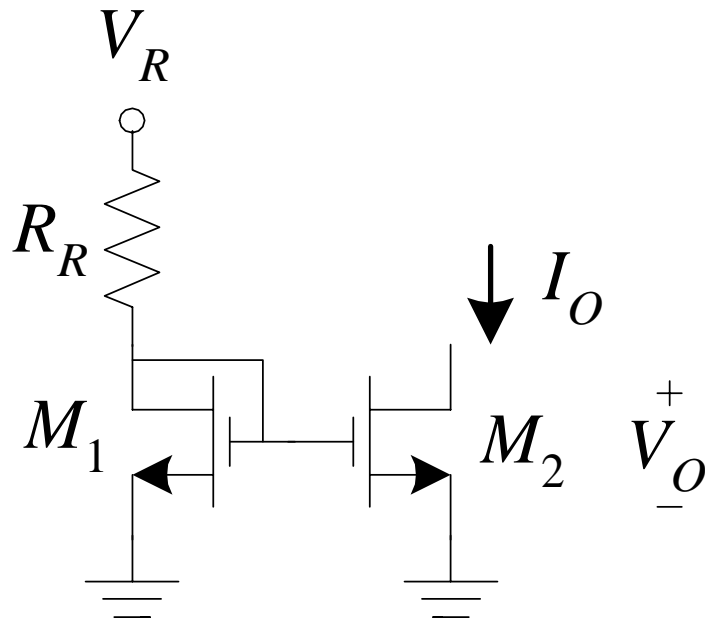
$$V_{DS1} = V_{D4S1} - V_{DS4} = V_{GS}$$

$$I_O = I_{REF} \left( \frac{W_2 / L_2}{W_1 / L_1} \right)$$

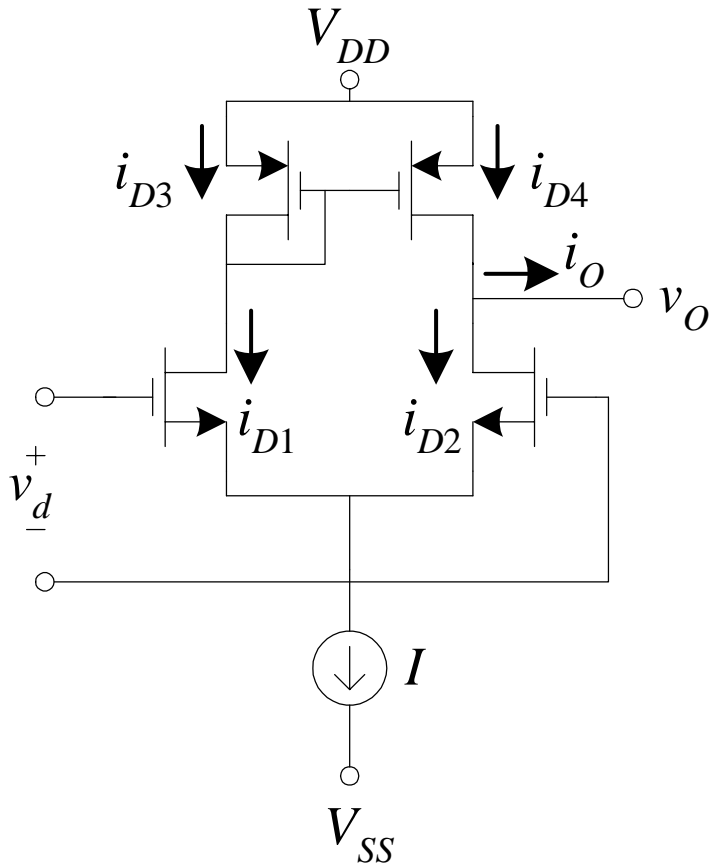


# Ejemplo

Calcular  $I_O$  si  $K_1 = K_2 = 400\mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $V_t = 2\text{V}$ ,  $V_A = 50\text{V}$ ,  
 $V_R = 15\text{V}$ ,  $R_R = 1\text{K}\Omega$ , y  $V_O = 6.6\text{V}$ .



# Amp. Diferencial CMOS con Carga Activa



para la polarización ( $v_d = 0$ ):

$$I_{D1} = I_{D3} = I_{D4} = I_{D2} = I/2, \quad I_O = 0$$

para la señal ( $V_{DD} = V_{SS} = I = 0$ ):

$$i_{d1} = g_m (v_d / 2) \quad i_{d2} = g_m (-v_d / 2)$$

$$i_{d1} = i_{d3} = i_{d4} \quad i_o = i_{d4} - i_{d2} = g_m v_d$$

$$v_o = i_o (r_{o4} \parallel r_{o2}) = g_m v_d \frac{r_o}{2} \quad r_o = \frac{V_A}{I/2}$$

$$g_m = 2K(V_{GS} - V_t) = \frac{I}{V_{GS} - V_t} \quad A_V = \frac{V_A}{V_{GS} - V_t}$$

# Ejercicios de Tarea

---

Resolver problemas 6.87, 6.94 y 6.96 del libro de texto