

# EL42A - Circuitos Electrónicos

## Clase No. 27: Polarización de Circuitos Integrados

Patricio Parada

pparada@ing.uchile.cl

Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Universidad de Chile

17 de Noviembre de 2009

# Contenidos

## Fuentes de Corriente

Motivación

Espejo de Corriente

Circuitos Fuente de Corriente Mejorados

Fuente Widlar

1. Técnicas clásicas de polarización hacen uso extensivo de divisores de tensión, condensadores de acoplamiento y bypass.
2. Este enfoque no es práctico en polarización de circuitos integrados.
3. Porque? Resistencias grandes utilizarían porciones grandes de la superficie del integrado.
4. Condensadores de acoplamiento y bypass tienen un efecto pasaaltos no deseable.

La solución es utilizar una **fuentes de corriente** para polarizar el circuito.

## Parámetros Típicos de una Fuente de Corriente

Hay dos elementos que importan al momento de caracterizar una fuente de corriente:

- ▶ La magnitud de la fuente  $I_0$ .
- ▶ La resistencia de salida de la fuente  $R_0$ .

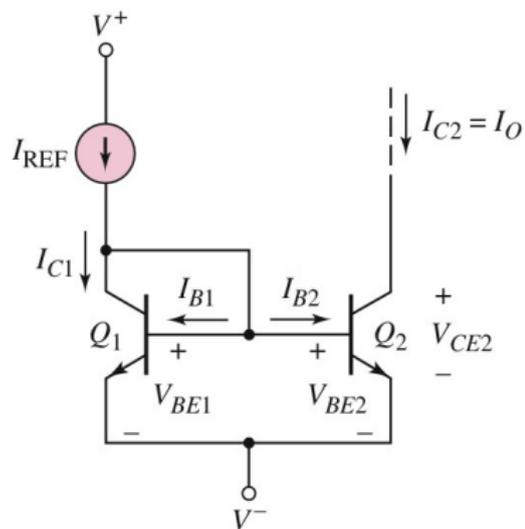
En el caso de la fuente ideal  $R_0 = \infty$ . En general, sin embargo, tal valor es finito y tiene un efecto en la variación de corriente que se mide en la carga cuando esta se conecta:

$$\frac{\Delta V_0}{\Delta I_0} = R_0$$

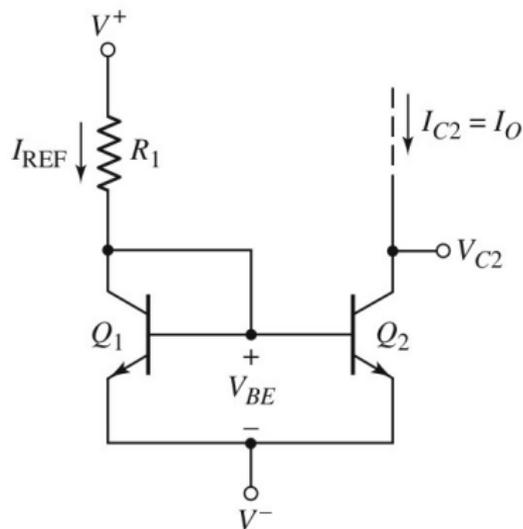
o equivalentemente

$$\Delta I_0 = \frac{1}{R_0} \Delta V_0. \quad (1)$$

## Circuito Espejo de Corriente I



(a)



(b)

$$R_1 = \frac{V^+ - V^- - V_{BE}}{I_{REF}}$$

## Circuito Espejo de Corriente II

Si ambos transistores son iguales y como  $V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BE}$  tenemos

$$\begin{aligned} I_{C1} &= I_{S1} \exp\left(\frac{V_{BE1}}{V_T}\right) = I_S \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \\ &= I_{S2} \exp\left(\frac{V_{BE2}}{V_T}\right) = I_{C2} \end{aligned}$$

Si  $Q_2$  está en el modo activo, entonces

$$I_{B1} = I_{B2}.$$

Por lo tanto

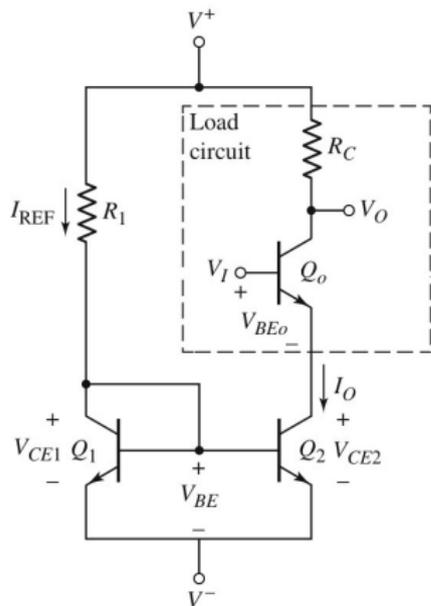
$$\begin{aligned} I_{REF} &= I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} \\ &= I_{C1} + 2I_{B1} \\ &= I_{C1} \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \\ &= I_{C2} \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \end{aligned}$$

## Circuito Espejo de Corriente III

Pero  $I_{C2} = I_0$ . Finalmente

$$I_0 = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta}}. \quad (2)$$

Qué pasa si conectamos una carga a la fuente?



- ▶ La carga afecta la operación de  $Q_2$ .
- ▶ Si  $R_0$  es pequeño  $Q_2$  podría eventualmente saturarse.
- ▶ En general se tienen las siguientes relaciones

$$I_{C1} = I_S \exp\left(\frac{V_{BE1}}{V_T}\right) \left(1 + \frac{V_{CE1}}{V_A}\right)$$

$$I_{C2} = I_S \exp\left(\frac{V_{BE2}}{V_T}\right) \left(1 + \frac{V_{CE2}}{V_A}\right)$$

## Circuito Espejo de Corriente IV

Por lo tanto

$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \exp\left(\frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{V_T}\right) \frac{1 + V_{CE1}/V_A}{1 + V_{CE2}/V_A}$$

Pero  $V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BE}$  y  $V_{CE1} = V_{CE2}$  tenemos

$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{1 + V_{BE}/V_A}{1 + V_{CE2}/V_A}$$

Además tenemos

$$I_{REF} = I_{C1} \left(1 + \frac{2}{\beta}\right)$$

$$I_{C2} = I_0$$

$$\Rightarrow I_0 = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta}} \times \frac{1}{1 + V_{BE}/V_A} \times \left(1 + \frac{V_{CE2}}{V_A}\right)$$

## Circuito Espejo de Corriente V

Notemos que el voltaje  $V_{CE2}$  depende del voltaje de entrada aplicado al transistor de carga,  $V_I$ . La relación entre ellos se deriva haciendo LK en el loop externo:

$$V_I = V_{BE0} + V_{CE2} + V^-$$

esto es

$$V_{CE2} = V_I - V_{BE0} - V^-$$

Por lo tanto el cambio del voltaje tendrá un efecto en  $V_{CE2}$ . En efecto

$$\Delta V_{CE2} = \Delta V_I$$

Cabe preguntarse entonces, cuál es la magnitud del cambio diferencia del  $I_0$  con respecto a  $V_{CE2}$ ?

$$\frac{dI_0}{dV_{CE2}} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta}} \times \frac{1}{1 + V_{BE}/V_A} \times \frac{1}{V_A}$$

## Circuito Espejo de Corriente VI

$$\frac{dI_0}{dV_{CE2}} = \frac{1}{r_{02}} \times \frac{1}{1 + V_{BE}/V_A}$$

Si  $V_{BE} \ll V_A$ , entonces

$$\frac{dI_0}{dV_{CE2}} \cong \frac{1}{r_{02}}.$$

La resistencia de salida de la fuente (mirando hacia el colector de  $Q_2$  corresponde a la resistencia dinámica del transistor, esto es,  $r_{02}$ ).

Este cálculo también puede realizarse utilizando el modelo equivalente de señal pequeña (en el modo activo) de ambos transistores.

Se tiene entonces lo siguiente:

$$V_x = (I_x - g_{m2}V_{\pi 2})r_{02}$$

En la entrada  $V_{\pi 1} = V_{\pi 2}$ . Por lo tanto

$$g_{m1}V_{\pi 1} + \frac{V_{\pi 1}}{R_1 \parallel r_{01}} + \frac{V_{\pi 1}}{r_{\pi 1} \parallel r_{\pi 2}} = 0$$
$$\Rightarrow V_{\pi 1} = 0.$$

Por lo tanto,

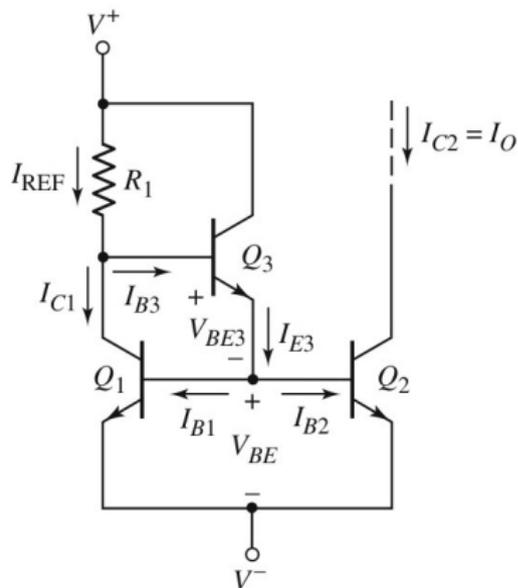
$$V_x = I_x r_{02}$$

y finalmente  $R_0 = r_{02}$ .

## Circuitos Fuente de Corriente Mejorados I

Objetivo: Mejorar la estabilidad de la fuente con respecto a variaciones de  $\beta$  y  $V_o$ .

### Fuente con Tres Transistores



El transistor  $Q_3$  provee de corriente a las bases  $Q_1$  y  $Q_2$ . Se tiene

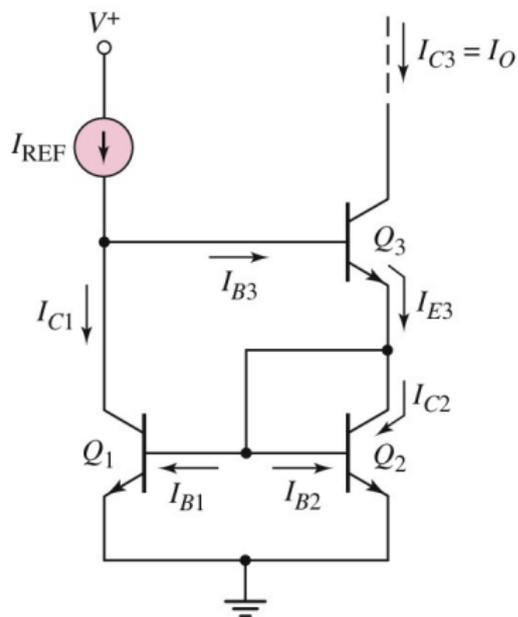
$$I_O = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta(1+\beta_3)}}$$

y

$$R_1 = \frac{V^+ - 2V_{BE} - V^-}{I_{REF}}.$$

La resistencia de salida es  $R_0 \cong r_{o2}$ .

## Fuente Wilson

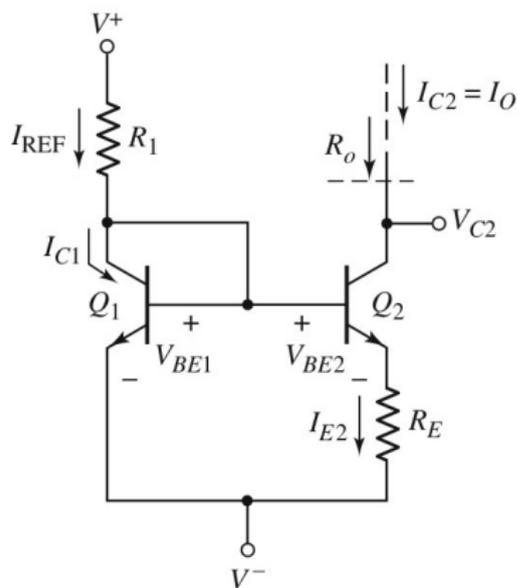


y

$$I_0 = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta(2+\beta)}}$$

$$R_0 \cong \frac{\beta}{2} r_{03}.$$

## Fuente Widlar



y

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

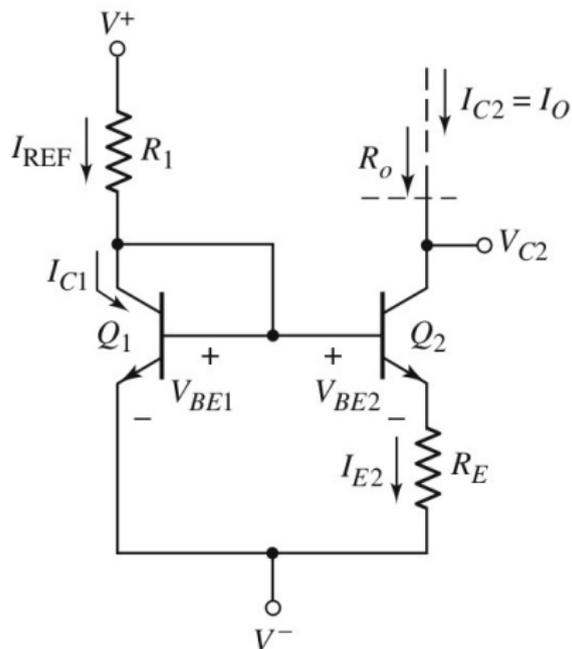
$$R_0 \cong (1 + g_{m2} R_E \parallel r_{\pi 2}) r_{o2}.$$

- ▶ 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

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

- ▶ 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 I



Si  $\beta \gg 1$  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

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

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

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

Por otro lado,

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

Finalmente obtenemos

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

### Ejemplo

Diseño de una fuente Widlar para los siguientes requerimientos:

$$I_{REF} = 1\text{mA}, I_0 = 12\mu\text{A}, V^+ = -V^- = 5\text{V}, V_{BE1} = 0,7\text{V}.$$

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

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