

EL42A - Circuitos Electrónicos

Clase No. 23: Respuesta en Frecuencia de Circuitos Amplificadores (4)

Patricio Parada

pparada@ing.uchile.cl

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

29 de Octubre de 2009

Circuitos Amplificadores en Frecuencia

- Circuitos de Emisor y Fuente Común

- Circuitos Base Común y Compuerta Común

- Circuitos Seguidores de Emisor y de Fuente

- Cascodo

- ▶ Tal como ha sido la tónica de este capítulo, el objetivo que uno busca alcanzar al analizar la respuesta en frecuencia de un circuito amplificador es determinar las frecuencias de corte que separan el comportamiento de baja, media y alta frecuencia que son típicas en este tipo de circuitos.
- ▶ Por ello, uno separa los efectos de cada uno de los condensadores y determina sólo la frecuencia de corte asociada a ese condensador.
- ▶ P: Qué hacer cuando hay múltiples condensadores?
- ▶ R1: Determinar si alguno de ellos es dominante, es decir, si su valor es mucho mayor (o mucho menor) que las otras frecuencias de corte inferior (o superior) y, de ser así, seleccionarlo como la frecuencia de corte inferior (o superior) del amplificador.

- R2: Si las frecuencias de corte que uno obtiene son comparables (por ejemplo, $f_{L1} = 2$ Hz, $f_{L2} = 3$ Hz y $f_{L3} = 5$ Hz, entonces la frecuencia de corte inferior real es

$$f_L(\text{dom}) = \frac{f_L}{\sqrt{2^{1/n} - 1}} \quad (1)$$

y

$$f_S(\text{dom}) = f_S \sqrt{2^{1/n} - 1} \quad (2)$$

donde n es el número de polos que son del mismo orden.

- El factor $\sqrt{2^{1/n} - 1}$ se obtiene considerando que la función de transferencia tiene la forma

$$T(\omega) = \frac{1}{(1 + j\omega\tau)^n} \quad (3)$$

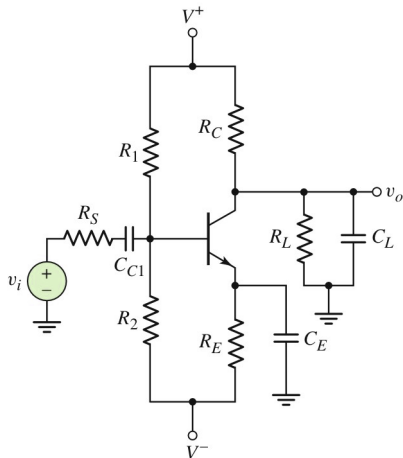
- ▶ La frecuencia de corte se obtiene cuando la función de transferencia decae un factor $1/\sqrt{2}$ con respecto a su valor máximo (para la frecuencia de corte superior).
- ▶ Luego

$$|T(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{(1 + (\omega\tau)^2)^n}}$$
$$\omega = \frac{1}{\tau} \sqrt{2^{1/n} - 1}$$

- ▶ En lo que sigue vamos a calcular las frecuencias de corte superior de distintos configuraciones de amplificación.

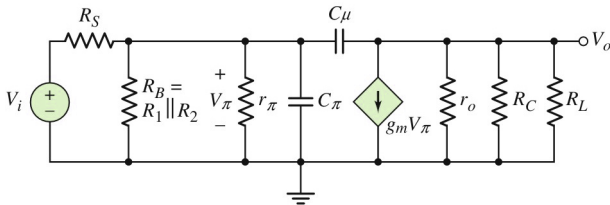
Circuitos de Emisor y Fuente Común I

- Consideremos el circuito de emisor común de la figura

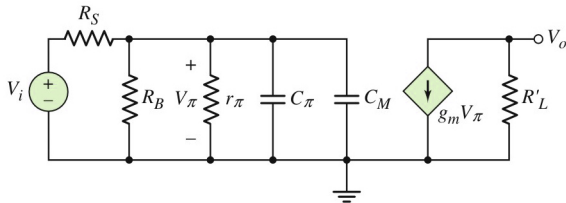


Circuitos de Emisor y Fuente Común II

- ▶ La respuesta para baja frecuencia puede determinarse siguiendo los procedimientos de la primera sección de este capítulo (Clase No. 20).
- ▶ El circuito equivalente para alta frecuencia es



- ▶ Definimos $R'_L = r_o \parallel R_C \parallel R_L$ y aplicaremos el teorema de Miller para obtener el siguiente circuito equivalente simplificado:



Circuitos de Emisor y Fuente Común III

- La capacitancia de Miller es

$$C_M = (1 + g_m R'_L) \quad (4)$$

y la resistencia de salida del amplificador es

$$R_o = r_o \parallel R_C \parallel R_L. \quad (5)$$

- La frecuencia de corte superior del circuito (-3dB) se puede obtener determinando la expresión de la ganancia de voltaje.
- Notamos que

$$V_\pi = \frac{R_B \parallel r_\pi \parallel \frac{1}{j\omega(C_\pi + C_M)}}{R_S + R_B \parallel r_\pi \parallel \frac{1}{j\omega(C_\pi + C_M)}} V_i$$
$$V_o = -g_m V_\pi R'_L.$$

- Reemplazando obtenemos

$$\frac{V_o}{V_s} = -g_m R'_L \frac{R_B \parallel r_\pi \parallel \frac{1}{j\omega(C_\pi + C_M)}}{R_S + R_B \parallel r_\pi \parallel \frac{1}{j\omega(C_\pi + C_M)}} V_i$$

- Reordenando términos obtenemos

$$A_v = \underbrace{-g_m R'_L \frac{R_B \parallel r_\pi}{R_S + R_B \parallel r_\pi}}_{A_{MB}} \frac{1}{1 + j\omega \frac{R_S(R_B \parallel r_\pi)}{R_S + R_B \parallel r_\pi} (C_\pi + C_M)}. \quad (6)$$

- La constante de tiempo del circuito es

$$\tau_H = (R_S \parallel R_B \parallel r_\pi)(C_\pi + C_M) \quad (7)$$

- Notamos que la frecuencia de corte es

$$f_H = \frac{1}{2\pi(R_S \parallel R_B \parallel r_\pi)(C_\pi + C_M)} \quad (8)$$

- La capacitancia de Miller para este circuito amplificador es

$$C_M = (1 + g_m r_o \parallel R_C \parallel R_L)C_\mu$$

por lo que la frecuencia de corte del circuito se ve fuertemente reducida por este efecto.

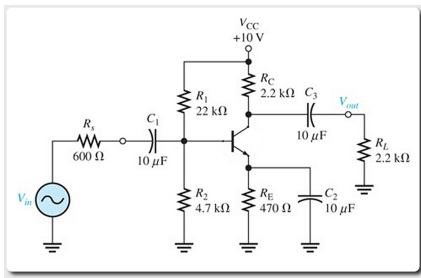
Ejemplo I

Análisis de alta frecuencia para un Amp. Emisor Común

Considere el circuito amplificador de señal en la configuración emisor común de la figura.

- Determine la ganancia de banda media del circuito.
- Determine la frecuencia de corte superior del circuito.

Asuma que $\beta_{DC} = 125$, $C_{\pi} = 20 \text{ pF}$ y $C_{\mu} = 2,4 \text{ pF}$, $V_{BE}(\text{on}) = 0,7 \text{ V}$.



Análisis DC

► Tenemos que

$$V_{BQ} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{4,7}{22 + 4,7} \times 10 = 1,76 \text{ V.}$$

$$V_{EQ} = V_B - V_{BE(\text{on})} = 1,06 \text{ V.}$$

$$I_{EQ} = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1,06}{470} = 2,26 \text{ mA.}$$

$$I_{CQ} = \frac{\beta_{DC}}{\beta_{DC} + 1} I_{EQ} = \frac{125}{126} \times 2,26 \text{ mA} = 2,24 \text{ mA.}$$

$$r_\pi = \frac{\beta_{DC} V_T}{I_{CQ}} = \frac{125 \times 25 \text{ mV}}{2,24 \text{ mA}} = 1,4 \text{ k}\Omega$$

$$g_m = \frac{I_{CQ}}{V_T} = \frac{2,24 \text{ mA}}{0,025 \text{ V}} = 89,6 \text{ mA/V.}$$

Análisis AC de Banda Media

- ▶ La ganancia de banda media del circuito se determinar cortocircuitando las capacitancias externas y abriendo las capacitancias internas.
- ▶ Luego,

$$A_{MB} = -g_m(R_C \parallel R_L) \frac{R_1 \parallel R_2 \parallel r_\pi}{R_S + R_1 \parallel R_2 \parallel r_\pi}$$

- ▶ Para determinar la capacitancia de Miller es necesario considerar la ganancia entre la base del terminal y el colector. Luego

$$A_{vo} = -g_m R_C \parallel R_L = -98,5 \text{ V/V.}$$

Análisis AC de Baja Frecuencia

- ▶ El circuito tiene 3 polos: uno asociado a C_1 , otro a C_2 y otro a C_3 .
- ▶ El polo asociado a C_1 tiene constante de tiempo igual a

$$\tau_1 = (R_i + R_S)C_1,$$

donde $R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel (r_\pi + (1 + \beta)R_E)$.

- ▶ Luego,

$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi(R_i + R_S)C_1} = \frac{1}{2\pi(600 + 3640)10^{-5}} = 3,8 \text{ Hz.}$$

- ▶ El polo asociado a C_2 tiene constante de tiempo igual a

$$\tau_2 = \frac{R_E(R_S + r_\pi)}{R_S + r_\pi + (1 + \beta)R_E}C_2$$

Ejemplo V

Análisis AC de Baja Frecuencia

- La frecuencia de corte asociada al condensador de bypass, C_2 es

$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi \frac{R_E(R_S + r_\pi)C_2}{R_S + r_\pi + (1 + \beta)R_E}} = 1,04 \text{ kHz.}$$

- El polo asociado a C_3 tiene constante de tiempo igual a

$$\tau_3 = (R_o + R_S)C_3,$$

$$\text{donde } R_o = R_E \parallel \frac{r_\pi + R_E \parallel R_1 \parallel R_2}{1 + \beta}.$$

- Luego, la frecuencia de corte asociada a C_3 es

$$f_{L3} = \frac{1}{2\pi(R_o + R_L)C_3} = 7,1 \text{ Hz.}$$

- En consecuencia, C_2 ejerce un efecto dominante sobre los otros dos condensadores, y la frecuencia de corte inferior del amplificador es

$$f_L = 1,04 \text{ kHz.} \quad (9)$$

Análisis AC de Alta Frecuencia

- ▶ La capacitancia de Miller es

$$C_M = (1 + |A_{vo}|)C_\mu = 238 \text{ pF.}$$

- ▶ La resistencia de entrada del circuito es

$$R_1 \parallel R_2 \parallel R_S \parallel r_\pi = 378 \Omega.$$

- ▶ La constante de tiempo del circuito es

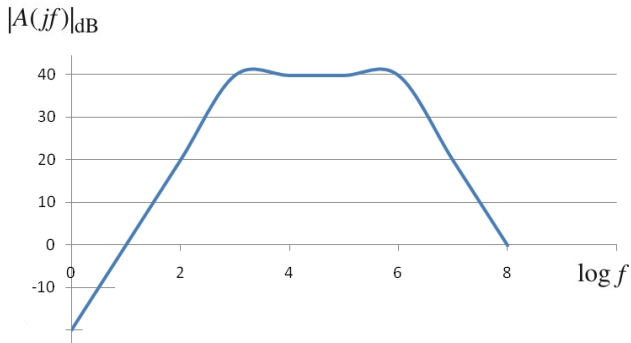
$$\tau_H = 0,62 \mu\text{s}$$

y la frecuencia de corte (3dB) es

$$f_H = \frac{1}{\tau_H} = 1,625 \text{ MHz.}$$

Ejemplo VII

- La respuesta aproximada del circuito, es la siguiente

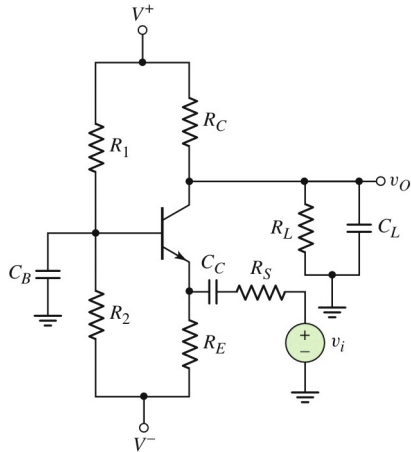


- ▶ El procedimiento para determinar las frecuencias de corte puede seguir una de dos rutas posibles:
 - ▶ Si el circuito no es demasiado complejo, determinarlo directamente a partir de la función de transferencia del circuito.
 - ▶ Si esto no resulta posible, reducir porciones separadas del amplificador a circuitos RC; luego
 - ▶ Encontrar una forma aproximada de la función de transferencia en términos de las constantes RC de cada subcircuito y determinar las frecuencias de corte del circuito completo.
- ▶ En el caso de obtener varias frecuencias de corte muy cercanas, se puede aplicar el factor $\sqrt{2^{1/n} - 1}$ para corregir el resultado obtenido.

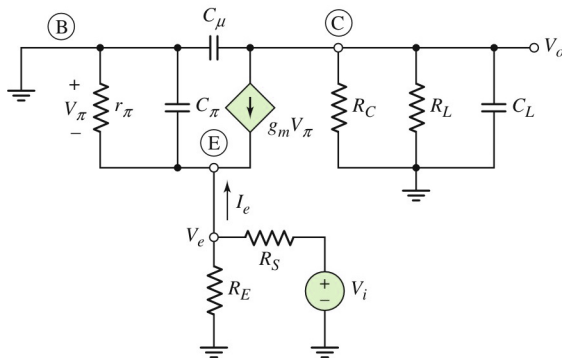
- ▶ Estas configuraciones tienen la propiedad de mitigar en forma casi absoluta el efecto Miller que aparece en cualquier circuito de fuente o emisor común.
- ▶ Es por ello que la configuración cascode (EM+BC) resulta tan atractiva: mantiene la ganancia de voltaje y aumenta su ancho de banda respecto de la situación sin la segunda etapa.

Circuitos Base Común y Compuerta Común II

- Consideremos el circuito



- El circuito equivalente para alta frecuencia es



- Escribimos LCK en (E):

$$I_e + g_m V_\pi + \frac{V_\pi}{1/j\omega C_\pi} + \frac{V_\pi}{r_\pi} = 0. \quad (10)$$

- Notamos que $V_\pi = -V_e$, por lo tanto,

$$\frac{I_e}{V_e} = \frac{1}{Z_{in}} = \frac{1}{r_\pi} + g_m + j\omega C_\pi.$$

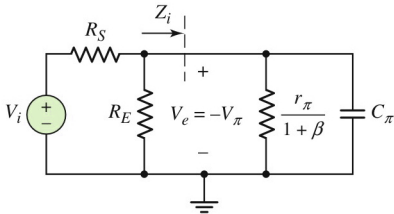
- Ordenando términos tenemos

$$\frac{1}{Z_{in}} = \frac{1}{r_e} + j\omega C_\pi. \quad (11)$$

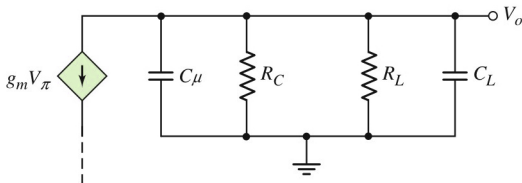
- El circuito visto desde la salida es bastante simple. En particular, como B está conectado a tierra, no hay realimentación por C_μ , lo que elimina el efecto Miller.

Circuitos Base Común y Compuerta Común V

- El circuito visto desde la entrada (a) y la salida (b) es



(a)



(b)

- La impedancia de salida es

$$Z_{\text{out}} = R_C \parallel \frac{1}{j\omega C_\mu}. \quad (12)$$

- Tenemos una constante de tiempo asociada a cada condensador:

$$\tau_\pi = (r_e \parallel R_E \parallel R_S)C_\pi \Rightarrow f_{H_\pi} = \frac{1}{2\pi(r_e \parallel R_E \parallel R_S)C_\pi}$$
$$\tau_\mu = (R_C \parallel R_L)(C_\mu + C_L) \Rightarrow f_{H_\mu} = \frac{1}{2\pi(R_C \parallel R_L)(C_\mu + C_L)}$$

- Usualmente $C_\mu \ll C_\pi$, por lo que esperamos que $f_{H_\pi} \ll f_{H_\mu}$, y por lo tanto, la frecuencia de corte del circuito puede ser aproximada por

$$f_{3 \text{ dB}} = \frac{1}{2\pi(r_e \parallel R_E \parallel R_S)C_\pi}. \quad (13)$$

- ▶ Sin embargo, el valor de r_e puede ser tal que haga que f_{H_π} sea mucho mayor que f_{H_μ} .
- ▶ Consideremos el circuito de base común antes referido, con los siguientes valores:

$$R_E = 470 \, \Omega$$

$$R_S = 600 \, \Omega$$

$$C_\mu = 2,4 \, \text{pF}$$

$$C_\pi = 20 \, \text{pF}$$

$$r_\pi = 1,1 \text{k}\Omega$$

$$\beta_{DC} = 125.$$

- Reemplazando los valores en la expresión para las frecuencias de corte tenemos

$$f_{H_{\mu}} = 60 \text{ MHz}$$

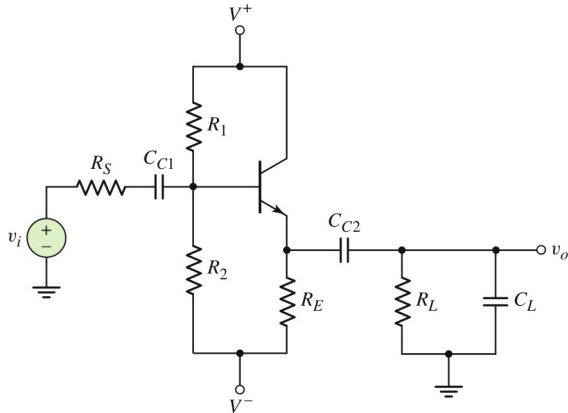
$$f_{H_{\pi}} = 750 \text{ MHz.}$$

- Por lo tanto, la frecuencia de corte superior del circuito es 60 MHz.
- En general, vamos a tener que

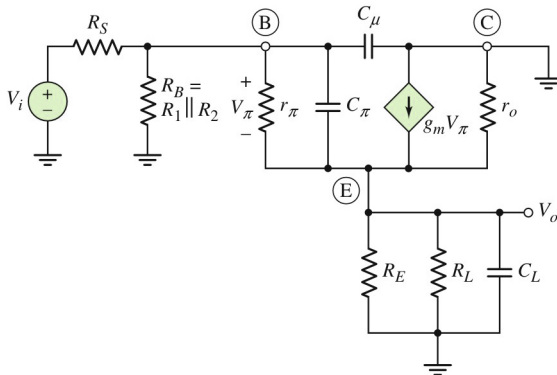
$$f_H = \min(f_{H_{\mu}}, f_{H_{\pi}}). \quad (14)$$

Circuitos Seguidores de Emisor y de Fuente I

- Consideremos el circuito

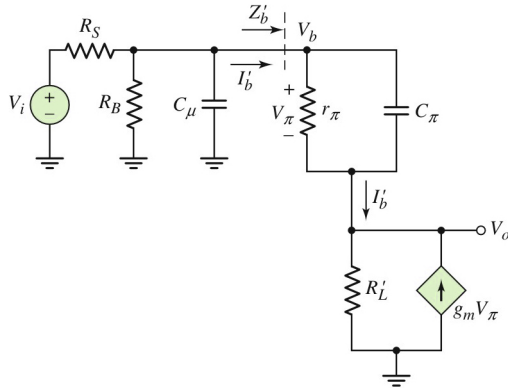


- El circuito equivalente para alta frecuencia es



Circuitos Seguidores de Emisor y de Fuente III

- Notamos del esquemático que C_μ está conectado a tierra (por medio del colector). Luego podemos reordenar el circuito para facilitar el análisis.



- ▶ donde hemos despreciado el efecto de C_L (por ser habitualmente no dominante) y

$$R'_L = r_o \parallel R_E \parallel R_L.$$

- ▶ Luego, tenemos

$$V_o = R'_L(I'_b + g_m V_\pi).$$

- ▶ Además,

$$Z'_b = \frac{V_b}{I'_b} = \frac{1}{r_\pi \parallel 1/jC_\pi} (1 + g_m R'_L) + R'_L$$

- ▶ Este circuito tiene un cero y dos polos.
- ▶ El cero ocurre cuando

$$f_o = \frac{1}{2\pi C_\pi r_e}. \quad (15)$$

- Podemos encontrar el polo dominante al despreciar R'_L comparado con $r_\pi(1 + g_m R'_L)$.
- Obtenemos la constante de tiempo

$$\tau = (R_S \parallel R_B \parallel (1 + g_m R'_L)r_\pi) \left(C_\mu + \frac{C_\pi}{1 + g_m R'_L} \right) \quad (16)$$

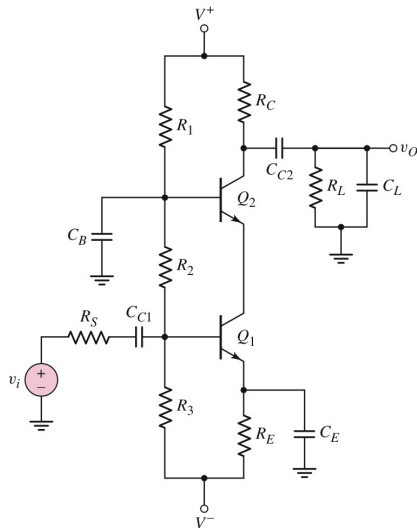
y la frecuencia de corte

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (17)$$

- ▶ Consideremos nuevamente el circuito cascodo.
- ▶ El circuito cascodo se construye conectando en serie un amplificador de emisor común con uno de base común.
- ▶ Éste fue considerado sólo en banda media, y vimos que la ganancia total de voltaje del circuito era muy similar a la de la primera etapa.
- ▶ Ahora vamos a considerar las características en alta frecuencia del circuito.
- ▶ En particular, vamos a mostrar que el ancho de banda aumenta considerablemente con respecto a la de emisor común, lo cual lo hace una configuración de amplificación bastante atractiva.

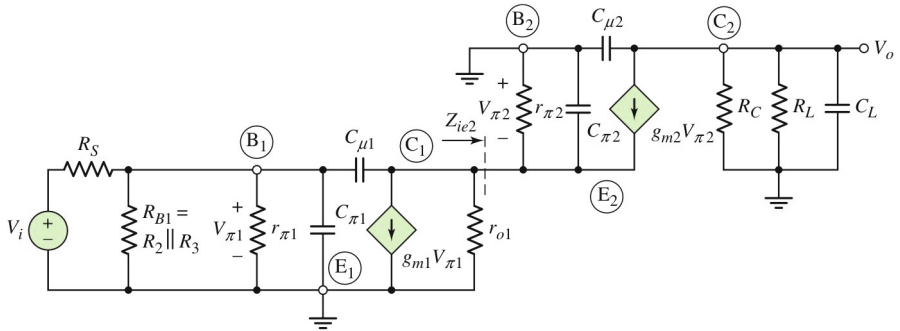
Circuito Amplificador Cascodo II

- Consideremos el circuito



Circuito Amplificador Cascodo II

- El circuito equivalente para alta frecuencia es



- Podemos notar inmediatamente que la impedancia que ve la primera etapa del circuito es Z_{ie2} es igual a

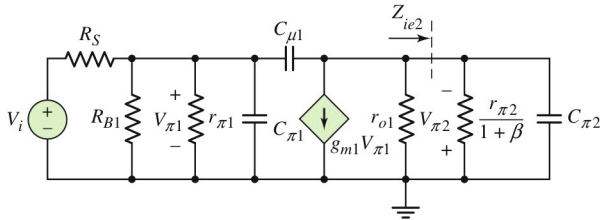
$$Z_{ie2} = r_{\pi 2} \parallel \frac{1}{g_{m2}} \parallel \frac{1}{j\omega C_{\pi 2}}.$$

Circuito Amplificador Cascodo III

- Este hecho lo acabamos de derivar al calcular la impedancia de entrada de un amplificador de base común. Es decir,

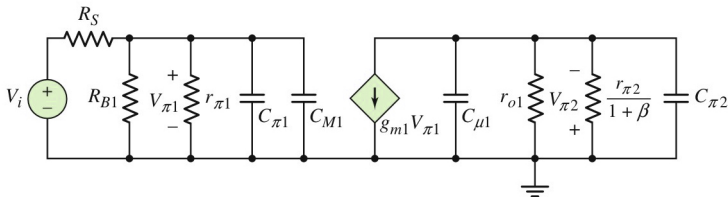
$$Z_{ie2} = r_{e2} \parallel \frac{1}{j\omega C_{\pi2}}. \quad (18)$$

- Podemos simplificar entonces el circuito para obtener lo siguiente



Circuito Amplificador Cascodo IV

- Si aplicamos el teorema de Miller a la entrada obtenemos



- La capacitancia de Miller es la siguiente:

$$C_{M1} = C_{\mu 1} \left[1 + g_{m1} \frac{r_{\pi 2}}{1 + \beta} \right] \quad (19)$$

- Si Q_1 y Q_2 y dado que están polarizados con casi la misma corriente, se tiene que

$$r_{\pi 1} \approx r_{\pi 2} \quad g_{m1} \approx g_{m2}$$

- Luego, dado que

$$g_{m1}r_{\pi2} = \beta$$

tenemos que

$$C_{M1} \approx 2C_{\mu1}.$$

lo cual evidencia una atenuación evidente del efecto Miller.

- La constante de tiempo asociada a $C_{\pi2}$ es

$$\tau_{\pi2} = r_{e2}C_{\pi2}.$$

- Dado que $r_e = \frac{r_{\pi}}{1 + \beta}$, este valor es pequeño, lo que hace que la frecuencia de corte sea del orden de $1/C_{\pi2}$, un valor del orden de 10^{12} Hz.

Circuito Amplificador Cascodo VI

- ▶ Por ello, vamos a despreciar los efectos de $C_{\mu1}$ y $C_{\pi2}$, y considerar sólo el efecto de $C_{\pi1} + C_{M1}$ y $C_{\mu2}$.
- ▶ La constante de tiempo del circuito asociada a $C_{\pi1} + C_{M1}$ es

$$\tau_{\pi} = (R_S \parallel R_{B1} \parallel r_{\pi1})(C_{\pi1} + C_{M1})$$

- ▶ La constante de tiempo asociada a $C_{\mu2}$ es

$$\tau_{\mu} = (R_C \parallel R_L)C_{\mu2}$$

- ▶ La frecuencia de corte superior del cascodo corresponde al mínimo de las frecuencias de corte f_{π} y f_{μ} .

- ▶ La ganancia de banda media del circuito se obtiene analizando el circuito que se obtiene al
 - ▶ Abrir todos los condensadores internos,
 - ▶ Cortocircuitar todos los condensadores externos.
- ▶ Este cálculo ya lo habíamos realizado, y el valor de la ganancia de voltaje obtenido es

$$A_{MB} = -g_{m2}(R_C \parallel R_L) \frac{R_{B1} \parallel r_{\pi1}}{R_{B1} \parallel r_{\pi1} + R_S} \quad (20)$$