

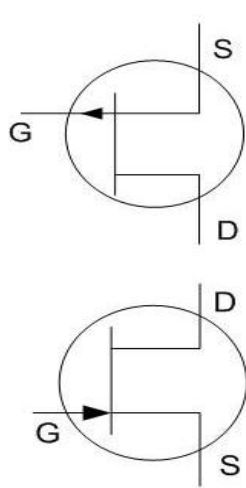
場效電晶體放大電路

National Taiwan Normal University

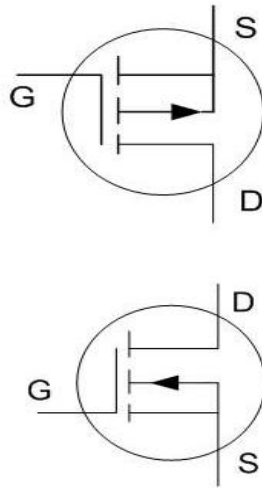
講師：趙婉芝

一、FET放大與小訊號動作原理

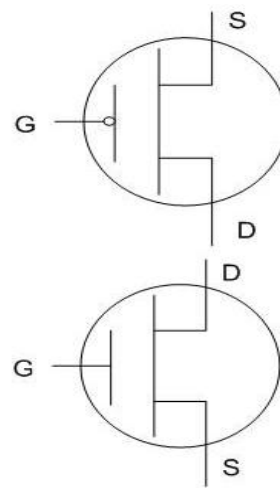
常用於MOSFET的電路符號有多種形式，最常見的設計是以一條垂直線代表通道（Channel），兩條和通道平行的接線代表源極（Source）與汲極（Drain），左方和通道垂直的接線代表閘極（Gate）。



與JFET做比較



增強型MOSFET



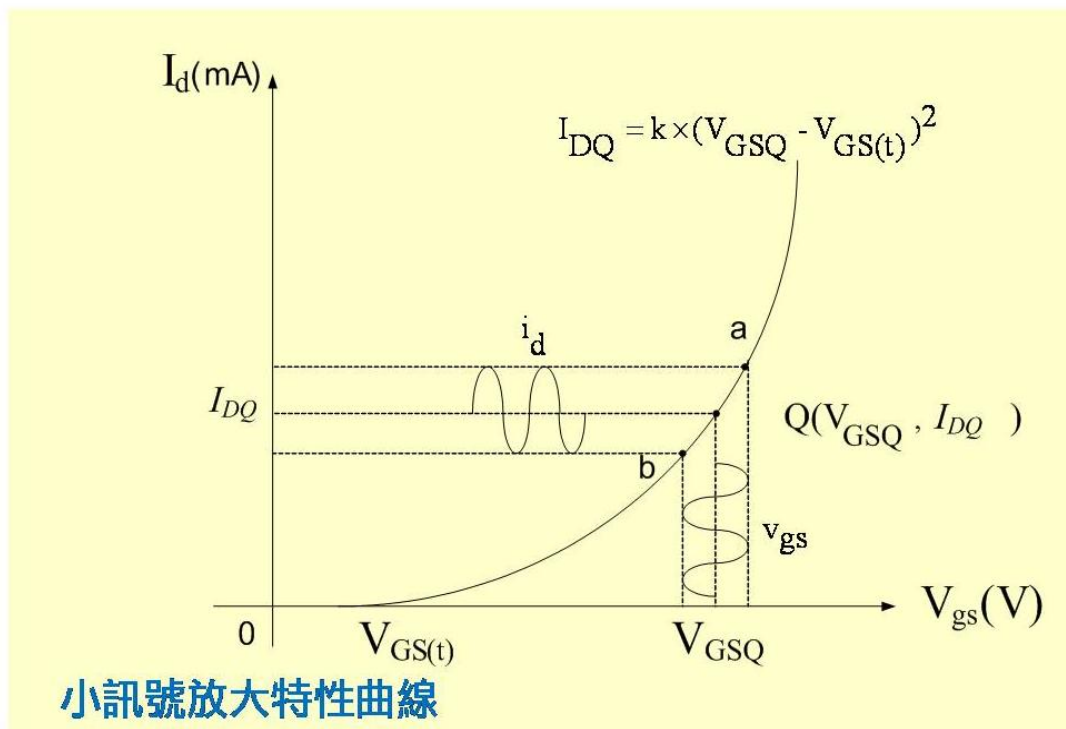
P-channel

N-channel

一、FET放大與小訊號動作原理

FET放大原理

當輸入信號 V_{gs} 電壓夠小時，其放大區域線段a、b兩點近似於直線，屬於線性放大特性，輸出為不失真之放大信號 i_d 電流。

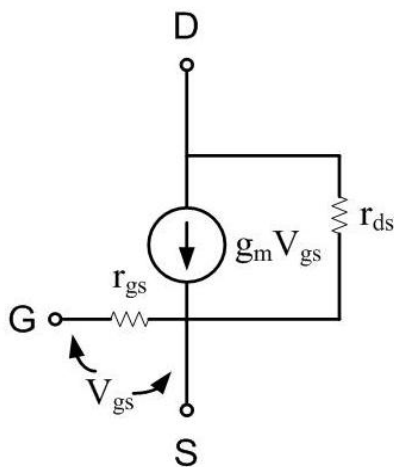


一、FET放大與小訊號動作原理

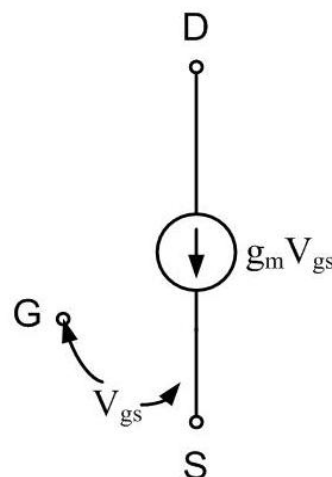
FET等效電路

公式： $I_d = g_m V_{gs}$

閘極-源極間的內部阻抗以 r_{gs} 表示，汲極與源極之間有一個電流源 $g_m V_{gs}$ ，另外，包含汲極-源極間內部阻抗 r_{ds} 。其中將 r_{gs} 假設成無限大值，使得閘極與源極間變成開路電路，也假設 r_{ds} 足夠大到可以忽略。



完整等效電路

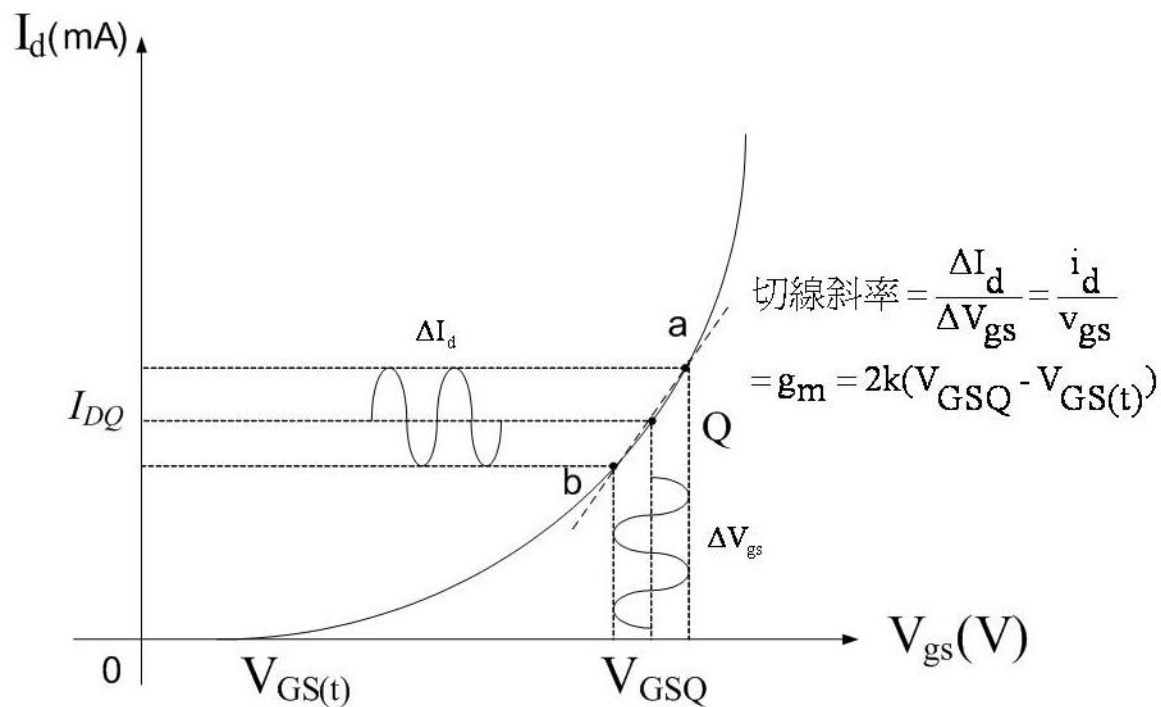


簡化等效電路

一、FET放大與小訊號動作原理

FET小信號互導增益 g_m

下圖為增強型MOSFET工作於夾止飽和區時，輸入輸出 $V_{gs}-I_d$ 特性曲線。



一、FET放大與小訊號動作原理

輸入電壓 $V_{gs} = V_{GSQ} + v_{gs}$

輸出電流 $I_d = I_{DQ} + i_d$

$I_d = k \times (V_{gs} - V_{GS(t)})^2$ ，代入 $I_d = I_{DQ} + i_d$ 及 $V_{gs} = V_{GSQ} + v_{gs}$ ，得

$$\begin{aligned} I_{DQ} + i_d &= k \times (V_{GSQ} + v_{gs} - V_{GS(t)})^2 = k \times [(V_{GSQ} - V_{GS(t)}) + v_{gs}]^2 \\ &= k \times (V_{GSQ} - V_{GS(t)})^2 + 2k \times (V_{GSQ} - V_{GS(t)})v_{gs} + k \times v_{gs}^2 \\ &= I_{DQ} + 2k \times (V_{GSQ} - V_{GS(t)})v_{gs} + k \times v_{gs}^2 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow i_d = 2k \times (V_{GSQ} - V_{GS(t)})v_{gs}$$

可得增強型MOSFET的小信號互導增益

$$g_m = \frac{\Delta I_d}{\Delta V_{gs}} = \frac{i_d}{v_{gs}} = 2k \times (V_{GSQ} - V_{GS(t)})$$

一、FET放大與小訊號動作原理

Q

已知N通道增強型MOSFET工作於夾止飽和區，輸入偏壓 $V_{GSQ}=3V$ ，臨界電壓 $V_{GS(t)}=1V$ ，參數 $k=0.5mA/V^2$ ，試求輸出直流偏壓電流 $I_{DQ}=?$
小信號互導增益 $g_m=?$

一、FET放大與小訊號動作原理

A

輸出直流偏壓電流：

$$I_{DQ} = k \times (V_{GSQ} - V_{GS(t)})^2 = 0.5 \times (3 - 1)^2 = 2(\text{mA})$$

小信號互導增益：

$$g_m = 2k \times (V_{GSQ} - V_{GS(t)}) = 2 \times 0.5 \times (3 - 1) = 2(\text{mA/V}) \text{ 或}$$

$$g_m = 2\sqrt{k \times I_{DQ}} = 2\sqrt{0.5 \times 2} = 2(\text{mA/V})$$

一、FET放大與小訊號動作原理

FET電壓增益

理想FET等效電路加上外接汲極交流電阻

$$\text{交流電壓增益} = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}$$

其中 $V_{\text{in}} = V_{\text{gs}}$ 且 $V_{\text{out}} = V_{\text{ds}}$

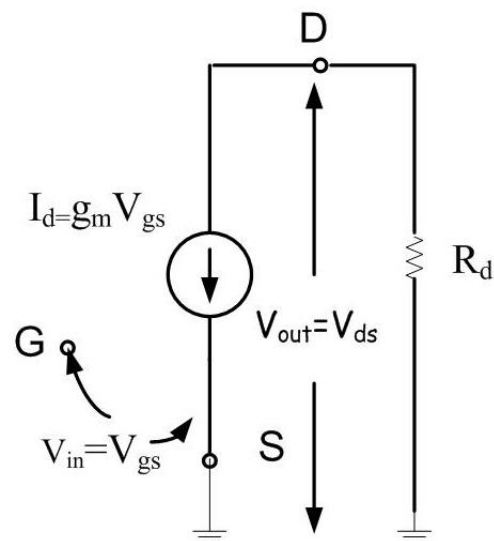
所以電壓增益公式： $A_v = \frac{V_{\text{ds}}}{V_{\text{gs}}}$

從等效電路可以得出 $V_{\text{ds}} = I_{\text{d}} R_{\text{d}}$

根據互導的定義 $V_{\text{gs}} = \frac{I_{\text{d}}}{g_{\text{m}}}$

$$\Rightarrow A_v = \frac{I_{\text{d}} R_{\text{d}}}{\frac{I_{\text{d}}}{g_{\text{m}}}} = \frac{g_{\text{m}} I_{\text{d}} R_{\text{d}}}{I_{\text{d}}}$$

$$\Rightarrow A_v = g_{\text{m}} R_{\text{d}}$$



外接交流汲極電阻時的
簡化FET等效電路

一、FET放大與小訊號動作原理

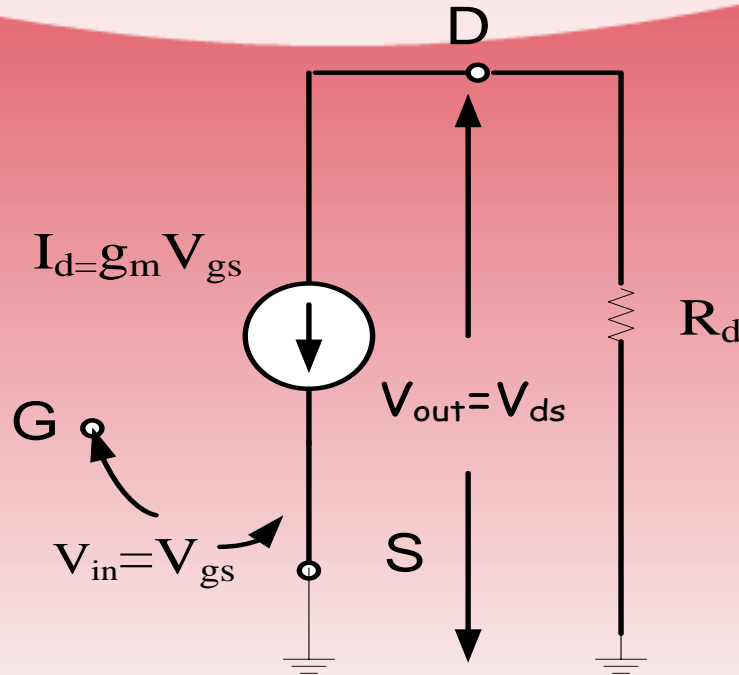
Q

某FET的 $g_m=5\text{mS}$ 。如果外接交流汲極阻抗是 $1.2\text{k}\Omega$ ，則理想狀況下的電壓增益為多少？

一、FET放大與小訊號動作原理

A

$$A_v = g_m R_d = (5mS)(1.2k\Omega) = 6$$



一、FET放大與小訊號動作原理

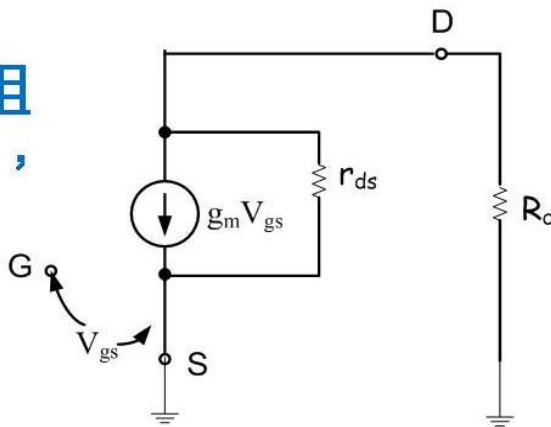
r_{ds} 對增益的影響

如果考慮FET汲極-源極間內部阻抗，它將與 R_d 並聯。

如果 r_{ds} 沒有比 R_d 大很多(至少大10倍以上)，

電壓增益將降低為 $A_v = g_m \left(\frac{R_d r_{ds}}{R_d + r_{ds}} \right)$

包含汲極-源極內部阻抗 r_{ds} 的FET等效電路，
 r_{ds} 與 R_d 並聯



一、FET放大與小訊號動作原理

Q

FET的 $g_m=5\text{mS}$ ，外接交流汲極阻抗是 $1.2\text{k}\Omega$ ， $r_{ds}=10\text{k}\Omega$ ，試求考慮 r_{ds} 影響的電壓增益。

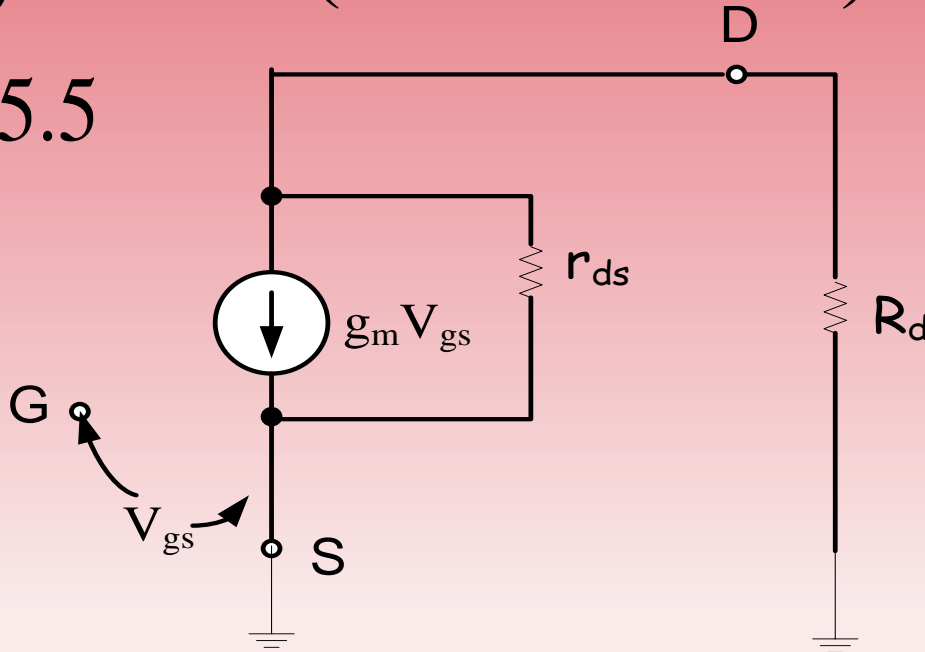
一、FET放大與小訊號動作原理

A

R_{ds} 可以等效的視為與
外接交流汲極電阻 R_d 並聯。

$$A_v = g_m \left(\frac{R_d r_{ds}}{R_d + r_{ds}} \right) = (5mS) \left(\frac{(1.2k\Omega)(10k\Omega)}{1.2k\Omega + 10k\Omega} \right)$$
$$= (5mS)(1.1k\Omega) = 5.5$$

因為 r_{ds} 與 R_d 並聯，
所以電壓增益比
上一例題低。

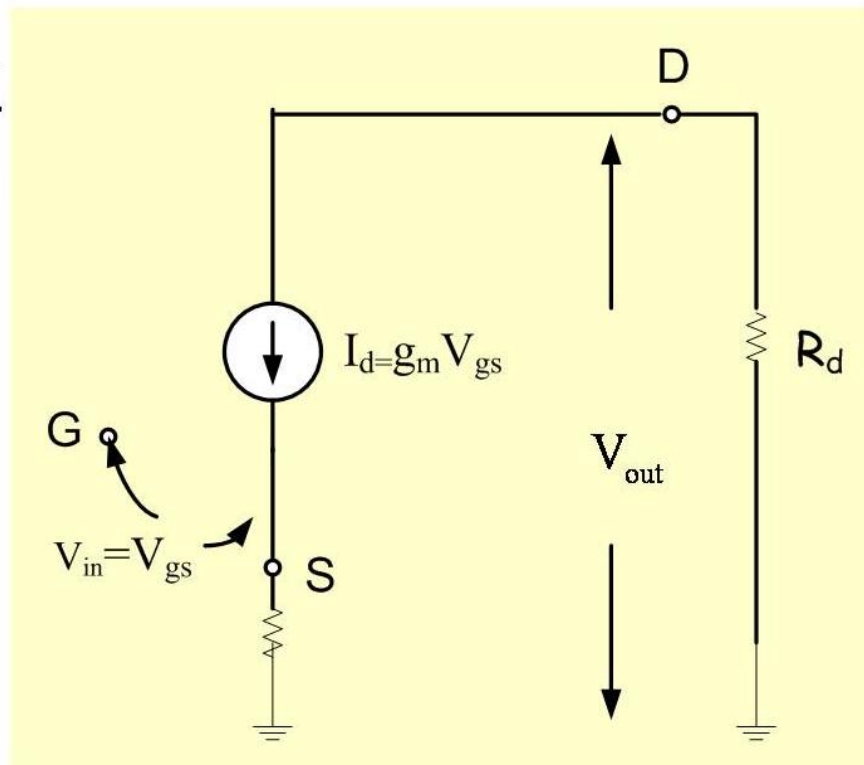


一、FET放大與小訊號動作原理

外接源極電阻對增益的影響

在FET源極端與接地端間加入外部電阻
閘極對地的總輸入電壓為 $V_{in} = V_{gs} + I_d R_s$
 R_d 兩端取得的輸出電壓為 $V_{out} = I_d R_d$
所以電壓增益公式

$$\Rightarrow A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_d R_d}{V_{gs} + I_d R_s} = \frac{g_m V_{gs} R_d}{V_{gs} + g_m V_{gs} R_s}$$
$$= \frac{g_m V_{gs} R_d}{V_{gs} (1 + g_m R_s)} = \frac{g_m R_d}{1 + g_m R_s}$$



一、FET放大與小訊號動作原理

Q

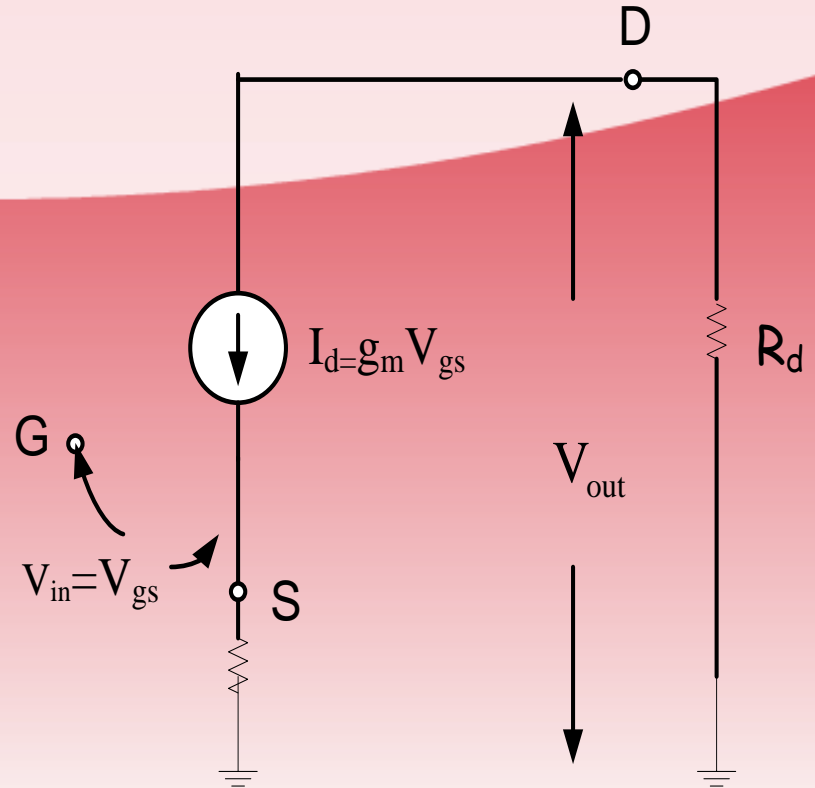
FET的 $g_m=5\text{mS}$ ，外接交流汲極阻抗是 $1.2\text{k}\Omega$ ，試求以 R_d 為輸出電壓時的電壓增益， $R_s=500\Omega$ ，省略 r_{ds} 。

一、FET放大與小訊號動作原理

A

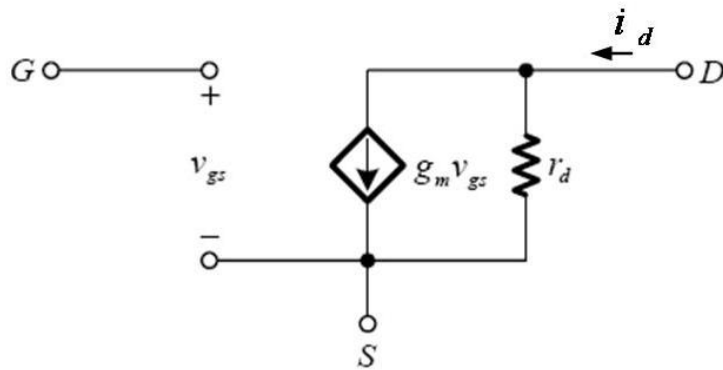
$$A_v = \frac{g_m R_d}{1 + g_m R_s} = \frac{(5\text{mS})(1.2\text{k}\Omega)}{1 + (5\text{mS})(500\Omega)} = \frac{6}{1 + 2.5} = 1.71$$

因為多了 R_s ，
降低了電壓增益。

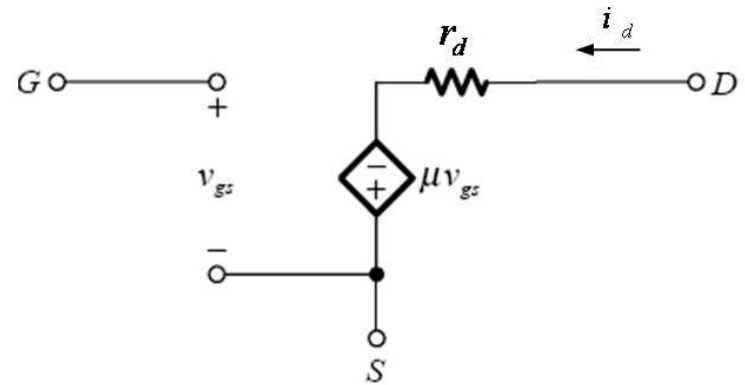


一、FET放大與小訊號動作原理

小訊號模型



諾頓等效模型



戴維寧等效模型

FET的低頻小訊號模型

註：諾頓與戴維寧等效電路的轉換規則可知： $V_{Th} = I_N R_{Th}$ ，
戴維寧電壓源的正端就是諾頓電流源的箭頭位置。

二、共源極放大器

共源極放大器

以閘極端為輸入端、汲極端為輸出端、源極端共接端之放大組態，稱為共源極(CS)放大。

- ◆ 顯示n通道JFET共源極自己偏壓電路，交流信號源以電容耦合到閘極。

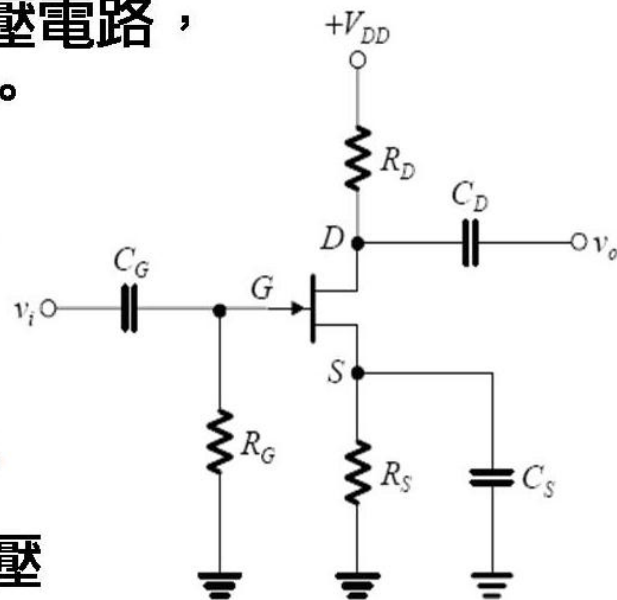
- ◆ 電阻 R_G ：

1、維持閘極電壓值約為直流0V
(因為 I_{GSS} 相當小)

2、通常具有數M Ω 電阻值，避免對交流信號源造成負載效應。

- ◆ R_S 兩端的電壓降可作為偏壓電壓

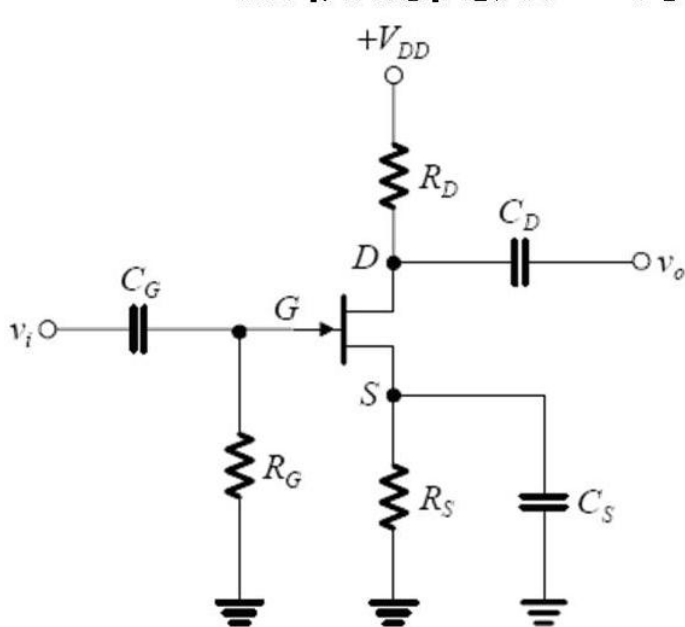
- ◆ 電容 C_S 保持FET源極端實際上交流接地



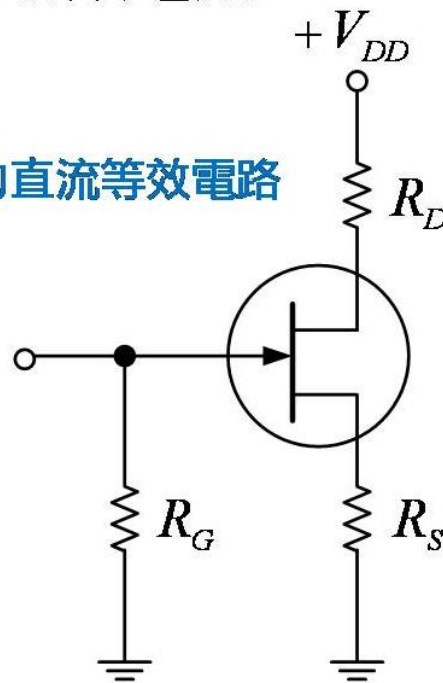
二、共源極放大器

直流分析

要分析JFET共源極放大器，首先必須決定直流偏壓值，要完成此項工作，可以將所有的電容器視為開路，得出直流等效電路。



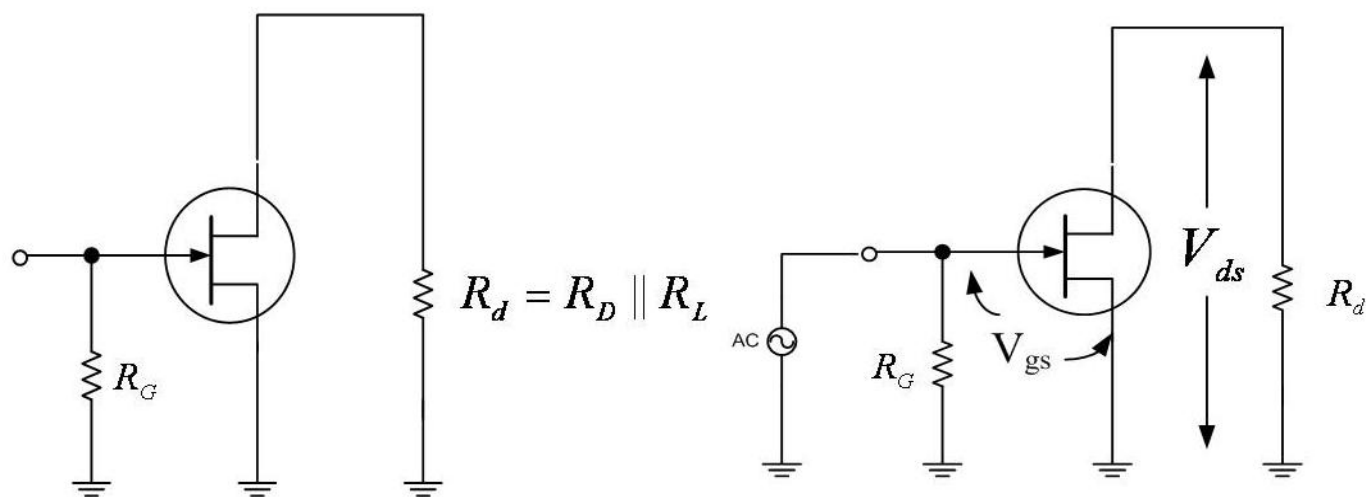
放大器的直流等效電路



二、共源極放大器

交流等效電路

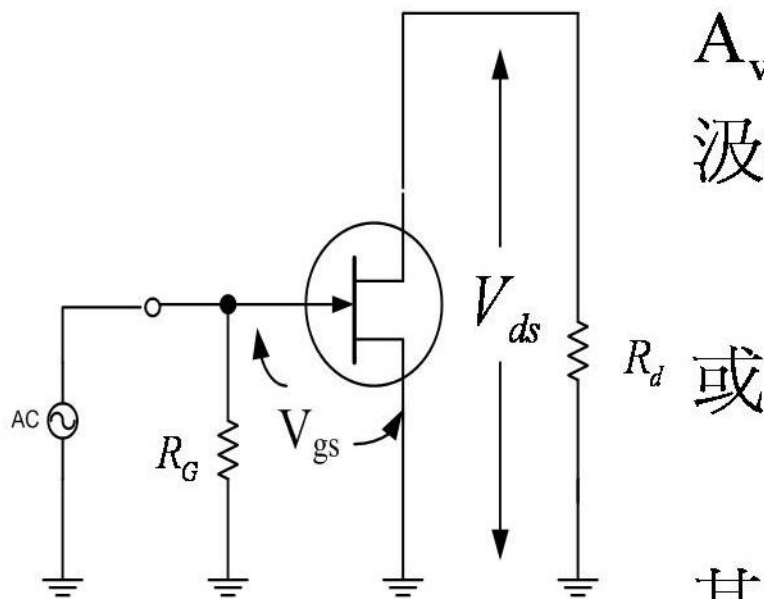
依據信號頻率 $X_c \cong 0$ 的假設，將電容器短路。
基於電壓源沒有內阻的假設，將直流電源以
接地端取代。 V_{DD} 端為交流零電位，所以視
同交流接地



二、共源極放大器

電壓增益

由FET電壓增益公式，可應用在共源極放大電路上



$$A_v = g_m R_d$$

汲極的輸出信號電壓 V_{ds} 為

$$V_{out} = V_{ds} = A_v V_{gs}$$

或

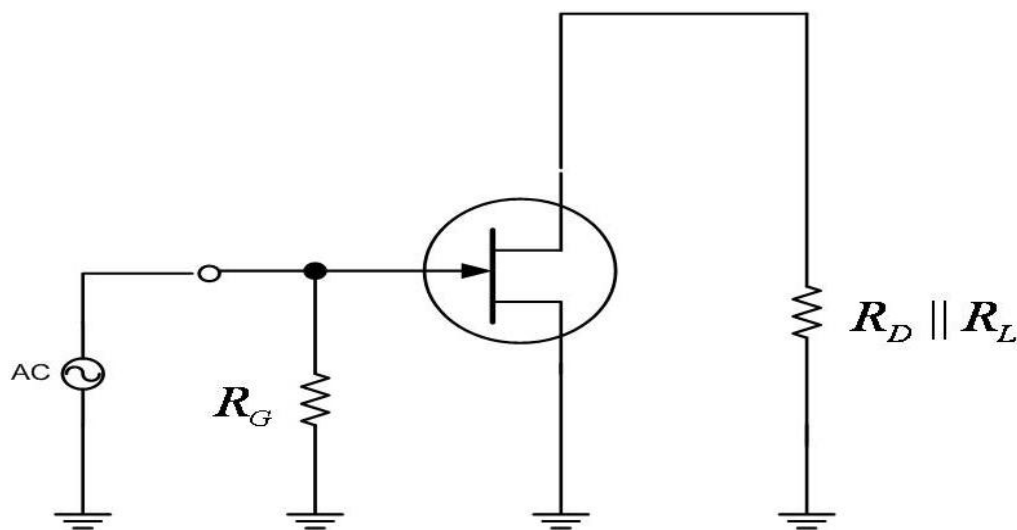
$$V_{out} = g_m R_d V_{in}$$

其中 $R_d = R_D \parallel R_L$ 和 $V_{in} = V_{gs}$

二、共源極放大器

交流負載對電壓增益的影響

- ◆ 當**負載**經由耦合電容器連接到放大器輸出端，汲極交流阻抗可以實際上視為 R_D 和 R_L 的並聯值，因為 R_D 的上端是交流接地。
- ◆ 汲極交流總電阻公式：
$$R_d = \frac{R_D R_L}{R_D + R_L}$$



二、共源極放大器

Q

如果將 $4.7\text{k}\Omega$ 的負載電阻交流耦合放大器的輸出端，($R_D=3.3\text{k}\Omega$)則輸出電壓的有效值為多少？

二、共源極放大器

A

交流汲極阻抗為：

$$R_d = \frac{R_D R_L}{R_D + R_L} = \frac{(3.3\text{k}\Omega)(4.7\text{k}\Omega)}{8\text{k}\Omega} = 1.94\text{k}\Omega$$

