EL42A - Circuitos Electrónicos

Clase No. 29: Fuentes de Corriente (2)

Patricio Parada
pparada@ing.uchile.cl

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

18 de noviembre de 2008

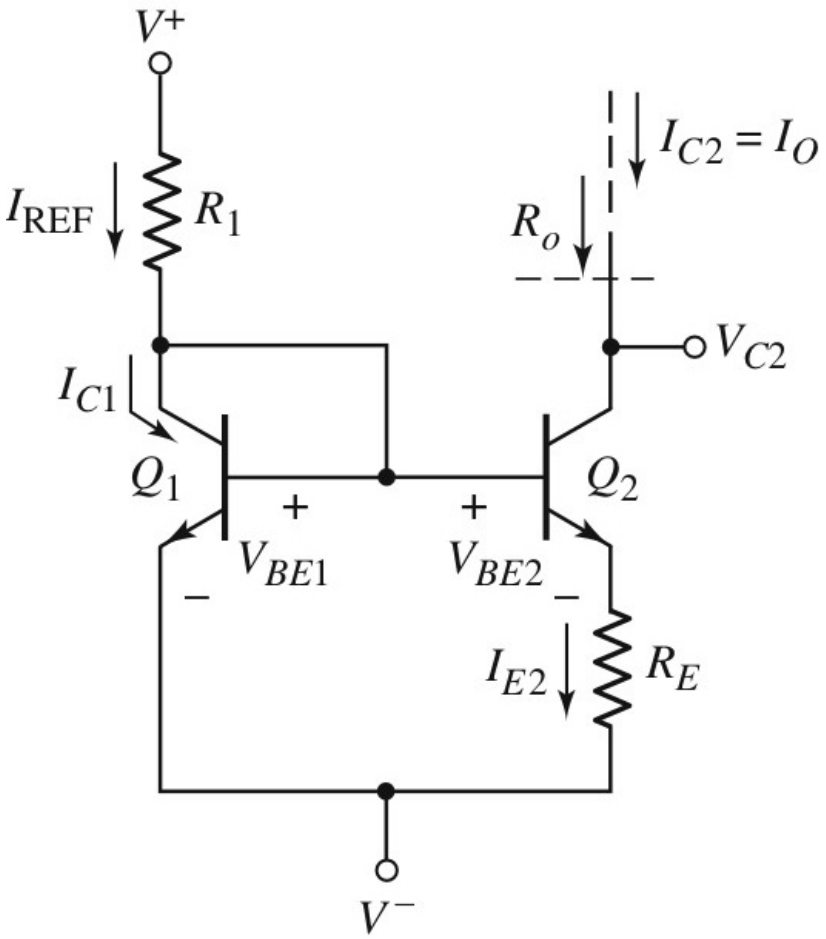
Fuente Widlar: Motivación

- Problema: Cuál es el orden de R_1 en una fuente espejo de corriente?
- Caso: Considere $I_0 \cong 10\ \mu A$, $V^+ = -V^- = 5\ V$; entonces

$$R_1 = \frac{V^+ - V^- - V_{BE}}{I_{\text{REF}}} \cong \frac{5 - (-5) - 0{,}7}{10 \times 10^{-6}} = 930 k\Omega$$

- Esta resistencia es muy grande para un circuito integrado. La fuente Widlar es una alternativa donde R_1 es de un orden de $k\Omega$'s en lugar de casi mega ohms.

Fuente Widlar: Análisis DC



Si $\beta >> 1$ tenemos que $I_{B1} \sim 0$. Además si Q_1 y Q_2 son idénticos tendremos

$$I_{\text{REF}} = I_{C1} = I_S \exp\left(\frac{V_{BE1}}{V_T}\right)$$

$$I_0 = I_{C2} = I_S \exp\left(\frac{V_{BE2}}{V_T}\right)$$

Por lo tanto

$$V_{BE1} = V_T \log\left(\frac{I_{\text{REF}}}{I_S}\right)$$

$$V_{BE2} = V_T \log\left(\frac{I_0}{I_S}\right)$$

Fuente Widlar: Análisis DC

$$V_{BE1} - V_{BE2} = V_T \log\left(\frac{I_{\text{REF}}}{I_0}\right)$$

Por otro lado,

$$V_{BE1} - V_{BE2} = I_{E2} R_E \cong I_0 R_E$$

Finalmente obtenemos

$$I_0 R_E = V_T \log\left(\frac{I_{\text{REF}}}{I_0}\right)$$

Example

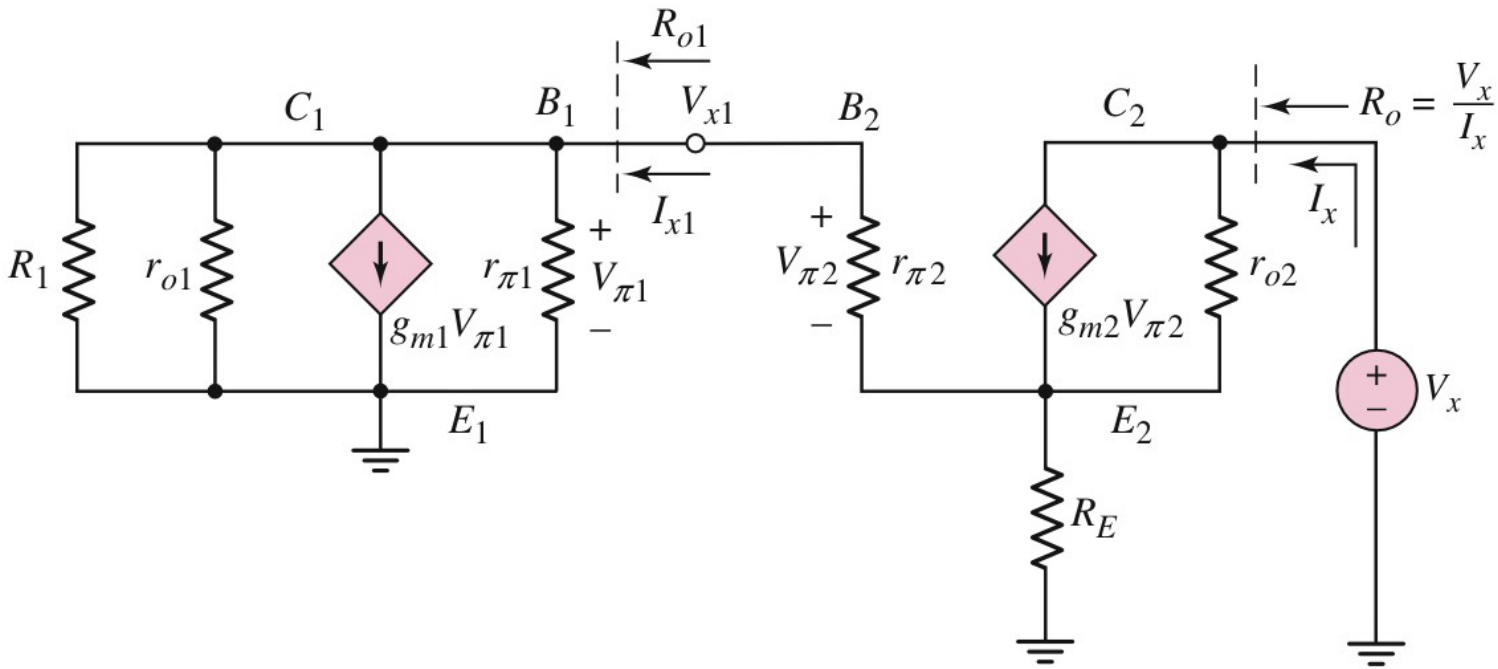
Diseño de una fuente Widlar para los siguientes requerimientos:
$I_{\text{REF}} = 1mA,\ I_0 = 12\mu A,\ V^+ = -V^- = 5\ V,\ V_{BE1} = 0{,}7\ V.$

$$R_1 = \frac{V^+ - V_{BE1} - V^-}{I_{\text{REF}}} = \frac{5 - 0{,}7 + 5}{1 \times 10^{-3}} = 9{,}3\ k\Omega$$

$$R_E = \frac{V_T}{I_0} \log\left(\frac{I_{\text{REF}}}{I_0}\right) = \frac{0{,}026}{0{,}012 \times 10^{-3}} \log \frac{1}{0{,}012} = 9{,}58\ k\Omega.$$

Fuente Widlar: Resistencia de Salida R_o

Vamos a determinar la resistencia de la fuente mirando hacia el colector de Q_2 utilizando el modelo de equivalente de señal pequeña de ambos transistores.



El cálculo lo vamos a realizar en dos pasos: primero calcularemos la resistencia vista desde la base de Q_2 y mirando hacia Q_1 (denotada por R_{o1}), y luego la resistencia de salida de la fuente R_o.

Fuente Widlar: Resistencia de Salida R_o

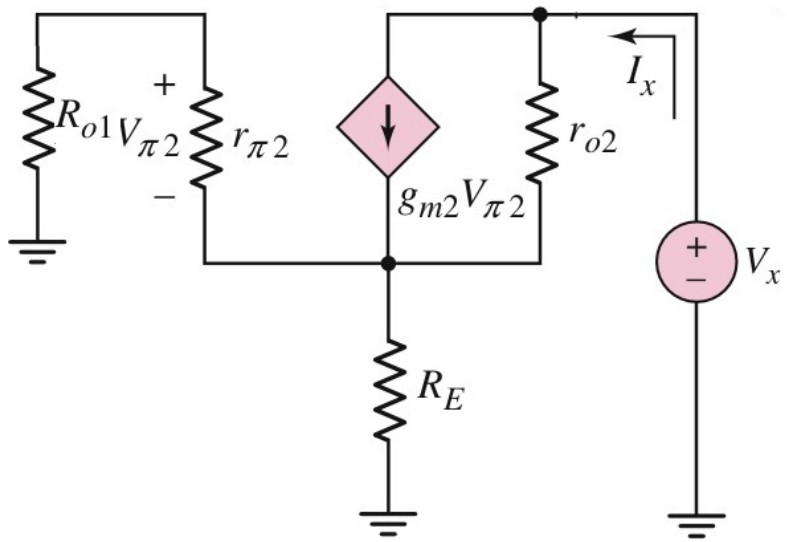
LCK (B_1):

$$I_{x1} = \frac{V_{\pi 1}}{r_{\pi 1}} + g_{m1} V_{\pi 1} + \frac{V_{\pi 1}}{r_{o1} \| R_1}$$

$$= V_{\pi 1} \left(\frac{1}{r_{\pi 1}} + \frac{1}{r_{o1} \| R_1} + g_{m1} \right)$$

$$\Rightarrow \frac{V_{\pi 1}}{I_{x1}} = r_{\pi 1} \| r_{o1} \| R_1 \| 1/g_{m1} \equiv R_{o1}.$$

Obtenemos el siguiente circuito simplificado:



Fuente Widlar: Resistencia de Salida R_o

$$(R_{o1} + r_{\pi 2})\frac{V_{\pi 2}}{r_{\pi 2}} + R_E\left(I_x + \frac{V_{\pi 2}}{r_{\pi 2}}\right) = 0$$

$$\Rightarrow \left(\frac{R_{01}}{r_{\pi 2}} + 1 + \frac{R_E}{r_{\pi 2}}\right)V_{\pi 2} = -R_E I_x$$

Reordenando obtenemos

$$R_o \equiv \frac{V_x}{I_x} = r_{o2}\left[1 + g_{m2}\frac{R_E r_{\pi 2}}{R_{o1} + R_E + r_{\pi 2}} + \frac{R_E \| (R_{o1} + r_{\pi 2})}{r_{o2}}\right]$$

Si $R_{o1} << r_{\pi 2}$ podemos hacer la simplificación:

$$R_o \equiv \frac{V_x}{I_x} = r_{o2}\left[1 + R_E \| r_{\pi 2}\left(\frac{1}{r_{o2}} + g_{m2}\right)\right]$$

Es usual que $1/r_{o2} << g_{m2}$; en este caso la expresión puede simplificarse aun más. En este caso, la fuente introduce una incremento en la resistencia de salida de un factor

$$1 + g_{m2} R_E \| r_{\pi 2}$$

Fuente Widlar: Ejemplo

Considere la configuración $V^+ = -V^- = 5\ V, R_1 = 9{,}3\ k\Omega, R_E = 9{,}58\ k\Omega$. Considere además que $V_A = 80\ V$ y $\beta = 100$. Determine el cambio en I_0 si V_{C2} varía en $4\ V$.

Solución

Asumimos $I_0 = 12\ \mu A$ (el mismo que usamos en el ejemplo anterior).

Reemplazamos los valores en las fórmulas de los parámetros:

$$r_{02} = \frac{V_A}{I_0} = \frac{80}{0{,}012 \times 10^{-3}} = 6{,}67\ M\Omega$$

$$g_{m2} = \frac{I_0}{V_T} = \frac{0{,}012}{0{,}026} = 0{,}462\ mA/V$$

$$r_{\pi 2} = \beta \frac{V_T}{I_0} = 100 \times \frac{0{,}026}{0{,}012} = 217\ k\Omega$$

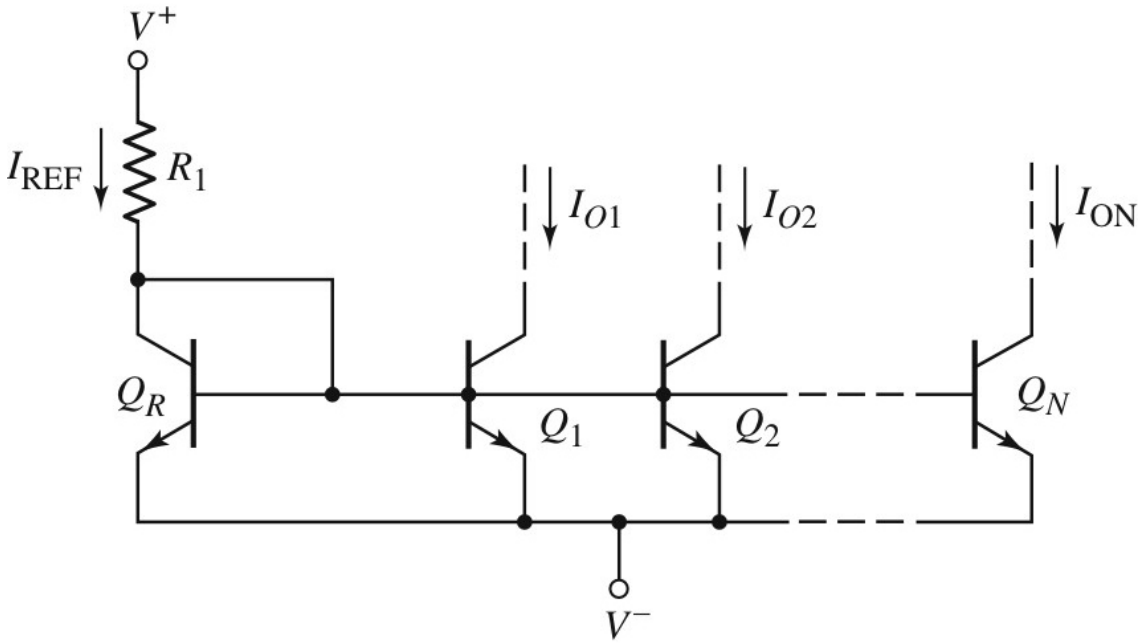
$$\Rightarrow R_0 = r_{o2}(1 + R_E \| r_{\pi 2} g_{m2}) = 34{,}9\ M\Omega.$$

$$\Delta I_0 = \frac{1}{R_0} \Delta V_{C2} = 0{,}115\ \mu A$$

Lo que corresponde a una variación de un $0{,}96\,\%$.

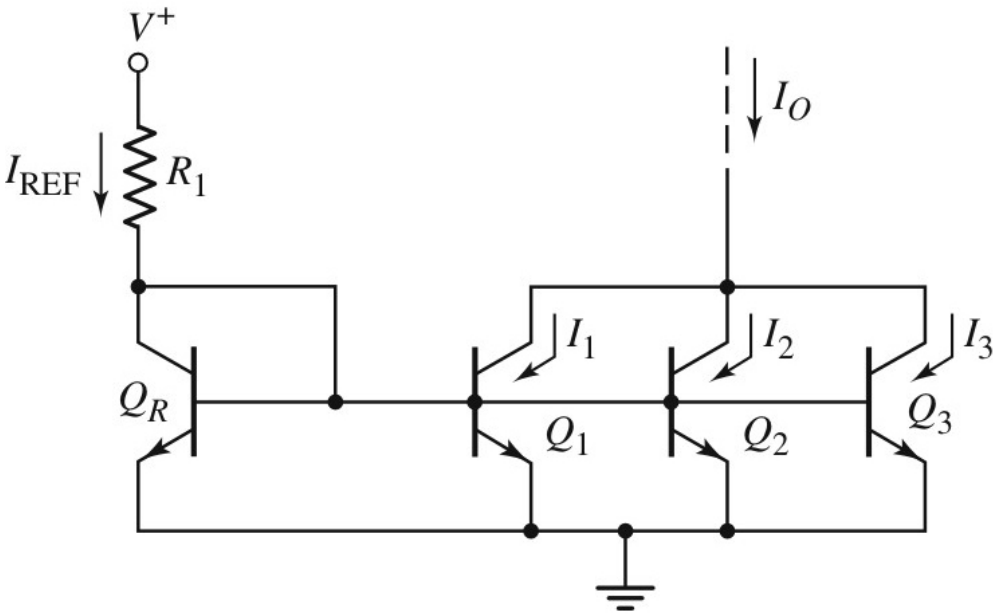
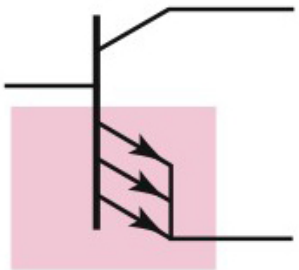
Fuentes Espejo con Múltiples Transistores

- En el circuito espejo de corriente con dos transistores la corriente I_0 se establece fijando la corriente I_{REF} a través de Q_1. Este transistor puede ser aprovechado para alimentar otros transistores conectados en paralelo a Q_2.
- Consideremos por ejemplo



Fuentes Espejo con Múltiples Transistores

En este caso

$$I_{o1} = I_{o2} = \ldots = I_{oN} = \frac{I_{\text{REF}}}{1 + \frac{1+N}{\beta}}$$

Podemos conectar los colectores de los transistores de carga para cambiar la relación entre la corriente de referencia y la corriente de carga I_0. En este caso utilizamos un símbolo especial para denotar el arreglo: