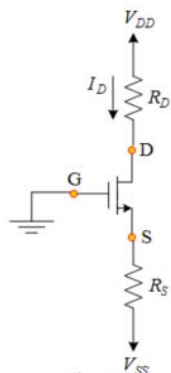


### Question 1

圖 1 電路中，直流電壓源  $V_{DD} = 2.5V$ 、 $V_{SS} = -2.5V$ ，MOSFET 其汲極電壓  $V_D = 0.5V$ 、汲極電流  $I_D = 0.4mA$ ，試求解電阻  $R_D$ 、 $R_S$  之值，其中 MOSFET 元件參數  $V_t = 0.7V$ 、 $k = 1.6mA/V^2$ 。



**Sol:**

Step1: 假設其運作在飽和模式  $I_D = \frac{1}{2}k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$

Step2: 帶入已知  $0.4 \times 10^{-3} = \frac{1}{2} \times (100 \times 10^{-6}) \times 32 \times (V_{GS} - 0.7)^2$

$$V_{GS} - 0.7 = \pm 0.5$$

$$\text{若 } V_{GS} - 0.7 = -0.5$$

不符合  $V_{GS} > V_t$  之條件

$$\text{若 } V_{GS} - 0.7 = +0.5$$

$$\text{符合 } V_{GS} > V_t \text{ 之條件 } \Rightarrow V_{GS} = 1.2V$$

$$\text{Step3: } V_{GS} = 1.2V = V_G - V_S$$

$$V_S = -1.2V$$

Step4: 檢查是否符合飽和模式條件

$$V_{DS} = 0.5 - (-1.2) = 1.7$$

$$V_{DS} = 1.7V > V_{GS} - V_t = 0.5 \text{ (符合工作在飽和區之條件，假設成立)}$$

Step5: 用歐姆定理求  $R_D$ ,  $R_S$

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D$$

$$0.5 = 2.5 - (0.4 \times 10^{-3}) \times R_D$$

$$R_D = 5k\Omega$$

$$V_S = V_{SS} + I_D R_S$$

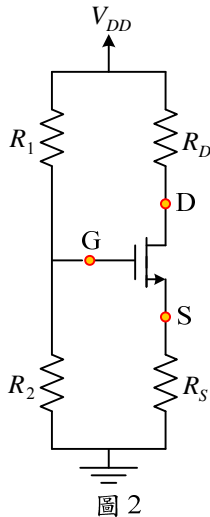
$$-1.2 = -2.5 + (0.4 \times 10^{-3}) \times R_S$$

$$R_S = 3.25k\Omega$$

## Question 2

圖 2 電路中，MOSFET 元件參數  $V_t = 3V$ 、 $k = 1mA/V^2$ ，

- a) 若  $R_1 = 8M\Omega$ 、 $R_2 = 4M\Omega$ 、 $R_S = 1k\Omega$  及  $R_D = 4k\Omega$ ，試求解直流汲極電流  $I_D$ 、直流源極及汲極電壓  $V_S$ 、 $V_D$ ；
- b) 試設計電路( $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_D$  及  $R_S$ )，使  $I_D = 4mA$ 、 $V_S = 4V$  及  $V_D = 8V$ ，其中電阻  $R_1$ 、 $R_2$  為  $M\Omega$ 。



**Sol:**

(a)

Step1: 假定 FET 處於飽和模式：

$$I_D = kV_{GS,eff}^2$$

$$\Rightarrow V_{GS,eff}^2 = V_G - V_S - V_t = 1 - I_D (V_S = I_D R_S)$$

$$V_G = V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4V$$

$$\Rightarrow I_D = (1 - I_D)^2$$

$$\Rightarrow I_D = 0.38mA \text{ or } 2.618 \text{ (不符假設)}$$

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D = 10.48V$$

$$V_S = I_D R_S = 0.38V$$

檢查： $10.1 = V_{DS} > V_{GS,eff} = 0.62$  OK !

(b)

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D \Rightarrow R_D = 1k\Omega$$

$$V_S = I_D R_S \Rightarrow R_S = 1k\Omega$$

假定 FET 處於飽和模式：

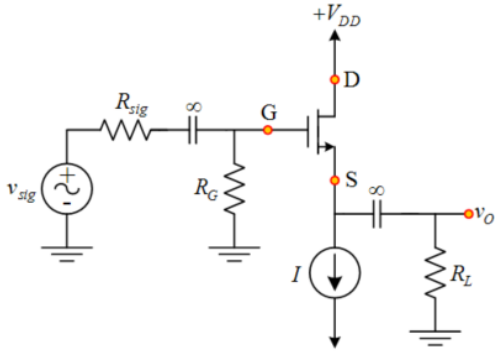
$$I_D = k(V_G - V_S - V_t)^2$$

$$\Rightarrow V_G = 9V = V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \text{ 選 } R_1 = 3M\Omega, R_2 = 9M\Omega$$

檢查： $V_{DS} > V_{GS,eff} \Rightarrow 4V > 2V$  OK !

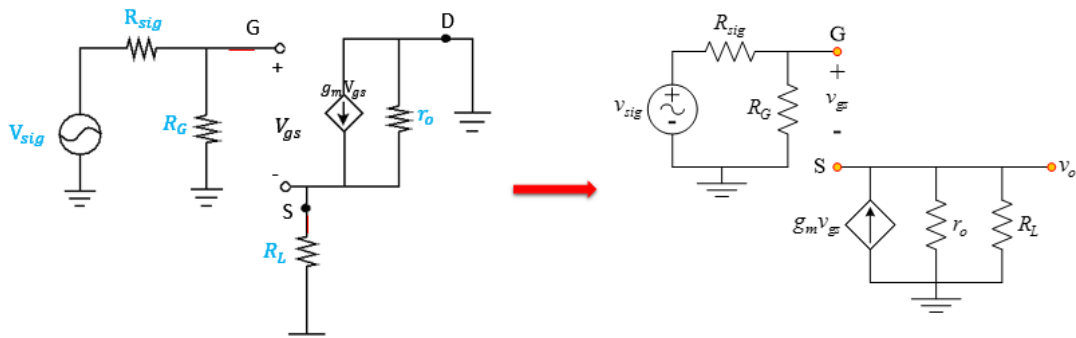
### Question 3

圖 3 電路中，若訊號源內阻  $R_{sig} = 1\text{M}\Omega$ 、閘極電阻  $R_G = 4.7\text{M}\Omega$ 、負載電阻  $R_L = 15\text{k}\Omega$ ，且 MOSFET 元件其小訊號互導參數  $g_m = 1\text{mA/V}$ 、通導調變效應等效電阻  $r_o = 150\text{k}\Omega$ 。試求解此 MOSFET 電路其小訊號電壓增益  $v_o/v_{sig}$  及其等效輸入電阻  $R_m$ 。



Sol:

Step1:



由小訊號模型：

$$V_g = V_{sig} \times \frac{R_G}{R_{sig} + R_G}$$

$$V_s = (g_m V_{gs}) \times (r_o \parallel R_L) = (g_m V_{gs}) \times \frac{r_o R_L}{r_o + R_L}$$

$$V_{gs} = V_g - V_s = \frac{R_G}{R_{sig} + R_G} \times V_{sig} \times \frac{1}{1 + g_m \frac{r_o R_L}{r_o + R_L}}$$

$$V_o = g_m V_{gs} \frac{r_o R_L}{r_o + R_L} = g_m \times \frac{r_o R_L}{r_o + R_L} \times \frac{R_G}{R_{sig} + R_G} \times \frac{1}{1 + g_m \frac{r_o R_L}{r_o + R_L}} \times V_{sig}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_{sig}} = 0.9123$$

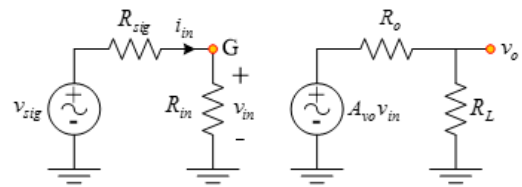
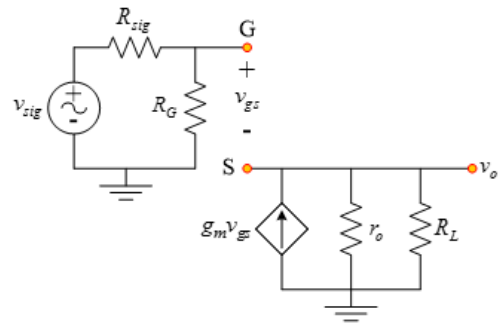
Step2: 小訊號電路的等效輸入阻抗

$$R_{in} = \left| \frac{v_{in}}{i_{in}} \right|$$

由等效小訊號電路可知:  $v_{in} = v_{sig} \frac{R_G}{R_{sig} + R_G}$

$$i_{in} = \frac{v_{sig}}{R_{sig} + R_G}$$

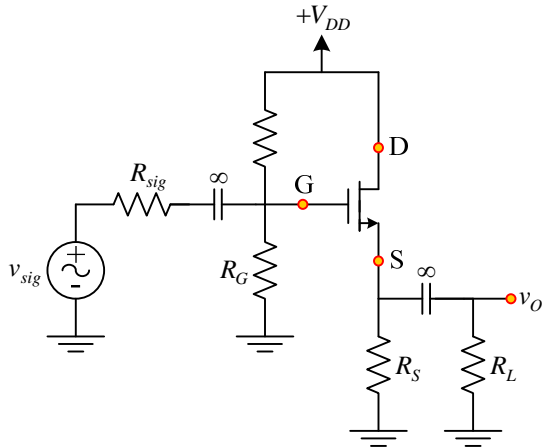
$$R_{in} = \frac{v_{sig} \frac{R_G}{R_{sig} + R_G}}{\frac{v_{sig}}{R_{sig} + R_G}} = R_G = 4.7M\Omega$$



### Question 4

圖 4 電路中，直流電壓源  $V_{DD} = 24V$ 、訊號源內阻  $R_{sig} = 2k\Omega$ 、負載電阻  $R_L = 100\Omega$ ，MOSFET 元件參數  $V_t = 2V$ 、 $k = 5mA/V^2$ ，

- 試設計  $R_1$ 、 $R_2$  及  $R_S$ ，使 MOSFET 直流汲極電流  $I_D = 20mA$ 、直流閘極電壓  $V_G = 12V$ ；
- 試利用等效小訊號模型，求解小訊號電壓放大增益  $v_o/v_{sig}$ 。
- 若  $v_{sig} = 2\cos(\omega t)$ ，試求解源極電壓的最大值與最小值。



**Sol:**

(a) 因為工作於 saturation mode， $I_D = k(V_{GS} - V_t)^2$   
 已知  $I_D = 20mA$ 、 $k = 5mA/V^2$ 、 $V_t = 2V$

$$V_G = 12V、V_{DD} = 24V$$

$$\text{可得 } V_{GS} = \sqrt{\frac{I_D}{k}} + V_t = \sqrt{\frac{20}{5}} + 2 = 4V$$

$$\text{由左圖可知 } V_G = V_{DD} \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow 12 = 24 \times \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

得  $R_1 : R_2 = 1 : 1$ ，取  $R_1 = R_2 = 12M\Omega$  (取 M 為降低損耗)

$$V_S = V_G - V_{GS} \Rightarrow V_S = 12 - 4 = 8V$$

$$R_S = \frac{V_S}{I_D} = \frac{8}{20} = 0.4k\Omega$$

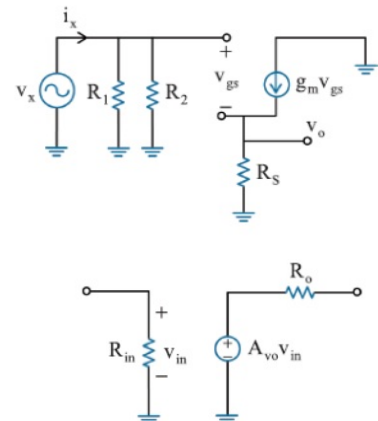
(b)

$$g_m = 2\sqrt{kI_D} = 2\sqrt{5 * 20} = 20 \text{ m}\Omega \text{ (小信號情況)}$$

$$R_{in} = R_1 // R_2 = \frac{1}{\frac{1}{12} + \frac{1}{12}} = 6M\Omega$$

$$R_o = R_S // \frac{1}{g_m} = \frac{1}{\frac{1}{400} + \frac{1}{50}} = 44.4\Omega$$

$$A_{vo} = \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} = \frac{20 * 0.4}{1 + 20 * 0.4} = 0.89$$



$$A_v = A_{vo} \times \frac{R_{in}}{R_a + R_{in}} \times \frac{R_L}{R_o + R_L} = 0.89 \times \frac{6M}{2k + 6M} \times \frac{100}{44.4 + 100}$$
$$= 0.614$$

(c) 已知  $V_i = 2\cos\omega t$ ,  $V_s = 8V$

在有信號輸入的情況下  $V_s = 8 + A_v \times V_i = 8 + 0.614 \times 2\cos\omega t$

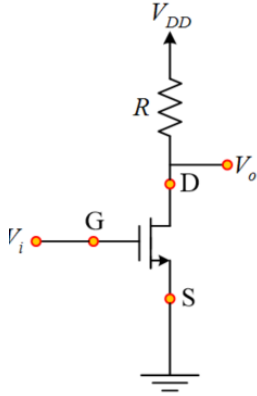
$$\Rightarrow V_{s(max)} = 8 + 1.228 = 9.228(V)$$

$$\Rightarrow V_{s(min)} = 8 - 1.228 = 6.772(V)$$

### Question 5

圖 5 為 N-channel MOSFET 所構成之數位電路，若  $V_{DD} = 5V$  且輸入訊號  $V_i = 0V$  或  $V_i = 5V$ ，其中 MOSFET 元件參數  $V_t = 2V$ 、 $k = 1mA/V^2$ ，

- 當  $R = 10k\Omega$  且  $V_i = 5V$  時，試求解輸出訊號  $V_o$  及此數位電路所消耗的功率；
- 當  $R = 1k\Omega$  且  $V_i = 5V$  時，試求解  $V_o$  及此數位電路所消耗的功率；



**Sol:**

(a)

Step1: 假設 FET 在 TRIODE MODE 下:

$$I_D = k \cdot (2V_{GS,eff}V_{DS} - V_{DS}^2)$$

$$V_{GS,eff} = V_{GS} - V_t \quad k = 1mA/V^2$$

$$V_i - V_s = V_{GS} = 5V > V_t = 2V, \text{ 導通 } I_D = 1 \cdot (2 \cdot 3 \cdot V_{DS} - V_{DS}^2) \dots (1)$$

$$V_{DD} - V_{DS} = I_D \cdot R \Rightarrow 5 = V_{DS} + I_D \cdot 10 \dots (2)$$

$$\text{解(1)(2)得 } V_{DS} = V_o = 0.083(V), I_D = 0.492(mA)$$

Check  $V_{DS} < V_{GS,eff} \dots ok$

$$P_{ON} = V_{DD} \cdot I_D = 5 \cdot 0.492 = 2.46mW$$

(b)

Step1: 假設 FET 在 TRIODE MODE 下:

$$I_D = k \cdot (2V_{GS,eff}V_{DS} - V_{DS}^2)$$

$$V_{GS,eff} = V_{GS} - V_t \quad k = 1mA/V^2$$

$$V_i - V_s = V_{GS} = 5V > V_t = 2V, \text{ 導通 } I_D = 1 \cdot (2 \cdot 3 \cdot V_{DS} - V_{DS}^2) \dots (1)$$

$$V_{DD} - V_{DS} = I_D \cdot R \Rightarrow 5 = V_{DS} + I_D \dots (2)$$

$$\text{解(1)(2)得 } V_{DS} = V_o = 0.807(V), I_D = 4.193(mA)$$

Check  $V_{DS} < V_{GS,eff} \dots ok$

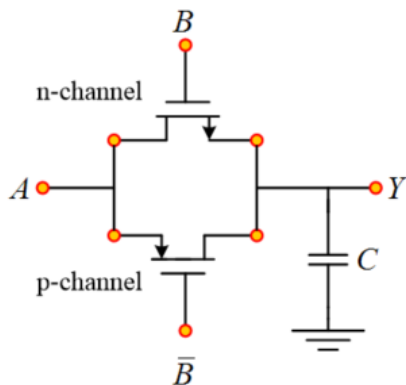
$$P_{ON} = V_{DD} \cdot I_D = 20.965mW$$

## Question 6

圖 6 為 MOSFET 元件所構成之邏輯電路，若  $A = B = 5V$ 、 $\bar{B} = 0V$ ，且輸出端等效電容  $C = 27pF$ ，試求解輸出端  $Y$  由  $0V$  上升至  $2.5V$  所需之時間。

note: N-channel MOSFET 元件參數  $V_t = 2V$ 、 $k = 1mA/V^2$ ；

P-channel MOSFET 元件參數  $V_t = -2V$ 、 $k = 1mA/V^2$ 。



**Sol:**

Step 1.

當  $Y=0$  時

$$Q_n : V_{GS}=5V, V_{GS,eff}=5-2=3V < V_{DS}=5-0=5V \text{---saturation mode}$$

$$Q_p : V_{SG}=5V, V_{SG,eff}=5-2=3V < V_{DS}=5-0=5V \text{---saturation mode}$$

$$\Rightarrow I_{Dp}=k(V_{GS,eff})^2=1(5-2)^2=9mA$$

$$\text{同理 } I_{Dn}=9mA \quad \Rightarrow \text{相加得 } I_1=9+9=18mA$$

Step 2.

$$Q_n : V_{GS}=2.5V ; V_{DS}=5-2.5=2.5V \quad V_{GS,eff}=2.5-2=0.5V < V_{DS}=2.5V \text{--- saturation mode}$$

$$Q_p : V_{SG}=5V ; V_{SD}=5-2.5=2.5V \quad V_{SG,eff}=5-2=3V > V_{SD}=2.5V \text{--- triod mode}$$

$$I_{Dn}=k(V_{GS,eff})^2=1(2.5-2)^2=0.25mA$$

$$I_{Dp}=k[2V_{SG,eff}V_{SD}-V_{SD}^2]=1[2*3*2.5-2.5^2]=8.75mA$$

$$\Rightarrow I_2=0.25+8.75=9mA$$

$$\text{平均充電電流}=(I_1+I_2)/2=(18+9)/2=13.5mA$$

Step 3.

$$\text{電容關係式 } I = C \frac{dV}{dt}$$

$$\text{故 } \Delta t = c \frac{\Delta V}{I} = 27 * 10^{-12} \frac{2.5-0}{13.5*10^{-3}} = 5*10^{-9}(\text{sec})$$

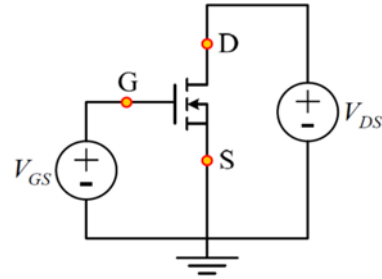


### Question 7

圖 7 中，閘源極電壓  $V_{GS} = 1.5 \text{ V}$ ，若其臨界電壓  $V_t = 0.7 \text{ V}$ ，試求解在下列情況下，MOSFET 之操作模式為何。

a)  $V_{DS} = 0.5 \text{ V}$ ；

b)  $V_{DS} = 0.9 \text{ V}$ ；



### Sol:

for Question a)

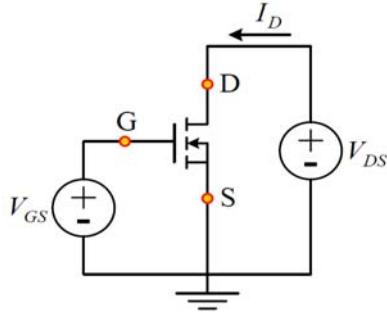
由於  $V_{DS} = 0.5 \text{ V} < (V_{GS} - V_t) = 0.8 \text{ V}$ ，因此 MOSFET 元件操作在三極管區 (Triode Region)。

for Question b)

由於  $V_{DS} = 0.9 \text{ V} > (V_{GS} - V_t) = 0.8 \text{ V}$ ，因此 MOSFET 元件操作在三極管區 (Saturation Region)。

### Question 8

下列 MOSFET 電路中，若閘源極電壓  $V_{GS}$ 、汲源極電壓  $V_{DS}$  皆為 1.2V 時，汲極電流  $I_D = 100\mu\text{A}$ ；試求解當  $V_{GS} = 1.5\text{V}$ 、 $V_{DS} = 3\text{V}$  時，FET 元件之操作模式及其汲極電流  $I_D$ ，其中 MOSFET 參數  $V_t = 0.7\text{V}$ 。



**Sol:**

#### Step1.

由題目已知條件可知，閘源極電壓  $V_{GS}$ 、汲源極電壓  $V_{DS}$  皆為 1.2V，即  $V_{DS} > (V_{GS} - V_t)$ 、MOSFET 操作在飽和區(Saturation Region)，汲極電流  $I_D = 100\mu\text{A}$ 。

$$100 \times 10^{-6} = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (1.2 - 0.7)^2 = 0.125 k'_n \frac{W}{L}$$

$$k'_n \frac{W}{L} = 0.8 \times 10^{-3}$$

#### Step2.

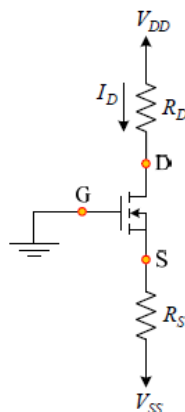
若  $V_{GS} = 1.5\text{V}$ 、 $V_{DS} = 3\text{V}$  時， $V_{DS} > (V_{GS} - V_t)$ ，

MOSFET 操作在飽和區(Saturation Region)。

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 = \frac{1}{2} \times (0.8 \times 10^{-3}) \times (1.5 - 0.7)^2 = 256 \mu\text{A}$$

### Question 9

下列 MOSFET 電路中，若直流電壓源  $V_{DD} = 2.5\text{ V}$ 、 $V_{SS} = -2.5\text{ V}$ ，且 FET 元件之汲極電壓  $V_D = 0.5\text{ V}$ 、汲極電流  $I_D = 0.4\text{ mA}$ ，試求解電阻元件  $R_D$ 、 $R_S$  值，其中 MOSFET 參數  $V_t = 0.7\text{ V}$ 、 $k_n' = 100\mu\text{A}/\text{V}^2$  且  $W/L = 32$ 。



Sol:

Step1.

假設 MOSFET 元件操作在飽和區 (Saturation Region)，因此可得知

$$I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$$
$$\Rightarrow 0.4 \times 10^{-3} = \frac{1}{2} (100 \times 10^{-6}) \times 32 \times (V_{GS} - 0.7)^2$$
$$V_{GS} - 0.7 = 0.5$$
$$\Rightarrow V_{GS} = 1.2 = V_G - V_S = 0 - V_S \Rightarrow V_S = -1.2\text{ V}$$

Step2.

由歐姆定律可知， $V_D = V_{DD} - I_D R_D$  &  $V_S = V_{SS} + I_D R_S$

$$0.5 = 2.5 - (0.4 \times 10^{-3}) R_D \quad \& \quad -1.2 = -2.5 + (0.4 \times 10^{-3}) R_S$$
$$\Rightarrow R_D = 5\text{ k}\Omega \quad \& \quad R_S = 3.25\text{ k}\Omega$$

Step3.

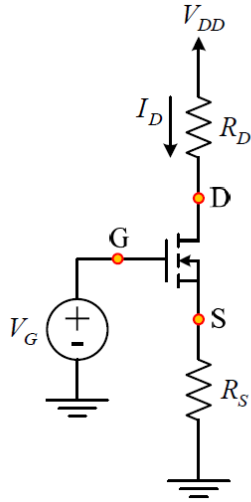
a) 產生感應通過： $V_{GS} = 1.2\text{ V} > V_t$

b) 飽和區偏壓條件： $V_{DS} = 0.5 - (-1.2) = 1.7\text{ V} > V_{GS} - V_t = 0.2\text{ V}$

符合假設!

### Question 10

下列MOSFET電路中，若FET 操作在飽和模式，且其閘極電壓 $V_G=4\text{ V}$ 、電阻元件  $R_S=1\text{ k}\Omega$ ，試求解汲極電流 $I_D$ ，其中MOSFET參數  $V_t=2\text{ V}$ 、 $k_n'(W/L)=2\text{ mA/V}^2$ 。



Sol :

Step1.

$$I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$$

$$V_S = I_D R_S \Rightarrow V_{GS} = V_G - V_S = V_G - I_D R_S$$

Step2.

$$I_D = \frac{1}{2} \times (2 \times 10^{-3}) \times [4 - I_D \times (1 \times 10^3) - 2]^2$$

$$\Rightarrow I_D = 1\text{ mA or } 4\text{ mA}$$

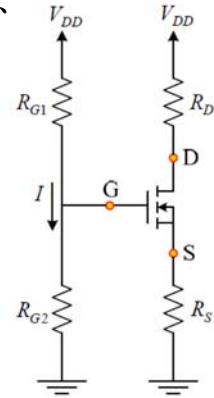
若  $I_D=4\text{ mA}$   $V_S = I_D R_S = 4\text{ V}$  &  $V_{GS} = 4 - 4 = 0$

此時MOSFET 元件無法產生感應通道、電流無法導通，與假設( $I_D=4\text{ mA}$ )矛盾，因此

$$I_D = 1\text{ mA} \text{ \& } V_S = I_D R_S = 1\text{ V}$$

### Question 11

下列MOSFET 電路中，若直流電壓源  $V_{DD} = 5V$ ，源極電壓  $V_S = 1.6V$ 、汲極電壓  $V_D = 3.4V$ 、汲極電流  $I_D = 0.32mA$ ，且流通電阻  $R_{G1}$  及  $R_{G2}$  的電流  $I = 1\mu A$ ；試求解電阻  $R_{G1}$ 、 $R_{G2}$ 、 $R_D$  及  $R_S$  值，其中MOSFET 元件參數  $V_t = 1V$ 、 $k_n' (W/L) = 1mA/V^2$ 。



**Sol:**

Step1.

$$V_S = I_D R_S \Rightarrow 1.6V = (0.32 \times 10^{-3}) \times R_S \Rightarrow R_S = 5k\Omega$$

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D \Rightarrow 3.4 = 5 - (0.32 \times 10^{-3}) \times R_D$$

$$R_D = 5k\Omega$$

Step2.

若假設MOSFET 元件操作在飽和區(Saturation Region)，

$$I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow 0.32 \times 10^{-3} = \frac{1}{2} \times (1 \times 10^{-3}) (V_{GS} - 1)^2$$

$$V_{GS} = 1.8 = V_G - V_S$$

$$\Rightarrow V_G = 1.8 + 1.6 = 3.4V$$

Step3.

$$I = \frac{V_{DD}}{R_{G1} + R_{G2}} \Rightarrow 1 \times 10^{-6} = \frac{5}{R_{G1} + R_{G2}} \Rightarrow R_{G1} + R_{G2} = 5M\Omega$$

$$V_G = V_{DD} \times \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \Rightarrow 3.4 = 5 \times \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$$

$$\Rightarrow \underline{R_{G1} = 1.6M\Omega \ \& \ R_{G2} = 3.4M\Omega}$$

Step4.

a) 產生感應通到  $V_{GS} = 1.8V > V_t$

b) 飽和區偏壓條件： $V_{DS} = 3.4 - (-1.6) = 1.8V > V_{GS} - V_t = 0.8$   
符合假設!