

實習九

雙載子接面電體交流小訊號放大電路（一） --共射極放大器

實習目的

1. 學習雙載子接面電晶體放大電路之交流小訊號基本特性。
2. 藉由實驗過程，以瞭解共射極放大器之電壓放大、電流放大與功率放大等交流小訊號原理與測量方法。



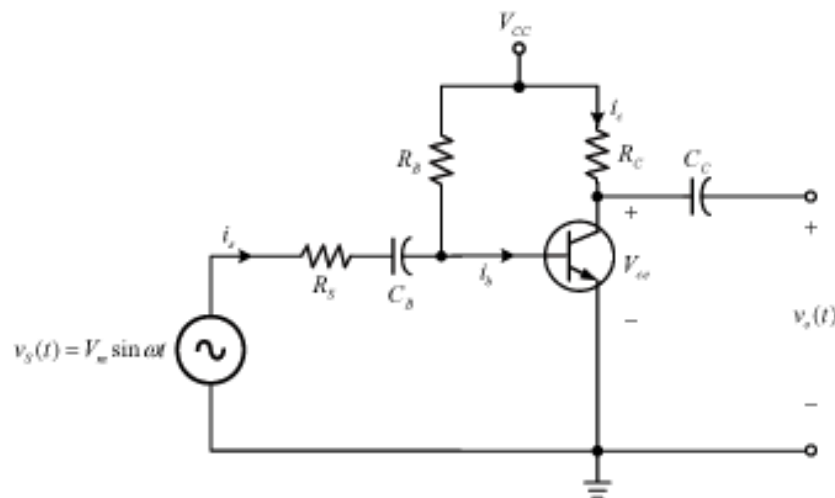
相 關 知 識

- ◆ **直流偏壓**乃是用來提供電晶體電路工作時所需之**電源**，此種偏壓純粹是一種**直流操作**，其目的乃為建立電路之**直流工作點**，當交流訊號輸入時，會產生一個在**工作點**附近變化之電壓與電流，提供電晶體能適當的將交流訊號作**完整而無失真**之放大所需之能量。
- ◆ 本實習將討論雙載子接面電晶體 (BJT) 放大器之**交流小訊號分析** (僅針對**中頻信號**之交流訊號分析)，首先討論 BJT 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**共射極 (CE) 放大器**的小訊號交流特性，包括**電流增益** (Current Gain)、**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。

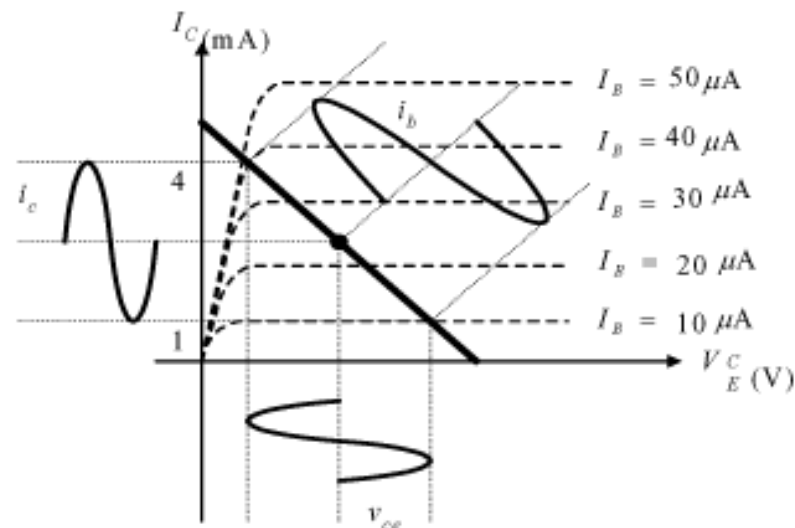


電晶體交流小訊號放大器原理

- ◆ 在電子電路中，具有**放大功能**之主動元件（如電晶體），往往能使**輸出之能量大於輸入能量**，此顯然違背**能量不滅定律**，而能支持**放大功能論點**之原因，有**直流偏壓**供給這些主動元件，以提供對**訊號放大時所增加之能量**。接著使用單級**共射極固定偏壓放大器**(如下圖所示)為例，以說明雙載子電晶體**小訊號放大原理**。
- ◆ 當對電晶體施予適當**直流偏壓**後（此偏壓必須使電晶體操作於**順向活性區**），便可得到此電路之**直流負載線與工作點（ Q 點）**，如下圖所示。



- ◆ 當於電晶體輸入端加上 $v_s = V_m \sin \omega t$ 之輸入訊號時，則 v_s 會通過 C_B 進入輸入端(基極)，同時 v_s 亦會產生輸入電流(基極電流) i_b ，而 i_b 會以 Q 點為中心，沿著負載線作等量之變化，因電晶體操作於順向活性區，故輸入電流 i_b 經由電晶體之放大 ($i_c = \beta \cdot i_b$) 後，所產生之輸出電流 i_c (集極電流) 與



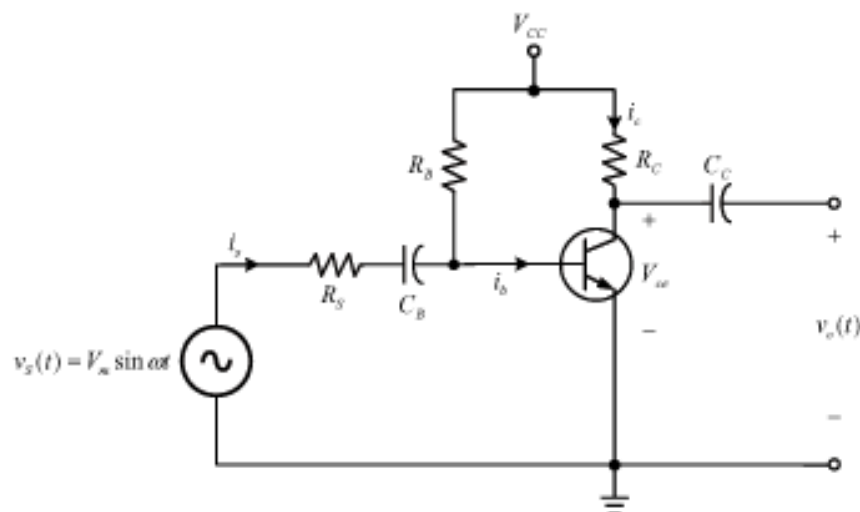
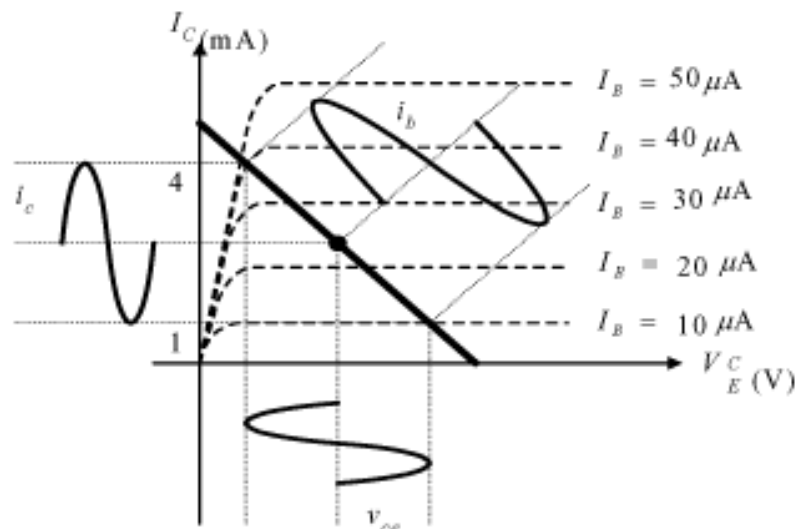
集-射極電壓 v_{ce} 亦隨之變化，此可由基極電流之變化量對 i_c 與 v_{ce} 之投影而得，如上圖所示。

- ◆ 觀察上圖可知，輸入電流(基極電流)之峰值 i_{bm} 為 15 微安 ($15\mu A$)，而輸出電流(集極電流)之峰值 i_{cm} 為 1.5 毫安 ($1.5mA$)，很明顯的，輸出電流比輸入電流增加了 100 倍，此代表電晶體具有放大交流訊號之功用。



◆ 觀察右圖可知，當**基極電流** i_b 增大時，**集極電流** i_c 會隨之增大，導致電晶體**集-射極電壓** v_{ce} 亦會變大；反之，當**基極電流** i_b 變小時，**集極電流** i_c 亦會隨之減時，導致電晶體**集-射極電壓** v_{ce} 會隨之變小。

◆ 由於不考慮直流訊號(將 V_{CC} 接地)，導致**集極電流**(輸出電流) i_c 之變化方向與**基極電流**(輸入電流) i_b **相反**(即 i_c 與 i_b **反相**)，且**集-射極電壓**(輸出電壓) v_{ce} 之極性與**輸入電壓** v_s 亦相反(即 v_s 與 v_{ce} **反相**)。



雙載子接面電晶體之混合 h 參數小訊號等效模型

- ◆ 另一種電晶體小訊號等效電路模型為**混合 h 參數小訊號模型**，由於此種小訊號模型之使用歷史較混合 r 參數小訊號等效模型久，且使用 h 參數來量測亦較 r 參數**簡單正確**，因此大多數之製造商在**電晶體規格表中**常以混合 h 參數列出，故本章主要採用**混合 h 參數小訊號模型**來對電晶體放大電路進行**小訊號分析**。

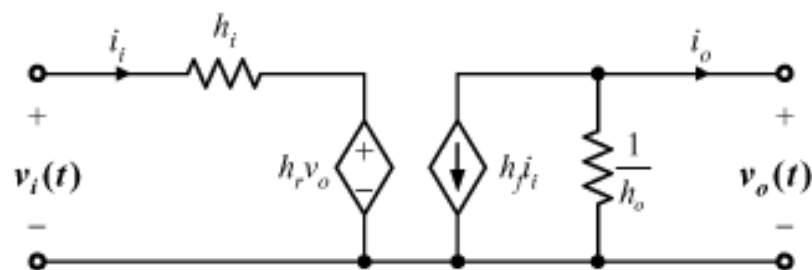
- ◆ 電晶體之**混合 h 參數之小訊號模型**，亦可用右圖之**線性雙埠網路**來代表，則右圖之**特性方程式**可表示為

$$v_i = f(i_i, v_o) \quad \text{與} \quad i_o = f(i_i, v_o)$$

- ◆ 若以**函數**之觀點，可將上兩式可改寫為

$$v_i = h_i i_i + h_r v_o$$

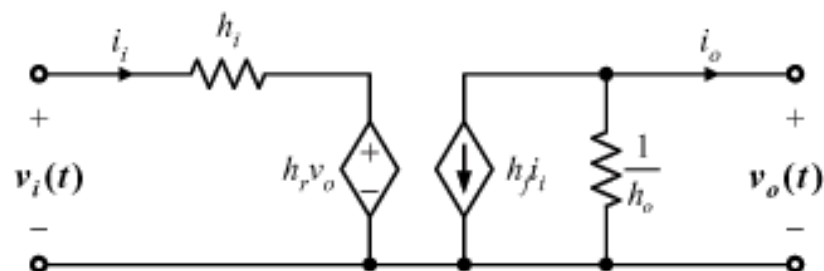
$$i_o = h_f i_i + h_o v_o$$



◆ 若以**向量分析**之觀點，可將 $v_i = h_i i_i + h_r v_o$ 與 $i_o = h_f i_i + h_o v_o$ 改寫為

$$\begin{bmatrix} v_i \\ i_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_i & h_r \\ h_f & h_o \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_i \\ v_o \end{bmatrix}$$

其中



1. h_i 式定義當**輸出短路時之輸入阻抗**，即 $h_i = \frac{v_i}{i_i} \big|_{v_o \rightarrow 0}$ 。
2. h_r 式定義當**輸入開路時之逆向電壓增益**，即 $h_r = \frac{v_i}{v_o} \big|_{i_i \rightarrow 0}$ 。
3. h_f 式定義當**輸出短路時之順向電流增益**，即 $h_f = \frac{i_o}{i_i} \big|_{v_o \rightarrow 0}$ 。
4. h_o 式定義當**輸入開路時之輸出導納**，即 $h_o = \frac{i_o}{v_o} \big|_{i_i \rightarrow 0}$ 。



不同電晶體電路組態之 h 參數表示法

- ◆ 因電晶體之電路組態可分共射極 (CE) 組態、共基極 (CB) 組態與共集極 (CC) 組態等三種，因每一種電晶體電路組態之電氣特性皆不相同，故 h 參數亦不同，因此有不同之標示方法，一般之標示方法為在 h 參數之下標加上該種組態之第一個英文字母來作區分。
- ◆ 共射極組態之 h 參數表示方法為在各個 h 參數之下標再加上 e 英文字母來表示，即可寫成為 h_{ie} , h_{re} , h_{fe} 與 h_{oe} 來代表，下表定義三種電晶體之電路組態之 h 參數表示法。

h 參數	基本定義	CE	CC	CB
h_i	輸出短路時之輸入阻抗	h_{ie}	h_{ic}	h_{ib}
h_r	輸入開路時之逆向電壓增益	h_{re}	h_{rc}	h_{rb}
h_f	輸出短路時之順向電流增益	h_{fe}	h_{fc}	h_{fb}
h_o	輸入開路時之輸出導納	h_{oe}	h_{oc}	h_{ob}



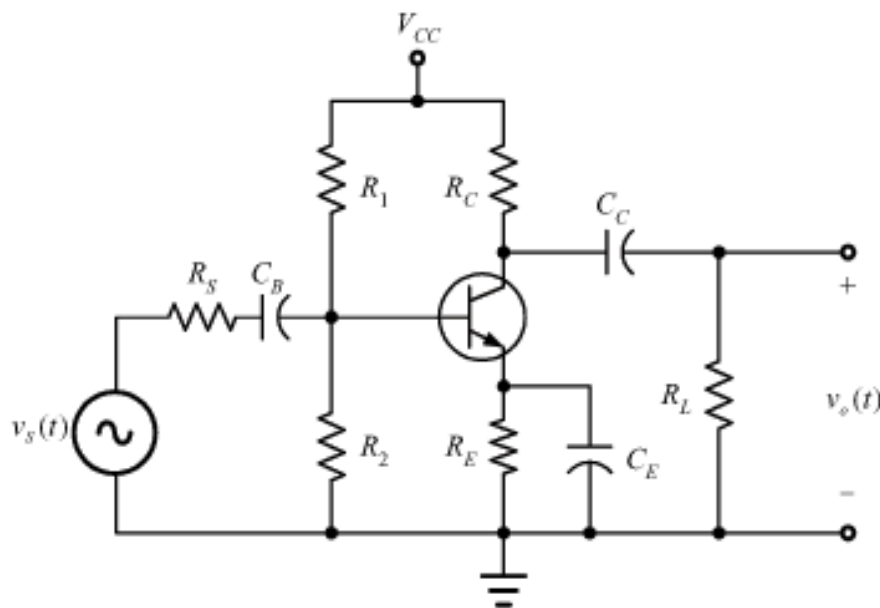
雙載子接面電晶體小訊號放大器之分析

- ◆ 一般而言，小訊號分析是指電子電路工作於中頻帶之分析，在此頻率範圍內之所有耦合電容與旁路電容等微法拉 (μF) 級電容之阻抗皆相當小，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) 級電容之阻抗會變得相對較大，故可用開路來取代。
- ◆ 因為電晶體放大器之小訊號分析，主要是討論放大器之交流特性，故在進行電晶體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，並採用混合 h 參數小訊號模型來取代電晶體，以簡化電路分析之複雜度。
- ◆ 本實習將採用 BJT 混合 h 參數小訊號模型，針對這兩種共射極放大器作交流小訊號分析，以了解此兩種放大器之交流特性之差異。



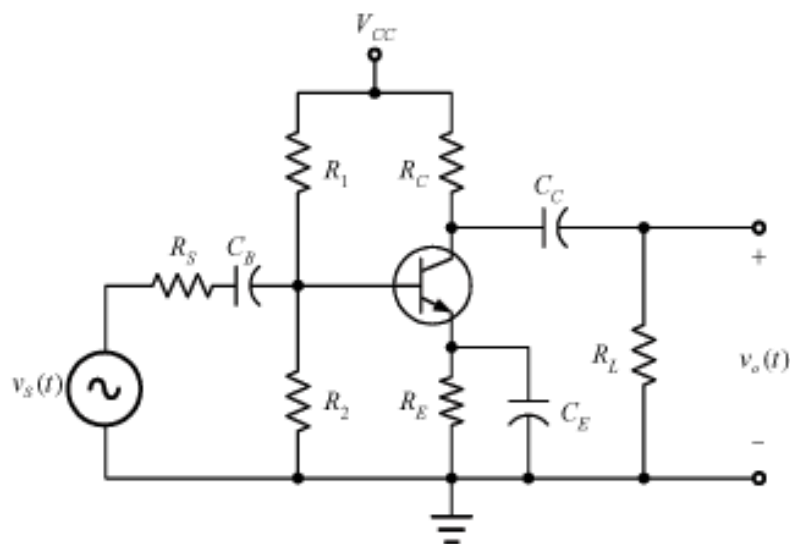
共射極 (CE) 組態放大器之小訊號分析

- ◆ 第五章所討論之**共射極組態**直流偏壓電路，大致上可分為兩種，一種是**無射極電阻**之共射極放大電路，此種電路**結構較為簡單**；而另一種是**加上射極電阻**之電晶體放大電路，以提高**偏壓之穩定性**。
- ◆ 本節將採用**混合 h 參數小訊號模型**，針對這兩種共射極電路組態作**交流小訊號分析**，以了解此兩種放大器之交流特性的差異。
- ◆ 若將**交流輸入訊號** $v_s(t)$ 經由耦合電容進入電晶體之**基極**，而輸出訊號則由**集極**取出，即可組成**共基極(CB)放大器**，如右圖所示。



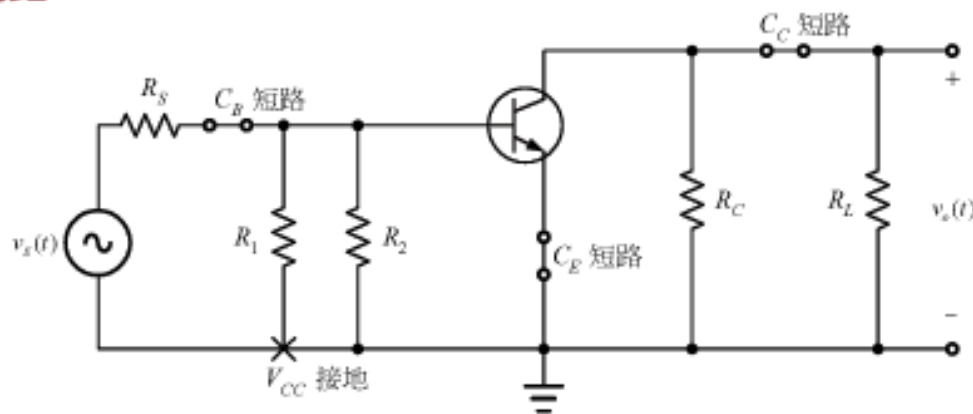
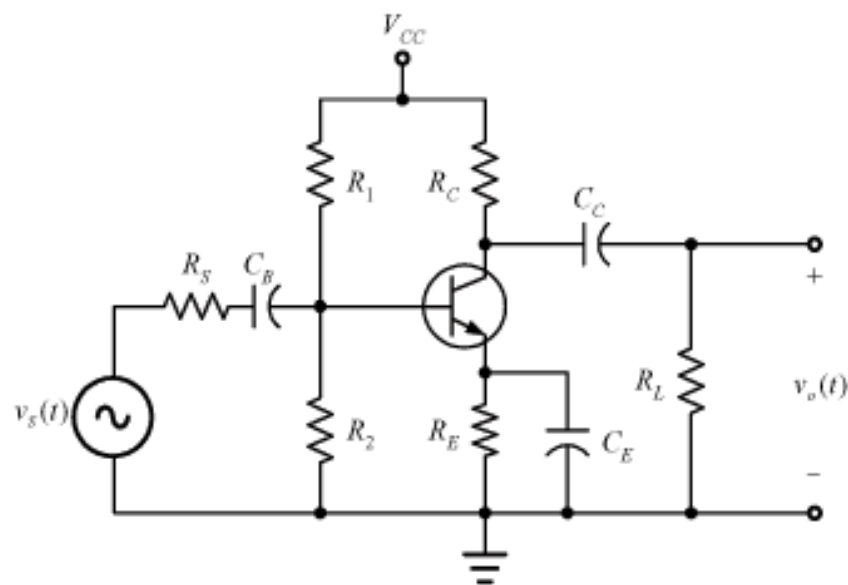
無射極電阻之電晶體放大電路

- ◆ 在進行電晶體電路之交流小訊號分析時，所有耦合電容 (C_B , C_C) 與旁路電容 (C_E) 皆可以短路取代，故對下圖進行小訊號分析時，可視為無射極電阻之共射極放大電器(右下圖之射極電阻被旁路電容 C_E 短路而不存在)



無射極電阻之共射極放大器

- ◆ 若將**交流輸入訊號** v_s 經由耦合電容進入電晶體之**基極**，而輸出訊號則由**集極**取出，即可組成**共射極(CE)放大器**，如右圖所示。
- ◆ 欲對**共射極(CE)放大器**作小訊號分析時，首先必須將所有耦合電容與旁路電容**短路**，並**移掉**所有之直流電源（因僅考慮交流效應，應將直流電源接地）後，即可得到右上圖之**交流等效電路**，如右下圖所示。

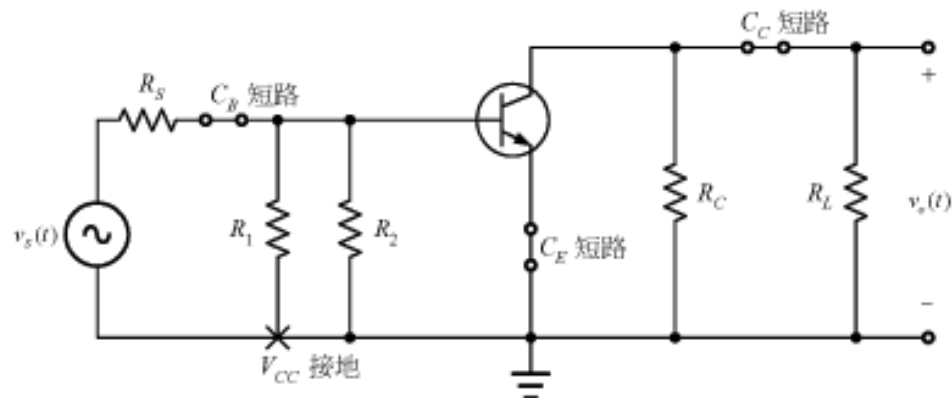


接著以共射極組態之**混合 h 參數小訊號**

模型來取代**電晶體**後，即可得此右上圖**小訊號**

等效電路，如右下圖，接著利用左上圖之**等效**

電路，以求出 A_i 、 A_v 、 Z_i 與 Z_o 如下：



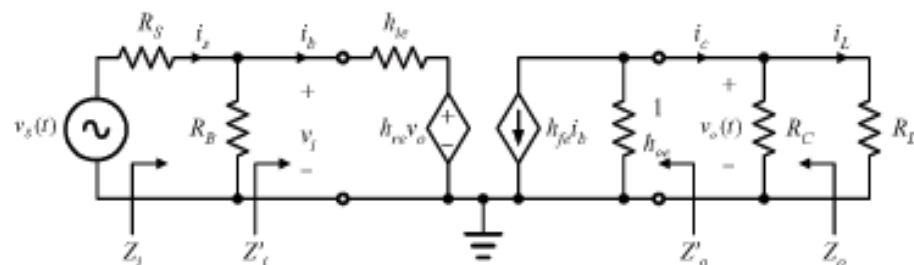
(a) **電流增益** A_i ：

利用 **KVL** 於右下圖之**輸出迴路**可得

$$i_c + h_{fe} \cdot i_b + h_{oe} \cdot v_o = i_c + h_{fe} \cdot i_b + h_{oe} \cdot i_c \cdot Z_L = 0$$

整理上式可得 $A'_i = \frac{i_c}{i_b} = \frac{-h_{fe}}{1 + h_{oe} \cdot Z_L} \approx -h_{fe}$

(若 $h_{oe} \rightarrow 0$ 、 $h_{re} \rightarrow 0$)



利用右下圖可得**電流增益** $A_i = \frac{i_L}{i_s} = \frac{i_L}{i_c} \cdot \frac{i_c}{i_b} \cdot \frac{i_b}{i_s} = \frac{R_C}{R_L + R_C} \cdot A'_i \cdot \frac{R_B}{R_B + h_{ie}}$ 。

其中 $Z_L = R_C \parallel R_L = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L}$ 、 $R_B = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$



(b) **電壓增益** A_v :

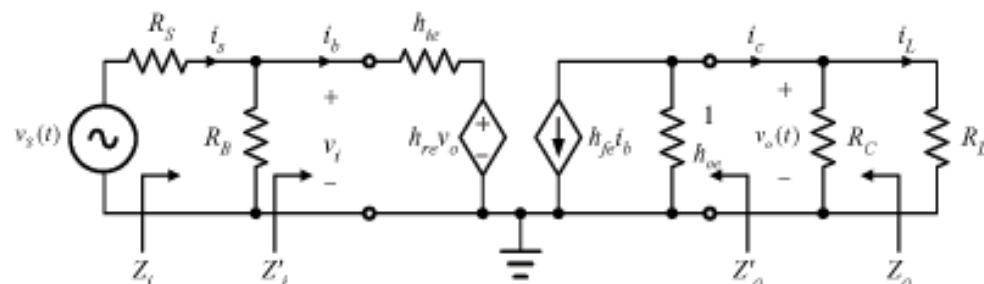
利用 KVL 於下圖之**輸入迴路**可得 $v_i = h_{ie} \cdot i_b + h_{re} \cdot v_o = \left[h_{re} - \frac{h_{ie} \cdot (1 + h_{oe} \cdot Z_L)}{h_{fe} \cdot Z_L} \right] \cdot v_o$, 其中

$$i_b = \frac{1 + h_{oe} \cdot Z_L}{-h_{fe}} \cdot i_c \cdot i_c = \frac{v_o}{Z_L} \text{ 與 } Z_L = R_C // R_L \circ$$

整理上式可得

$$A'_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-h_{fe} \cdot Z_L}{h_{ie} + (h_{ie} \cdot h_{oe} - h_{fe} \cdot h_{re}) \cdot Z_L} \\ \approx \frac{-h_{fe} \cdot Z_L}{h_{ie}}$$

(若 $h_{oe} \rightarrow 0$ 、 $h_{re} \rightarrow 0$)



利用右上圖可得共射極放大器之**電壓增益** A_v 為 $A_v = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s} = A'_v \cdot \frac{Z_i}{R_S + Z_i}$

其中 $Z_i = R_B // h_{ie} = \frac{R_B \cdot h_{ie}}{R_B + h_{ie}} \circ$



(c) 輸入阻抗 Z_i :

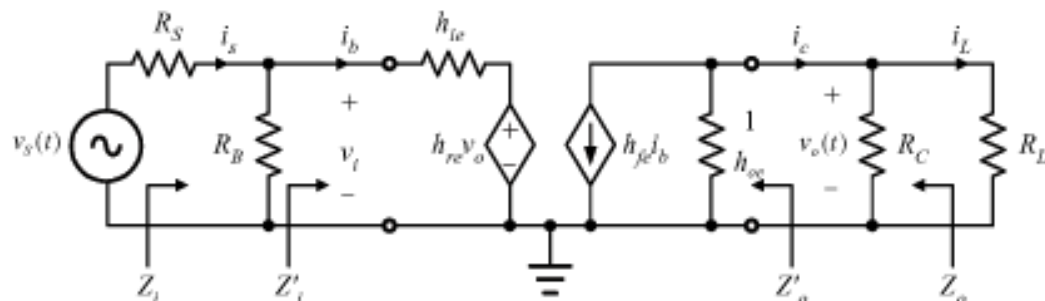
利用 KVL 於右下圖之輸入迴路可得

$$v_i = h_{ie} \cdot i_b + h_{re} \cdot v_o = h_{ie} \cdot i_b + h_{re} \cdot i_c \cdot Z_L = h_{ie} \cdot i_b + h_{re} \cdot A_i \cdot i_b \cdot Z_L = i_b \cdot (h_{ie} + h_{re} \cdot A_i \cdot Z_L)$$

整理上式可得

$$Z'_i = \frac{v_i}{i_b} = h_{ie} + h_{re} \cdot A'_i \cdot Z_L \approx h_{ie}$$

(若 $h_{oe} \rightarrow 0$ 、 $h_{re} \rightarrow 0$)



由右上圖可得放大器之輸入阻抗 Z_i 為

$$Z_i = R_B // Z'_i = \frac{R_B \cdot Z'_i}{R_B + Z'_i}$$

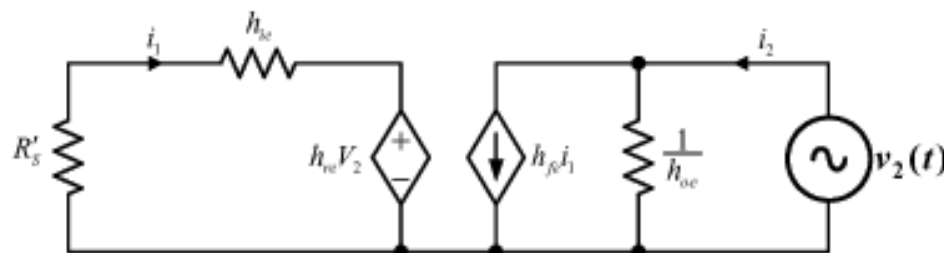
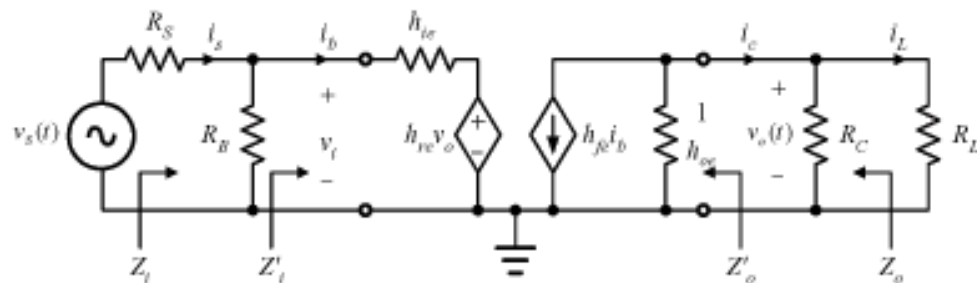


(d) **輸出阻抗** Z_o :

根據電路學之**定義**，令 $v_s = 0$ ，並移去負載 R_L ，並在輸出端加上 v_2 ，即可得 Z'_o 為

$$Z'_o = \frac{v_2}{i_2} \Big|_{v_s=0, R_L \rightarrow \infty}$$

利用上式之定義，可重繪右上圖之**等效電路**，如右下圖所示(不考慮 R_C 之效應)。



觀察右下圖之輸入與輸出迴路，可分別得電流 $i_1 = \frac{-h_{re} \cdot v_2}{R'_s + h_{ie}}$ 與

$$i_2 = h_{fe} \cdot i_1 + h_{oe} \cdot v_2 = h_{fe} \cdot \left(\frac{-h_{re} \cdot v_2}{R'_s + h_{ie}} \right) + h_{oe} \cdot v_2 = \left(h_{oe} - \frac{h_{fe} \cdot h_{re}}{R'_s + h_{ie}} \right) \cdot v_2, \text{ 整理右式, 可得}$$

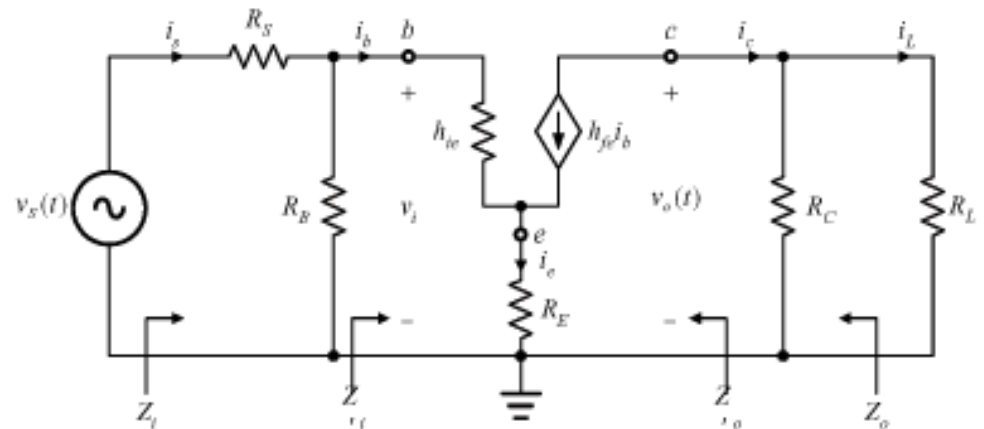
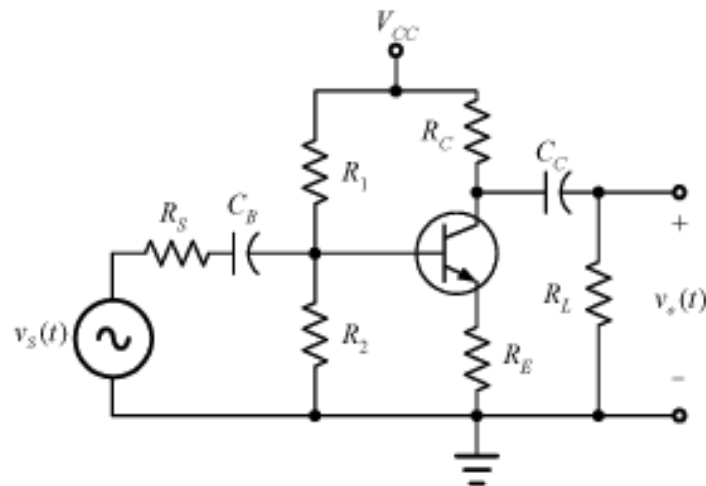
$$Z'_o = \frac{v_o}{i_c} = \frac{1}{h_{oe} - \frac{h_{fe} \cdot h_{re}}{R'_s + h_{ie}}} \rightarrow \infty \text{ (若 } h_{oe} \rightarrow 0, h_{re} \rightarrow 0, \text{ 其中 } R'_s = R_s // R_B = \frac{R_s \cdot R_B}{R_s + R_B} \text{)}$$

利用右上圖可得**輸出阻抗** $Z_o = Z'_o // R_c = R_c$ 。



具射極電阻之共射極放大器

- ◆ 一個具有射極電阻，且未加旁路電容之共射極組態放大電路，如右下圖所示。若將電晶體以簡化混合 h 參數小訊號模型來取代後，可得小訊號等效電路，如左下圖所示。



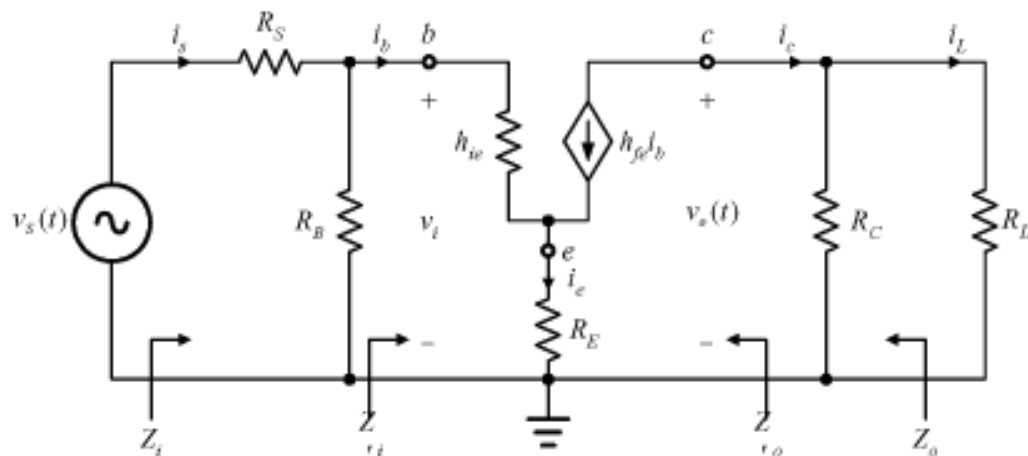
- ◆ 接著利用左上圖之等效電路，以求出此放大器之 A_i 、 A_v 、 Z_i 與 Z_o 如下：



(a) 電流增益 A_i :

$$A_i' = \frac{i_c}{i_b} = -h_{fe}$$

利用分流定律於右圖之輸入與輸出迴路，可得



$$A_i = \frac{i_L}{i_s} = \frac{i_L}{i_c} \cdot \frac{i_c}{i_b} \cdot \frac{i_b}{i_s} = \frac{R_C}{R_L + R_C} \cdot (-h_{fe}) \cdot \frac{R_B}{R_B + h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R_E}$$

觀察上式可知，具射極電阻之共射極放大器之電流增益，明顯比無射極電阻之共射極放大器的電流增益小，且射極電阻 R_E 愈大，則電流增益會變得愈小。

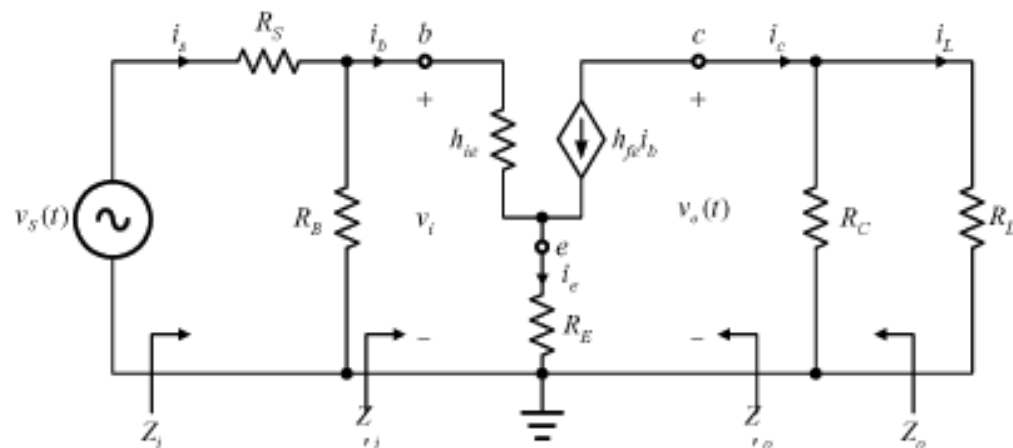


(b) 電壓增益 A_v :

利用 KVL 於右圖之輸入迴路可得

$$\begin{aligned} v_i &= i_b \cdot h_{ie} + i_e \cdot R_E = i_b \cdot h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot i_b \cdot R_E \\ &= [h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R_E] \cdot i_b \end{aligned}$$

其中 $i_e = (1 + h_{fe}) \cdot i_b$ 。



再由右圖之輸出迴路可得 $v_o = -h_{fe} \cdot i_b \cdot (R_C \parallel R_L)$ ，由以上之計算可得 A'_v 為

$$A'_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-h_{fe} \cdot (R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R_E}$$

觀察上式可知，具射極電阻之共射極放大器之電壓增益，明顯比無射極電阻之共射極放大器的電壓增益小，且射極電阻 R_E 愈大，則電壓增益會變得愈小。

利用右上圖可得放大器之電壓增益 A_v 為

(其中 $R_i = R_B \parallel [h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R_E]$)

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s} = A'_v \cdot \frac{R_i}{R_S + R_i}$$



(c) 輸入阻抗 Z_i :

利用 KVL 於右圖之輸入迴路可得

$$v_i = i_b \cdot h_{ie} + i_e \cdot R_E = i_b \cdot [h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R_E]$$

整理上式可得

$$Z'_i = \frac{v_i}{i_b} = h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R_E$$

其中 $v_i = i_b \cdot h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R_E$

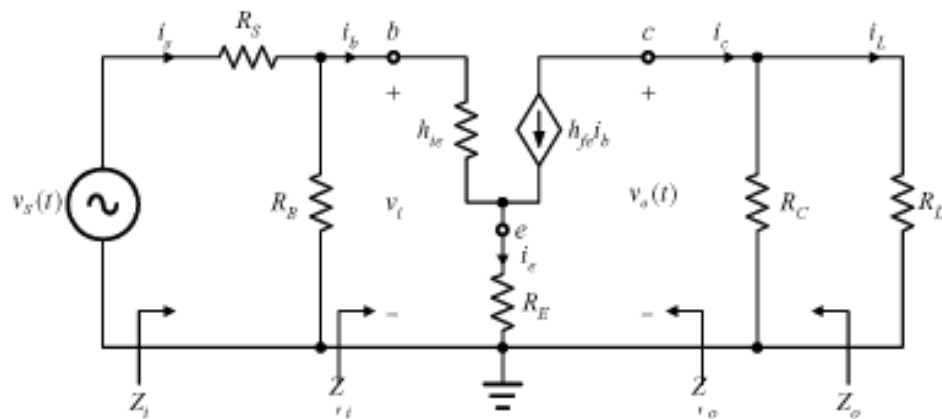
利用右圖之輸入迴路，可得放大器之輸入阻抗 Z_i 為

$$Z_i = R_B \parallel Z'_i = \frac{R_B \cdot Z'_i}{R_B + Z'_i} = \frac{9K \times 26.1K}{9K + 26.1K} = 6.7K\Omega$$

(d) 輸出阻抗 Z_o :

因相依電流源 $h_{fe} \cdot i_b$ 具有極高之阻抗，故放大器之輸出阻抗 Z_o 為

$$Z_o = \frac{v_o}{i_c} = R_c$$



實習步驟與結果

(一) 無射極電阻之共射極放大器

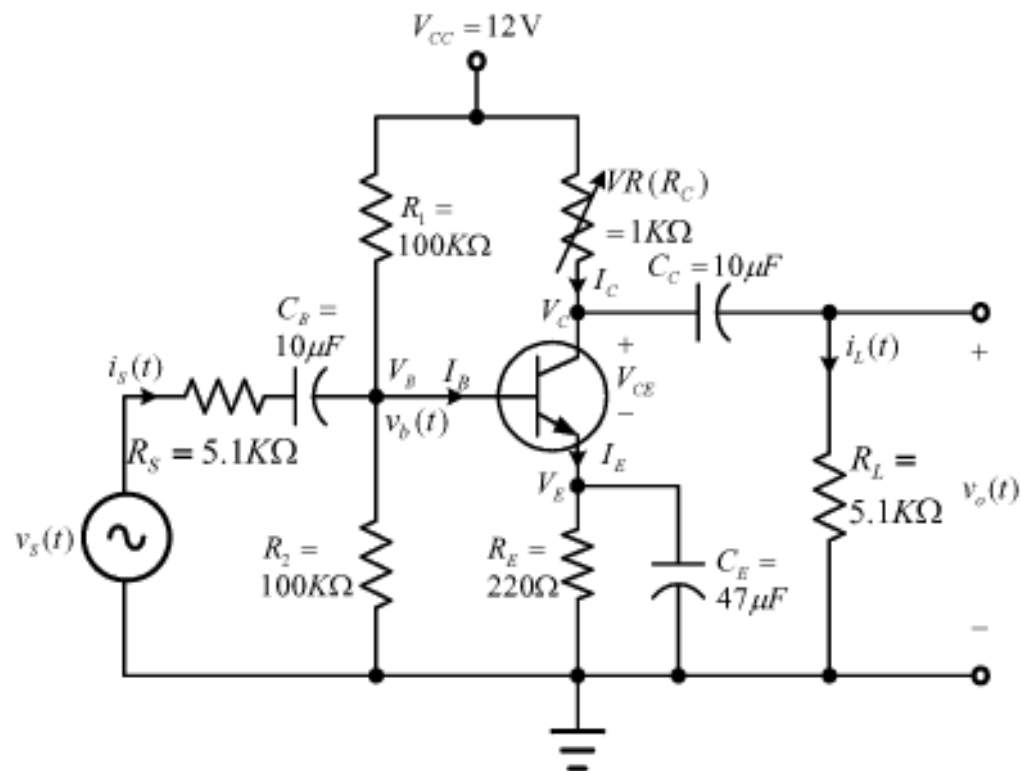


表 9-1 無射極電阻之共射極放大器的直流電壓與電流

集極電阻 (V_R) = 305 Ω

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
$I_C(mA)$	12.37	11.75
$I_B(\mu A)$	51.5	49.7
$I_E(mA)$	12.42	11.98
$V_B(V)$	6	3.2
$V_C(V)$	8.22	8.96
$V_E(V)$	2.7	3
$V_{CE}(V)$	5.52	6
$\beta = \frac{I_C}{I_B}$	240	236



表 9-2 無射極電阻之共射極放大器的交流電壓波形

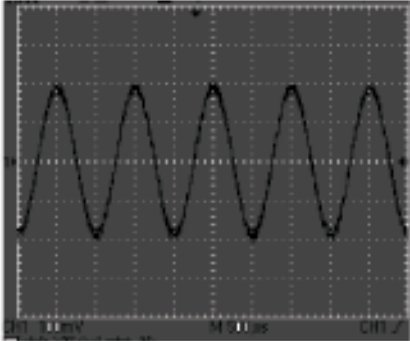
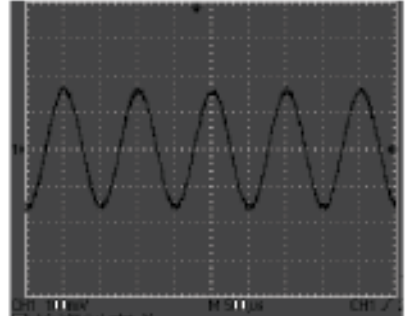
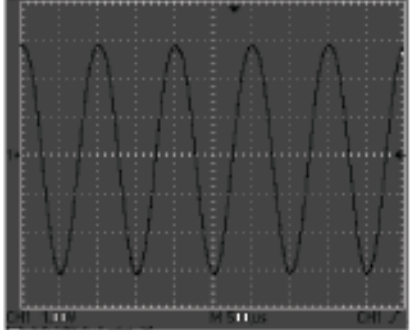
	<p><u>100m</u> Volts/DIV 峰值電壓：<u>0.2</u> V <u>500μ</u> Time/DIV 週期：<u>1m</u> sec 頻率：<u>1K</u> Hz</p>
	<p><u>100m</u> Volts/DIV 峰值電壓：<u>0.15</u> V <u>500μ</u> Time/DIV 週期：<u>1m</u> sec 頻率：<u>1K</u> Hz</p>
	<p><u>1</u> Volts/DIV 峰值電壓：<u>2.85</u> V <u>500μ</u> Time/DIV 週期：<u>1m</u> sec 頻率：<u>1K</u> Hz</p>



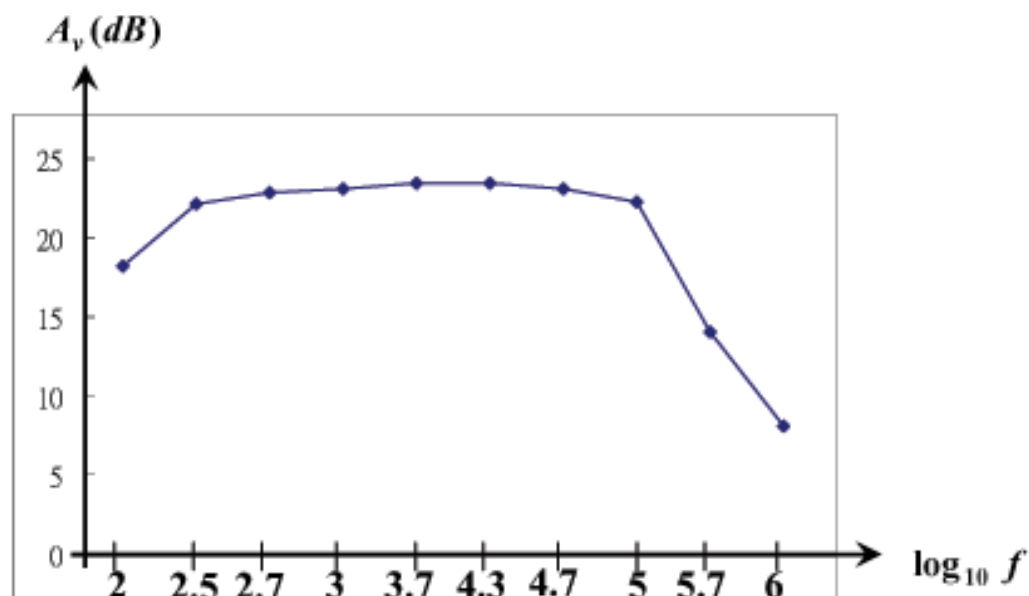
表 9-3 無射極電阻之共射極放大器的電壓與電流增益

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
$i_s(t) = \frac{v_s(t) - v_b(t)}{R_S}$	$12\ \mu A$	$9.8\ \mu A$
$i_L(t) = \frac{v_o(t)}{R_L}$	$0.67\ mA$	$0.56\ mA$
$A_i = \frac{i_L(t)}{i_s(t)}$	63.5	57
$A_v = \frac{v_o(t)}{v_s(t)}$	17.2	14.3
$A_p = A_i \times A_v$	1092	815



表 9-4 無射極電阻之共射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
$v_{s(p-p)}$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
$v_{o(p-p)}$	3.24	5.16	5.52	5.72	5.92	5.92	5.72	5.2	2	1.02
$A_v = \frac{v_{o(p-p)}}{v_{s(p-p)}}$	8.1	12.9	13.8	14.3	14.8	14.8	14.3	13	5	2.55



(二) 具射極電阻之共射極放大器

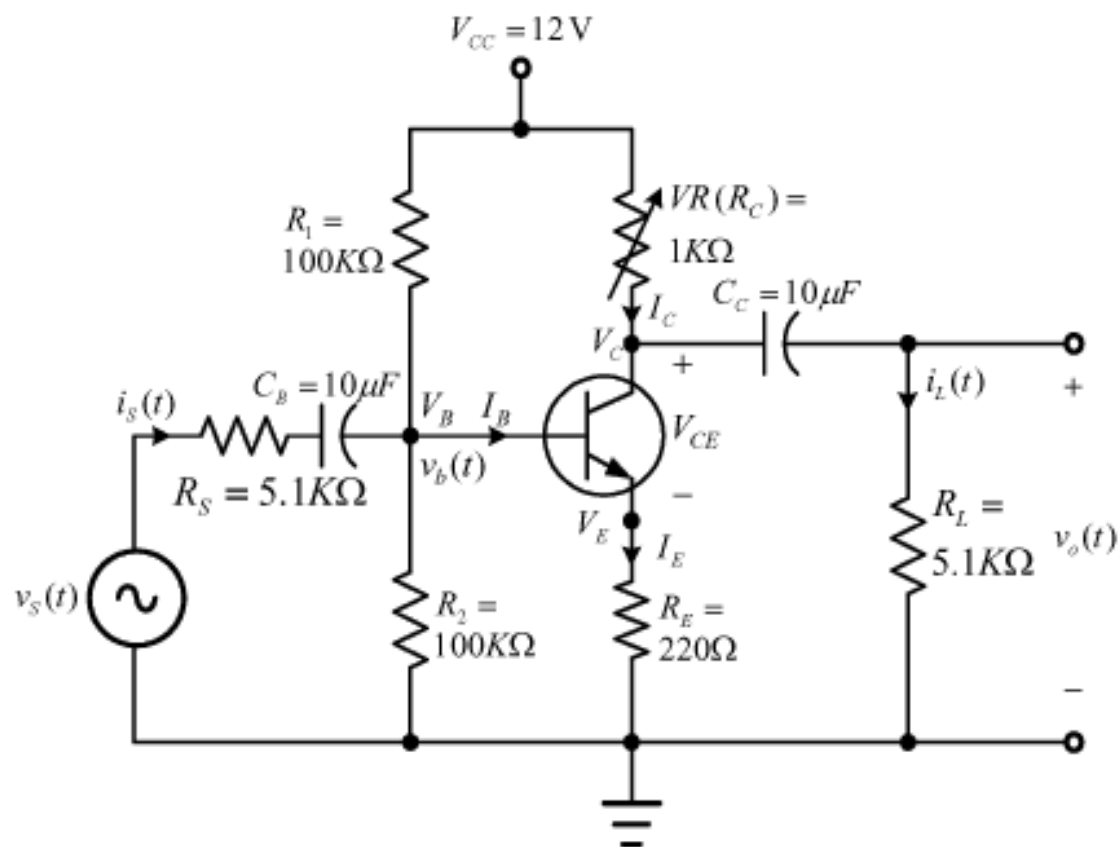


表 9-5 具射極電阻之共射極放大器的直流電壓與電流

集極電阻 (V_R) = 286 Ω

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
$I_C(mA)$	12.37	11.77
$I_B(\mu A)$	51.5	49.6
$I_E(mA)$	12.42	11.93
$V_B(V)$	6	3.25
$V_C(V)$	8.22	9.05
$V_E(V)$	2.7	3.01
$V_{CE}(V)$	5.52	6
$\beta = \frac{I_C}{I_B}$	240	237



表 9-6 具射極電阻之共射極放大器的交流電壓波形

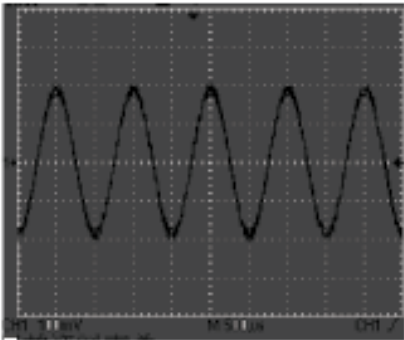
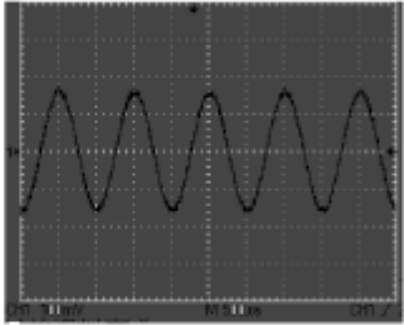
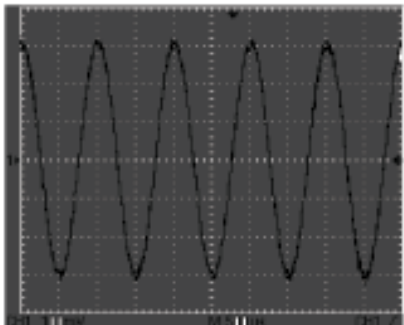
	<p><u>100m</u> Volts/DIV 峰值電壓：<u>0.2</u> V <u>500μ</u> Time/DIV 週期：<u>1m</u> sec 頻率：<u>1K</u> Hz</p>
	<p><u>100m</u> Volts/DIV 峰值電壓：<u>0.16</u> V <u>500μ</u> Time/DIV 週期：<u>1m</u> sec 頻率：<u>1K</u> Hz</p>
	<p><u>100m</u> Volts/DIV 峰值電壓：<u>0.36</u> V <u>500μ</u> Time/DIV 週期：<u>1m</u> sec 頻率：<u>1K</u> Hz</p>



表 9-7 具射極電阻之共射極放大器的電壓與電流增益

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
$i_s(t) = \frac{v_s(t) - v_b(t)}{R_S}$	$9.26 \mu A$	$7.84 \mu A$
$i_L(t) = \frac{v_o(t)}{R_L}$	$82.3 mA$	$70 mA$
$A_i = \frac{i_L(t)}{i_s(t)}$	8.89	8.93
$A_v = \frac{v_o(t)}{v_s(t)}$	2.2	1.8
$A_p = A_i \times A_v$	19.6	16.1



表 9-8 具射極電阻之共射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
$v_{s(p-p)}$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
$v_{o(p-p)}$	0.7	0.7	0.7	0.71	0.72	0.72	0.71	0.71	0.6	0.44
$A_v = \frac{v_{o(p-p)}}{v_{s(p-p)}}$	1.75	1.75	1.75	1.78	1.8	1.8	1.78	1.78	1.5	1.1

