

EL42A - Circuitos Electrónicos

Clase No. 17: Circuitos Amplificadores Lineales (5)

Patricio Parada
pparada@ing.uchile.cl

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

8 de Octubre de 2009

Configuraciones para Amplificadores MOSFET

- Configuración de Fuente Común

- Configuración de Drenaje Común

- Configuración de Compuerta Común

- Aplicaciones en Circuitos Integrados

Amplificador de Fuente Común con Resistencia en la Fuente I

- ▶ Al igual que en el caso del amplificador bipolar con emisor común, el amplificador de fuente común tiene problemas de inestabilidad con respecto a los parámetros del transistor.
- ▶ La combinación de la curva de carga con la característica del transistor nos permite definir que el punto de operación del circuito es

$$V_{DSQ} = V_{DD} - R_D K_n (V_{GSQ} - V_t)^2$$

$$\text{donde } V_{GSQ} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD}.$$

- ▶ La sensibilidad del punto de operación con respecto de los parámetros del transistor es fácil de calcular:

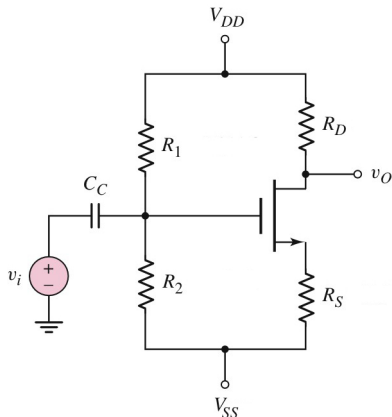
$$\frac{\partial V_{DSQ}}{\partial K_n} = -R_D V_{OV}^2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_{DSQ}}{\partial V_t} = 2K_n R_D V_{OV}. \quad (2)$$

- ▶ Para mejorar la condición de estabilidad del punto de operación del circuito, que es que ambas derivadas sean lo más pequeñas posibles, uno puede incorporar la resistencia R_S entre fuente y tierra.
- ▶ La incorporación de esta resistencia hace relevante la consideración del efecto substrato (body effect), pues el terminal del cuerpo del transistor estará a una tensión distinta a la fuente.
- ▶ Nuestro análisis despreciará este efecto por el momento.

Amplificador de Fuente Común con Resistencia en la Fuente III

- ▶ En la figura mostramos el circuito de fuente común modificado.
- ▶ Para determinar la ganancia de voltaje del circuito utilizaremos el modelo para pequeña señal asociado al NMOS.
- ▶ Incluiremos el efecto Early modelado mediante la resistencia r_o entre D y S.



Amplificador de Fuente Común con Resistencia en la Fuente IV

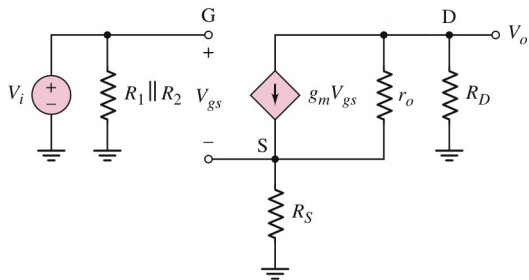
Podemos plantear 4 ecuaciones para determinar V_o en función de V_i :

$$V_i = V_{GS} + V_S$$

$$V_o = V_{DS} + V_S$$

$$\frac{V_S}{R_S} = -\frac{V_D}{R_D}$$

$$g_m V_{GS} + \frac{V_{DS}}{r_o} = \frac{V_S}{R_S}$$



Amplificador de Fuente Común con Resistencia en la Fuente V

- ▶ Combinando las ecuaciones obtenemos

$$g_m(V_i - V_S) + \frac{V_o - V_S}{r_o} = -\frac{1}{R_D}V_o.$$

- ▶ Reordenando términos

$$\left(g_m \frac{R_S}{R_D} + \frac{1}{r_o} + \frac{R_S}{R_D r_o} + \frac{1}{R_D} \right) = -g_m V_i.$$

- ▶ Recordando que $\frac{1}{r_o} + \frac{1}{R_D} = \frac{1}{r_o \parallel R_D}$, tenemos

$$A_v = -\frac{g_m(r_o \parallel R_D)}{1 + \frac{R_S}{R_D} \frac{1}{g_m \parallel r_o}}. \quad (4)$$

Amplificador de Fuente Común con Resistencia en la Fuente VI

- ▶ En el caso que $r_o \rightarrow \infty$, la expresión se simplifica aun más, considerando que

$$r_o \parallel R_D \rightarrow R_D$$
$$r_o \parallel 1/g_m \rightarrow 1/g_m.$$

- ▶ Luego

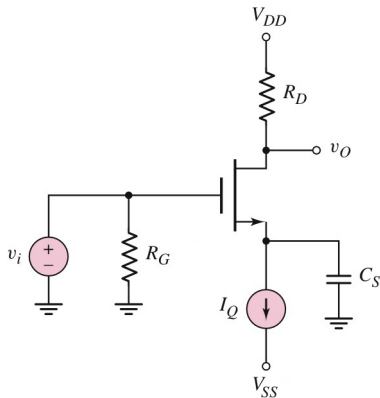
$$A_v = -\frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S}. \quad (5)$$

- ▶ Es evidente, en ambos casos, que la incorporación de la resistencia R_S tiene un costo operacional en términos de una menor ganancia de amplificación.
- ▶ En general, el término $g_m R_S \gg 1$, por lo que la ganancia A_v tiende asintóticamente a

$$A_v \rightarrow -\frac{R_D}{R_S}.$$

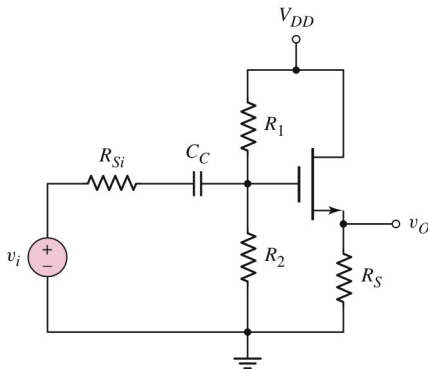
Amplificador de Fuente Común con Resistencia en la Fuente VII

- ▶ La disminución de la ganancia de voltaje del amplificador puede ser contrarrestada incluyendo un condensador C_S en paralelo a R_S .
- ▶ De esta forma se logra estabilizar el punto de operación y tener una “buena” ganancia de voltaje.
- ▶ Una solución más sofisticada considera estabilizar la corriente utilizando una fuente de corriente I_Q en el terminal de fuente.



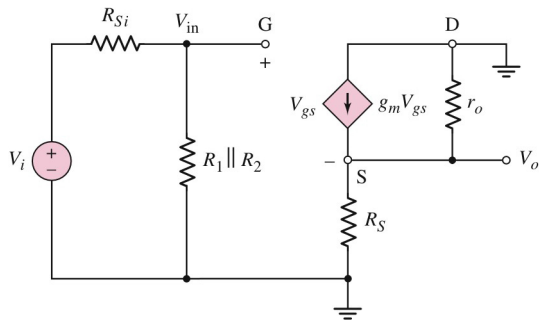
Amplificador de Drenaje Común

- ▶ La configuración de drenaje común toma su salida del terminal de fuente en lugar del drenado.
- ▶ Recibe el nombre de **seguidor de fuente**, porque su ganancia de voltaje es cercana a 1.
- ▶ La configuración típica es



Amplificador de Drenaje Común: Análisis AC I

- Nos concentraremos en el análisis AC, tal como lo hicimos con el amplificador de fuente común.



- ▶ Tenemos

$$V_{in} = \frac{R_1 \parallel R_2}{R_{Si} + R_1 \parallel R_2} V_i$$

$$V_{in} = V_{gs} + V_o \Rightarrow V_{gs} = V_{in} - V_o$$

$$V_o = g_m V_{gs} (r_o \parallel R_S).$$

- ▶ Por lo tanto,

$$V_o = \underbrace{\frac{r_o \parallel R_S}{\frac{1}{g_m} + r_o \parallel R_S}}_{A_{vo}} \frac{R_1 \parallel R_2}{R_{Si} + R_1 \parallel R_2} V_i \quad (6)$$

- ▶ La ganancia de voltaje total del amplificador es siempre menor que 1, lo que es consistente con el resultado para amplificadores bipolares de colector común.

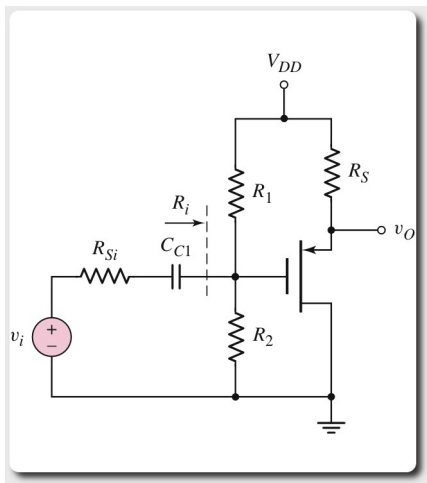
Ejemplo

Ejemplo de Diseño

Diseñe un circuito seguidor de fuente utilizando un PMOS mejorado, y siguiendo las siguientes especificaciones:

- ▶ $V_{SDQ} = 10 \text{ V}$
- ▶ $I_{DQ} = 2,5 \text{ mA}$
- ▶ $R_i = 50 \text{ k}\Omega$
- ▶ $A_v = 0,90$.

El PMOS tiene $V_{tp} = -2 \text{ V}$, $k'_p = 40 \mu\text{A}/\text{V}^2$ y $\lambda = 0$. En el circuito $V_{DD} = 20 \text{ V}$ y $R_{si} = 4 \text{ k}\Omega$.



- Comenzamos diseñando la polarización del circuito:

$$V_{DD} = R_S I_{DQ} + V_{SDQ}$$

$$\Rightarrow R_S = \frac{V_{DD} - V_{SDQ}}{I_{DQ}} = \frac{20 - 10}{0,0025} = 4 \text{ k}\Omega.$$

- La ganancia de voltaje es

$$A_v = \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} \frac{R_1 \parallel R_2}{R_{Si} + R_1 \parallel R_2}$$

pero $R_i = R_1 \parallel R_2$, por lo tanto

$$g_m = \frac{R_{Si} + R_i}{R_S \left(\frac{R_i}{A_v} - (R_{Si} + R_i) \right)} = 8,68 \text{ mA/V.}$$

Solución II

- ▶ Pero $g_m = 2\sqrt{K_p I_{DQ}}$, por lo que

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}k'_p \frac{W}{L} &= \frac{g_m^2}{4I_{DQ}} \\ \Rightarrow \frac{W}{L} &= \frac{g_m^2}{2I_{DQ}k'_p} \\ &= 376,7.\end{aligned}$$

- ▶ Con este valor podemos calcular V_{SGQ} , que al final nos servirá para determinar R_1 y R_2 :

$$\begin{aligned}I_{DQ} &= K_p(V_{SGQ} - V_{tp})^2 \\ V_{SGQ} &= \begin{cases} +1,424 \\ +2,576 \end{cases}\end{aligned}$$

- ▶ Elegimos la segunda raíz porque $V_{SGQ} > |V_{tp}|$ para que el transistor esté encendido.

- ▶ Finalmente, determinaremos R_1 y R_2 :

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{DD} = \frac{R_i}{R_2} V_{DD} = R_S I_{DQ} + V_{SGQ}$$

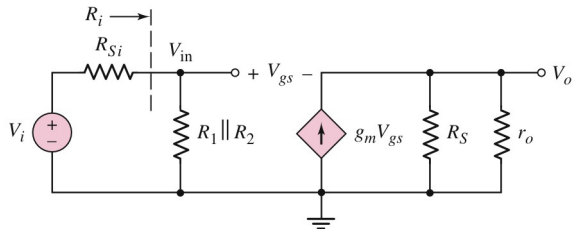
$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{R_i V_{DD}}{R_S I_{DQ} + V_{SGQ}} \\ &= 79,5 \text{ k}\Omega. \end{aligned}$$

- ▶ R_1 lo calculamos reemplazando en

$$\begin{aligned} R_1 &= \left(\frac{1}{R_1 \parallel R_2} - \frac{1}{R_2} \right)^{-1} \\ &= 134,7 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

Resistencias de Entrada y Salida

- Para determinar las resistencias de entrada y salida podemos utilizar el siguiente circuito para pequeña señal:

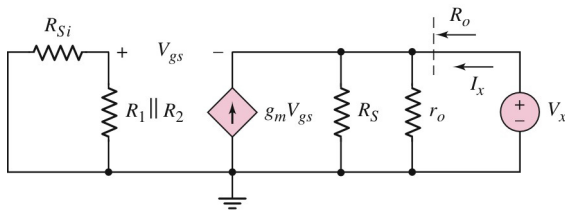


- Resulta directo ver que, aunque la impedancia de entrada del MOSFET es idealmente infinita, la resistencia de entrada es

$$R_i = R_1 \parallel R_2. \quad (7)$$

Resistencias de Entrada y Salida II

- ▶ La resistencia de salida la podemos calcular a partir del siguiente circuito:



- ▶ Podemos plantear LCK en el colector:

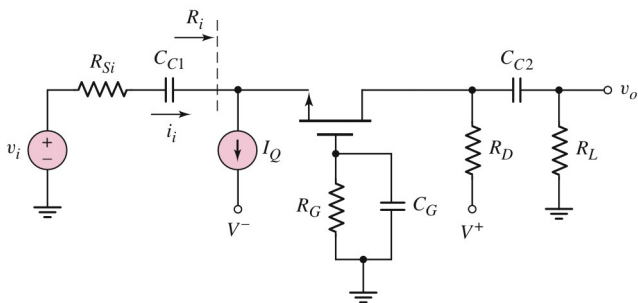
$$I_x = \frac{V_x}{r_o} + \frac{V_x}{R_s} - g_m V_{gs}.$$

- ▶ Notamos que $V_{gs} = -V_o$, por lo que

$$R_o = \frac{1}{g_m} \parallel R_s \parallel r_o. \quad (8)$$

Configuración de Compuerta Común I

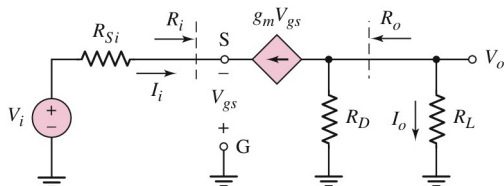
- Consideremos el circuito donde el terminal compuerta es común a la entrada y salida.



- La polarización del transistor se hace en forma directa mediante la fuente de corriente I_Q .
- La resistencia R_G protege la compuerta del MOSFET, evitando la acumulación de carga electrostática.

Configuración de Compuerta Común II

- ▶ El condensador C_G permite que la compuerta tenga la misma tierra que la señal v_i .
- ▶ El circuito equivalente para pequeña señal es el siguiente



- ▶ Vemos que

$$V_o = -g_m V_{gs} (R_D \parallel R_L)$$

y

$$V_i = I_i R_{Si} - V_{gs}.$$

Configuración de Compuerta Común III

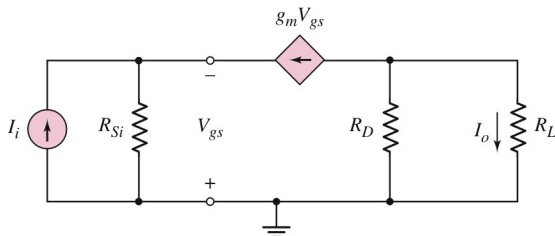
- ▶ Pero $I_i = -g_m V_{gs}$. Luego

$$V_{gs} = -\frac{V_i}{1 + g_m R_{Si}}$$

- ▶ La ganancia de amplificación de voltaje es

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{g_m R_D \parallel R_L}{1 + g_m R_{Si}}. \quad (9)$$

- ▶ La ganancia de corriente se puede determinar del siguiente circuito



Configuración de Compuerta Común IV

- ▶ La corriente I_o se puede determinar del divisor de corriente en la carga:

$$I_o = -\frac{R_D}{R_D + R_L} g_m V_{gs}.$$

- ▶ En la fuente (S) tenemos

$$I_i + g_m V_{gs} + \frac{V_{gs}}{R_{Si}} = 0$$

- ▶ Despejando obtenemos

$$V_{gs} = -I_i \frac{R_{Si}}{1 + g_m R_{Si}}.$$

- ▶ Finalmente, la ganancia de corriente es

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{R_D}{R_D + R_L} \frac{g_m R_{Si}}{1 + g_m R_{Si}}. \quad (10)$$

Resistencia de Entrada y Salida

- ▶ Resulta directo ver que

$$R_i = -\frac{V_{gs}}{I_i}$$

- ▶ Pero $I_i = -g_m V_{gs}$. Luego

$$R_i = \frac{1}{g_m}. \quad (11)$$

- ▶ La resistencia de salida la podemos determinar directamente, ya que $V_{gs} = 0$, por lo que

$$R_o = R_D. \quad (12)$$

- ▶ Vamos a considerar una aplicación bastante frecuente de encontrar en amplificadores implementados mediante circuitos integrados.
- ▶ En todas estas aplicaciones veremos que el circuito amplificador tiene una **carga activa**, esto es, la carga del circuito es un transistor.
- ▶ Estudiaremos tres tipos de amplificadores con cargas activas:
 - ▶ Amplificadores NMOS con carga mejorada.
 - ▶ Amplificadores NMOS con carga empobrecida.
 - ▶ Amplificadores NMOS con carga PMOS.

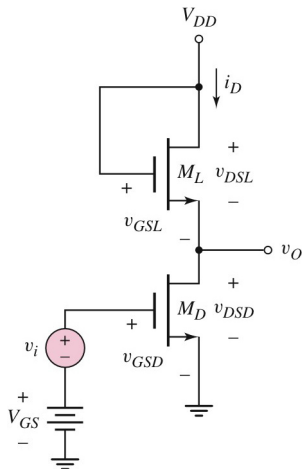
Amplificadores NMOS con Carga Mejorada I

- ▶ En el circuito distinguiremos dos elementos:
 - ▶ El transistor amplificador o driver, M_D
 - ▶ El transistor carga o load M_L .
- ▶ Podemos ver inmediatamente que el transistor M_L está saturado porque

$$v_{GSL} = v_{DSL} > v_{DSL}(\text{sat}) = v_{GSL} - V_{tL}.$$

- ▶ Ello simplifica la expresión de la corriente i_{DL} :

$$i_{DL} = K_{nL}(v_{GSL} - V_{tL})^2 \quad (13)$$



- ▶ El driver del circuito se rige por las expresiones habituales de voltaje-corriente:

$$i_{DD} = \begin{cases} K_{nD}[2(v_{GSD} - V_{tD})v_{DSD} - v_{DSD}^2] & v_{DSD} < v_{DSD}(\text{sat}). \\ K_{nD}(v_{GSD} - V_{tD})^2 & v_{DSD} \geq v_{DSD}(\text{sat}). \end{cases} \quad (14)$$

- ▶ La curva de carga se puede obtener del loop de carga:

$$V_{DD} = v_{DSL} + v_{DSD}$$

- ▶ Como $i_{DL} = i_{DD} = i_D$, y $v_{DSL} = v_{GSL}$, podemos escribir

$$v_{DSL} = \sqrt{\frac{i_D}{K_{nL}}} + V_{tL}. \quad (15)$$

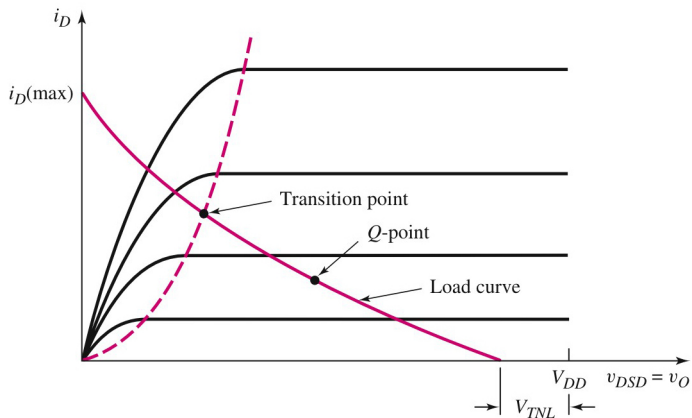
- ▶ Luego, la curva de carga es

$$v_{DSD} = V_{DD} - V_{tL} - \sqrt{\frac{i_D}{K_{nL}}}. \quad (16)$$

- ▶ Los cortes de la curva de carga con los ejes se producen en

$$\begin{aligned} i_D = 0 : v_{DSD} &= V_{DD} - V_{tL} \\ v_{DSD} = 0 : i_D(\max) &= K_{nL}(V_{DD} - V_{tL})^2. \end{aligned}$$

Amplificadores NMOS con Carga Mejorada IV



Amplificadores NMOS con Carga Mejorada V

- ▶ La curva de transferencia de voltaje puede ser utilizada para ver las características de amplificación del circuito completo:

