

Electrónica Fundamental

Práctico 6

Transistores - Segunda Parte

Los ejercicios marcados con ★ son opcionales. Además cada ejercicio puede tener un número, que indica el número de ejercicio del libro del curso (*Microelectronic Circuits, 7th. edition. Sedra/Smith.*) o una fecha, que indica en que prueba se planteó el ejercicio.

Objetivo: El objetivo general del presente práctico es familiarizar al estudiante con la operación del transistor MOS como amplificador. En particular se utilizará el análisis de circuitos MOS en pequeña señal y las distintas configuraciones básicas en las que el transistor MOS opera como amplificador. Además en la parte final del práctico se presentan ejercicios para entender el funcionamiento del transistor bipolar en continua y sus diferencias con la operación del transistor MOS.

En todos los ejercicios, a menos que se establezca lo contrario, asuma que:

- $\mu_n C_{ox} = 200 \mu A/V^2$, $\mu_p C_{ox} = 100 \mu A/V^2$
- $V_{t0n} = |V_{t0p}| = 0.6V$
- $V_{An} = V_{Ap} = \infty$
- $\delta_n = \delta_p = 0$

Ejercicio 1

En la etapa Source-Común de la Figura 1 el transistor M1 tiene $W/L = 30/0.5$ y V_A se puede considerar infinito.

- Calcule la tensión de gate para que la corriente de drain $I_D = 0.5mA$ (Verifique que M1 opera en saturación).
- Calcule la ganancia v_o/v_i del circuito.
- Con la tensión de gate calculada, ¿cuánto se puede aumentar W/L sin que M1 salga de saturación? ¿Cuál es la máxima ganancia en tensión que puede lograrse mientras se aumenta W/L ?

Ejercicio 2

Se quiere obtener una ganancia $|v_o/v_i| = 15V/V$ en la etapa Source-Común de la Figura 2 utilizando una corriente de polarización de $0.5mA$ y considerando $\delta = 0.3$.

- Teniendo en cuenta que $V_{A1} = 8V$ y $V_{A2} = 20V$, determine el $(W/L)_2$ necesario.

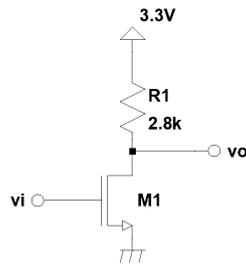


Figura 1

- (b) Si $(W/L)_1 = 20/0.35$, ¿cuál es la tensión V_B necesaria?
- (c) Si el ancho y el largo de ambos transistores se duplica, ¿cómo cambia la ganancia? Y si además ahora V_B aumenta de forma tal que la corriente de polarización se duplica, ¿cómo cambia la ganancia?

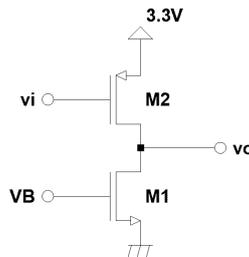


Figura 2

Ejercicio 3

El circuito de la Figura 3 es una etapa Source-Común con resistencia de degeneración de Source. Como el transistor no tiene el source conectado al sustrato (considere $\delta = 0.2$) podemos analizar también el funcionamiento en este mismo circuito de un “seguidor de fuente” (Source-Follower), viendo el efecto en la ganancia de la señal source-sustrato a través de g_{ms} . Note que la polarización queda determinada por la tensión DC en el gate del transistor.

- (a) Determine una expresión para la tensión de gate necesaria, en función de la corriente I_D y los parámetros del problema.
- (b) Determine la expresión para las ganancias v_d/v_i y v_s/v_i en función de los parámetros de pequeña señal del transistor y los parámetros del problema.
- (c) Si $R_S = 200\Omega$ y $R_D = 1k\Omega$ y el transistor tiene un $W/L = 30$ ¿cuál debe ser la corriente I_D necesaria para obtener una ganancia $|v_d/v_i| = 2V/V$?
- (d) ¿Cuál es la tensión de gate necesaria para esa corriente? ¿Cuánto vale v_s/v_i ?
- (e) ¿Cuál es la excursión a la salida v_d ?

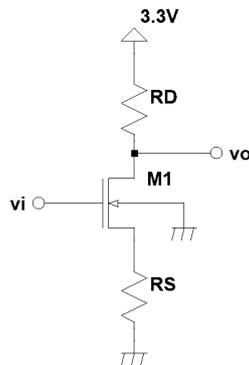


Figura 3

Ejercicio 4 (8.70)

El objetivo de este problema es introducir a los estudiantes a la configuración cascode. Esta configuración se utiliza para aumentar la resistencia de salida, la que en muchos casos aumenta la ganancia, además de aportar otros beneficios (ej.: mejora la respuesta en alta frecuencia). Este configuración se compone de dos transistores: el transistor de entrada (MA) en configuración source común, en serie con un transistor en gate común (MB, con V_{BIAS} constante).

En este ejercicio, vamos a mostrar las ventajas de la configuración cascode frente a utilizar un solo transistor más largo. Considere que, excepto en las diferencias en el largo que se indican, los transistores del problema son idénticos: W , V_{t0} , δ y tensión de Early relativa al largo del transistor V'_A ($V/\mu m$).

- (a) El transistor de la Figura 4.2 es un amplificador Source-Común donde el largo L se multiplicó por 4 con respecto al amplificador original de la Figura 4.1. Muestre que V_{Dsat} es el doble, g_m es la mitad y la ganancia v_o/v_i es el doble que en el circuito original.
- (b) Compare ahora esos resultados con el circuito cascode de la Figura 4.3 que opera con la misma corriente de polarización. Para calcular la ganancia vamos a hacer un equivalente Norton del circuito:
 - i. Mostrar que la transconductancia de cortocircuito (g_m)¹ de el amplificador cascode es igual a el g_m del transistor MA y por lo tanto es la misma que la del amplificador de la Figura 4.1.
 - ii. Calcular la resistencia de salida R_{out} del circuito. ¿Qué condición se debe cumplir para que la misma sea mucho mayor que la del amplificador de la Figura 4.1?
 - iii. Calcule la ganancia. ¿Cómo se compara con la del amplificador de la Figura 4.1?
- (c) Determine V_{BIAS} para que la tensión mínima de operación a la salida, manteniendo a MA y a MB en saturación, sea igual al V_{Dsat} del amplificador de la Figura 4.2

¹La transconductancia de cortocircuito es la relación entre la corriente de salida y el voltaje de entrada cuando el voltaje de salida está conectado a tierra.

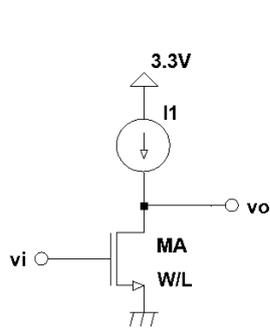


Figura 4.1

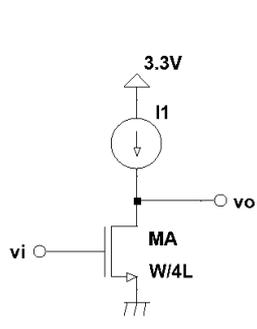


Figura 4.2

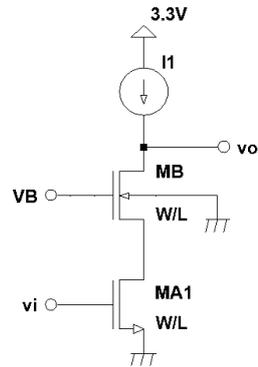


Figura 4.3

Ejercicio 5 (7.31)

En el circuito de la Figura 5 la fuente de corriente entrega $I_1 = 0.5mA$ y el transistor M1 tiene los siguientes datos: $V_{t0} = 0.5V$, $\beta = 4mA/V^2$ y $V_A = 50V$

- Calcule el punto de operación del transistor y la excursión máxima a la salida.
- ¿Cuánto vale la corriente continua por R_G ? ¿y la corriente en señal? ¿Cuál es la función de R_G ? ¿Qué da si $R_G = 0$? ¿Y si $R_G = \infty$?
- Calcule la ganancia v_o/v_i del circuito.

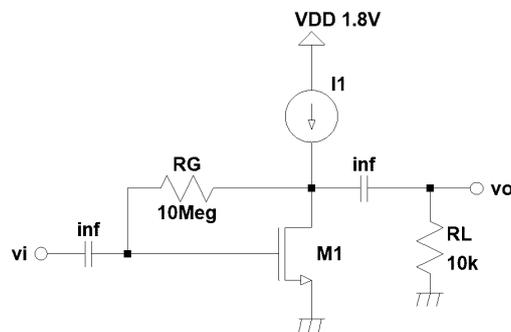


Figura 5

Ejercicio 6

En el circuito de la Figura 6 la corriente de polarización del transistor M1 está definida por la fuente de corriente I_1 independientemente de los valores de R_1 y R_2 (¿por qué?). Suponga que $I_1 = 1mA$, $R_D = 500\Omega$, $C_1 = C_2 = 1\mu F$ y $V_A = \infty$.

- Calcule el (W/L) del transistor para que la ganancia en banda pasante sea $5V/V$

- (b) Diseñe $R1$ y $R2$ para que la excursión a la salida sea $\pm 300mV$, pero sin que la corriente por $R1$ supere $0.1mA$.
- (c) Determine la frecuencia de corte inferior del circuito.

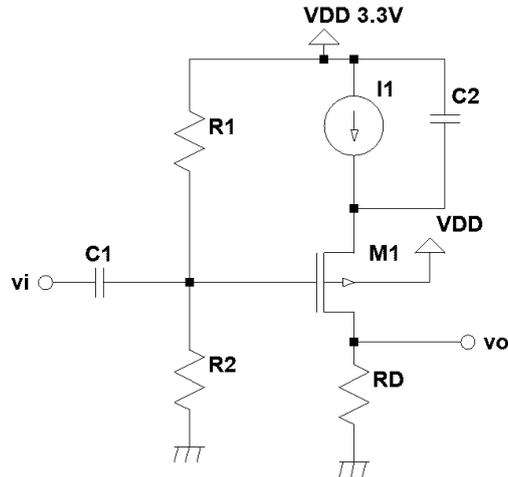


Figura 6

Ejercicio 7

El objetivo de este problema es introducir a los estudiantes al par diferencial, uno de las configuraciones más importantes luego de las etapas básicas vistas en el curso. El circuito de la Figura 7 es una de las posibles implementaciones del mismo.

Lo usual en estos circuitos, a menos que se establezca lo contrario, es considerar que los transistores son idénticos y que las tensiones DC en los gates son iguales y tales que los transistores operan en saturación.

- (a) Determine las corrientes de polarización I_D en cada transistor. ¿Cuál es la relación entre los g_m de los transistores?
- (b) Si la amplitud de señal en $v_1 = v_i$ y en $v_2 = 0$, determine la amplitud de señal en el nodo X y la ganancia v_o/v_i .
- (c) Si ahora tanto v_1 como v_2 tienen la misma amplitud de señal $v_i/2$, pero ambas señales están en contra-fase, ¿cuál es la amplitud de señal en el nodo X y la ganancia v_o/v_i ?

Ejercicio 8

El circuito de la Figura 8 es un amplificador de 3 etapas cuya polarización se fija a través de una realimentación en continua.

Adicionalmente en la parte (c) se analiza como cambia la resistencia de entrada del circuito si está realimentación también actúa en AC.

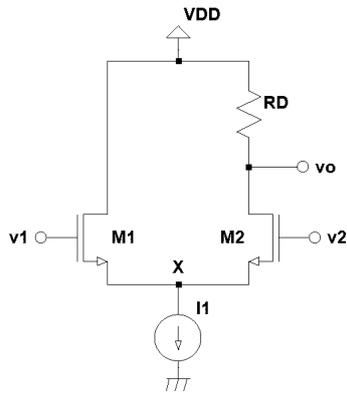


Figura 7

Los transistores de este amplificador cumplen que $\beta_{M1i} = 4\beta_{M2i} = 1\mu A/V^2$ y $V_{t0} = 2V$. Además, para las dos primeras partes del ejercicio las capacidades se consideran infinitas. Calcular:

- la tensión DC de la salida
- la ganancia $\frac{v_{out}}{v_{in}}$
- la resistencia de entrada. Si la capacidad $C_2 = 0$, ¿cuál es la nueva resistencia de entrada? ¿De qué forma mejora el circuito C_2 ?

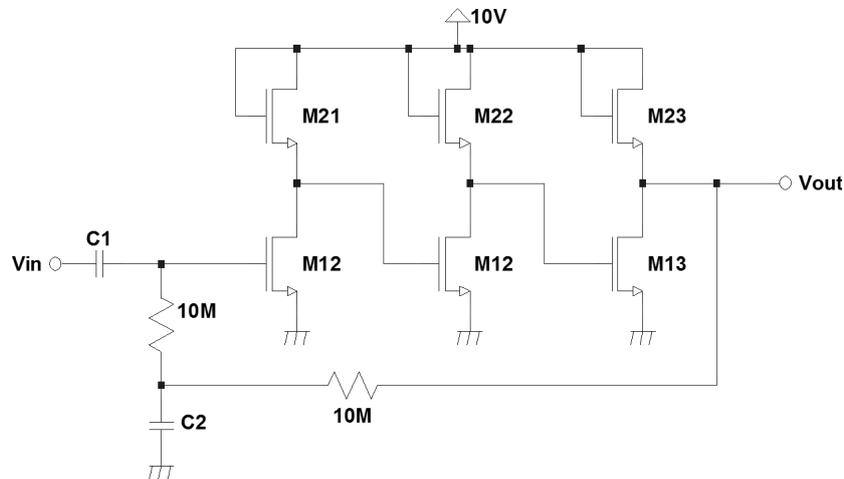


Figura 8

Ejercicio 9

Para los circuitos de la Figura 9, hallar las tensiones y corrientes indicadas en cada caso. Considerar $\beta = 100$ y $|V_{BE}| = 0.7V$

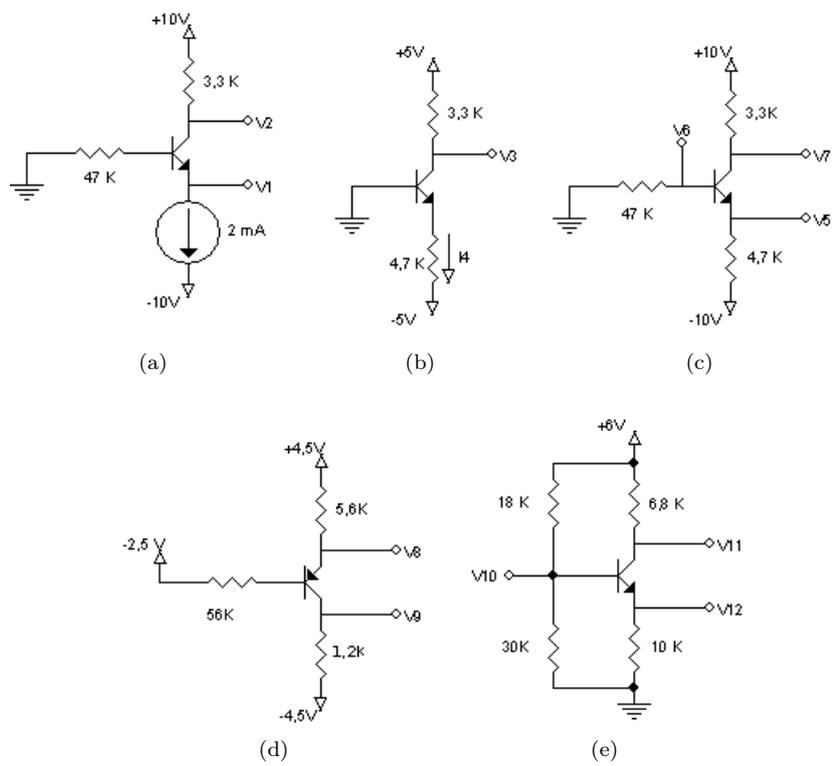


Figura 9

Ejercicio 10

En el circuito de la Figura 10 R_1 , R_2 y T2 forman lo que se conoce como “Multiplicador de V_{BE} ”² ya que generan una tensión (V) proporcional al V_{BE} del transistor. Por otro lado, T1 y el resto del circuito forman una fuente de corriente DC, independiente del valor de V siempre que T1 se mantenga en zona activa. Para resolver el Ejercicio considere D1 y D2 con $V_D = 0.7V$ y T1 y T2 con $V_{BE} = 0.6V$ y $\beta > 100$. Se pide:

- Calcular V en función de R_1 y R_2 .
- Calcular R_1 y R_2 para que $V = 10V$.
- Elegir R_1 y R_2 de la serie E12 de forma de que V sea lo más próximo posible a 10V. Hallar el valor de V obtenido.

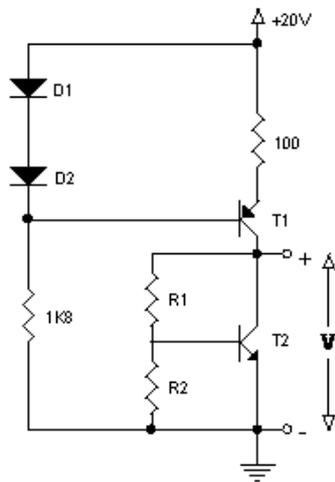


Figura 10

²Este circuito es muy utilizado en amplificadores de potencia

Solución

Ejercicio 1

(a)

$$V_G = 0.89V$$

$$V_D = 1.9V > V_{Dsat} = 0.29V$$

(b)

$$\frac{v_o}{v_i} = -g_m R_D = 9.7V/V$$

(c)

$$(W/L)_{max} = 127.8$$

$$\frac{v_o}{v_i} = -20.8V/V$$

Ejercicio 2

(a)

$$(W/L)_2 = 22.4$$

(b)

$$V_B = 0.9V$$

(c)

$$\frac{W}{L} = \frac{2W}{2L} \Rightarrow \text{No hay cambios}$$

$$I_D = 1mA \Rightarrow \frac{v_o}{v_i} = -10.6V/V$$

Ejercicio 3

(a)

$$V_G = V_{t0} + \sqrt{\frac{2(1+\delta)I_D}{\beta}} + (1+\delta)R_S I_D$$

(b)

$$\frac{v_s}{v_i} = \frac{g_m R_S}{1 + g_{ms} R_S} \simeq \frac{g_m}{g_{ms}} = \frac{1}{1 + \delta} \quad (g_{ms} R_S \gg 1)$$

$$\frac{v_d}{v_i} = -\frac{g_m R_D}{1 + g_{ms} R_S} \simeq -\frac{R_D}{(1 + \delta) R_S} \quad (g_{ms} R_S \gg 1)$$

(c)

$$I_D = 1.48mA$$

(d)

$$V_G = 1.72V$$

$$\frac{v_s}{v_i} = 0.4V/V$$

(e)

$$v_{op}^{max} = 0.62V \quad (\text{caso más restrictivo})$$

Ejercicio 4

(a)

$$\beta = \mu C_{ox} \frac{W}{L}$$

$$V_{Dsat} = \sqrt{\frac{2I_D}{(1+\delta)\beta}}$$

$$gm = \sqrt{\frac{2I_D\beta}{(1+\delta)}}$$

$$r_o = \frac{1}{gds} = \frac{V'_A L}{I_D}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = -gmr_o = -\frac{gm}{gds}$$

(b)

$$Gm_{equiv} \simeq \frac{gm_A gm_S B}{gms_B + gds_A + gds_B} \simeq gm_A \quad (gms \gg gds)$$

$$R_{out} = \frac{v_{out}}{i_{out}} \simeq \frac{gms_B}{gds_A gds_B} = gms_B r_{oA} r_{oB}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = -Gm_{equiv} R_{out} \simeq -gm_A gms_B r_{oA} r_{oB}$$

$$\left(\frac{v_o}{v_i}\right)_{cascode} \simeq (1+\delta) \left(\frac{v_o}{v_i}\right)_1^2$$

Ejercicio 5

(a)

$$I_{D1} = I_1 = 0.5mA$$

$$V_G = 1.0V$$

$$v_{op}^{max} = 0.5V$$

(b)

$$I_{RG} = 0$$
$$i_{RG} = \frac{v_o - v_i}{R_G}$$

La función de R_G es polarizar $V_G = V_D$, pero que en señal no haya corriente entre v_o y v_i

- si $R_G = 0$ en DC logra su objetivo pero hay un corto en señal. No sirve.
- si $R_G = \infty$ en DC igual logra su objetivo ya que de todas formas no hay corriente DC por R_G , mientras que en señal tenemos el caso ideal en el que tampoco hay corriente entre v_o y v_i .

(c)

$$\frac{v_o}{v_i} = -g_m(R_L//r_o) = -18.2V/V$$

Ejercicio 6

(a)

$$\frac{W}{L} = 500$$

(b)

$$R1 + R2 > 33k\Omega$$
$$V_{Gmin} = 260mV \Rightarrow \frac{R1 + R2}{R2} = V_{DD}/V_{Gmin}$$

Solución válida serie E12:

$$R1 = 33k\Omega$$

$$R2 = 3.3k\Omega$$

(c)

$$f_{3dB} = 1.59kHz$$

Ejercicio 7

(a)

$$I_{D1} = I_{D2} = I_1/2$$

$$g_{m1} = g_{m2} = g_m$$

(b)

$$v_x = v_1/2$$

$$v_o/v_i = g_m R_D/2$$

(c)

$$v_o/v_i = g_m R_D/2$$

Ejercicio 8

(a) $V_{out} = V_{in} = V_{GS_11A} = 4V$. Idem para V_{GS_12A} y V_{GS_13A} .

(b) $\frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{g_{m_11} g_{m_12} g_{m_13}}{g_{m_21} g_{m_22} g_{m_23}} = -6$.

(c) $r_{in} = 10M\Omega$. Si $C_2 = 0 \Rightarrow r_{in} = (20M + 1/g_{m_{23}})/9 = 2.3M$

Ejercicio 9

$$V_1 = -1.64V, V_2 = 3.4V$$

$$I_4 = 0.92mA, V_3 = 1.98V$$

$$V_5 = -1.54V, V_6 = -0.85V, V_7 = 4.0V$$

$$V_8 = -1.2V, V_9 = -3.3V$$

$$V_{10} = 3.72V, V_{11} = 4.0V, V_{12} = 3.0V$$

Ejercicio 10

(a) $V = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_{BE}$

(b) $R_1 = 11.75k\Omega, R_2 = 750\Omega$

(c) $R_1 = 12k\Omega, R_2 = 820\Omega, V = 9.38V$