

# 實 習 十 一

## 雙載子接面電體交流小訊號放大電路（三）

### --共射極串極放大器

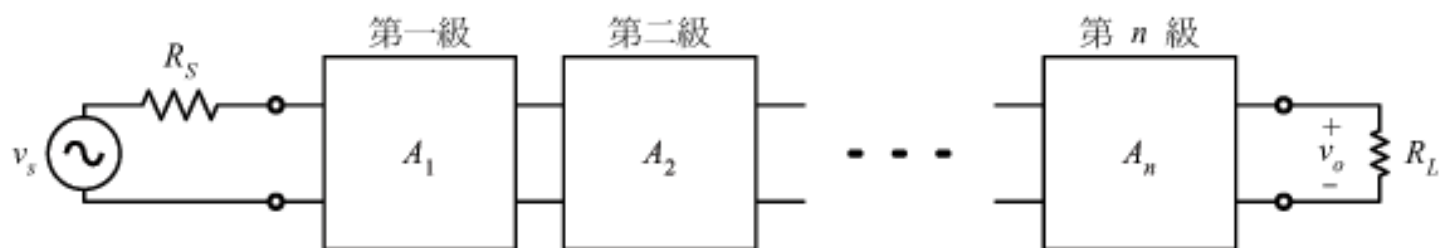
#### ◆ 實習目的

1. 學習雙載子接面電晶體所組成之串級放大器的交流小訊號基本特性。
2. 藉由實習過程，以瞭解共射極串級放大器之交流小訊號特性。



## 相 關 知 識

- ◆ 為了提高電晶體小訊號放大器之增益，可將放大器作**串級連接**，以彌補單級放大器**有限增益**之缺點。
- ◆ **串級放大器** (Multistage amplifier) 通常以下圖之方式串接起來，前一級放大器之**輸出阻抗**為下一級放大器之**輸入電阻**，即在求第一級之**增益**時，必須考慮第二級所產生之**負載效應**。



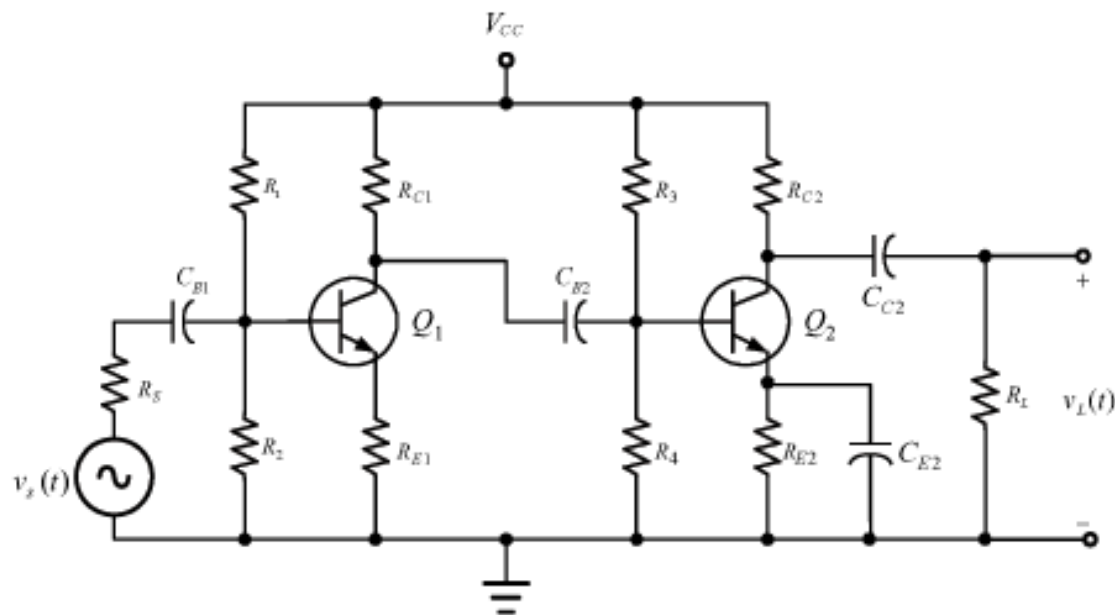
- ◆ 對不同級之放大器而言，並不需要有**相同之增益**，而串級放大器之**總增益值**為各級放大器**增益之乘積**，也就是說，有  $n$  級放大器串接起來，則總增益  $A_{Total} = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n$ ，因此欲得到**更大之增益**，可以使用**更多級放大器作串接**。
- ◆ 本實習將分成 2 個部分，分別討論兩種常用之**共射極串級電路**，分別為  $RC$  **耦合串級放大器**與**直接耦合串級放大器**。



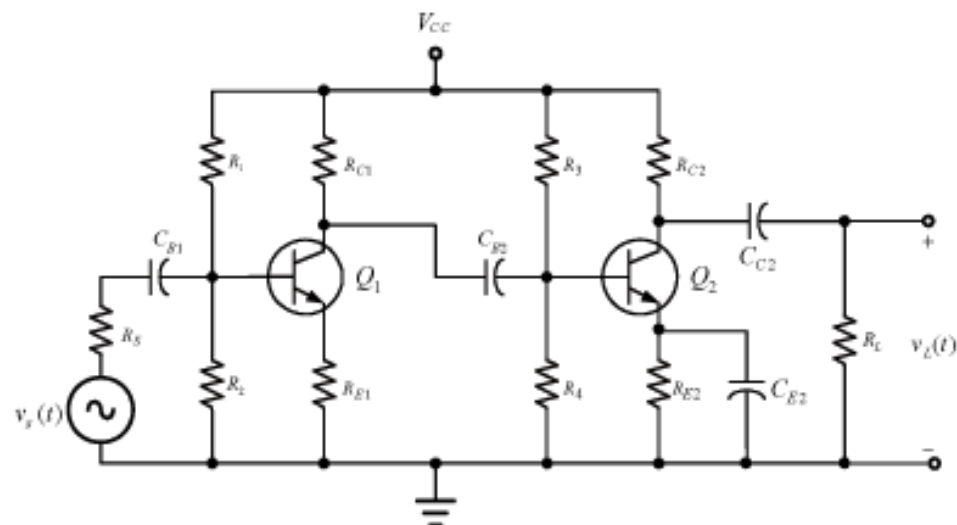
## RC 耦合共射極串級放大器

- ◆ 若將兩個電阻分壓器之**共射極放大器**作串級連接，**交流輸入訊號**  $v_s$  經過  $C_{B1}$  加入第 1 級放大器之輸入端（基極），接著將第 1 級 ( $Q_1$ ) 放大器之輸出端（集極），經過電容  $C_{B2}$  耦合至第 2 級 ( $Q_2$ ) 放大器之輸入（基極），最後經過電容  $C_C$ ，將訊號由第 2 級放大器之輸出端（集極）取出，即可得到 2 級 **RC 耦合之共射極串級放大器**，如下圖所示。

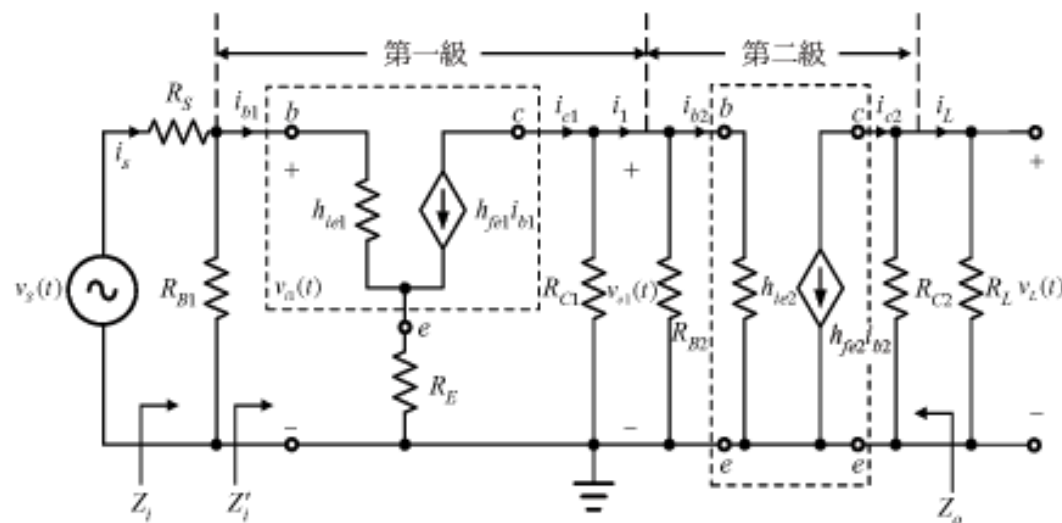
- ◆ 使用**耦合電容**  $C_{B2}$ ，以串接 2 個共射極放大器之輸入與輸出，因電容會**阻隔直流訊號**之流通，使兩個共射極放大器之**直流偏壓不會相互影響**，但因加上耦合電容  $C_{B2}$  之原因，導致低頻響應較差之缺點。



- ◆ 欲對右上圖之串級放大器作**小訊號分析**時，將所有耦合電容與旁路電容**短路**，並**移掉**所有之直流電源（即將**直流電源接地**）後，並以共射極組態之**簡化混合  $h$  參數小訊號模型**來取代電晶體後，即可得此串級放大器之**小訊號等效電路**，如右下圖所示。



- ◆ 利用右下圖之簡化混合  $h$  參數**小訊號等效電路**，便可求出串級放大器之  $A_i$ 、 $A_v$ 、 $Z_i$  與  $Z_o$  如下：



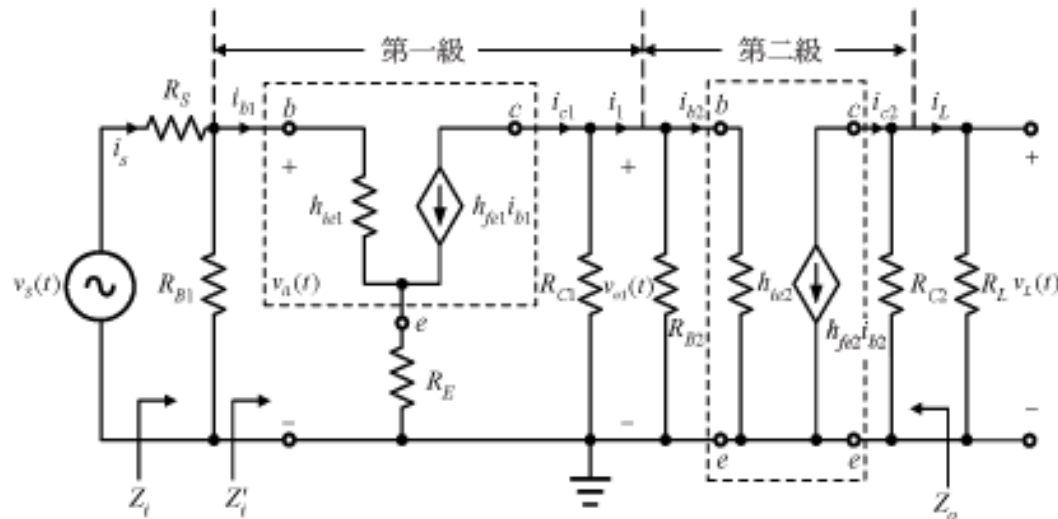
(a) **電流增益**  $A_i$  :

**第一級與第二級放大器之電流增益**  $A_{i1}$  與  $A_{i2}$  分別為

$$A_{i1} = \frac{i_1}{i_s} = \frac{i_1}{i_{c1}} \cdot \frac{i_{c1}}{i_{b1}} \cdot \frac{i_{b1}}{i_s} = \frac{R_{C1}}{R_{C1} + (R_{B2} // h_{ie2})} \cdot (-h_{fe1}) \cdot \frac{R_{B1}}{R_{B1} + h_{ie1} + (1 + h_{fe1}) \cdot R_E}$$

$$A_{i2} = \frac{i_L}{i_1} = \frac{i_L}{i_{c2}} \cdot \frac{i_{c2}}{i_{b2}} \cdot \frac{i_{b2}}{i_1} = \frac{R_{C2}}{R_{C2} + R_L} \cdot (-h_{fe2}) \cdot \frac{R_{B2}}{R_{B2} + h_{ie2}} \quad (\text{其中 } R_{B1} = R_1 // R_2, R_{B2} = R_3 // R_4)$$

因串級放大器之**總電流增益**，等於兩級放大器電流增益之**乘積**，即  $A_i = \frac{i_L}{i_s} = A_{i1} \times A_{i2}$ 。



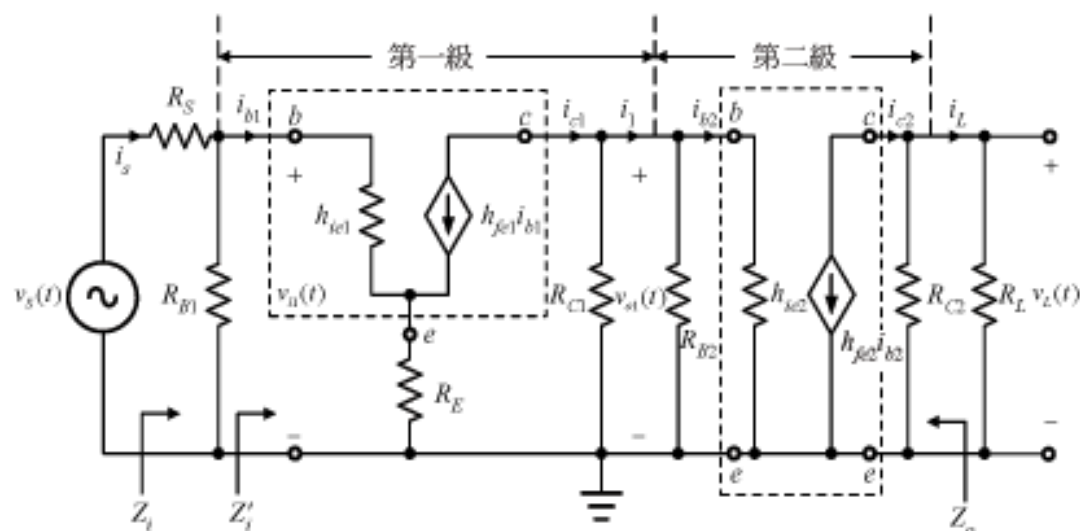
(b) 電壓增益  $A_v$  :

第一級電晶體之電壓增益為  $A'_{v1} = \frac{v_{o1}}{v_{i1}} = \frac{-h_{fe1} \cdot R_{o1}}{h_{ie1} + (1 + h_{fe1}) \cdot R_{E1}} \rightarrow A_{v1} = \frac{v_{o1}}{v_s} = \frac{v_{o1}}{v_{i1}} \cdot \frac{v_{i1}}{v_s} = A'_{v1} \cdot \frac{R_{i1}}{R_s + R_{i1}}$  。

第二級放大器之電壓增益  $A_{v2} = \frac{v_L}{v_{o1}} = \frac{-h_{fe2} \cdot R_{o2}}{h_{ie2}}$  。

其中  $R_{o1} = R_{C1} // R_{B2} // h_{ie2}$  、  $R_{i1} = R_{B1} // [h_{ie1} + (1 + h_{fe1}) \cdot R_{E1}]$  與  $R_{o2} = R_{C2} // R_L$  。

因串級放大器之總電壓增益，等於兩級放大器電壓增益之乘積，即  $A_v = \frac{v_L}{v_s} = A_{v1} \times A_{v2}$  。



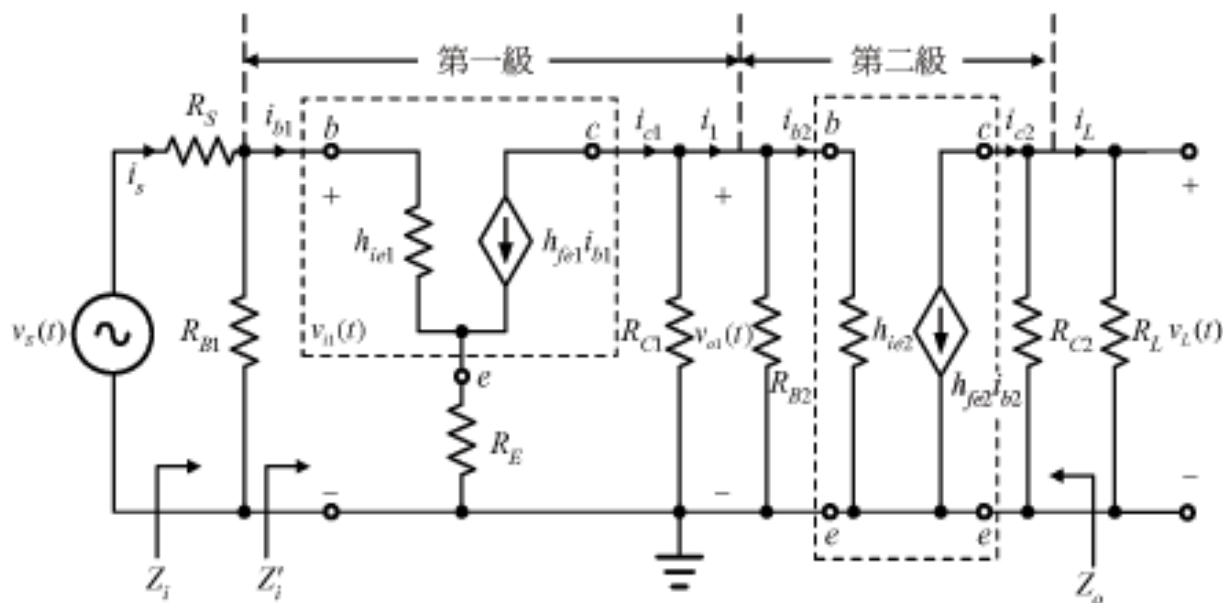
(c) 輸入阻抗  $Z_i$  :

第一級放大器之輸入阻抗  $Z'_i$  為

$$Z'_i = h_{ie1} + (1 + h_{fe1}) \cdot R_{E1}$$

由下圖之輸入迴路，可得此串級放大器之輸入阻抗  $Z_i$  為

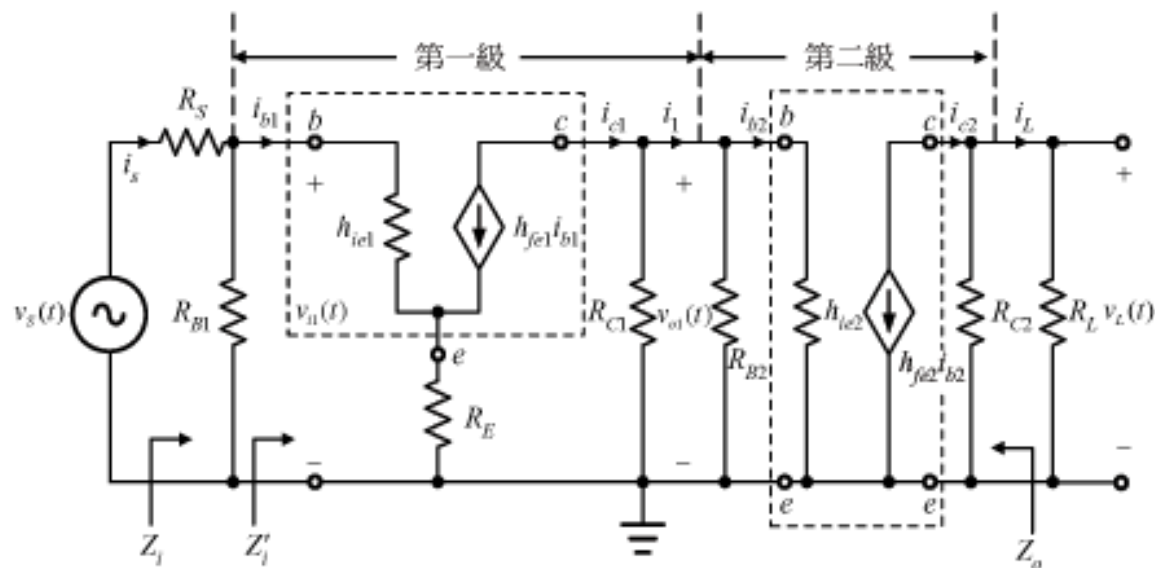
$$Z_i = R_{B1} // Z'_i$$



(d) **輸出阻抗**  $Z_o$  :

因下圖之輸出迴路為**相依電流源**  $h_{fe} \cdot i_b$  具有極高之阻抗，故串級放大器之**輸出阻抗**  $Z_o$  為

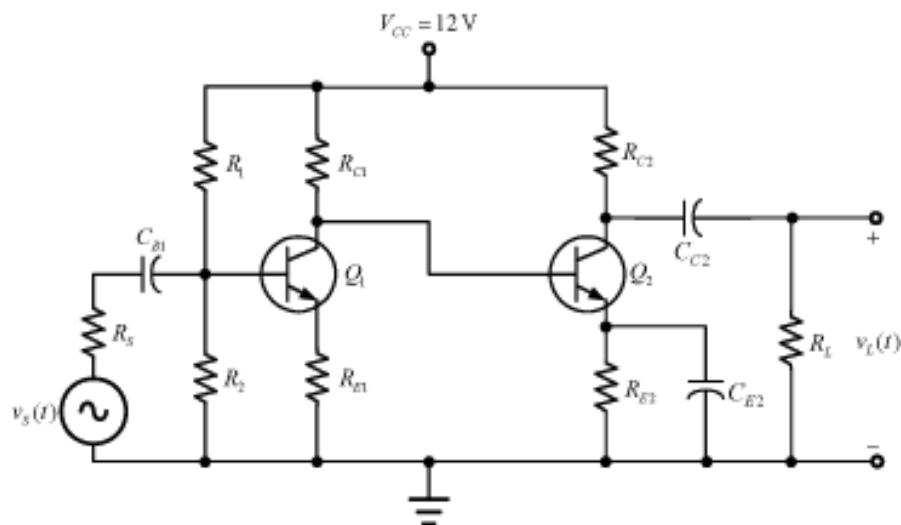
$$Z_o = R_{C2}$$



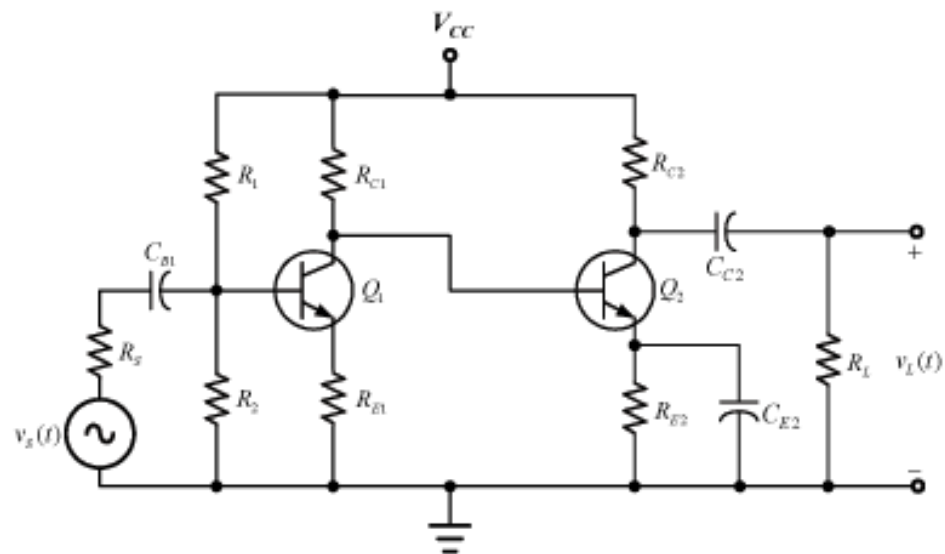


# 直接耦合共射極串極放大器

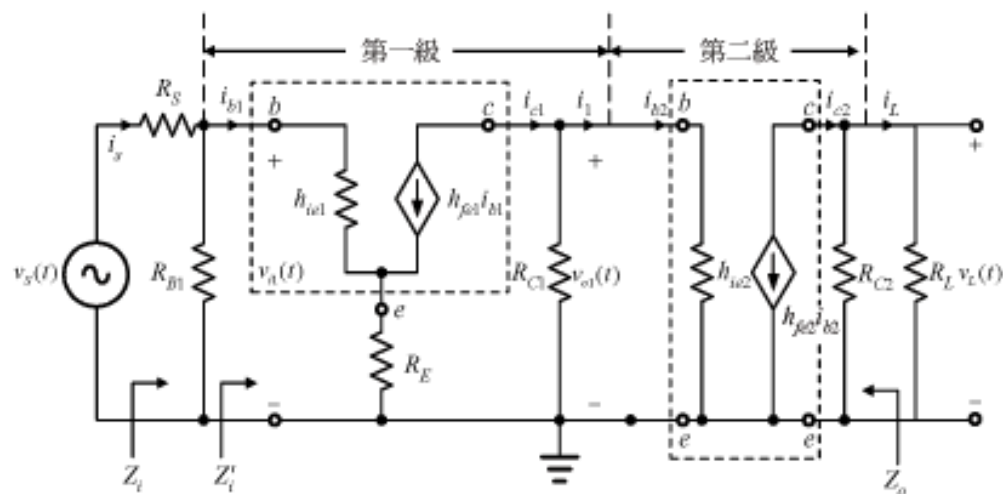
- ◆ 將兩個電阻分壓器之共射極放大器作串級連接，交流輸入訊號  $v_s$ ，經過電容  $C_{B1}$  加入第 1 級放大器之輸入端（基極），接著將第 1 級放大器之輸出端（集極），直接耦合至第 2 級放大器之輸入（基極），最後經過電容  $C_C$ ，將訊號由第 2 級放大器之輸出端（集極）取出，即可得到兩級直接耦合之共射極串級放大器，如下圖所示。
- ◆ 因  $Q_1$  之輸出，直接耦合至  $Q_2$  之輸入，導致交、直流訊號，皆可在這兩級間流通，故可得到較佳之低頻響應之優點。
- ◆ 因沒有使用耦合電容，以阻隔直流訊號的流動，導致  $Q_2$  之直流偏壓，會受  $Q_1$  之集極電壓與電流的影響，故  $R_{C1}$  與  $R_{E1}$  之選擇，必須考慮  $Q_2$  之基 - 射極導通條件，方可使  $Q_2$  工作於順向活性區，使  $Q_2$  實現小訊號放大之功能。



- ◆ 欲對右上圖之串級放大器作小訊號分析時，首先將所有耦合電容與旁路電容**短路**，並移掉所有之直流電源（即將直流電源接地）後，並以**共射極組態之簡化混合  $h$  參數小訊號模型**取代 BJT 後，即可得此串級放大器之**小訊號等效電路**，如右下圖所示。



- ◆ 利用右下圖之**簡化混合  $h$  參數小訊號等效電路**，便可求出串級放大器之  $A_i$ 、 $A_v$ 、 $Z_i$  與  $Z_o$  如下：



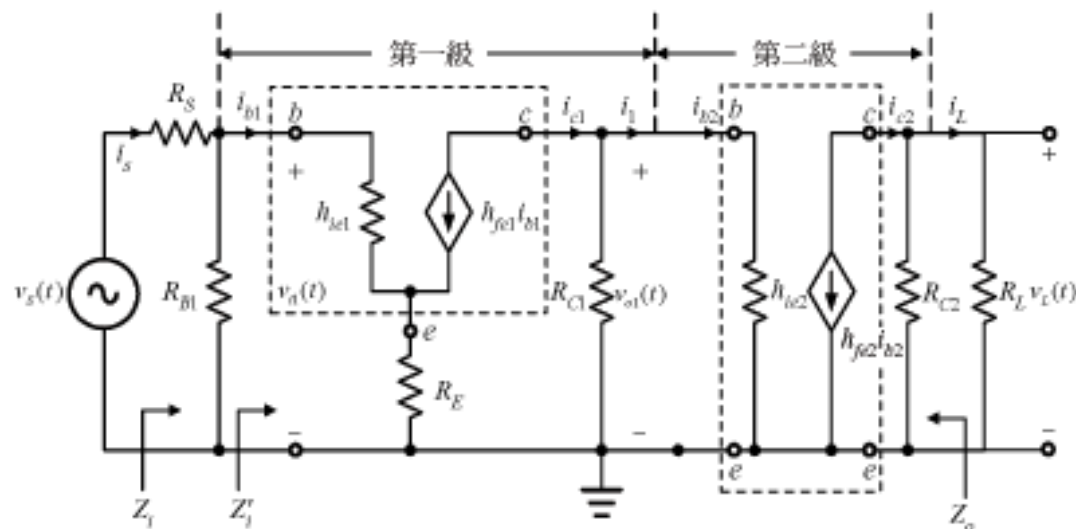
(a) 電流增益  $A_i$  :

第一級與第二級放大器之電流增益  $A_{i1}$  與  $A_{i2}$  分別為

$$A_{i1} = \frac{i_{b2}}{i_s} = \frac{i_{b2}}{i_{c1}} \cdot \frac{i_{c1}}{i_{b1}} \cdot \frac{i_{b1}}{i_s} = \frac{R_{C1}}{R_{C1} + h_{ie2}} \cdot (-h_{fe1}) \cdot \frac{R_{B1}}{R_{B1} + h_{ie1} + (1 + h_{fe1}) \cdot R_E} \quad (\text{其中 } R_{B1} = R_1 // R_2)$$

$$A_{i2} = \frac{i_L}{i_{b2}} = \frac{i_L}{i_{c2}} \cdot \frac{i_{c2}}{i_{b2}} = \frac{R_{C2}}{R_{C2} + R_L} \cdot (-h_{fe2})$$

因串級放大器之總電流增益，等於兩級放大器電流增益之乘積，即  $A_i = \frac{i_L}{i_s} = A_{i1} \times A_{i2}$ 。



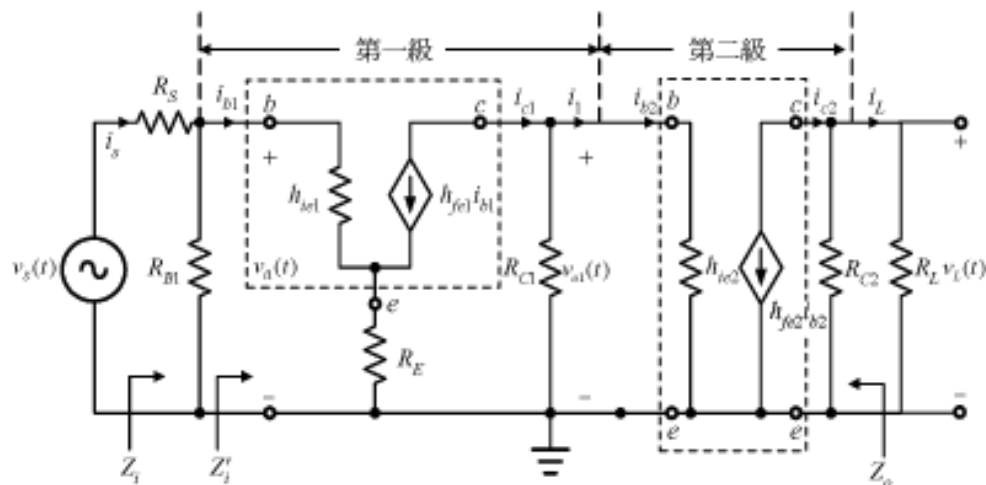
(b) 電壓增益  $A_v$  :

第一級電晶體之電壓增益為  $A'_{v1} = \frac{v_{o1}}{v_{i1}} = \frac{-h_{fe1} \cdot R_{o1}}{h_{ie1} + (1 + h_{fe1}) \cdot R_{E1}} \rightarrow A_{v1} = \frac{v_{o1}}{v_s} = \frac{v_{o1}}{v_{i1}} \cdot \frac{v_{i1}}{v_s} = A'_{v1} \cdot \frac{R_{i1}}{R_s + R_{i1}} \circ$

第二級放大器之電壓增益  $A_{v2} = \frac{v_L}{v_{o1}} = \frac{-h_{fe2} \cdot R_{o2}}{h_{ie2}} \circ$

其中  $R_{o1} = R_{C1} // h_{ie2}$ 、 $R_{i1} = R_{B1} // [h_{ie1} + (1 + h_{fe1}) \cdot R_{E1}]$  與  $R_{o2} = R_{C2} // R_L \circ$

因串級放大器之總電壓增益，等於兩級放大器電壓增益之乘積，即  $A_v = \frac{v_L}{v_s} = A_{v1} \times A_{v2} \circ$



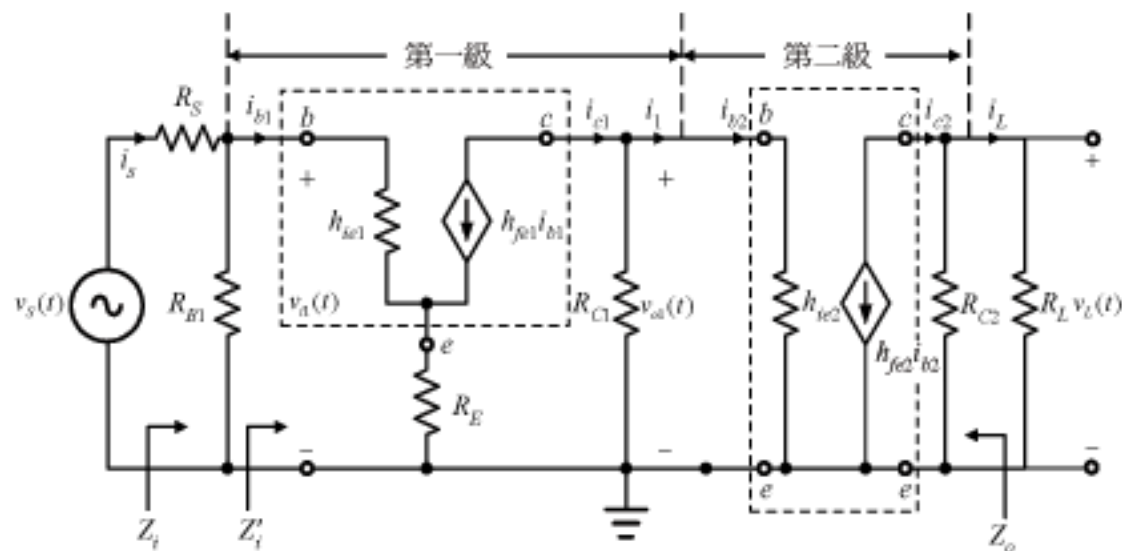
(c) 輸入阻抗  $Z_i$  :

第一級放大器之輸入阻抗  $Z'_i$  為

$$Z'_i = h_{ie1} + (1 + h_{fe1}) \cdot R_{E1}$$

由下圖之輸入迴路，可得此串級放大器之輸入阻抗  $Z_i$  為

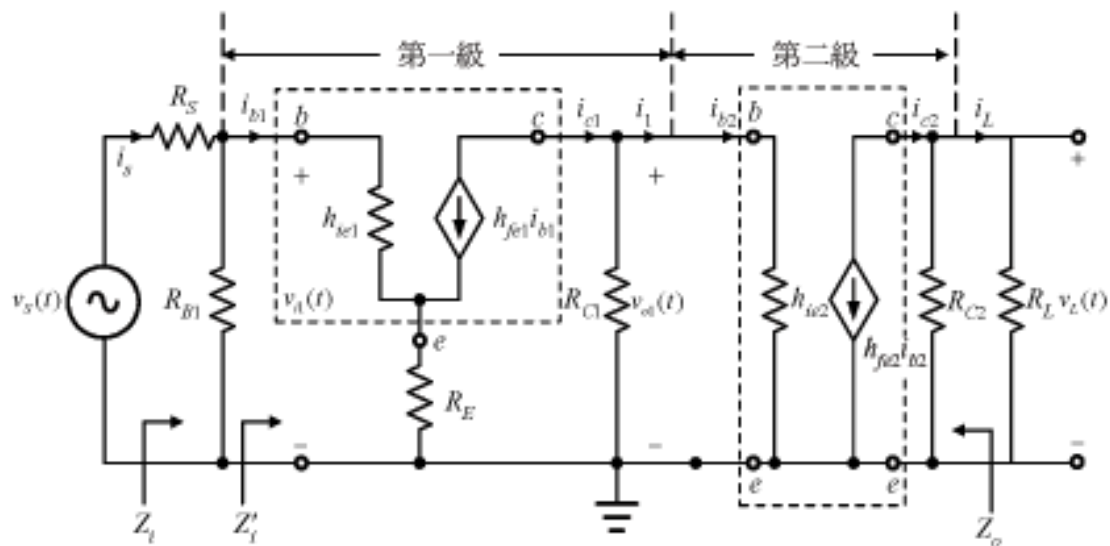
$$Z_i = R_{B1} // Z'_i$$



(d) 輸出阻抗  $Z_o$  :

因下圖之輸出迴路為相依電流源  $h_{fe} \cdot i_b$  具有極高之阻抗，故串級放大器之輸出阻抗  $Z_o$  為

$$Z_o = R_{C2}$$



# 實習步驟與結果

## (一) RC 耦合共射極串級放大器

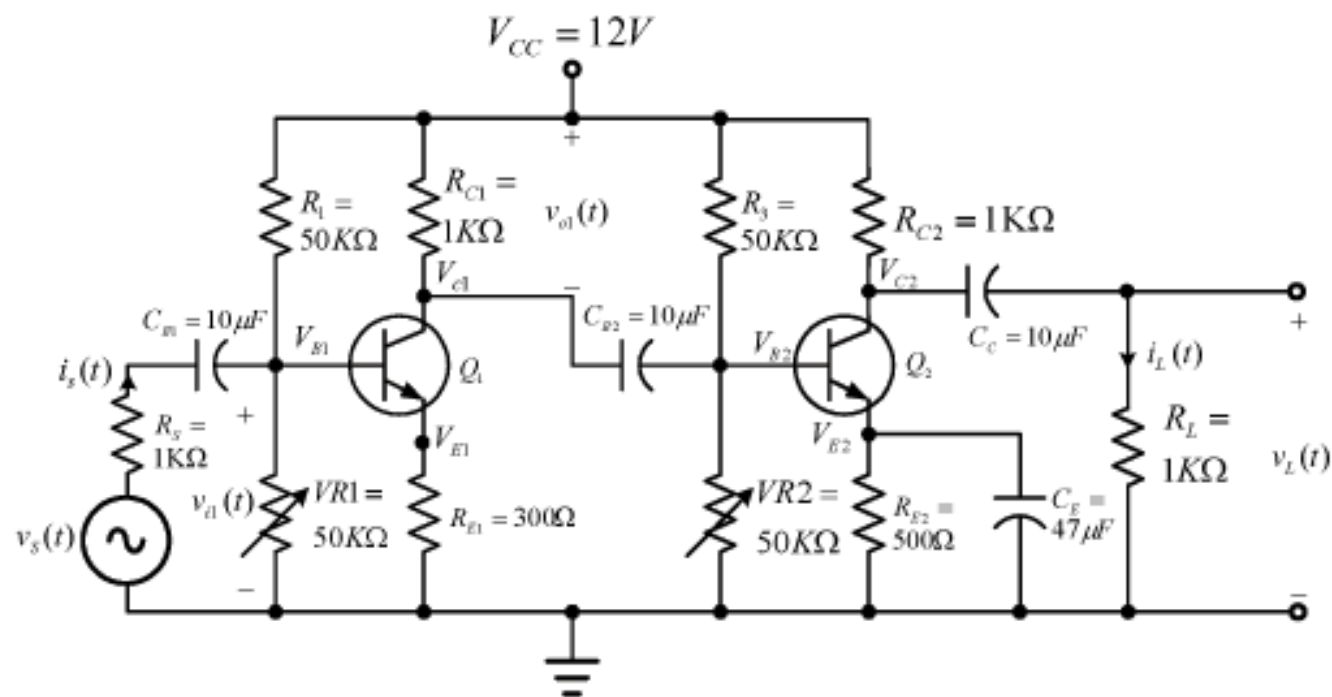


表 11-1 RC 耦合共射極串級放大器之直流電壓

$$VR1 = \underline{11.7K} \Omega, VR2 = \underline{16K} \Omega$$

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
$V_{B1}(V)$	2.27	2.02
$V_{C1}(V)$	7.4	7.37
$V_{E1}(V)$	1.389	1.4
$V_{B2}(V)$	2.9	2.67
$V_{C2}(V)$	8	8.02
$V_{E2}(V)$	2	2.04





表 11-2 RC 耦合共射極串級放大器之交流電壓波形

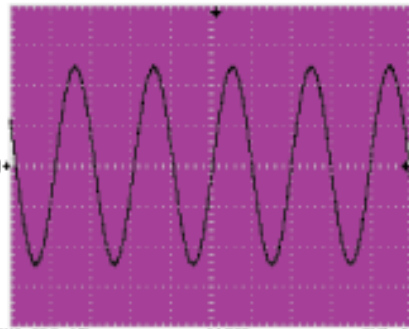
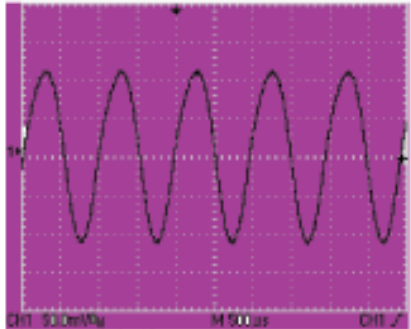
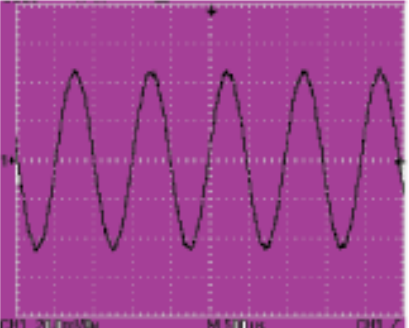
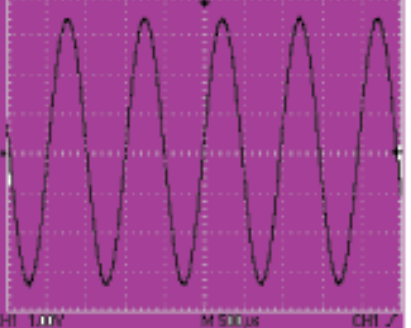
 <p>CH1 20.0mV/DIV M 500μs CH1</p>	<p>20m Volts/DIV            峰值電壓： 50m V            500μ Time/DIV            週期： 1m sec            頻率： 1K Hz</p>	 <p>CH1 50.0mV/DIV M 500μs CH1</p>	<p>50m Volts/DIV            峰值電壓： 115m V            500μ Time/DIV            週期： 1m sec            頻率： 1K Hz</p>
 <p>CH1 20.0mV/DIV M 500μs CH1</p>	<p>20m Volts/DIV            峰值電壓： 45m V            500μ Time/DIV            週期： 1m sec            頻率： 1K Hz</p>	 <p>CH1 1.0V M 500μs CH1</p>	<p>1 Volts/DIV            峰值電壓： 3.3 V            500μ Time/DIV            週期： 1m sec            頻率： 1K Hz</p>



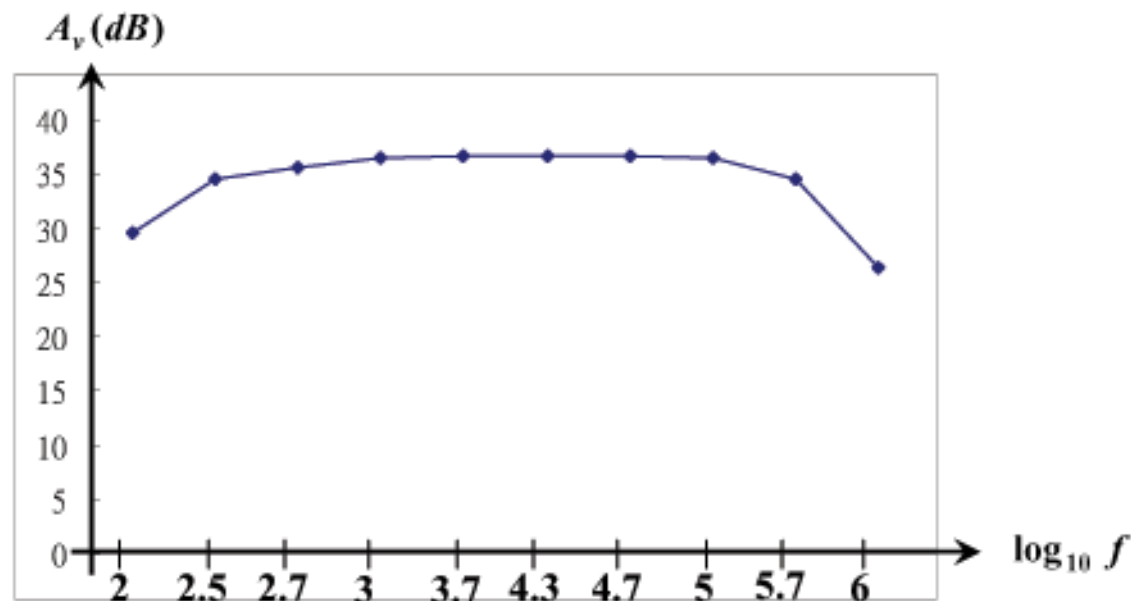
表 11-3 RC 耦合共射極串級放大器的電壓與電流增益

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
$i_s(t) = \frac{v_s(t) - v_{i1}(t)}{R_S}$	$6.2 \mu A$	$5 \mu A$
$i_L(t) = \frac{v_L(t)}{R_L}$	$3.85 mA$	$3.3 mA$
$A_i = \frac{i_L(t)}{i_s(t)}$	621	660
$A_{v1} = \frac{v_{o1}(t)}{v_s(t)}$	2.8	2.3
$A_{v2} = \frac{v_L(t)}{v_{o1}(t)}$	25.8	28.7
$A_v = A_{v1} \times A_{v2}$	72.2	66
$A_p = A_v \times A_i$	44861	43560



表 11-4  $RC$  耦合共射極串級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
$v_{s(p-p)}$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
$v_{L(p-p)}$	3.0	5.4	6	6.6	6.8	6.8	6.8	6.6	5.4	2.1
$A_v = \frac{v_{L(p-p)}}{v_{s(p-p)}}$	30	54	60	66	68	68	68	66	54	21



## (二) 直接耦合共射極串級放大器

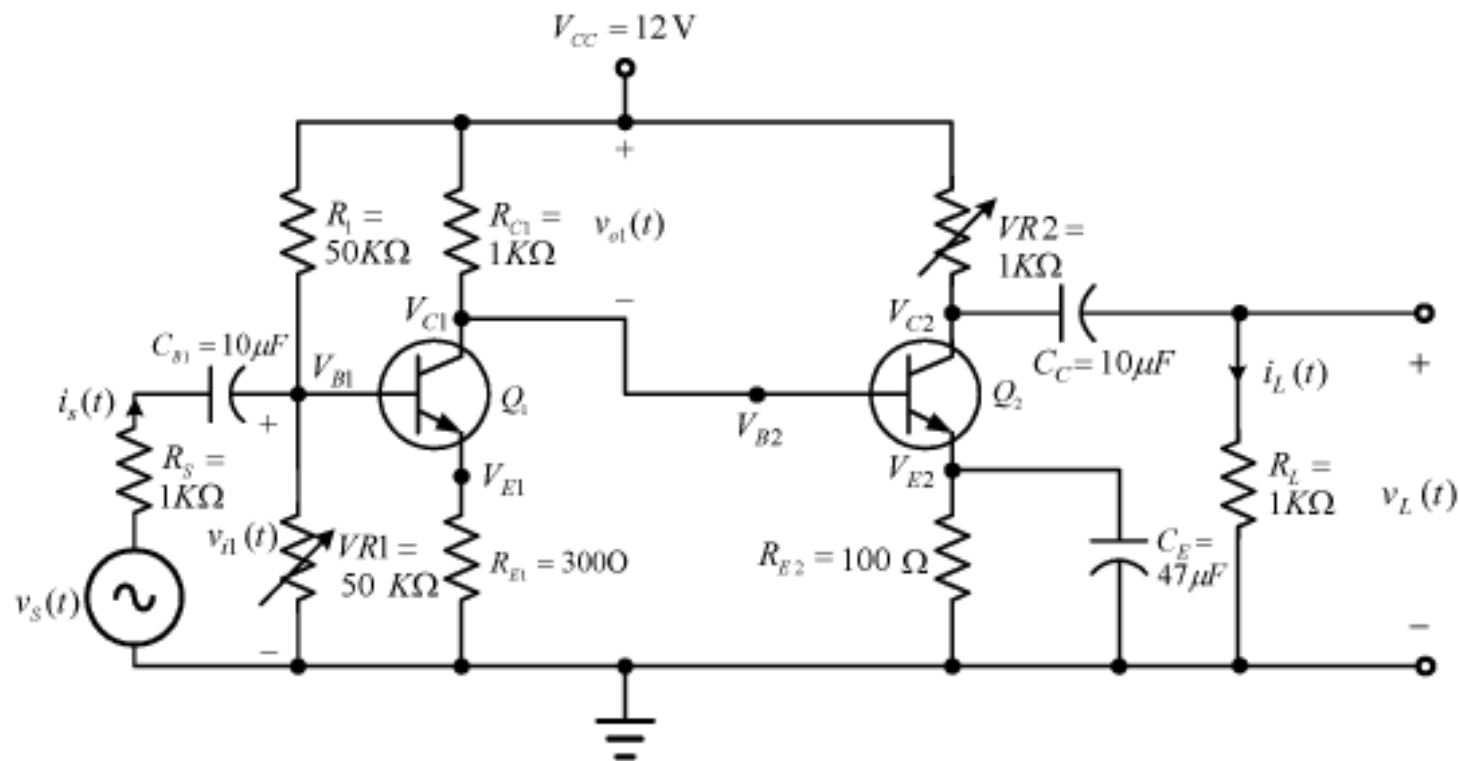


表 11-5 直接耦合共射極串級放大器之直流電壓

$$VR1 = \underline{11K} \quad \Omega、VR2 = \underline{80} \quad \Omega$$

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
$V_{B1}(V)$	2.16	1.98
$V_{C1}(V)$	7.67	7.7
$V_{E1}(V)$	2.17	1.95
$V_{B2}(V)$	11.52	10.73
$V_{C2}(V)$	11.7	11.57
$V_{E2}(V)$	3.75	3.6



表 11-6 直接耦合共射極串級放大器之交流電壓波形

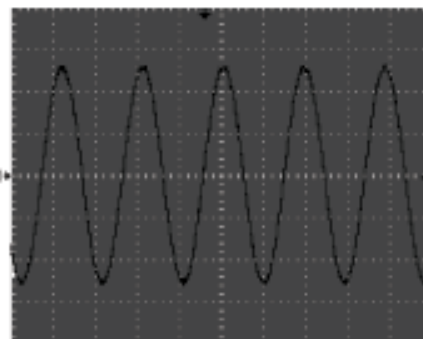
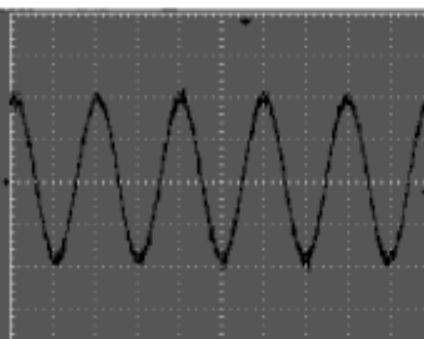
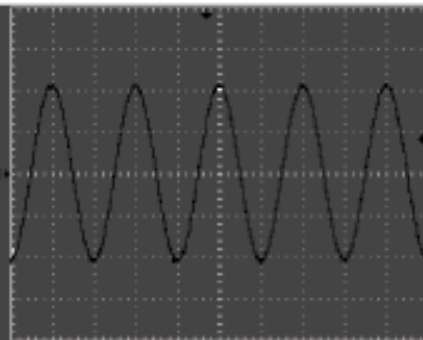
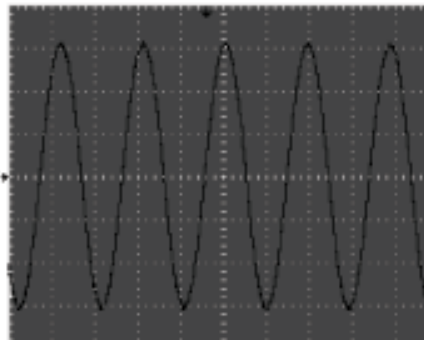
 <p>CH1 20.0mV M 500μs CH1 /</p>	<p><u>20m</u> Volts/DIV            峰值電壓: <u>50m</u> V  <u>500μ</u> Time/DIV            週期: <u>1m</u> sec            頻率: <u>1K</u> Hz</p>	 <p>CH1 20.0mV M 500μs CH1 /</p>	<p><u>20m</u> Volts/DIV            峰值電壓: <u>0.12</u> V  <u>500μ</u> Time/DIV            週期: <u>1m</u> sec            頻率: <u>1K</u> Hz</p>
 <p>CH1 20.0mV M 500μs CH1 /</p>	<p><u>20m</u> Volts/DIV            峰值電壓: <u>40m</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 /</p>	<p><u>100m</u> Volts/DIV            峰值電壓: <u>0.37</u> V  <u>500μ</u> Time/DIV            週期: <u>1m</u> sec            頻率: <u>1K</u> Hz</p>



表 11-7 直接耦合共射極串級放大器的電壓與電流增益

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
$i_s(t) = \frac{v_s(t) - v_{i1}(t)}{R_s}$	$6.2 \mu A$	$10 \mu A$
$i_L(t) = \frac{v_L(t)}{R_L}$	$0.85 mA$	$0.37 mA$
$A_i = \frac{i_L(t)}{i_s(t)}$	52	37
$A_{v1} = \frac{v_{i1}(t)}{v_s(t)}$	2.8	2.4
$A_{v2} = \frac{v_L(t)}{v_{o1}(t)}$	5.8	3.08
$A_v = A_{v1} \times A_{v2}$	16.2	7.4
$A_p = A_v \times A_i$	845	274



表 11-8 直接耦合共射極串級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
$v_{s(p-p)}$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
$v_{L(p-p)}$	0.4	0.5	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.65
$A_v = \frac{v_{L(p-p)}}{v_{s(p-p)}}$	4	5	6	8	8	8	8	8	7	6.5

