

Formulario di Progetto di circuiti analogici L-A

Riccardo Trevisan

11 dicembre 2008

Transistore MOS

Polarizzazione

- Fattore di conduzione estrinseco:

$$\beta = \beta' \cdot S \quad (1)$$

- Fattore di conduzione intrinseco:

$$\beta' = \mu \cdot C_{ox} \quad (2)$$

- Tensione di soglia (effetto *body*):

$$|V_T| = |V_{T0}| + \gamma \left(\sqrt{|V_{SB}| + \phi} - \sqrt{\phi} \right) \quad (3)$$

- Regione lineare:

$$V_{DS} < V_{GS} - V_{TN} \quad \text{NMOS} \quad (4)$$

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{TP} \quad \text{PMOS} \quad (5)$$

- Regione di saturazione:

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{TN} \quad \text{NMOS} \quad (6)$$

$$V_{DS} < V_{GS} - V_{TP} \quad \text{PMOS} \quad (7)$$

- Corrente di drain in regione lineare:

$$I_D = \beta' S \left((V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right) \cdot (1 + \lambda |V_{DS}|) \quad (8)$$

- Corrente di drain in regione di saturazione:

$$I_D = \frac{\beta' S}{2} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda |V_{DS}|) \quad (9)$$

Parametri differenziali

- Corrente di drain in regime di piccoli segnali:

$$\begin{aligned} i_D &= \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_0 v_{GS} + \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{BS}} \right|_0 v_{BS} \\ &+ \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right|_0 v_{DS} \\ &= g_m v_{GS} + g_{mb} v_{BS} + g_d v_{DS} \end{aligned} \quad (10)$$

- Transconduttanza di gate:

$$\begin{aligned} g_m &= \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_0 v_{GS} \\ &= \begin{cases} \beta' S V_{DS} (1 + \lambda V_{DS}) & \text{lin.} \\ \beta' S (V_{GS} - V_T) (1 + \lambda V_{DS}) & \text{sat.} \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

- Transconduttanza di bulk:

$$\begin{aligned} g_{mb} &= \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{BS}} \right|_0 v_{DS} = \frac{\partial I_D}{\partial V_T} \frac{\partial V_T}{\partial V_{BS}} \\ &= g_m \frac{\gamma}{2\sqrt{|V_{SB}| + \phi}} = g_m \cdot \eta(V_{SB}) \end{aligned} \quad (12)$$

- Conduttanza di drain:

$$g_d = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right|_0 v_{DS}$$

$$= \begin{cases} \beta' S (V_{GS} - V_T - V_{DS}) \cdot (1 + \lambda V_{DS}) + \beta' S ((V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2) \lambda & \text{lin.} \\ \lambda \frac{\beta'}{2} S (V_{GS} - V_T)^2 & \text{sat.} \end{cases}$$

(13)

- Espressioni alternative dei parametri differenziali in regione di saturazione:

$$g_m = \sqrt{2\beta' S I_D} \quad (\lambda = 0) \quad (14)$$

$$= \frac{2I_D}{V_{GS} - V_T}$$

$$g_d = \frac{\lambda I_D}{1 + \lambda V_{DS}} \quad (15)$$

Capacità parassite

- Capacità sottosoglia:

$$C_{GS} = G_{GS0} \cdot W \quad (16)$$

$$C_{GD} = G_{GD0} \cdot W \quad (17)$$

$$C_{GB} = C_{ox} \cdot W \cdot L \quad (18)$$

- Capacità in regione lineare:

$$C_{GS} = \frac{1}{2} C_{ox} W L + G_{GS0} W \quad (19)$$

$$C_{GD} = \frac{1}{2} C_{ox} W L + G_{GD0} W \quad (20)$$

$$C_{GB} = 0 \quad (21)$$

- Capacità in saturazione:

$$C_{GS} = \frac{2}{3} C_{ox} W L + G_{GS0} W \quad (22)$$

$$C_{GD} = G_{GD0} W \quad (23)$$

$$C_{GB} = 0 \quad (24)$$

- Capacità di giunzione:

$$C_{SB} = \frac{C_J \cdot A_S}{\left(1 + \frac{V_{SB}}{\psi_0}\right)^{MJ}} + \frac{C_{JSB} \cdot P_S}{\left(1 + \frac{V_{SB}}{\psi_0}\right)^{MJSW}} \quad (25)$$

$$C_{DB} = \frac{C_J \cdot A_D}{\left(1 + \frac{V_{DB}}{\psi_0}\right)^{MJ}} + \frac{C_{JDB} \cdot P_D}{\left(1 + \frac{V_{DB}}{\psi_0}\right)^{MJSW}} \quad (26)$$

Stadi elementari

Source comune

- Guadagno di tensione:

$$A_{v_0} = -\frac{g_m}{g_d + G_L} \quad (27)$$

- Conduttanza d'ingresso:

$$G_i = 0 \quad R_i \rightarrow \infty \quad (28)$$

- Conduttanza d'uscita:

$$G_u = g_d + G_L \quad (29)$$

- Poli e zeri:

$$z = \frac{g_m}{C_2} \quad (30)$$

$$p_1 = -\frac{G_u}{g_m} \cdot \frac{G_g}{C_2} \quad (31)$$

$$p_2 = -\frac{g_m}{C_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{C_L}{C_2} + \frac{C_L}{C_1}} \quad (32)$$

Nota: p_1 è il polo dominante e determina la pulsazione di taglio:

$$\omega_T = \frac{G_u G_g}{g_m C_2} \quad (33)$$

Nel caso di generatore ideale di tensione, l'espressione dell'unico polo diventa:

$$p = -\frac{G_u}{C_2 + C_L} \quad (34)$$

Drain comune

- Guadagno di tensione:

$$A_{v_0} = \frac{g_m}{G_t + G_L} \quad (35)$$

- Conduttanza d'ingresso:

$$G_i = 0 \quad R_i \rightarrow \infty \quad (36)$$

- Conduttanza d'uscita:

$$G_u = G_t + G_L \quad (37)$$

Gate comune

- Guadagno di tensione:

$$A_{v_0} = \frac{G_t}{g_d + G_L} \quad (38)$$

- Conduttanza d'ingresso:

$$G_i = G_t \frac{1}{1 + \frac{g_d}{G_L}} \quad (39)$$

- Conduttanza d'uscita:

$$G_u = g_d + G_L \quad (40)$$

- Guadagno di corrente:

$$A_{i_0} = -1 \quad (41)$$

- Poli e zeri:

$$p_1 = -\frac{G_L}{C_L} \quad (42)$$

$$p_2 = -\frac{G_t}{C_1} \quad (43)$$

Nota: p_1 è il polo dominante e determina la pulsazione di taglio:

$$\omega_T = \frac{G_L}{C_L} \quad (44)$$

Stadio cascode

- Transconduttanza:

$$G_m = g_{m_1} \quad (45)$$

- Conduttanza d'uscita (senza carico):

$$G_o = \frac{g_{d_1} g_{d_2}}{g_{m_2}} \quad (46)$$

- Guadagno di tensione:

$$\begin{aligned} A_v &= -\frac{g_{m_1}}{\frac{g_{d_1} g_{d_2}}{g_{m_2}} + G_L} \\ &= -g_{m_1} (g_{m_2} r_{ds}^2 \parallel R_L) \end{aligned} \quad (47)$$

- Pulsazione di taglio:

$$\omega_T = \frac{G_u}{C_L} \quad (48)$$

Drain/Source comune generalizzato

- Guadagno di tensione:

$$A_{v_{u0}}^{\text{SCG}} = \frac{v_u}{v_i} = -\frac{g_m}{g_d + G_L + G_t \frac{G_L}{G_X}} \quad (49)$$

$$A_{v_{x0}}^{\text{DCG}} = \frac{v_x}{v_i} = \frac{g_m}{G_t + G_X + g_d \frac{G_X}{G_L}} \quad (50)$$

- Conduttanza d'uscita:

$$G_{o_u}^{\text{SCG}} = \frac{g_d}{1 + \frac{G_L}{G_X}} + G_L \quad (51)$$

$$G_{o_x}^{\text{DCG}} = \frac{G_t}{1 + \frac{g_d}{G_L}} + G_X \quad (52)$$

	A_{v_0}	ω_T	GBW
Source comune	$-\frac{g_m}{G_u}$	$\frac{G_g G_u}{C_{GD} g_m}$	$\frac{G_g}{C_{GD}}$
Gate comune	$\frac{G_t}{G_u}$	$\frac{G_u}{C_L}$	$\frac{g_m}{C_L}$
Cascode	$-\frac{g_m}{G_u}$	$\frac{G_u}{C_L}$	$\frac{g_m}{C_L}$

Tabella 1: Confronto tra stadi amplificatori (espressioni semplificate)

Circuiti elementari

Specchio di corrente

- Relazione fra le correnti:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\beta'_1 S_1}{\beta'_2 S_2} \quad (53)$$

- Conduttanza d'uscita ai piccoli segnali:

$$G_u = g_{d_2} \quad (54)$$

- Resistenza d'uscita nel caso di generatore di corrente più $n - 1$ stadi cascode:

$$R_o = r_{ds_1} \prod_{i=2}^n r_{ds_i} g_{m_i} \quad (55)$$

Nota: r_{ds_1} è la resistenza dello stadio cascode più distante dall'uscita.

Amplificatore differenziale

- Relazione ingresso-uscita:

$$v_{id} = v_1 - v_2 \quad v_{ic} = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (56)$$

$$v_u = A_d v_{id} + A_c v_{ic} \quad (57)$$

- Guadagno differenziale:

$$A_d = \frac{g_m}{g_d + g_{d_L}} \quad (58)$$

- Guadagno di modo comune:

$$A_c = -\frac{G_g g_d}{2g_{m_L}(g_d + g_{d_L})} \quad (59)$$

- Common-Mode Rejection Ratio:

$$\text{CMRR} = \rho = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \frac{2g_m g_{m_L}}{g_d G_g} \quad (60)$$

- Slew-Rate:

$$\text{SR} = \left. \frac{dV_u}{dt} \right|_{\max} = \frac{I_0}{C_C} \quad (61)$$

Amplificatore a due stadi

- Effetto Miller:

$$C_{\text{eq}} = C_C |A_{v_{02}}| \quad (62)$$

- Poli e zeri:

$$p_1 = -\frac{G_{o1}}{C_{\text{eq}}} = -\frac{G_{o1}}{C_C \cdot |A_{v_{02}}|} \quad (63)$$

$$p_2 = -\frac{gm_6}{C_{o1} + C_{o2}} \quad (64)$$

$$z = \frac{gm_6}{C_C} \quad (65)$$

- Larghezza di banda:

$$\omega_u = |A_{v_0}| \cdot \omega_{p_1} = \frac{g_{m_1}}{C_C} \quad (66)$$

Amplificatore operazionale

- Funzione di trasferimento:

$$\frac{V_u(s)}{V_i(s)} = \frac{A(s)}{1 + F(s)A(s)} \quad (67)$$

$$F(s) = \frac{Z_1(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} \quad (68)$$

- Guadagno ideale (configurazione invertente):

$$\frac{V_u(s)}{V_i(s)} = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)} \quad (69)$$

- Guadagno di anello e margine di fase (analisi della stabilità):

$$A_{LG}(s) = F(s)A(s) \quad (70)$$

$$\text{PM} = \pi - \arctan \frac{\omega_u}{\omega_{p1}} - \arctan \frac{\omega_u}{\omega_{p2}} \quad (71)$$