

# 實 習 十 五

## 單載子接面場效電體交流小訊號放大電路

### — 共源極放大器

#### ◆ 實習目的

1. 學習單載子接面場效電晶體放大電路之交流小訊號基本特性。
2. 藉由實習過程，以瞭解共源極放大電路之交流小訊號原理與測量方法。



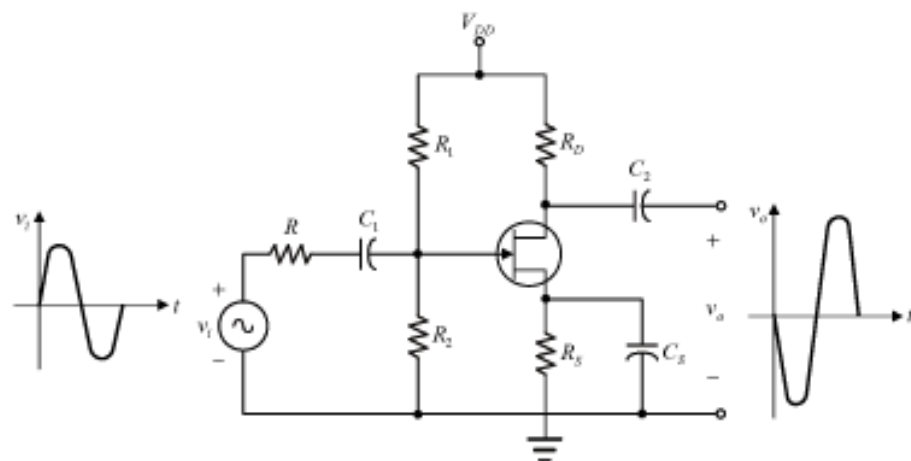
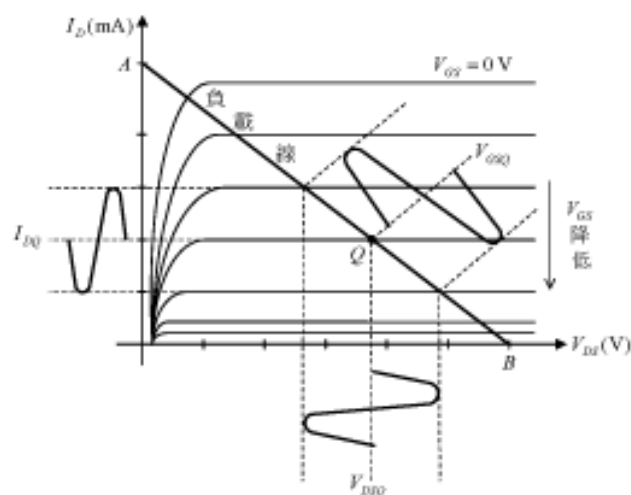
## 相 關 知 識

- ◆ **直流偏壓**可用來提供電晶體放大器所需之電源，此種偏壓純粹是一種直流操作，其目的為建立放大器之**直流工作點**，當交流訊號輸入時，便會產生一個在工作點附近變化之電壓與電流，以提供將交流訊號作完整而無失真放大所需之**能量**。
- ◆ 本實習亦僅討論單載子接面場效電晶體 (JFET) 放大電路之**交流分析**，稱為交流小小訊號放大電路分析 (針對**中頻信號**之交流小訊號分析)，首先討論 JFET 交流小訊號放大器原理與交流小訊號等效模型後，接著探討適合用作為中級之功率放大器，即**共源極** (CS) 放大器的交流小訊號特性，包括**電壓增益** (Voltage Gain)、**輸入阻抗** (Input Impedance) 與**輸出阻抗** (Output Impedance) 等之交流小訊號特性。



# 單載子接面場效電晶體交流小訊號放大電路之原理

- ◆ 以共源極放大電路為例，以討論 FET 之**小訊號放大原理**，當  $v_i$  加入放大電路後，電路所產生之  $i_d$  流經  $R_D$  時，便可得到放大後之  $v_o = i_d \cdot R_D$ ，因小訊號分析僅考慮**交流訊號**，因此應將  $V_{DD}$  視為接地，故  $v_o$  之極性會與  $v_i$  **相反**，如下圖所示。

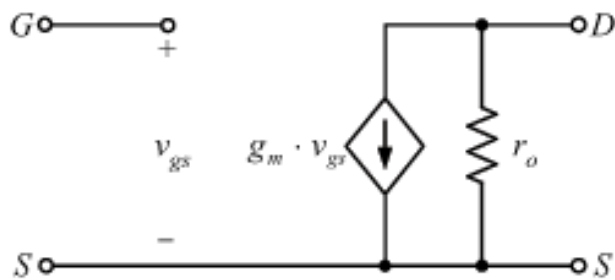


- ◆ 實際上 FET 為**非線性元件**，因此對電晶體電路作精確分析是一件相當困難之工作，而當電晶體操作於**飽和區**時，其輸出特性曲線幾乎是**線性**，故可用**近似等效線性模型**來模擬 FET 的特性，以**簡化**放大電路之分析工作。



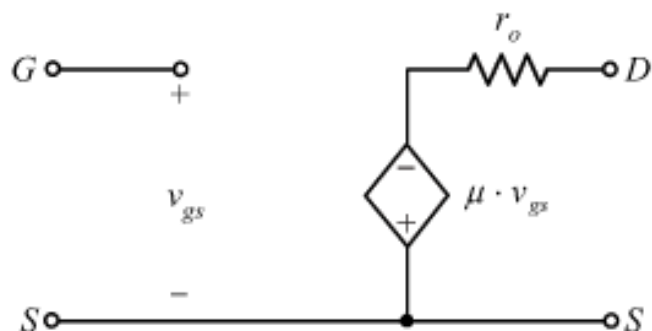
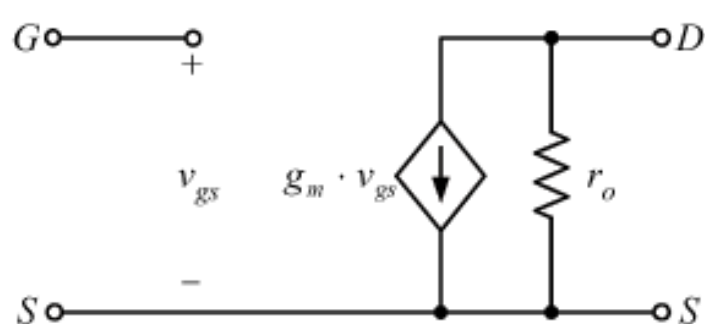
# 接面場效電晶體 (JFET) 之小訊號模型

- ◆ 因 JFET 直接使用輸入電壓，以控制輸出電流之大小，因此可將 FET 視為**電壓控制之電流源**。因放大電路中之**每一個參數**，皆會隨**直流偏壓**所決定之電壓與電流作改變，而**小訊號等效模型**是模擬電晶體電路之電壓與電流在**工作點**附近變化之情形，亦即當交流輸入訊號所產生之電壓與電流在工作點附近變動時，可由等效電路模型了解**輸入訊號與輸出訊號間**之電流與電壓的關係。
- ◆ 因 FET 可視為**電壓控制之電流源**，若僅考慮**交流小訊號**（忽略直流成份），即可繪出 JFET 之**交流小訊號等效電路**，如下圖所示，其中**互導**（ $g_m$ ）代表**轉移特性曲線對應工作點處**的斜率，單位為姆歐（ $S = 1/\Omega$ ），因  $g_m$  與  $v_{gs}$  會直接影響  $i_d$  之大小，即 FET 之輸出電流為  $g_m \cdot v_{gs}$ ，故 FET 為電壓控制電流之電子元件；而輸出電阻（ $r_o$ ）為**輸出特性曲線在工作點處**的斜率，即  $r_o$  為**通道長度調變**所產生之阻抗。



- ◆ 觀察右下圖可知，此 FET 之交流小訊號等效電路，採用諾頓模型來表示。若將其改為戴維寧模型，可得另一種形式之交流小訊號等效電路，如右下圖所示，其中  $\mu$  為 FET 中一個相當重要參數，稱為放大因素 (Amplifier Factor)。根據基本電路理論，可得參數  $\mu$  為

$$\mu = g_m \cdot r_o$$



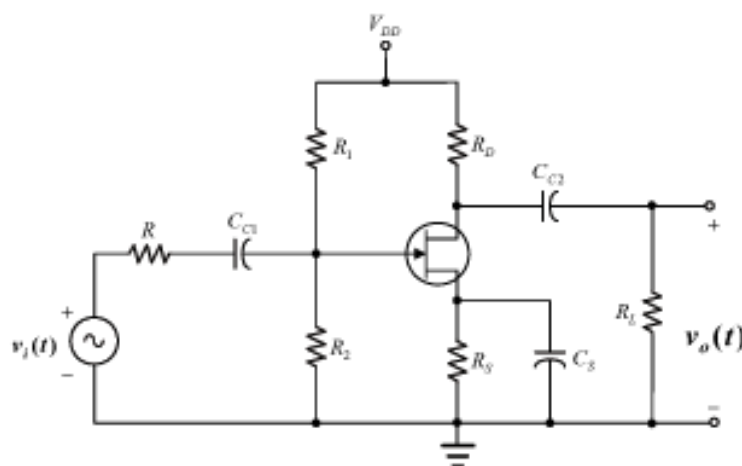
## 共源極 (CS) 放大器之交流小訊號分析

- ◆ 小訊號分析是指電子電路工作於**中頻帶**之分析，在此頻率範圍內的所有耦合電容與旁路電容等**微法拉** ( $\mu F$ ) 級之容抗皆相當小，故可用**短路**來取代；而對極際電容與寄生電容等**微微法拉** ( $pF$ ) 級之容抗會變得相對較大，故可用**開路**來取代。
- ◆ 因 JFET 放大器之小訊號分析主要是討論放大器之**交流特性**，因此進行放大電路之小訊號分析時，可**忽略直流電壓**之影響，即假設直流電源等於零，並採**交流小訊號模型**來取代 JFET，以簡化電路分析之複雜度。



## 無源極電阻之共源極放大器

- ◆ 若  $v_i$  經由耦合電容進入 JFET 之**閘極**，而輸出訊號是由**汲極**取出，便可構成**共源極**放大電路，如右圖所示。觀察右圖可知，利用旁路電容  $C_S$  與源極電阻  $R_S$  **並聯**，對交流小訊號而言， $R_S$  會被旁路電容短路；而對直流偏壓而言，此旁路電容可視為開路，如此既可**提高**直流偏壓之穩定性，又**不會降低**此放大器之交流增益。



- ◆ 欲對下圖作**交流小訊號分析**，首先必須將所有耦合電容 ( $C_1$ 、 $C_2$ ) 與旁路電容 ( $C_S$ ) **短路**，並移掉所有之直流電源（即將直流電壓  $V_{DD}$  **接地**）後，接著以**小訊號模型**來取代 JFET 後，即可得此放大器之**小訊號等效電路**。接著利用小訊號等效電路，以分析**共源極放大器**之交流小訊號特性，包括**電壓增益**  $A_v$ 、**輸入阻抗**  $Z_i$  與**輸出阻抗**  $Z_o$  等。





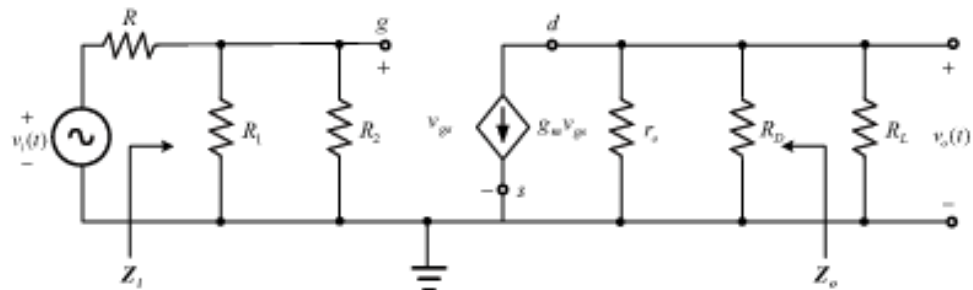
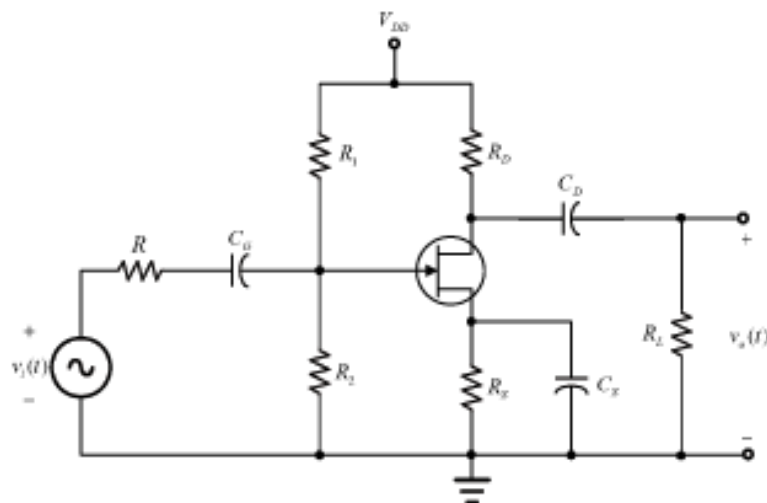
(a) 電壓增益  $A_v = \frac{v_o}{v_i}$  :

利用下圖之輸出迴路可得

$$v_o = -g_m \cdot v_{gs} \cdot (r_o \parallel R_D \parallel R_L) = -g_m \cdot v_{gs} \cdot R'_o \quad (\text{其中 } R'_o = r_o \parallel R_D \parallel R_L)$$

整理上式可得放大電路之電壓增益為

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_{gs}} \cdot \frac{v_{gs}}{v_i} = -g_m \cdot R'_o \cdot \frac{R_G}{R_G + R} \quad (\text{其中 } R_G = R_1 \parallel R_2)$$



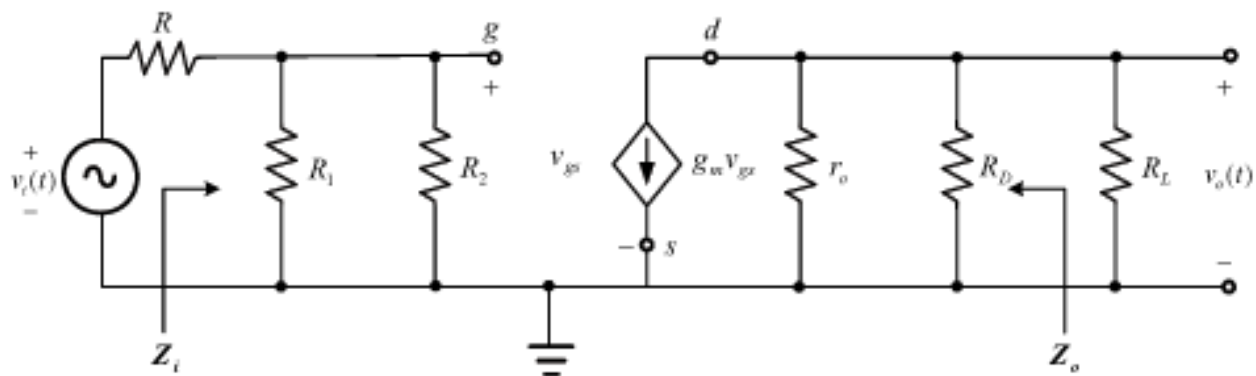


(b) **輸入阻抗**  $Z_i$  : 因 JFET 之輸入阻抗相當大，因此利用下圖之**輸入迴路**可得

$$Z_i = R_1 \parallel R_2 = R_G$$

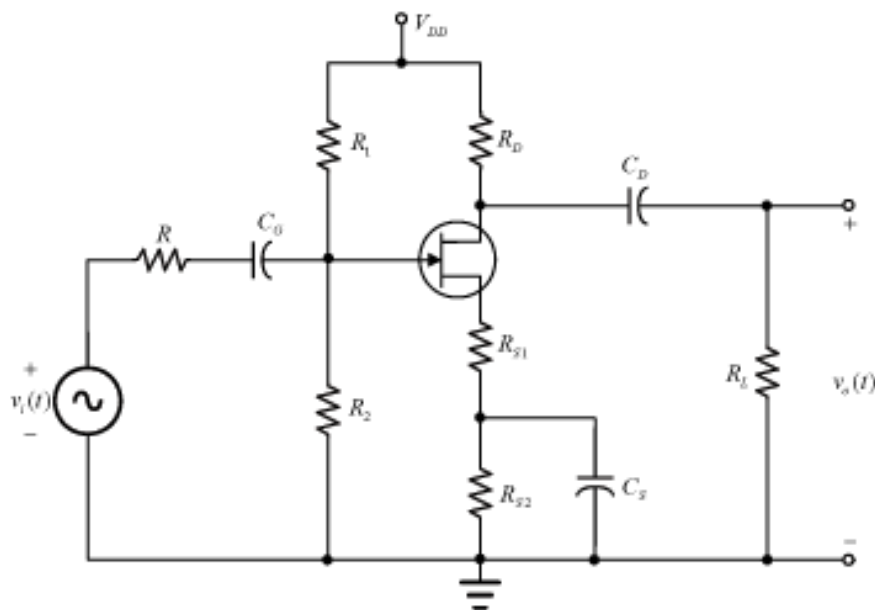
(c) **輸出阻抗**  $Z_o$  : 利用下圖之**輸出迴路**可得

$$Z_o = r_o \parallel R_D$$



## 具源極電阻之共源極放大器

- ◆ 若在共源極放大電路加上一個  $R_{S1}$  (不利用旁路電容與  $R_{S1}$  並聯)，而保留另一個  $R_{S2}$  (利用旁路電容與  $R_{S2}$  並聯)，便可組成具源極電阻之共源極放大電路，如右圖所示。
- ◆ 欲進行右圖之交流小訊號分析，首先將所有耦合電容 ( $C_1$ 、 $C_2$ ) 與旁路電容 短路，並移掉所有之直流電源(即將直流電壓  $V_{DD}$  接地)，接著以小訊號模型來取代 JFET 後，即可得此放大器之小訊號等效電路。接著利用小訊號等效電路，以分析具源極電阻之共源極放大電路的交流小訊號特性，包括  $A_v$ 、 $Z_i$  與  $Z_o$  等。



(a) **電壓增益**  $A_v = \frac{v_o}{v_i}$  : 利用 KVL 於右圖之**輸入迴路**可得

$$v_{gs} = v_g - v_s = \frac{R_G \cdot v_i}{R + R_G} - i_o \cdot R_{S1}$$

其中  $R_G = R_1 \parallel R_2$ 。

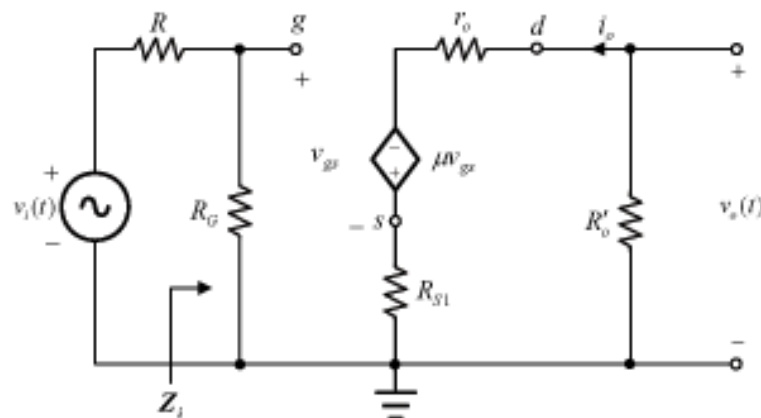
再利用 KVL 於右圖之**輸出迴路**可得

$$\mu \cdot v_{gs} = i_o \cdot (r_o + R_{S1} + R'_o)$$

接著將  $v_{gs}$  代入上式可得  $i_o = \frac{R_G \cdot v_i}{R + R_G} \cdot \frac{\mu}{(1 + \mu) \cdot R_{S1} + r_o + R'_o}$  , 利用上圖之**輸出迴路**可得

$$v_o = -i_o \cdot R'_o = \frac{-v_i \cdot R_G}{R + R_G} \cdot \frac{\mu \cdot R'_o}{(1 + \mu) \cdot R_{S1} + r_o + R'_o}$$

最後整理上式，可得放大電路之**電壓增益**  $A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-R_G}{R + R_G} \cdot \frac{\mu \cdot R'_o}{(1 + \mu) \cdot R_{S1} + r_o + R'_o}$ 。



(b) **輸入阻抗**  $Z_i$  :

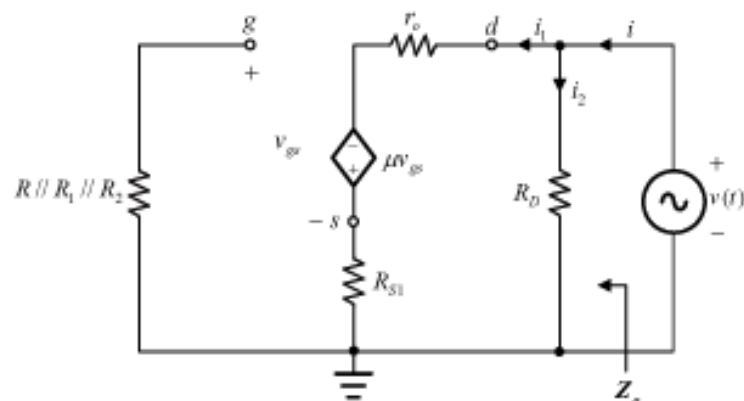
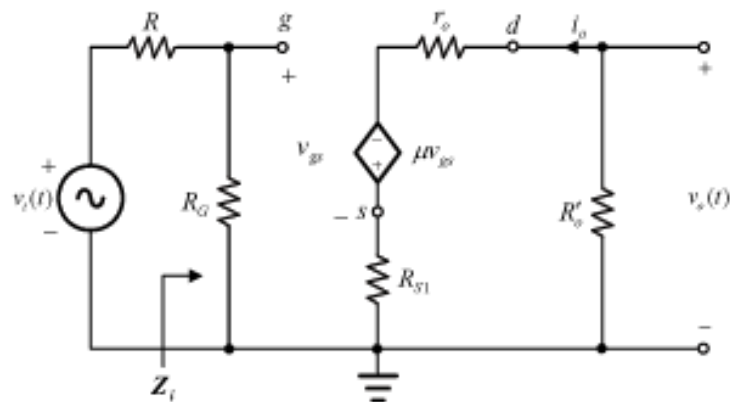
因 JFET 之輸入阻抗相當大，因此觀察右圖之**輸入迴路**可得  $Z_i = R_G$  。

其中  $R_G = R_1 // R_2$  。

(c) **輸出阻抗**  $Z_o$  :

因輸出迴路與相依性電壓源**串聯**，而相依性電壓源之阻抗無法直接估計，因此必須根據定義，令輸入訊號  $v_i$  等於**零**(即將  $v_i$  接地)與**移去負載電阻**  $R_L$ ，並在輸出端加上一**電壓**  $v$ ，如右圖所示，即求得放大器之**輸出阻抗**  $Z_o$  為

$$Z_o = \frac{v}{i} \Big|_{v_s = 0, R_L \rightarrow \infty}$$



利用右圖之輸入迴路可得

$$v_{gs} = -i_1 \cdot R_{S1}$$

再利用 KVL 於右圖之輸出迴路可得

$$v + \mu \cdot v_{gs} = i_1 \cdot (r_o + R_{S1})$$

整理上面兩式可得  $i_1$  為

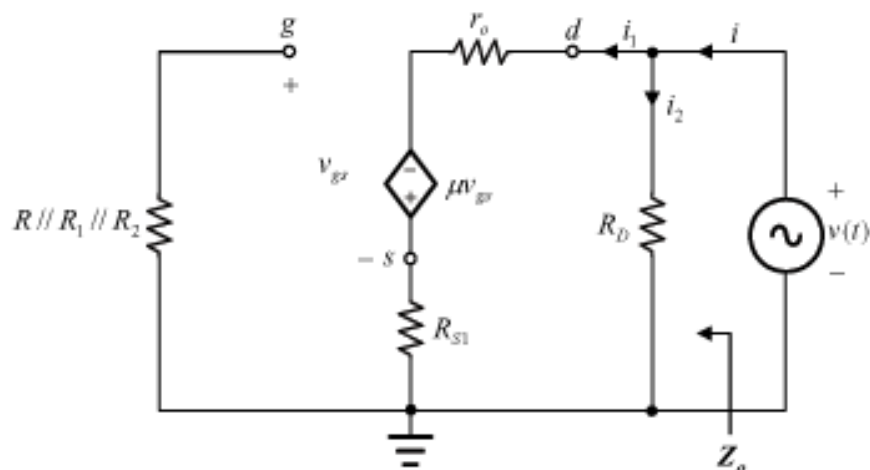
$$i_1 = \frac{v}{r_o + (1 + \mu) \cdot R_{S1}}$$

利用 KCL 於輸出迴路可得  $i$  為

$$i = i_1 + i_2 = \frac{v}{R_D} + \frac{v}{r_o + (1 + \mu) \cdot R_{S1}}$$

整理上式可得放大器之輸出阻抗  $Z_o$  為

$$Z_o = \frac{v}{i} = \frac{1}{\frac{1}{R_D} + \frac{1}{r_o + (1 + \mu) \cdot R_{S1}}} = R_D // [r_o + (1 + \mu) \cdot R_{S1}]$$



# 實習步驟與結果

## (一) 無源極電阻之共源極放大器

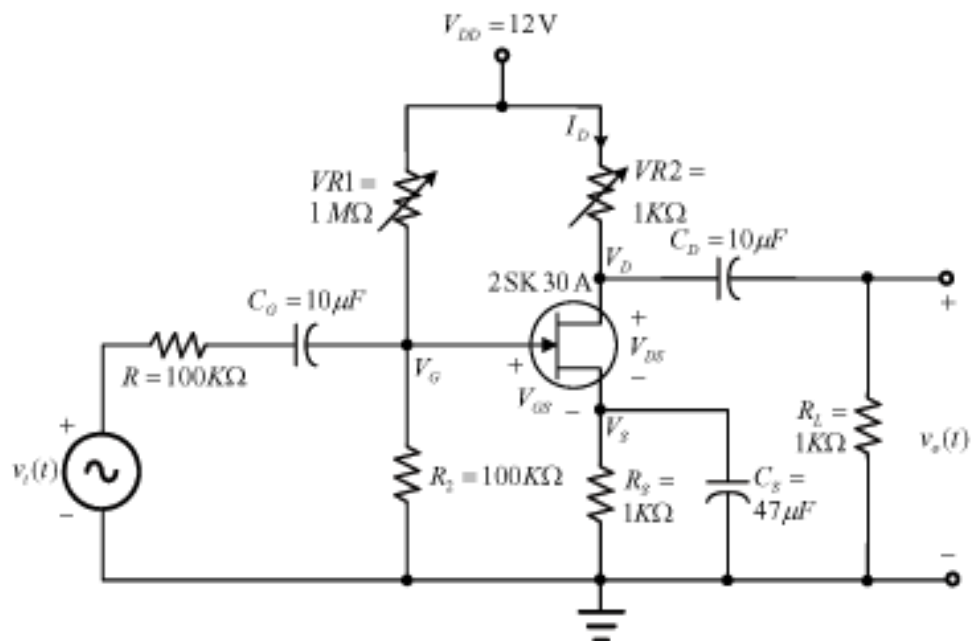


表 15-1 無源極電阻之共源極放大器的直流電壓與電流

$$VR1 = \underline{343K} \ \Omega, \ VR2 = \underline{892} \ \Omega$$

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
$I_{DSS} (mA)$		3.6
$V_{GS(off)} (V)$		-2
$I_D (mA)$	3.1	3.17
$V_G (V)$	2.7	2.68
$V_D (V)$	9.23	9.15
$V_S (V)$	3.1	3.11
$V_{GS} (V)$	-0.4	-0.412
$V_{DS} (V)$	6.1	6





表 15-2 無源極電阻之共源極放大器的交流電壓波形

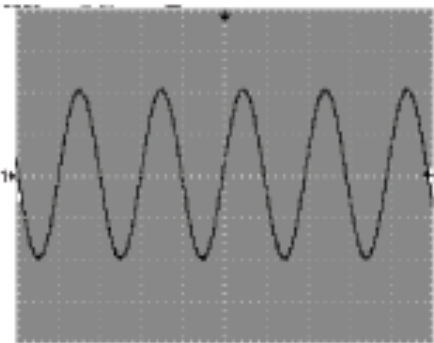
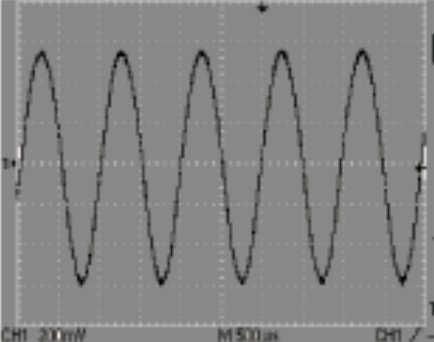
 <p>CH1 500mV M 500μs CH1 /</p>	<p><u>500m</u> Volts/DIV  <b>峰值電壓：</b> <u>1</u> V  <u>500μ</u> Time/DIV  <b>週期：</b> <u>1m</u> sec  <b>頻率：</b> <u>1K</u> Hz</p>
 <p>CH1 200mV M 500μs CH1 /</p>	<p><u>200m</u> Volts/DIV  <b>峰值電壓：</b> <u>0.58</u> V  <u>500μ</u> Time/DIV  <b>週期：</b> <u>1m</u> sec  <b>頻率：</b> <u>1K</u> Hz</p>

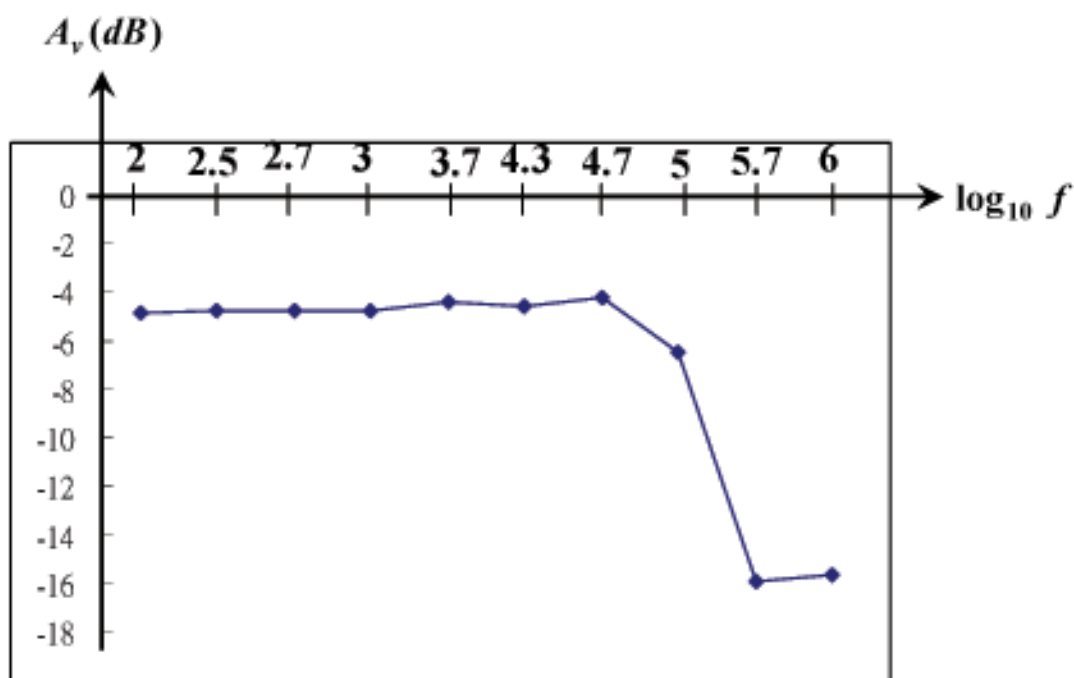
表 15-3 無源極電阻之共源極放大器的電壓增益

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
$A_v = \frac{v_o(t)}{v_i(t)}$	0.75	0.58

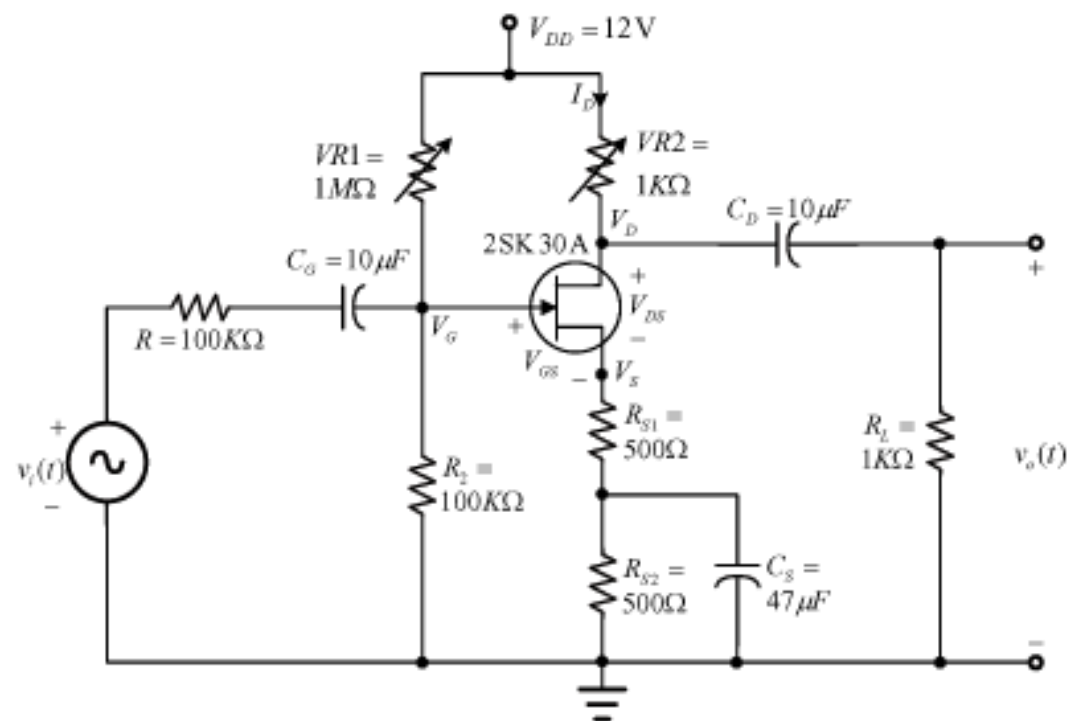


表 15-4 無源極電阻之共源極放大器的電壓增益對頻率關係

頻率 $f$ (Hz)	100	300	500	1K	5K	20K	50K	100K	500K	1M
$v_{i(p-p)}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$v_{o(p-p)}$	1.14	1.15	1.15	1.16	1.2	1.18	1.1	0.95	0.32	0.16
$A_v = \frac{v_{o(p-p)}}{v_{i(p-p)}}$	0.57	0.575	0.575	0.58	0.6	0.59	0.55	0.475	0.16	0.08



## (二) 具源極電阻之共源極放大器



**表 15-5 具源極電阻之共源極放大器的直流電壓與電流**

$$VR1 = \underline{341K} \, \Omega \text{ 、 } VR2 = \underline{970} \, \Omega$$

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
$I_D (mA)$	3.15	3
$V_G (V)$	2.72	2.56
$V_D (V)$	8.95	9.06
$V_S (V)$	3.15	3.05
$V_{GS} (V)$	-0.43	-0.474
$V_{DS} (V)$	5.8	6



表 15-6 具源極電阻之共源極放大器的交流電壓波形

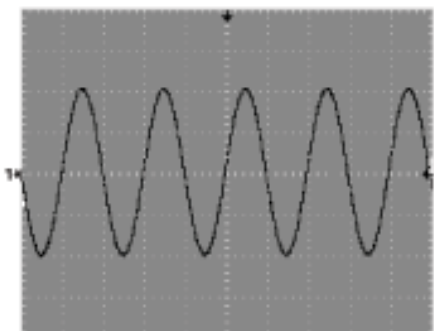
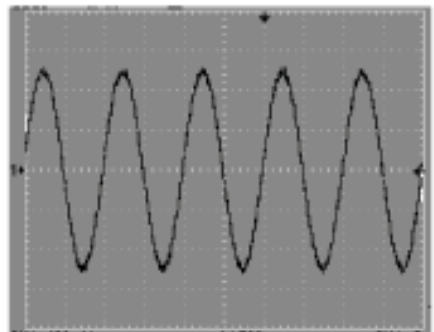
 <p>CH1 500mV M 500µs CH1 7</p>	<p><u>500m</u> Volts/DIV            峰值電壓：<u>1</u> V  <u>500µ</u> Time/DIV            週期：<u>1m</u> sec            頻率：<u>1K</u> Hz</p>
 <p>CH1 100mV M 500µs CH1 7</p>	<p><u>100m</u> Volts/DIV            峰值電壓：<u>0.26</u> V  <u>500µ</u> Time/DIV            週期：<u>1m</u> sec            頻率：<u>1K</u> Hz</p>

表 15-7 具源極電阻之共源極放大器的電壓增益

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
$A_v = \frac{v_o(t)}{v_i(t)}$	0.36	0.26



表 15-8 具源極電阻之共源極放大器的電壓增益對頻率關係

頻率 $f$ (Hz)	100	300	500	1K	5K	20K	50K	100K	500K	1M
$v_{i(p-p)}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$v_{o(p-p)}$	0.5	0.52	0.52	0.52	0.53	0.53	0.5	0.46	0.19	0.11
$A_v = \frac{v_{o(p-p)}}{v_{i(p-p)}}$	0.25	0.26	0.26	0.26	0.265	0.265	0.25	0.23	0.095	0.055

