

Clase 19¹ - Aplicación de transistores a circuitos analógicos (II)

AMPLIFICADOR SOURCE COMÚN Y COPIA DE CORRIENTE CON MOSFET

Contenido:

1. Amplificador Source Común
2. Máxima señal sin distorsión
3. Fuentes de corriente

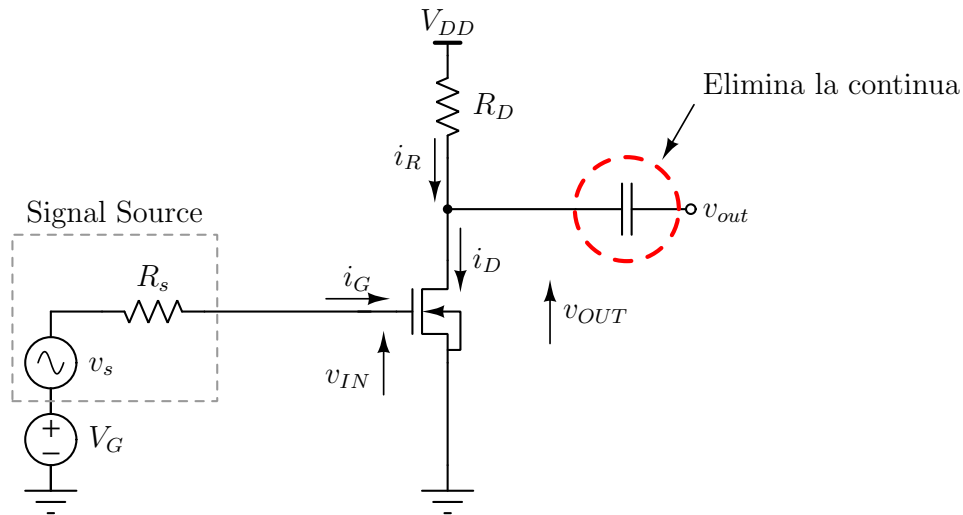
Lectura recomendada:

- Gray, Hurst, Lewis, Meyer, “Analysis and Design of Analog Integrated Circuits”, Ch. 3, §§3.1–3.3; Ch. 4 §§4.1–4.2.
- Sedra, Smith, “Microelectronic Circuits”, Ch. 4 §§4.7; Ch. 6 §§6.3.
- Howe, Sodini, “Microelectronics: An Integrated Approach”, Ch. 8, §§8.3–8.5.

¹Esta clase es una adaptación, realizada por los docentes del curso 86.03 – Dispositivos Semiconductores de la FIUBA, de la correspondiente hecha por el prof. Jesús A. de Alamo para el curso 6.012 – Microelectronic Devices and Circuits del MIT. Cualquier error debe adjudicarse a la adaptación.

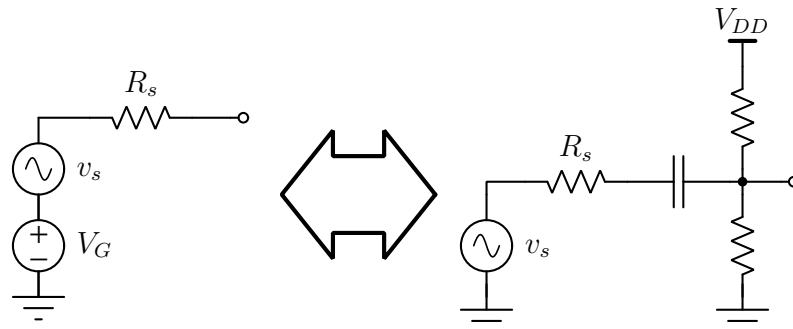
1. Amplificador Source Común

¿Cómo cambia todo si cambio un TBJ por un MOSFET?

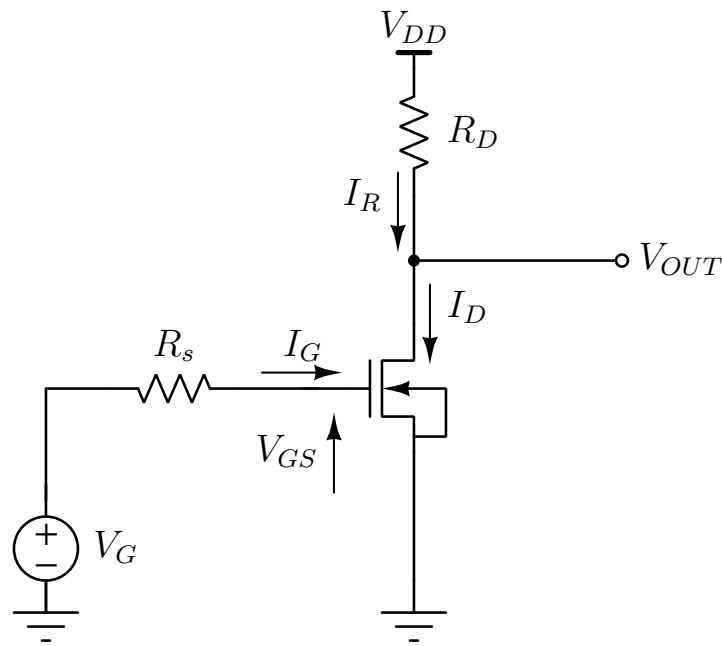


Algunas consideraciones:

- La fuente de polarización V_G es una simplificación del circuito de polarización del MOSFET. Una posible implementación es la siguiente:



- La frecuencia de la señal v_s es lo suficientemente alta para que la impedancia de los capacitores externos sea despreciable y lo suficientemente baja para que los efectos capacitivos del MOSFET sean también despreciables.

□ *Punto de polarización*

Como $I_G = 0 \Rightarrow V_G = V_{GS}$

Suponemos que el MOSFET está en saturación:

$$I_D = \frac{1}{2} \frac{W}{L} \mu_n C'_{ox} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$I_R = \frac{V_{DD} - V_{OUT}}{R_D}$$

Si V_G y R son dato, podemos calcular:

$$I_D = \frac{1}{2} \frac{W}{L} \mu_n C'_{ox} (V_G - V_T)^2$$

$$I_R = I_D$$

$$V_{OUT} = V_{DS} = V_{DD} - \frac{1}{2} \frac{W}{L} \mu_n C'_{ox} (V_G - V_T)^2 \cdot R$$

Si quisieramos saber con qué tensión polarizar al MOS-FET, en cambio se despeja:

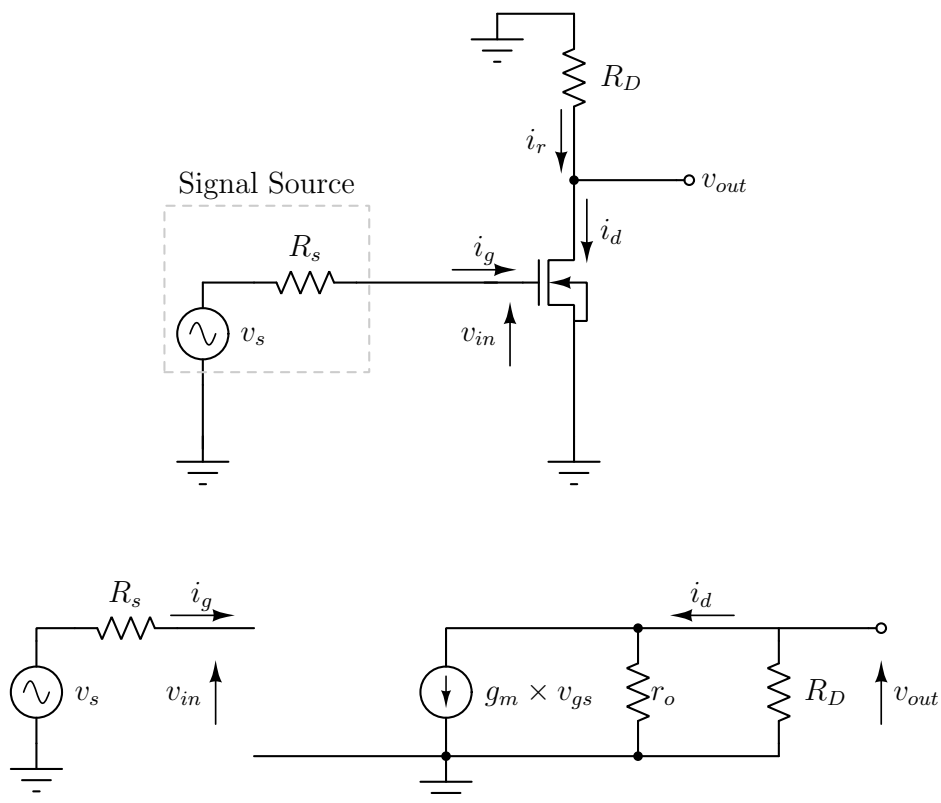
$$V_G = V_{GS} = \sqrt{\frac{2(V_{DD} - V_{OUT})}{R_D \frac{W}{L} \mu_n C'_{ox}}} + V_T$$

Finalmente verificamos que el punto Q este en zona de saturación:

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D \cdot R_D > V_{GS} - V_T$$

□ *Ganancia de tensión A_{vo} de pequeña señal*

Pasivamos las fuentes de tensión continua y reemplazamos el transistor por su modelo equivalente de pequeña señal para bajas frecuencias:



$$v_{out} = -g_m v_{in} (r_o // R_D)$$

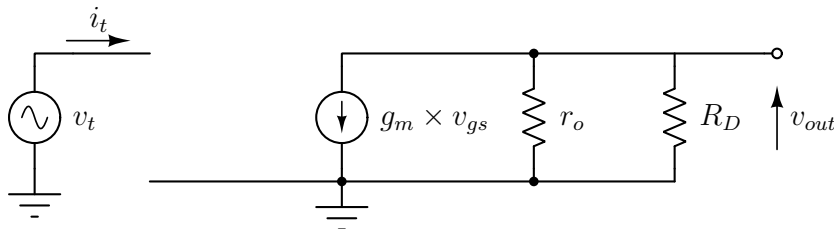
Luego la *ganancia de tensión sin carga* es:

$$A_{vo} = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -g_m (r_o // R_D)$$

□ *Resistencia de entrada, R_{IN}*

● Cálculo de la resistencia de entrada, R_{IN} :

- Aplicamos una tensión de prueba v_t en la entrada.
- Calculamos la corriente i_t resultante.
- Finalmente $R_{IN} = v_t/i_t$



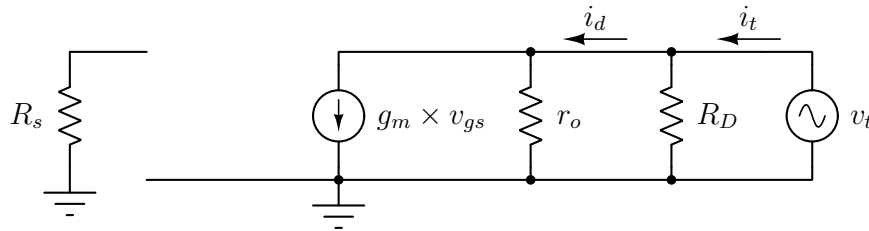
$$i_t = 0 \Rightarrow R_{IN} = \frac{v_t}{i_t} \rightarrow \infty$$

Esta es la resistencia de entrada “inherente” al circuito. *Puede modificarse si se utilizan resistores para polarizar el circuito.*

□ Resistencia de salida, R_{OUT}

● Cálculo de la resistencia de salida, R_{OUT} :

- Cargamos al amplificador a su entrada con R_s
- Aplicamos una tensión de prueba v_t en la salida.
- Calculamos la corriente i_t resultante.
- Calculamos $R_{OUT} = v_t/i_t$



El generador controlado no se enciende.

$$v_{gs} = 0 \Rightarrow g_m \times v_{gs} = 0$$

$$i_t = i_d + \frac{v_t}{R_D} = \frac{v_t}{r_o} + \frac{v_t}{R_D}$$

$$\Rightarrow v_t = i_t(r_o // R_D)$$

$$R_{OUT} = \frac{v_t}{i_t} = r_o // R_D$$

□ *Ganancia de tensión A_{vs} de pequeña señal*

Se puede también definir la ganancia de tensión respecto de la fuente de señal v_s :

$$A_{vs} = \frac{v_{out}}{v_s} = \frac{v_{out}}{v_{in}} \frac{v_{in}}{v_s}$$

Para el source-común, como $R_{IN} \rightarrow \infty$:

$$v_{in} \simeq v_s \Rightarrow \frac{v_{in}}{v_s} \simeq 1 \Rightarrow A_{vs} \simeq \frac{v_{out}}{v_{in}} = A_{vo}$$

□ *Relación de compromiso de A_{vo} , R_D , V_{DD} e I_{DQ}*

Examinemos la dependencia con la polarización:

$$|A_{vo}| = g_m (r_o // R_D) \simeq g_m R_D$$

Reescribimos $|A_{vo}|$ de la siguiente forma:

$$|A_{vo}| \simeq g_m R_D = \sqrt{2 \frac{W}{L} \mu_n C'_{ox} I_D} \frac{V_{DD} - V_{OUT}}{I_D}$$

$$|A_{vo}| \propto \frac{V_{DD} - V_{OUT}}{\sqrt{I_D}}$$

Para obtener elevado $|A_{vo}|$ conviene: $V_{DD} \uparrow$ e $I_D \downarrow$

Si V_{OUT} se quiere dejar constante, entonces ambos enfoques implican $\Rightarrow R_D = \frac{V_{DD}}{I_D} \uparrow$

Consecuencias de un elevado valor de R_D :

- Entra en juego el valor de r_o , ya que $|A_{vo}| = g_m(r_o // R_D)$
- Su implementación en circuitos integrados requiere un área muy grande de silicio. Es preferible prescindir de resistores.
- El valor elevado de resistencia incrementa el ruido térmico del circuito.

2. Máxima señal sin distorsión

La distorsión ocurre cuando el transistor no está trabajando en el régimen que corresponde.

La relación de la señal de salida con la señal de entrada no será lineal.

Existirá una deformación de la señal de salida y entonces:

$$v_{out} \neq A_{vo}v_{in}$$

□ *Máxima señal de entrada sin distorsión*

● Hay que verificar que v_{gs} se encuentre dentro del rango de validez del modelo de pequeña señal:

$$v_{gs} \leq 0.2 (V_{GS} - V_T)$$

Si no se verifica esta condición el amplificador distorsiona por alinealidad.

□ *Máxima señal de salida sin distorsión:*

● Límite superior: para v_s demasiado negativa el transistor se va al corte, i.e. toda la corriente de señal anula la corriente de polarización. En esta situación:

$$\Rightarrow V_{OUT} = V_{DD}$$

La señal de salida es:

$$\Rightarrow v_{out(corte)} = I_{DQ}R_D = V_{DD} - V_{DSQ}$$

• Límite inferior: para v_s muy positiva el MOSFET entrará en régimen de triodo. El caso límite tolerable es:

$$V_{OUT} = V_{DS(sat)}$$

Para hallar el valor exacto de V_{OUT} hay que resolver la intersección de la recta de carga con la parábola correspondiente a la ubicación del punto de pinch-off. Una respuesta rápida pero aproximada es considerar:

$$\Rightarrow v_{out(sat)} = V_{DSQ} - V_{DS(sat)} = V_{DSQ} - (V_{GSQ} - V_T)$$

Luego, la máxima señal de salida sin distorsión será:

$$v_{out,max} = \min\{v_{out(corte)}, v_{out(sat)}\}$$

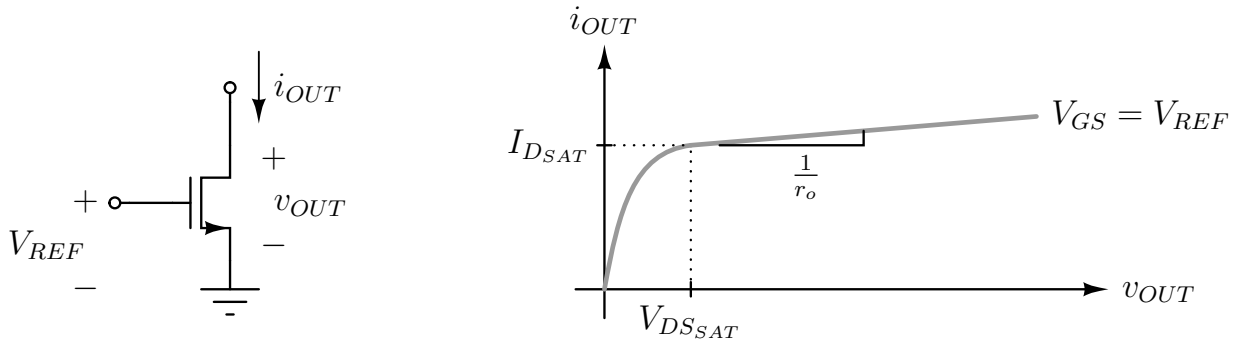
3. Fuentes de corriente

Como se se analizó en *Relaciones de compromiso para el Amplificador Source Común*, es necesario tener una resistencia de polarización R_D elevada para aumentar la ganancia.

Una alternativa para la resistencia de polarización R_D es utilizar fuentes de corriente.

¿Cómo puedo implementar una fuente de corriente con MOSFETs?

□ *El transistor MOS como fuente de corriente*

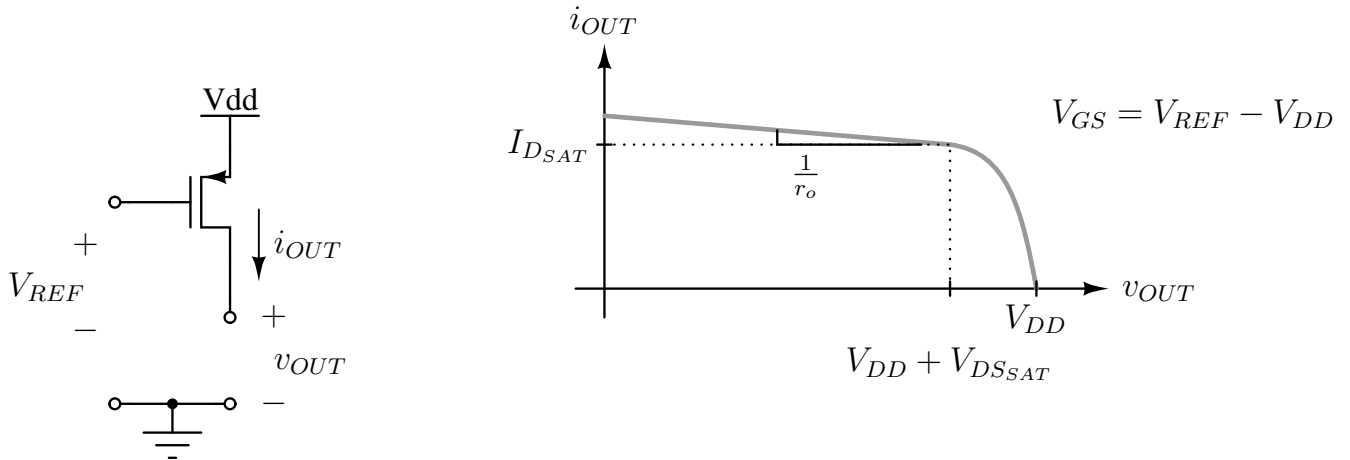


$$i_{OUT} = \frac{1}{2} \mu C'_{ox} \frac{W}{L} (V_{REF} - V_T)^2 (1 + \lambda \cdot v_{OUT})$$

Características:

- El valor de la corriente de salida es i_D y está definido por una tensión de referencia V_{REF} .
- El transistor funciona como fuente de corriente en régimen de saturación.
- Hay un valor mínimo de tensión de salida para el cual la fuente funciona correctamente: $v_{OUT} = V_{DS(sat)}$.
- Presenta una resistencia de salida $R_{OUT} = r_o$.
- El transistor N-MOSFET es un *sumidero de corriente*.

□ Fuente de corriente P-MOSFET



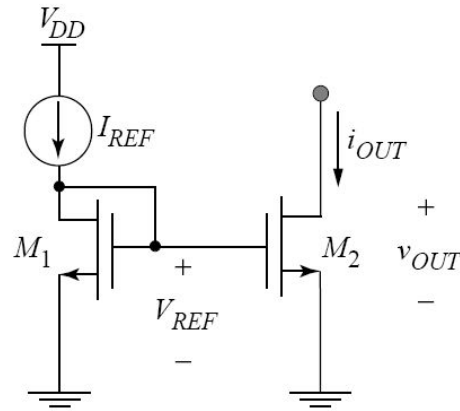
$$i_{OUT} = \frac{1}{2} \mu C'_{ox} \frac{W}{L} (V_{REF} - V_{DD} - V_T)^2 (1 - \lambda(v_{OUT} - V_{DD}))$$

Características:

- El valor de la corriente de salida es $i_{OUT} = -i_D$ y está definido por una tensión de referencia V_{REF} .
- El transistor funciona como fuente de corriente en régimen de saturación.
- Hay un valor máximo de tensión de salida para el cual la fuente funciona correctamente: $v_{OUT} = V_{DD} + V_{DSAT}$.
- Presenta una resistencia de salida $R_{OUT} = r_o$.
- El transistor P-MOSFET es un *fente de corriente*.

□ *Copia de corriente espejo simple*

¿Cómo se puede implementar V_{REF} ?



$$I_{REF} = \frac{1}{2} \mu C'_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_1 (V_{REF} - V_T)^2$$

$$i_{OUT} = \frac{1}{2} \mu C'_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_2 (V_{REF} - V_T)^2$$

Entonces:

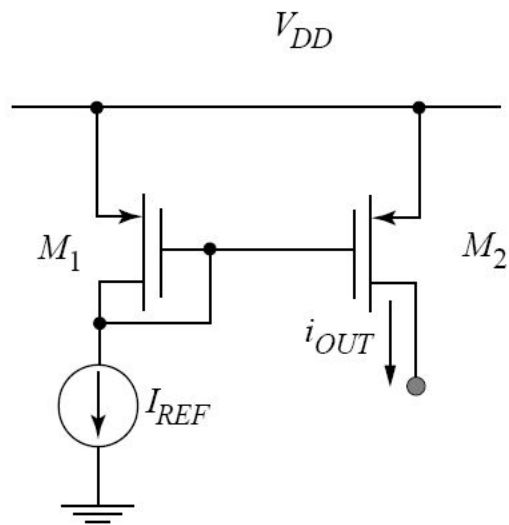
$$i_{OUT} = I_{REF} \frac{\left(\frac{W}{L} \right)_2}{\left(\frac{W}{L} \right)_1}$$

i_{OUT} se ajusta con I_{REF} según la relación W/L de los MOSFETs: Circuito *espejo de corriente*.

Es importante contar con transistores “bien apareados”: proporción W/L muy controlada, mismo V_T , t_{ox} , etc.

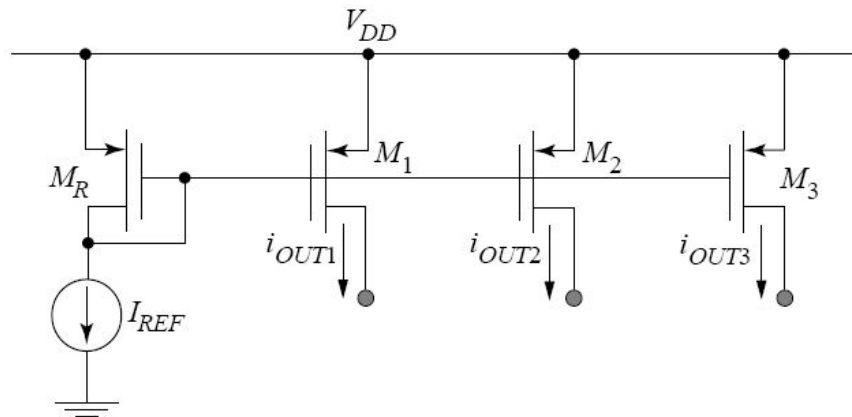
□ Fuente de corriente P-MOSFET

Fuente espejo con P-MOSFET :



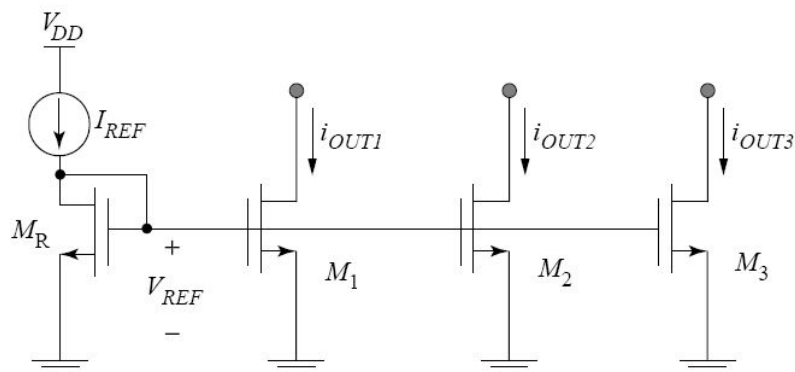
□ Múltiples fuentes de corriente

Dado que $I_G = 0$, de una sola fuente de corriente es posible obtener múltiples fuentes espejo:



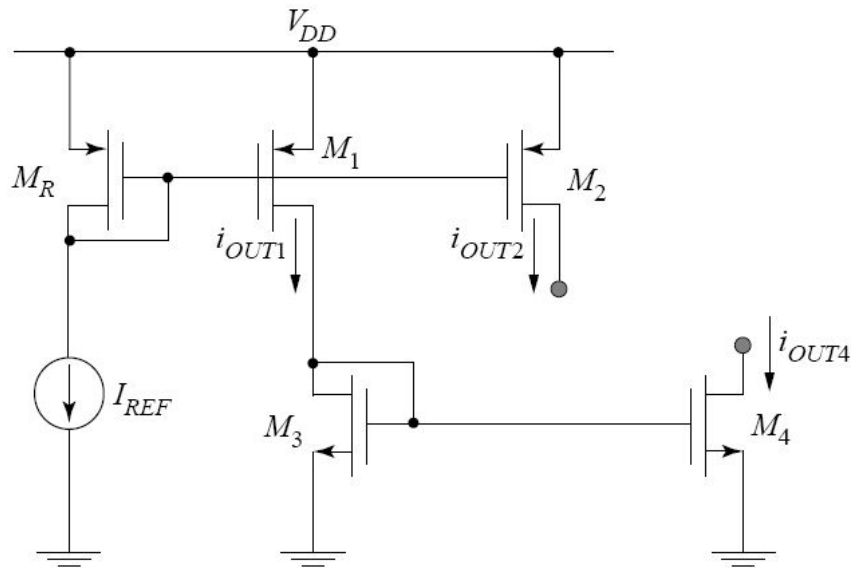
$$I_{OUTn} = I_{REF} \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_n}{\left(\frac{W}{L}\right)_R}$$

La misma idea se aplica a fuentes de corriente NMOS:



□ *Múltiples fuentes y sumideros de corriente*

Generalmente, en cualquier circuito se necesitan múltiples fuentes que absorban y entreguen corriente. Éstas se puede construir a partir de una única fuente de corriente:



$$I_{OUT1} = I_{REF} \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_1}{\left(\frac{W}{L}\right)_R}$$

$$I_{OUT2} = I_{REF} \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_2}{\left(\frac{W}{L}\right)_R}$$

$$I_{OUT4} = I_{OUT1} \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_4}{\left(\frac{W}{L}\right)_3} = I_{REF} \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_4}{\left(\frac{W}{L}\right)_3} \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_1}{\left(\frac{W}{L}\right)_R}$$

Principales conclusiones

- Se puede implementar un amplificador con utilizando un MOSFET: Amplificador Source Común.
- Calculamos sus parámetros: A_{vo} ; R_{IN} ; R_{OUT} .
- Estudiamos las relaciones de compromiso que existen en su implementación y sus límites de funcionamiento para evitar la distorsión.
- Polarizar un source común polarizado con una fuente de corriente facilita una polarización estable y puede mejorar su amplificación.
- Una copia de corriente se puede obtener a partir de una fuente de corriente con un circuito *copia de corriente espejo*.
- Se pueden obtener múltiples fuentes o sumideros de corriente, a partir de una sola fuente de corriente de referencia.
- La “calidad” de estas fuentes de corriente se basa en que en la tecnología de circuitos integrados dispone de transistores “bien apareados” dentro de un mismo chip, es decir: misma temperatura, mismo V_T , mismo t_{ox} y relación controlable de W/L .