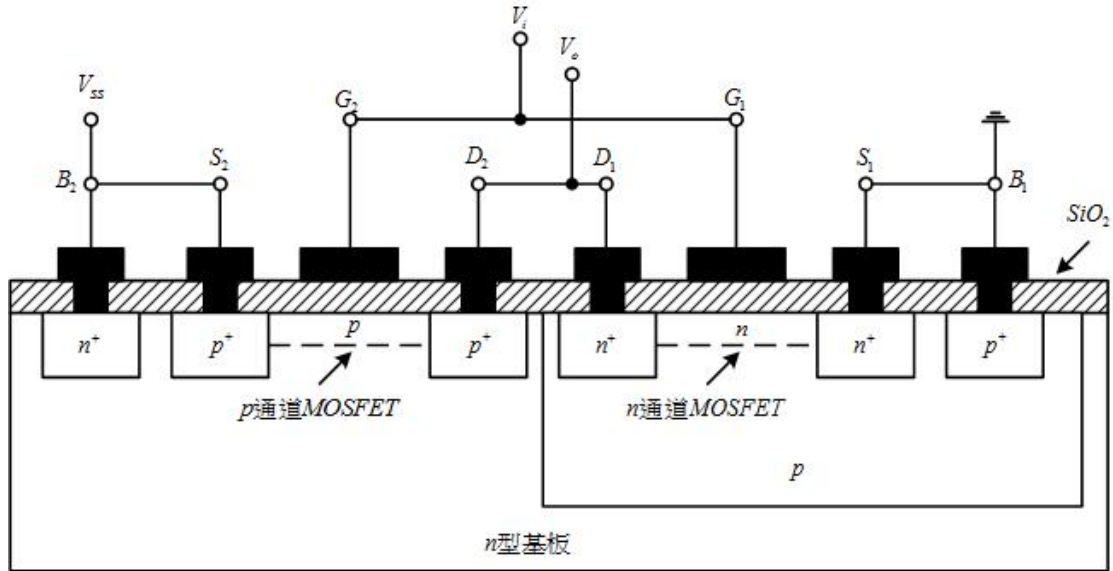


類 科：電力工程、電子工程、電信工程

科 目：電子學概要

一、試畫出一互補式金氧半場效電晶體(CMOS)之剖面圖(cross-section)，請清楚標示所使用之各項半導體物質與節點名稱，並解釋源極(Source)與汲極(Drain)之間通道長度調變效應發生之原因。

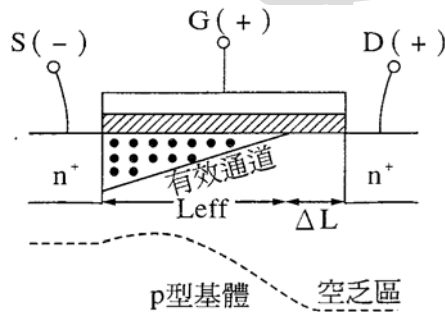
【擬答】：
CMOS 剖面圖：



通道長度調變效應 (channel length modulation effect)：
當 $V_{DS} > V_{DS(sat)}$ 時，汲極通道之接面空乏區將占去一部分通道，導致通道有效長度 L_{eff} 變短，通道電阻減少， V_{DS} 電壓仍維持 $V_{DS(sat)}$ ，故 I_{DS} 隨 V_{DS} 增加而變大。當考慮通道調變效應時，輸出電 I_D 具有斜度存在。

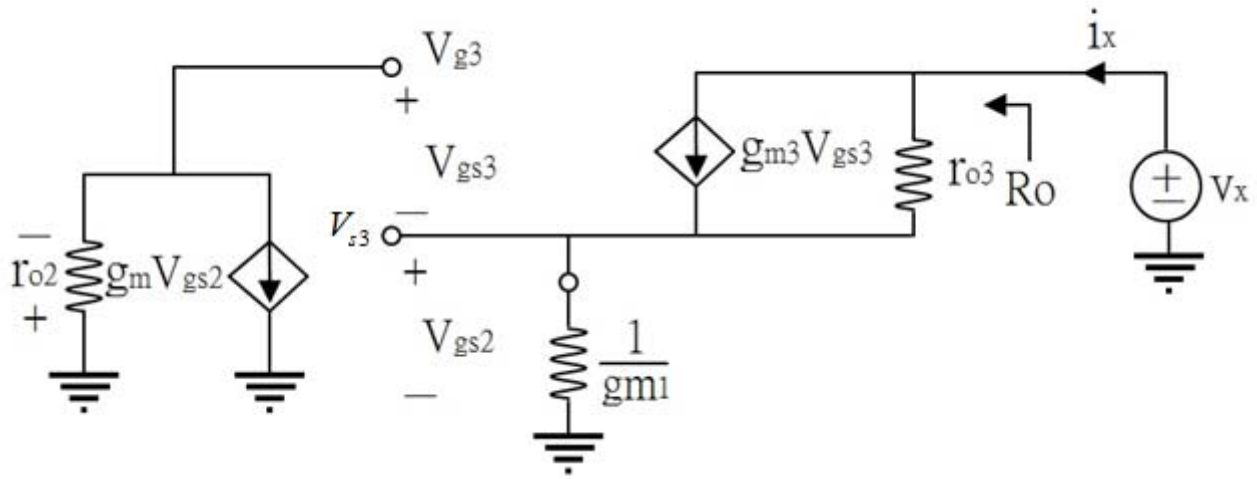
$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2(1 + \lambda V_{DS})$$

其中， $\lambda = \frac{1}{V_A}$ ， λ 稱為通道調變係數



二、如圖一所示電路，所有 MOSFET 的轉導(transconductance)等於 g_m ，輸出電阻皆為 r_o ，試推導圖一中之輸出電阻 $R_{out} = ?$

【擬答】：



$$v_x = (i_x - g_{m3} v_{gs3}) r_{o3} + i_x \cdot \frac{1}{g_{m1}} \dots\dots \textcircled{1}$$

$$v_{gs3} = v_{g3} - v_{s3} = -g_{m2} v_{gs2} \times r_{o2} - v_{s3} = -g_{m2} \times v_{s3} \times r_{o2} - v_{s3}$$

$$= -(g_{m2} \times r_{o2} + 1) \times v_{s3} = -(g_{m2} \times r_{o2} + 1) \cdot i_x \times \frac{1}{g_{m1}} \text{ 代入 } \textcircled{1} \text{ 式}$$

$$v_x = \left[i_x + g_{m3} (g_{m2} \times r_{o2} + 1) \times \frac{1}{g_{m1}} \times i_x \right] \times r_{o3} + i_x \times \frac{1}{g_{m1}}$$

$$R_o = \frac{v_x}{i_x} = \left[1 + g_{m3} (g_{m2} \times r_{o2} + 1) \times \frac{1}{g_{m1}} \right] \times r_{o3} + \frac{1}{g_{m1}}$$

$$\because g_{m1} = g_{m2} = g_{m3} = g_m$$

$$r_{o1} = r_{o2} = r_{o3} = r_o$$

$$\therefore R_o = \frac{v_x}{i_x} \cong [1 + (g_m r_o + 1)] \times r_o = r_o + (1 + \mu) r_o$$

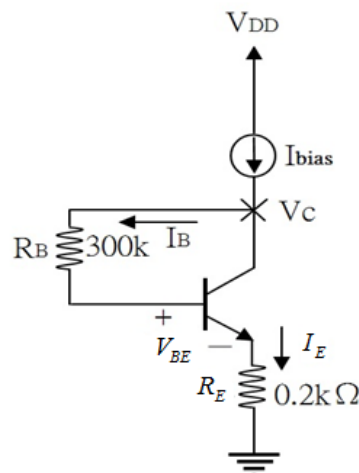
三、圖二所示電路中，BJT 電晶體之共射極順向短路電流增益 $\beta_F = 150$ ， $I_{bias} = 0.6mA$ ， V_{BE} 約為 $0.7V$ ，熱電壓 V_T 為 $24mV$ ，耦合電容 C 接近無限大。

- (一) 試計算直流集極電流及集極電壓。
- (二) 畫出此放大器之小訊號等效電路圖。
- (三) 求出放大器電壓增益 $v_o / v_i = ?$

【擬答】：

(一) ($k\Omega$, mA , V)

DC 分析



公職王歷屆試題 (103 高普考)

$$\therefore I_{bias} = I_E$$

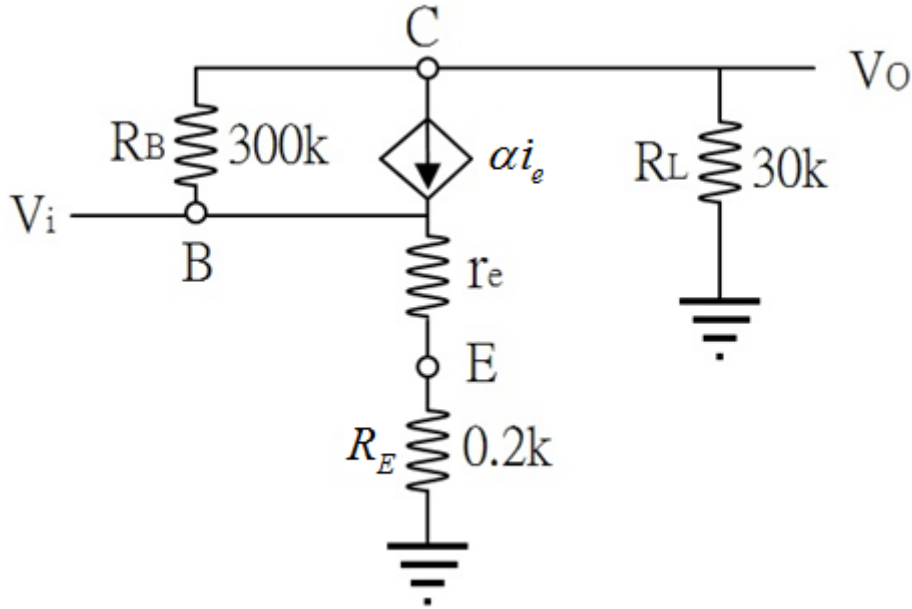
$$\therefore I_C = \alpha I_E = \frac{\beta_F}{1 + \beta_F} \times I_E = \frac{150}{1 + 150} \times 0.6 = 0.596 \text{mA}$$

$$V_C = I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E$$

$$= \frac{I_E}{1 + \beta_F} \times R_B + V_{BE} + I_E \times R_E$$

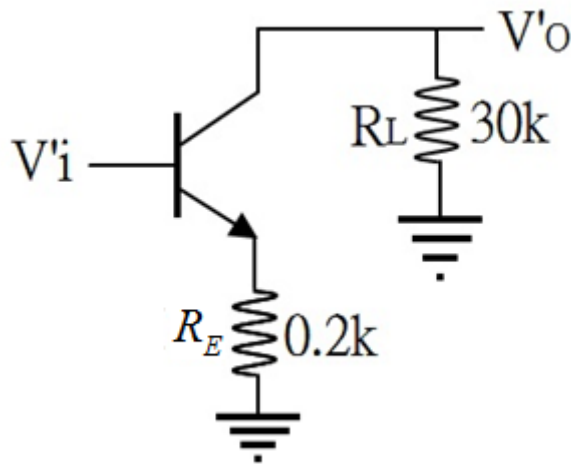
$$= \frac{0.6}{1 + 150} \times 300 + 0.7 + 0.6 \times 0.2 = 2.012 \text{V}$$

(二) ac 小信號分析：



$$(三) r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{24 \text{m}}{0.6 \text{m}} = 40 \Omega = 0.04 \text{k}\Omega$$

密勒增益 (k)



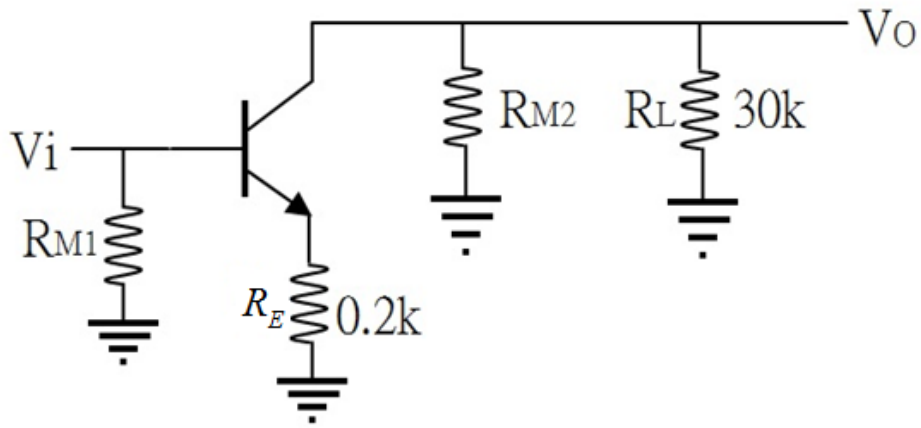
$$k = \frac{v_o'}{v_i'} = -\alpha \times \frac{R_L}{r_e + R_E} = -\frac{30}{0.04 + 0.2} = -125$$

$$R_{M1} = \frac{R_B}{1 - k} = \frac{300}{1 - (-125)} = 2.38 \text{k}\Omega$$

$$R_{M2} = \frac{R_B}{1 - \frac{1}{k}} = \frac{300}{1 - \frac{1}{-125}} = 297.62 \text{k}\Omega$$

由密勒定理折解

$$\frac{v_o}{v_i} = -\alpha \times \frac{R_{M2} // R_L}{r_e + R_E} = -\frac{297.62 // 30}{0.04 + 0.2} = -113.55$$



四、圖三所示放大器電路中，MOSFET 電晶體製程參數如下： $k_n' = \mu_n C_{ox} = 800 \mu A/V^2$ ， $k_p' = \mu_p C_{ox} = 450 \mu A/V^2$ ，輸出電阻 r_o 為 $200k\Omega$ ；所有的電晶體尺寸 $W/L = 10$ ， $I_{REF} = 100 \mu A$ 。假設 M_1 的內部寄生電容 $C_{gs} = 20 fF$ ， $C_{gd} = 5 fF$ ，負載電容 $C_L = 25 fF$ 且 C_L 已涵蓋 M_2 所引入之所有寄生電容， $R_{sig} = 10k\Omega$ 。

- (一) 忽略寄生電容，試求放大器之電壓增益 $v_o/v_i = ?$
- (二) 使用米勒定理，計算此放大器之高頻 $3dB$ 頻率 f_H 。
- (三) 使用開迴路時間常數法，計算此放大器之高頻 $3dB$ 頻率 f_H 。

【擬答】：

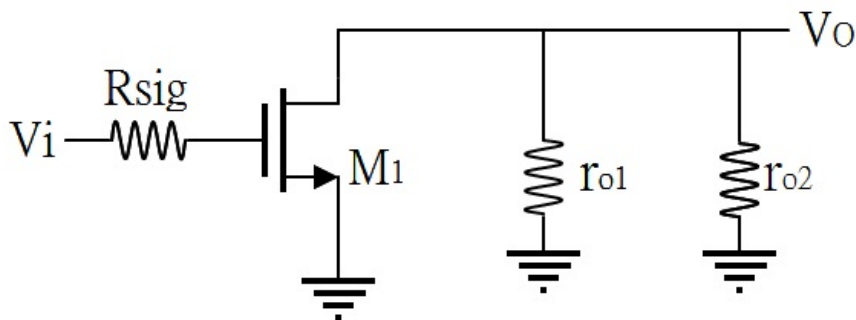
$$k_n = \frac{1}{2} k_n' \times \frac{W}{L} = \frac{1}{2} \times 800 \mu \times 10 = 4m A/V^2$$

$$k_p = \frac{1}{2} k_p' \times \frac{W}{L} = \frac{1}{2} \times 450 \mu \times 10 = 2.25m A/V^2$$

$$I_D = I_{REF} = 100 \mu A = 0.1mA$$

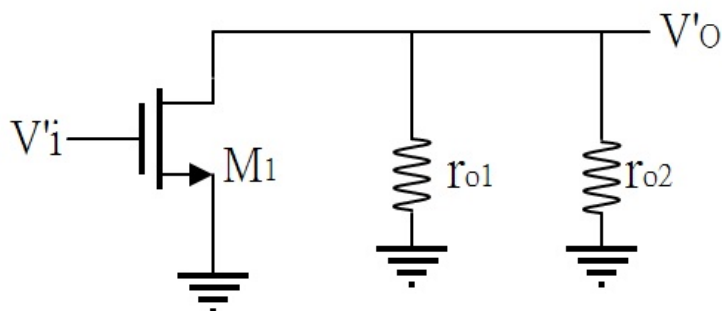
$$g_{m_n} = 2\sqrt{k_n \times I_D} = 2\sqrt{4m \times 0.1m} = 1.26m A/V$$

(一) ac 分析



$$\frac{v_o}{v_i} = -g_{m_n} \times (r_{o1} // r_{o2}) = -1.26m \times (200k // 200k) = -126$$

(二) 米勒增益 (k)

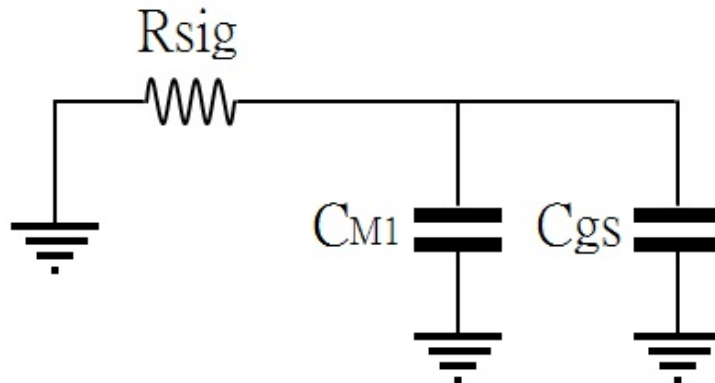


公職王歷屆試題 (103 高普考)

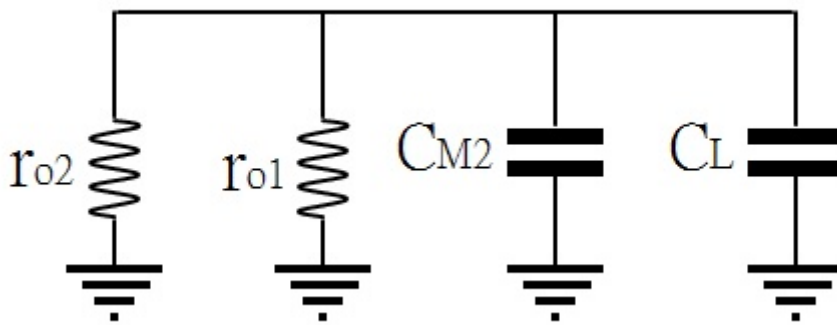
$$k = \frac{v_o'}{v_i'} = -g_{m_n} \times (r_{o1} // r_{o2}) = -126$$

$$C_{M1} = C_{gd}(1 - k) = 5f(1 - (-126)) = 635fF$$

$$C_{M2} = C_{gd}(1 - \frac{1}{k}) = 5f(1 - \frac{1}{-126}) = 5.04fF$$



$$f_{P_{in}} = \frac{1}{2\pi(C_{M1} + C_{gs})R_{sig}} = \frac{1}{2\pi(635f + 20f) \times 10k} = 24.3MHz$$



$$f_{P_{out}} = \frac{1}{2\pi(r_{o1} // r_{o2})(C_{M2} + C_L)} = \frac{1}{2\pi(200k // 200k) \times (5.04f + 25f)} = 53.05MHz$$

以平方和近似法

$$f_M = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{P_{in}}^2} + \frac{1}{f_{P_{out}}^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(24.3M)^2} + \frac{1}{(53.05M)^2}}} = 22.09MHz$$

(三)

$$R_{gs} = R_{sig} = 10k\Omega$$

$$R_{gd} = R_{sig} + (r_{o2} // r_{o1})(1 + g_{m_n} R_{sig}) = 10k + (200k // 200k)(1 + 1.26m \times 10k) = 1370k\Omega$$

$$R_L = r_{o2} // r_{o1} = 200k // 200k = 100k\Omega$$

以開迴路時間常數法

$$f_H = \frac{1}{2\pi(R_{gs}C_{gs} + R_{gd}C_{gd} + R_L C_L)} = \frac{1}{2\pi(10k \times 20f + 1370k \times 5f + 100k \times 25f)} = 16.67MHz$$