

## 實驗單元(四)－BJT 串級放大器電路

### ◎實驗單元摘要

本實驗單元是來介紹 BJT 串級放大器電路。實驗單元著重於認識串級放大器的架構，了解各種電路對整體電路特性的影響，並學習各項電路功能測量，包括電壓增益、頻率響應及輸入阻抗等項測量，以了解整體放大器電路的功能。

本單元主要將數個單級放大電路，組成一個多級放大電路，以便獲得足夠大的輸出來推動之負載，所以前一級與後一級之間的連接，以電阻電容（RC）耦合（coupling）方式，架構出 RC 耦合串級放大電路，針對串級放大電路特性上的參數變化分析，如電壓增益、電流增益、功率增益、輸入阻抗、輸出阻抗...等，即成為本單元學習的重點。

### ◎學習目標

1.了解 BJT 串級放大器電路結構，測量數據及電路特性。

### ◎實驗單元目錄

- 一、實驗儀器設備與實驗材料表(P.02)
- 二、實驗預報(P.03)
- 三、電路原理說明 (P.03)
- 四、含射極電阻及旁路電容的共射極串級放大器電路(P.17)
- 五、實驗電路設計(P.20)
- 六、測試步驟及數據測量與記錄(P.20)
- 七、實驗問題與討論(P.28)
- 八、實驗結論與實驗心得(P.28)
- 九、實驗綜合評論(P.28)
- 十、附上實驗進度紀錄單(照片檔)、麵包板電路組裝圖檔(照片檔) 及印刷電路板(PCB)組裝圖檔(照片檔) (P.28)
- 十一、實驗參考資料來源(P.29)
- 十二、實驗電路板(P.30)

## ◎實驗內容

## 一、實驗儀器設備與實驗材料表

表(一)：實驗儀器設備

項次	儀器名稱	數量
1	萬用電錶或三用電錶	1 部
2	示波器	1 台
3	訊號產生器	1 台
4	電源供應器	1 台

表(二)：實驗材料表

項次	位 置 碼	元 件 說 明	用量
1	RL1	碳膜電阻 $1K\Omega$ 5% 1/4W	1 個
2	R5、R7	可變電阻 VR $10K\Omega$	2 個
3	R6、R8	可變電阻 VR $500\Omega$	2 個
4	R(input)	可變電阻 VR $5K\Omega$	1 個
5	C4	PE 電容 $0.1\mu F$	1 個
6	C1、C2、C3	電解質電容 $39\mu F/50V$	3 個
7	CE1、CE2、C5	電解質電容 $120\mu F/50V$	3 個
8	Q1、Q2	BJT PN2222A NPN	2 個
9	設計值	碳膜電阻設計選用值	1 個

## 二、實驗預報

1.請寫出任四種串接組態放大器的特性(優點與缺點)。

### 三、電路原理說明[1][2][3][4][5]

#### 1. 串級放大器

一般放大器可以串聯起來，就是將前一級輸出做為下一級的輸入。每一個所串接的放大器稱為單級放大器，而串接起來的放大器功用，就是要提升整體系統的放大增益。

廣義的放大器(或可稱為放大系統)是由許多級的單一放大器(放大電路)所組成，例如聲頻放大系統由輸入端至輸出端依序如下所示：

- a.拾訊轉換器( Pick up transducer )：拾取聲頻訊息轉換成電壓或電流訊號。
- b.前級放大器( Pre-amplifier )：電壓放大器，作小訊號放大。
- c.功率放大器：作大訊號功率放大，藉以推動喇叭或馬達等負載。
- d.輸出放大器：作阻抗匹配，以便使用最高效率傳送最大功率。
- e.負載：如喇叭等。

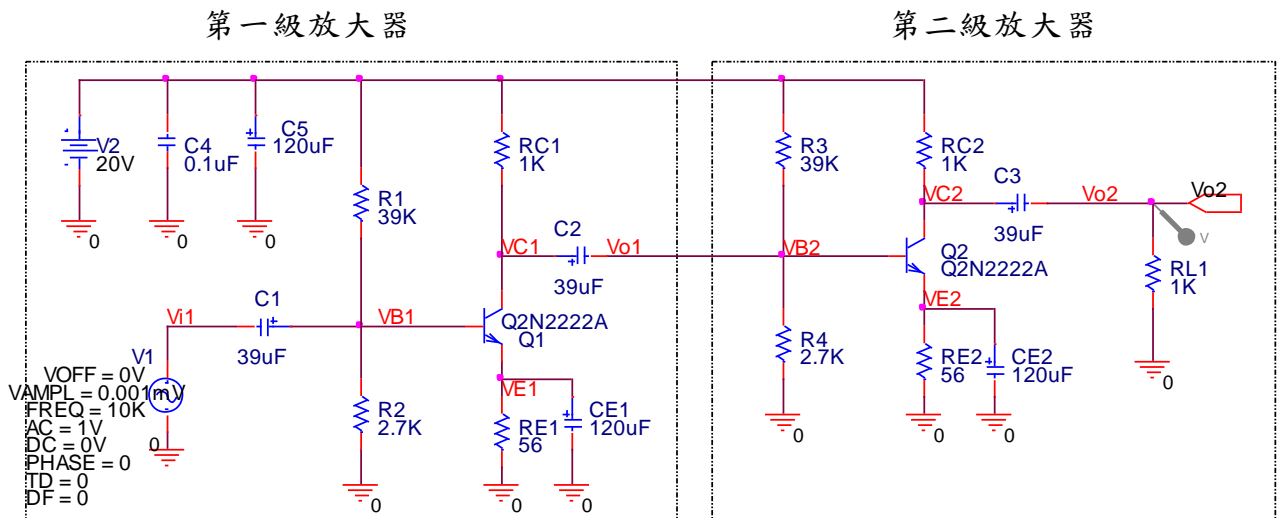
而各級間訊號傳送的媒介，即為其耦合或耦合方式。良好的耦合電路應具有如下特性：

- a.不影響前後級放大器之原 DC 工作點。
- b.所傳送訊號之衰減量、功率損失需小。
- c.失真小。

#### 2. 放大器各級間的耦合方式

一般放大器各級間的耦合方式可分為四種：

- a.電阻電容耦合( Resistance capacitance coupling , RC coupling )。
- b.阻抗耦合( Impedance coupling ).
- c.變壓器耦合( Transformer coupling )。
- d.直接耦合( Direct coupling )。
- e.疊接串級疊接串級放大電路

**(一)、電阻電容耦合( Resistance capacitance coupling , RC coupling )**

圖(一)： RC耦合放大器之一例

典型結構如圖(一)所示，串聯電容器之作用為高通濾波，為了使低頻放大時之電容阻抗  $X_C$  小，故需使用大容量電容器，但若其電容量過大時，則因時間常數( Time constant  $\tau = RC$ )過大，則會造成信號失真。故通常耦合電容器值選定之條件為頻率 100Hz 時，其電容抗約為基極電阻的 1/10 左右。

電阻電容耦合之優點有：

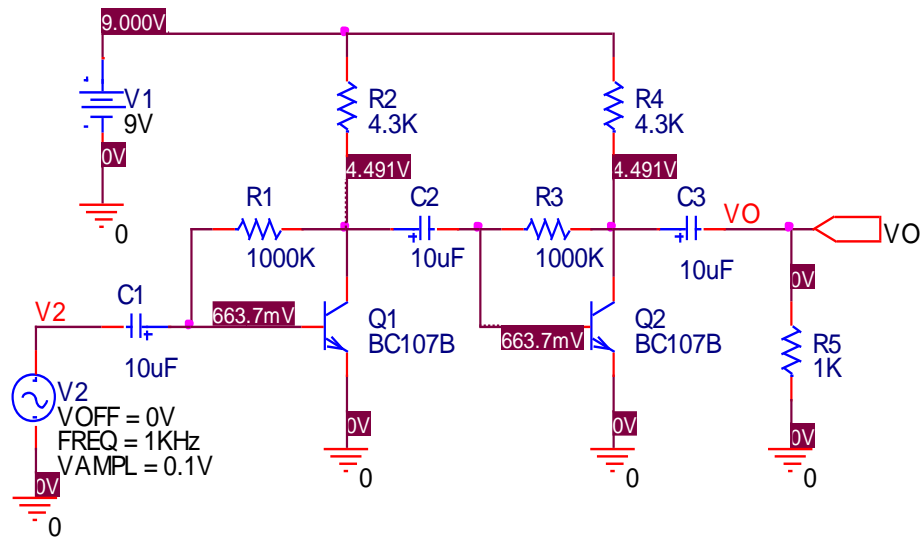
- 因為採用 R 及 C 方式，故結構簡單、成本低。
- 頻率響應之效果良好。
- 沒有電感存在，由電磁所感應而產生之交流聲可以降低到最小程度，雜音低。

電阻電容耦合之缺點有：

- 由於電阻負載緣故，損失功率較大，僅適用於低功率放大器場合。
- 前級放大器之輸入阻抗很小，阻抗不能匹配，故效率甚低。
- 耦合電容於低頻時，因  $X_C = 1/(2\pi fC)$ ，故電容抗很大，限制對於較低頻率之放大作用。

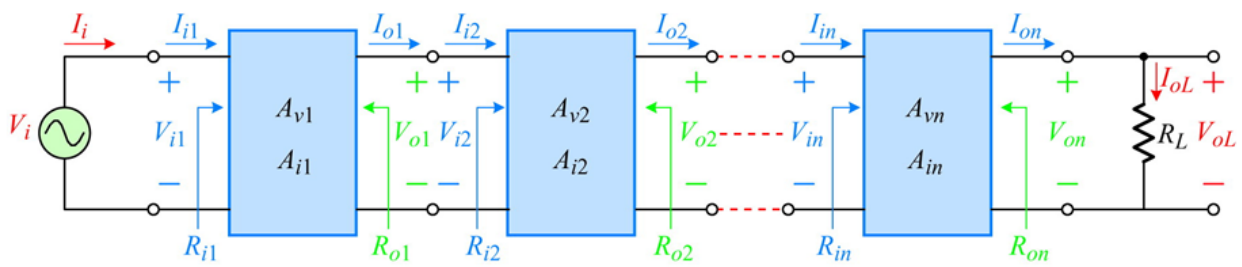
一些在許多的電晶體放大器晶片中，通常是由一些串級放大器所連接而成。圖(二)為電阻電容耦合放大器電路是使用級間電容耦合來連接電路，這樣可以獨立的設計 BJT 偏壓電路，但是低頻響應衰減及引起相位差，不適用於直流放大器電路，例如：熱電偶放大器及伺服控制器電路，另外由於元件及放大器電路的積體化，無法製造

出大電容量的電容器，此為 RC 耦合放大器電路的缺點。



圖(二)：兩級電容耦合放大器電路及直流偏壓值

#### a. 串級放大器的電壓增益



圖(三)：串級放大電路方塊圖[4]

圖(三)為串級放大器的總電壓增益  $A_{vT}$ ，為各級電壓增益的乘積。

$$A_{vT} = A_{v1} \times A_{v2} \times A_{v3} \dots \times A_{vn} \quad (n \text{ 為放大器級數})$$

$$\text{總電壓增益 } A_{vT} = \frac{V_{oL}}{V_i} = \frac{V_{on}}{V_{i1}} = \frac{V_{o1}}{V_{i1}} \times \frac{V_{o2}}{V_{i2}} \times \dots \times \frac{V_{on}}{V_{in}} = A_{v1} \times A_{v2} \times \dots \times A_{vn}$$

$$\text{總電流增益 } A_{iT} = \frac{I_{oL}}{I_i} = \frac{I_{on}}{I_{i1}} = \frac{I_{o1}}{I_{i1}} \times \frac{I_{o2}}{I_{i2}} \times \dots \times \frac{I_{on}}{I_{in}} = A_{i1} \times A_{i2} \times \dots \times A_{in}$$

$$\text{總功率增益 } A_{pT} = \frac{P_{on}}{P_{i1}} = \frac{P_{o1}}{P_{i1}} \times \frac{P_{o2}}{P_{i2}} \times \dots \times \frac{P_{on}}{P_{in}} = A_{p1} \times A_{p2} \times \dots \times A_{pn}$$

$$A_{pT} = \frac{P_{on}}{P_{i1}} = \frac{|V_{on} \times I_{on}|}{|V_{i1} \times I_{i1}|} = |A_{vT} \times A_{iT}|, \quad A_{pT} = \frac{P_{on}}{P_{i1}} = \frac{I_{on}^2 \times R_L}{I_{i1}^2 \times R_{i1}} = A_{iT}^2 \times \frac{R_L}{R_{i1}}$$

$$A_{pT} = \frac{P_{on}}{P_{i1}} = \frac{V_{on}^2 / R_L}{V_{i1}^2 / R_{i1}} = A_{vT}^2 \times \frac{R_{i1}}{R_L}$$

### b. 電壓增益的分貝值[6]

放大器的電壓增益通常以「分貝」 $dB$  來表示。

$$A_p(dB) \triangleq 10 \times \log \frac{P_o}{P_i}, \quad A_p(dB) = 10 \times \log |A_v \times A_i| = 10 \times \log |A_v| + 10 \times \log |A_i|$$

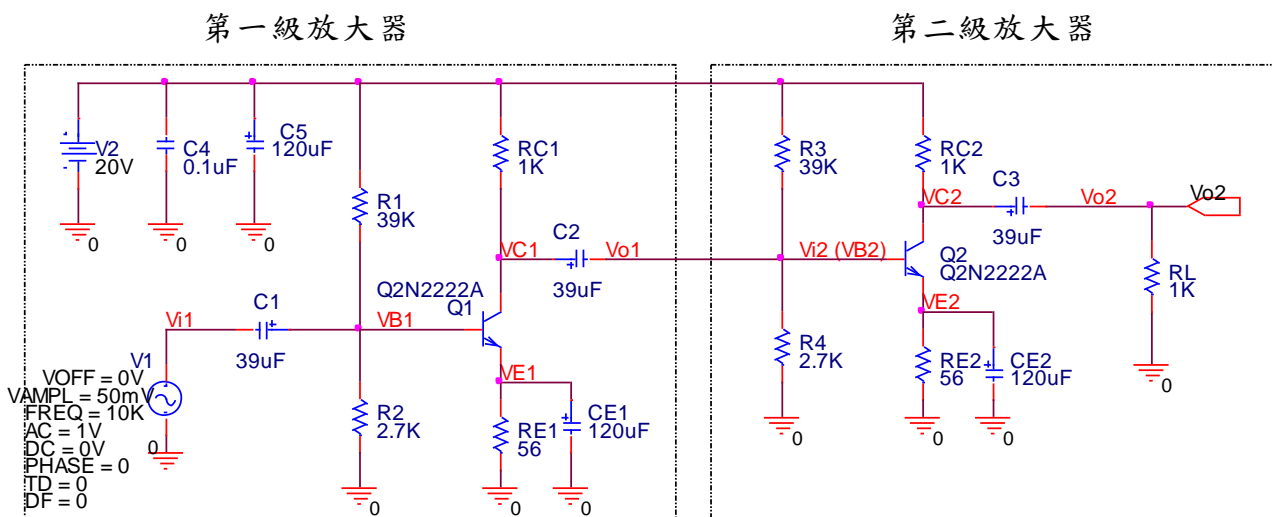
$$A_p(dB) = 10 \times \log \left( A_i^2 \times \frac{R_L}{R_{i1}} \right) = 20 \times \log |A_i| + 10 \times \log \frac{R_L}{R_{i1}}$$

$$A_p(dB) = 10 \times \log \left( A_v^2 \times \frac{R_{i1}}{R_L} \right) = 20 \times \log |A_v| + 10 \times \log \frac{R_{i1}}{R_L}$$

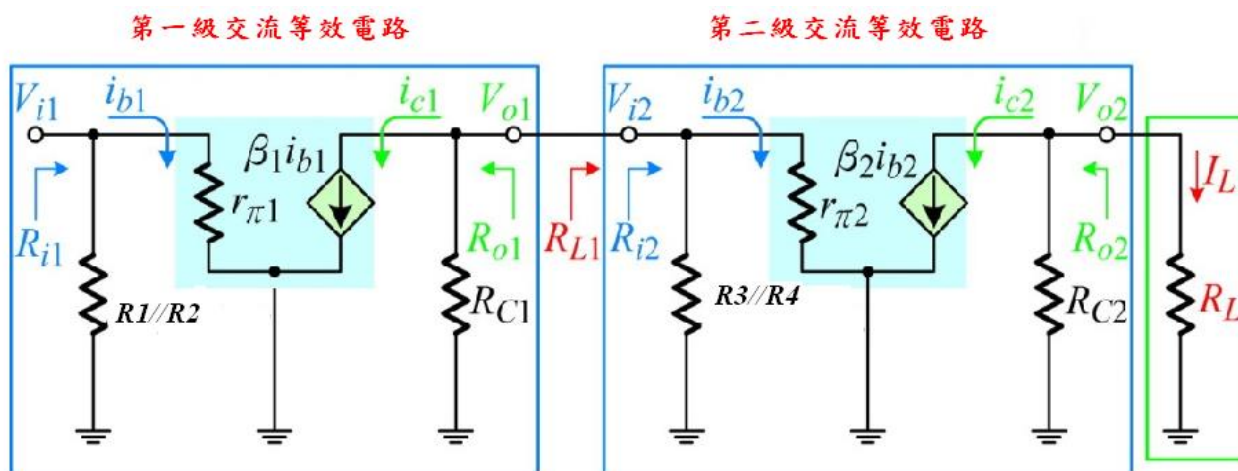
$$\begin{aligned} A_v(dB) &= 20 \log A_v = 20 \log (A_{v1} \times A_{v2} \times A_{v3} \times \cdots \times A_{vn}) \\ &= 20 \log(A_{v1}) + 20 \log(A_{v2}) + 20 \log(A_{v3}) + \cdots + 20 \log(A_{vn}) \\ &= A_{v1}(dB) + A_{v2}(dB) + A_{v3}(dB) + \cdots + A_{vn}(dB) \end{aligned}$$

### c. 串級分析

現以兩級放大器作為分析與解說。圖(四)為兩級共射極放大器組態。第一級的輸出以耦合電容至第二級輸入端。



圖(四)：RC 耦合串級放大器電路



圖(五)：小信號等效電路[4]

在求電壓增益時，必須考慮到第二級(後級)的輸入阻抗對第一級(前級)放大器的影響，此為負載效應。由於假設耦合電容對該交流信號頻率呈現短路  $X_{C_{c1}} \approx 0$ ，所以

第二級放大器的輸入阻抗變成第一級的交流負載。

從第一級的輸出端(Q1 的 C 極往右看，第二級的偏壓電阻與 Q2 的基極輸入阻抗呈現並聯，也就是說對交流信號由 Q1 的集極往右所見到的總電阻為  $R_{C1}' = R_{C1} // R_3 // R_4 // R_{ib2}$ 。因此的等效交流集極電阻為上項電阻的並聯效應，如圖(五)

所示。第一級放大電壓增益被第二負載效應所減少，因為第一級的集極有效電阻

小於真正的集極電阻  $R_{C1}$ ，而第一級電壓增益  $A_{v1} = \frac{R_{C1}'}{r_{e1}}$ 。

$$R_{C1}' = R_{C1} // R_3 // R_4 // R_{ib2}$$

因上述兩電路的偏壓電阻皆相同，故兩電阻的偏壓也相同。

$$V_{B1} = V_{B2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{CC} = \frac{2.7K\Omega}{39K\Omega + 2.7K\Omega} \times 20V = 1.29V$$

$$V_{E1} = V_{E2} = V_{B1} - 0.65V = 0.64V$$

$$I_{E1} = I_{E2} = \frac{V_{E1}}{R_{E1}} = \frac{0.64V}{56\Omega} = 11.43(mA), \quad I_{E1} \approx I_{C1} = I_{C2} = 11.43(mA)$$

$$V_{C1} = V_{C2} \approx V_{CC} - I_{C1} \times R_{C1} = 20V - 11.43(mA) \times (1K\Omega) = 8.57V$$

$$r_{e1} = r_{e2} = \frac{25mV}{I_{E1}} = \frac{25mV}{11.43mA}, \quad r_{\pi1} = r_{\pi2} = (\beta + 1)r_{e1} = 181 \times 2.18\Omega, \quad (\beta = 180),$$

$$r_{\pi1} = 394.58\Omega$$

$$r_{e1} \approx 2.18\Omega$$



$$R_{C1}' = R_{C1} // R3 // R4 // R_{ib2} \approx 1K\Omega // 39K\Omega // 2.7K\Omega // 395\Omega \approx 255\Omega$$

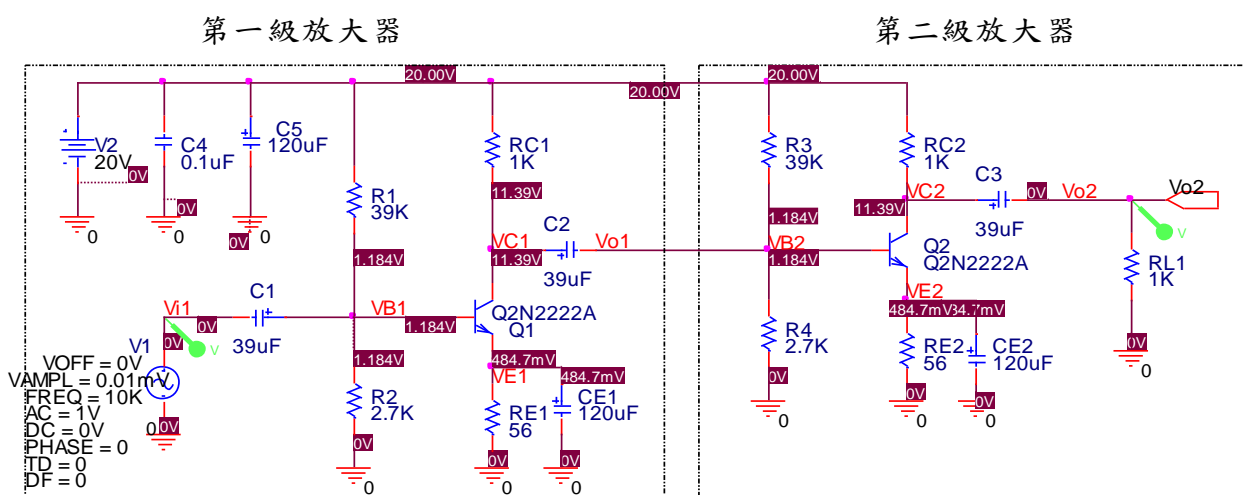
$$\text{電壓增益: } A_{v1} = \frac{R_{C1}'}{r_{e1}} = \frac{255\Omega}{2.18\Omega} \approx 117, \quad A_{v1}(dB) = 20\log 117 \approx 41.36(dB)$$

$$\text{第二級電壓增益 } A_{v2} = \frac{R_{C2}'}{r_{e1}} = \frac{R_{C2} // R_{L1}}{2.18\Omega} \approx 229, \quad A_{v2}(dB) = 20\log 229 \approx 47.2(dB)$$

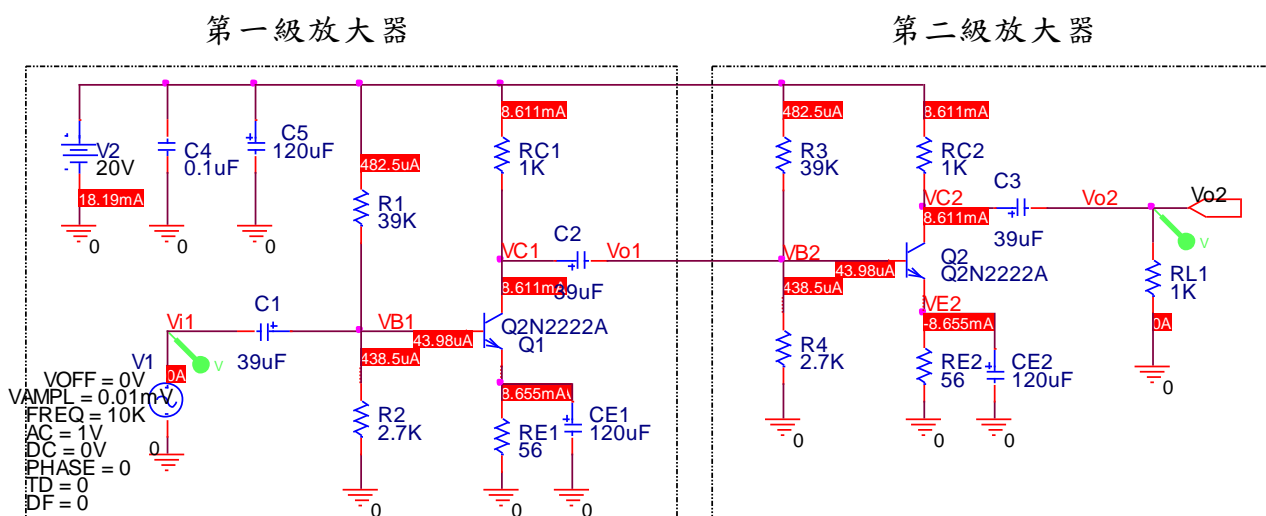
$$\text{此串級放大器的電壓總增益 } A_v = A_{v1} \times A_{v2} = 117 \times 229 = 26,793$$

$$A_v(dB) = 20\log 26793 = 41.36(dB) + 47.2(dB) \approx 88.56(dB)$$

#### d. 電路模擬



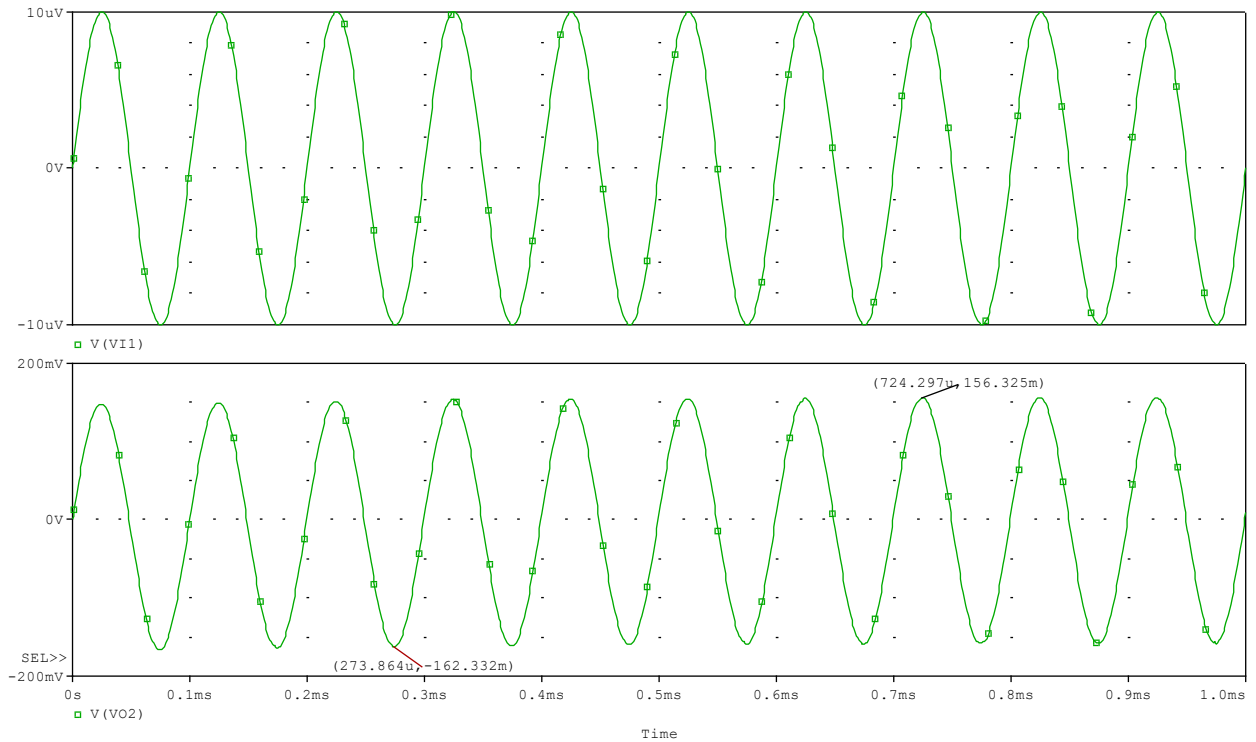
圖(六)：偏壓點分析：串級放大器的直流偏壓(一)



圖(七)：偏壓點分析：串級放大器的直流偏壓(二)



◎暫態分析：電壓增益  $A_v = \frac{320mV(p-p)}{20uV(p-p)} = 16,000$

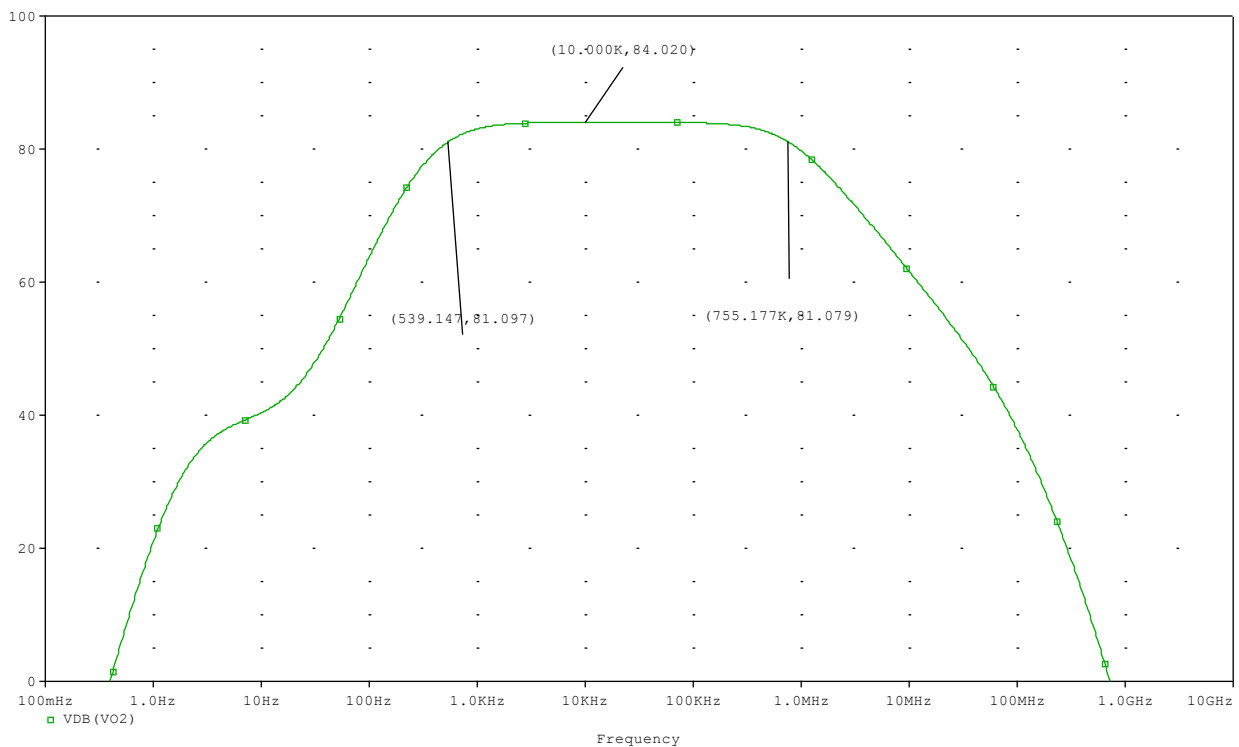


圖

(八)：串級放大器的暫態波形

◎交流分析：中頻增益  $A_v(dB) \approx 84.02(dB)$ ， $f_{L(-3dB)} \approx 539Hz$ ， $f_{H(-3dB)} \approx 755.18KHz$ ，

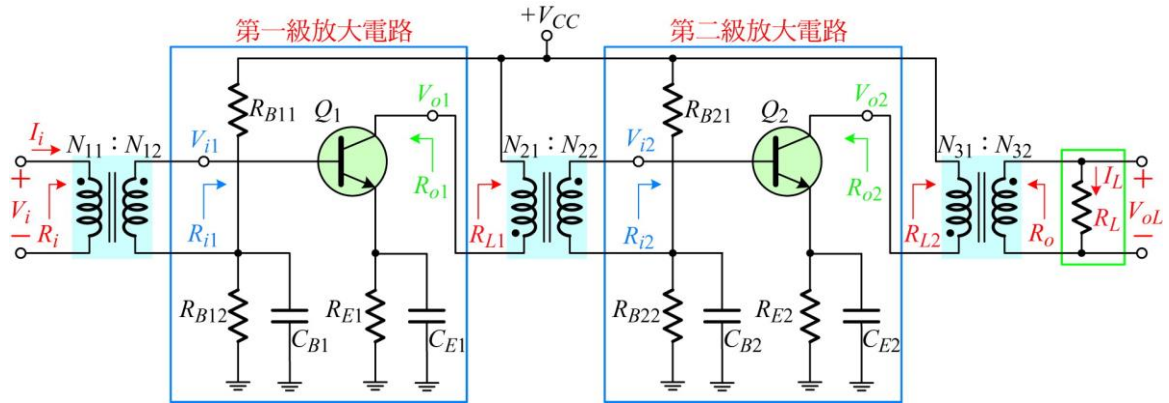
串級放大器頻寬  $B.W. \approx 754.61KHz$ 。



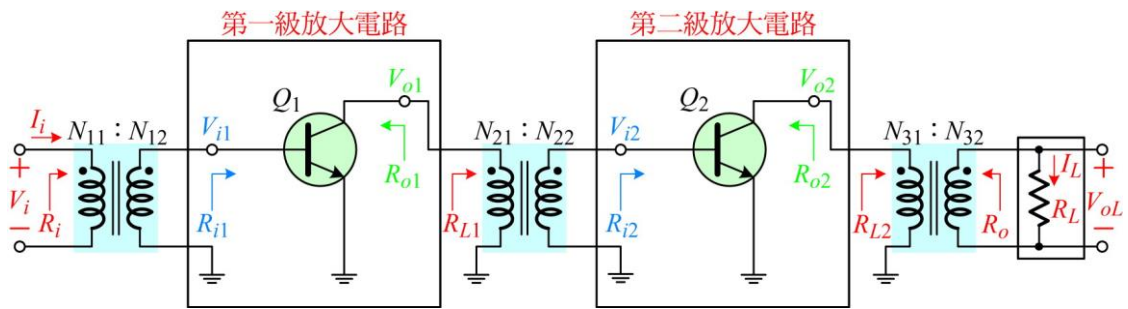
圖(九)：串級放大器的頻率響應

## (二)、變壓器耦合串級放大電路

變壓器耦合之最大優點，在於可使各級放大器之間的輸入阻抗與輸出阻抗容易獲得匹配，而得到最大的傳輸功率與增益，而且變壓器可以阻隔直流，使各級放大器之 DC 工作點不致相互影響。但因存在變壓器，使得其成本較貴、頻率響應較 RC 耦合方式差，只適用於固定頻率放大範圍之場合，音頻電路少使用。



圖(十)：原始放大電路[4]



圖(十一)：小信號等效電路[4]

$$R_i = \left( \frac{N_{11}}{N_{12}} \right)^2 \times R_{i1} = \left( \frac{N_{11}}{N_{12}} \right)^2 \times r_{\pi 1}, \quad R_o = \left( \frac{N_{32}}{N_{31}} \right)^2 \times R_{o2} = \left( \frac{N_{32}}{N_{31}} \right)^2 \times r_{o2}$$

$$A_{vT} = \frac{V_{oL}}{V_i} = \frac{V_{i1}}{V_i} \times \frac{V_{o1}}{V_{i1}} \times \frac{V_{i2}}{V_{o1}} \times \frac{V_{o2}}{V_{i2}} \times \frac{V_{oL}}{V_{o2}} = \frac{N_{12}}{N_{11}} \times A_{v1} \times \frac{N_{22}}{N_{21}} \times A_{v2} \times \frac{N_{32}}{N_{31}}$$

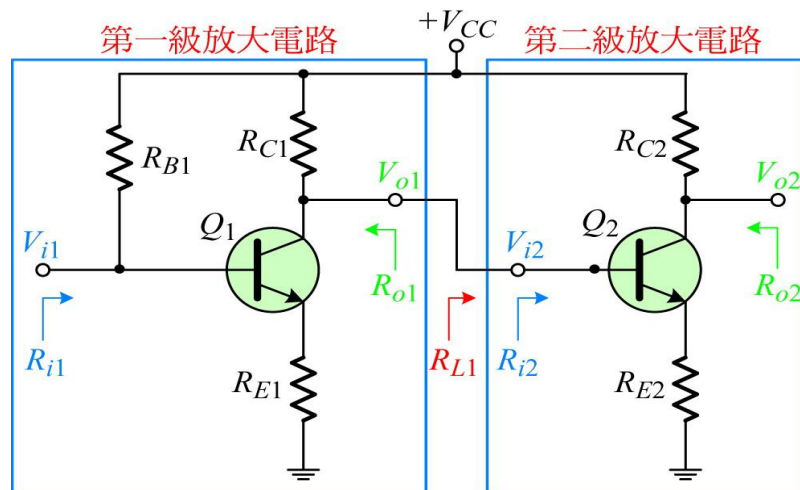
$$A_{v1} = \frac{-\beta_1 \times (r_{o1} // R_{L1})}{r_{\pi 1}}, \quad R_{L1} = \left( \frac{N_{21}}{N_{22}} \right)^2 \times R_{i2} = \left( \frac{N_{21}}{N_{22}} \right)^2 \times r_{\pi 2}$$

$$A_{v2} = \frac{-\beta_2 \times (r_{o2} // R_{L2})}{r_{\pi 2}}, \quad R_{L2} = \left( \frac{N_{31}}{N_{32}} \right)^2 \times R_L$$

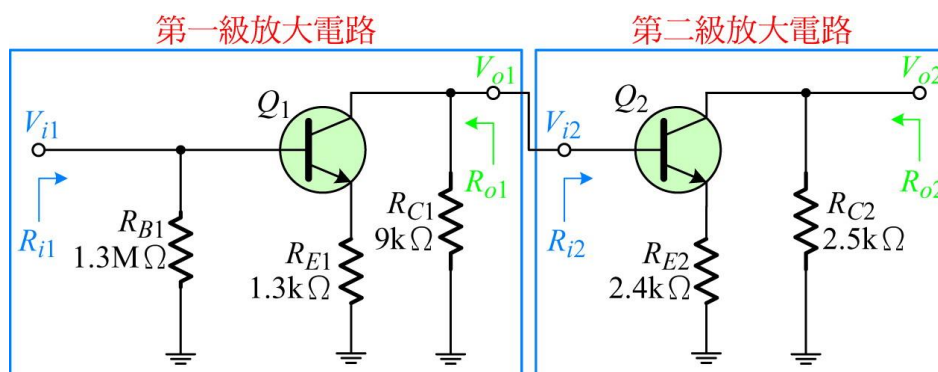
### (三)、直接耦合串級放大電路

直接耦合的主要目的是在避免低頻時於耦合電容上造成大量損失，而因為少了電阻電容等元件，故最具經濟價值。由於沒有電容器來阻隔直流，造成次一級放大器偏壓點受前級輸出直流電壓之影響而變動；另偏壓電流所產生之溫度變化亦會影響其它級而造成不穩定，故在直接耦合電路中，電晶體最容易受溫度影響。

兩級直接耦合放大電路，由於它的直接串接，沒有電容器隔斷直流電壓，前一級的直流變化，會被放大而饋送到下一級，而產生工作點的不穩定，為了克服此一問題，通常利用射極電阻器  $R_E$  的回授作用，來提高其穩定度。



圖(十二)：原始放大電路[4]



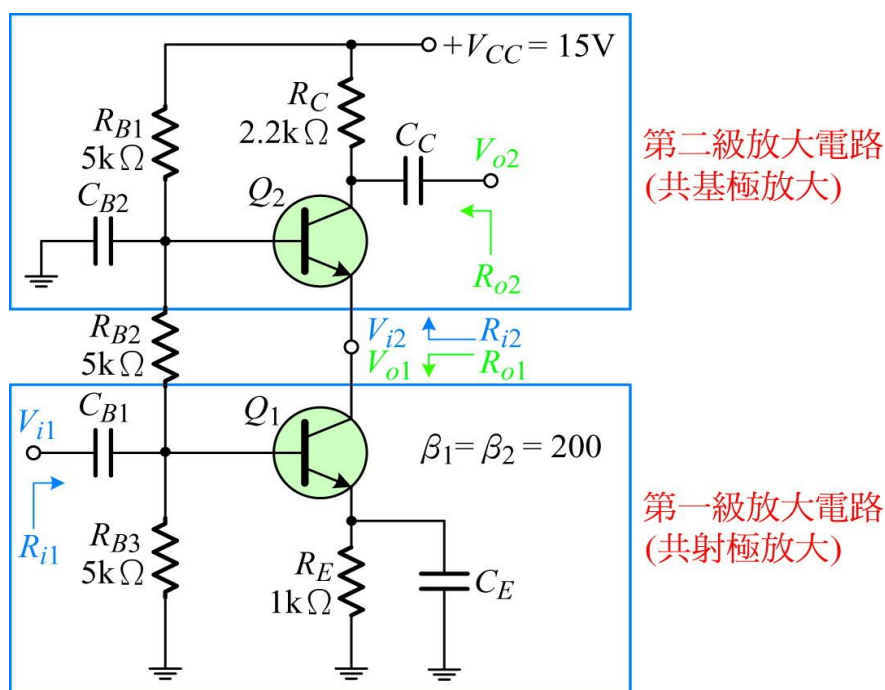
圖(十三)：小信號等效電路[4]

$$A_{vT} = A_{v1} \times A_{v2} = \frac{-\beta_1 \times (R_{C1} // R_{i2})}{r_{\pi 1} \times (1 + \beta_1) \times R_{E1}} \times \frac{-\beta_2 \times R_{C2}}{r_{\pi 2} \times (1 + \beta_2) \times R_{E2}}$$

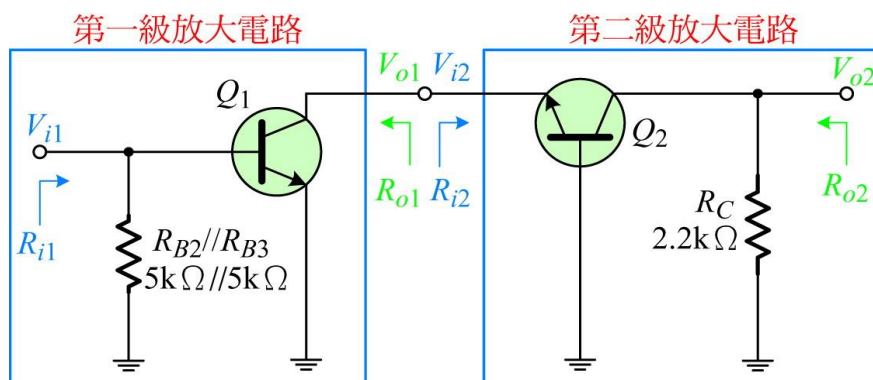
#### (四)、疊接串級放大電路

共射-共基放大器是一個兩級疊接串聯組態，由一個傳導放大器(Transconductance Amplifier)，然後由當前緩衝區，到一個單一的放大器級相比，這樣的組合可具有一個或多個以下特徵：高輸入輸出隔離，更高的輸入阻抗，輸出阻抗高，更高的增益或更高的帶寬。換言之，疊接放大器好處在於不增加電源消耗下改善隔離度和增加增益，並能降低米勒效應(Miller Effect)對訊號的影響，此外，疊接組態擁有高輸出阻抗，提供了設計放大器所需的一個重要特性。

$$A_{vT} = A_{v1} \times A_{v2} = \frac{-\beta_1 \times r_{e2}}{r_{\pi1}} \times \frac{-\alpha_2 \times R_C}{r_{e2}} \approx \frac{-R_C}{r_{e1}}$$



圖(十四)：原始放大電路[4]



圖(十五)：小信號等效電路[4]

#### (五)、達寧頓放大電路

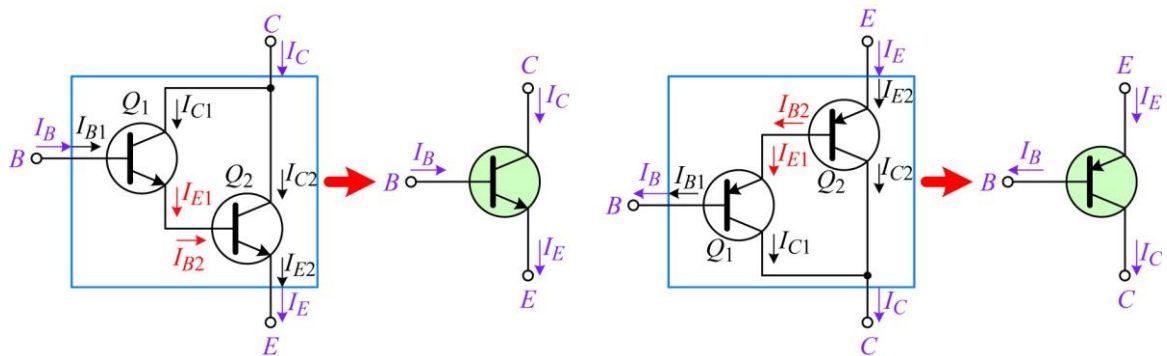
達靈頓放大器另一種型式的直接耦合放大器，電晶體間以直接方式串接，沒有加上任何耦合元件。這樣的電晶體串接型式最大的作用是：提供高電流放大增益。因達靈頓（Darlington）放大電路，由二個電晶體組合而成，是具有極高電流增益的電路，它的電流增益是個別電流增益的乘積，所以達靈頓對電晶體的電流增益為  $\beta_1 \times \beta_2$ ，所以會有較大的漏電流  $I_{CEO}$ 。

達靈頓的特性有：高電流增益、電壓增益約等於 1（小於 1）、高輸入阻抗、低輸出阻抗。另外，達靈頓對電晶體的漏電流  $I_{CEO}$  較大，造成電路不穩定。

達靈頓對電晶體可簡易區分為同型達靈頓對電晶體與異型（或稱互補型）達靈頓對電晶體，兩者的差異性如下所示。

### 1. 同型達靈頓對電晶體

如下圖(十六)所示，兩級放大器元件同為 NPN 型電晶體，將前級電晶體的射極電流直接引入下一級的基極，當作下級的輸入。因為使用相同類型的電晶體，所以稱為「同型達靈頓」連接。



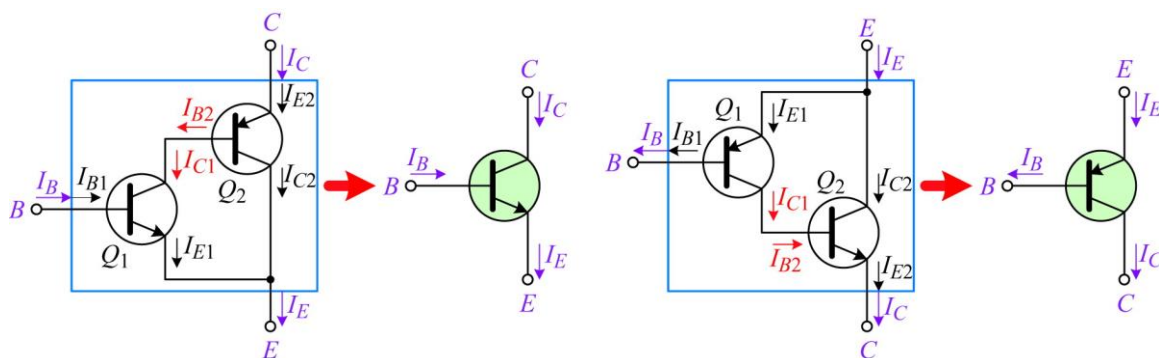
圖(十六)：同型達靈頓對電晶體[4]

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} = \beta_1 \times I_{B1} + \beta_2 \times I_{B2} \quad I_C = \beta_1 \times I_{B1} + \beta_2 \times (1 + \beta_1 I_{B1}) \times I_{B1} = (\beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2) \times I_B$$

$$I_E = I_{E2} = (1 + \beta_2) \times I_{B2} = (1 + \beta_2) \times (1 + \beta_1) \times I_{B1} = (1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2) \times I_B$$

### 2. 異型（或稱互補型）達靈頓對電晶體

使用 NPN 與 PNP 電晶體相互串接達成達靈頓的特性，則稱為「異型達靈頓」。



圖(十七)：異型達寧頓對電晶體[4]

$$I_C = I_{E2} = (1 + \beta_2) \times I_{B2} = (1 + \beta_2) \times \beta_1 \times I_{B1} = (\beta_1 + \beta_1 \beta_2) \times I_B$$

$$I_E = I_{E1} + I_{C2} = (1 + \beta_1) \times I_{B1} + \beta_2 \times I_{B2} = (1 + \beta_1) \times I_{B1} + \beta_2 + \beta_1 \times I_{B1} = (1 + \beta_1 + \beta_1 \beta_2) \times I_B$$

$$I_C \approx I_E \approx \beta_1 \beta_2 \times I_{B2} = \beta^2 \times I_B$$

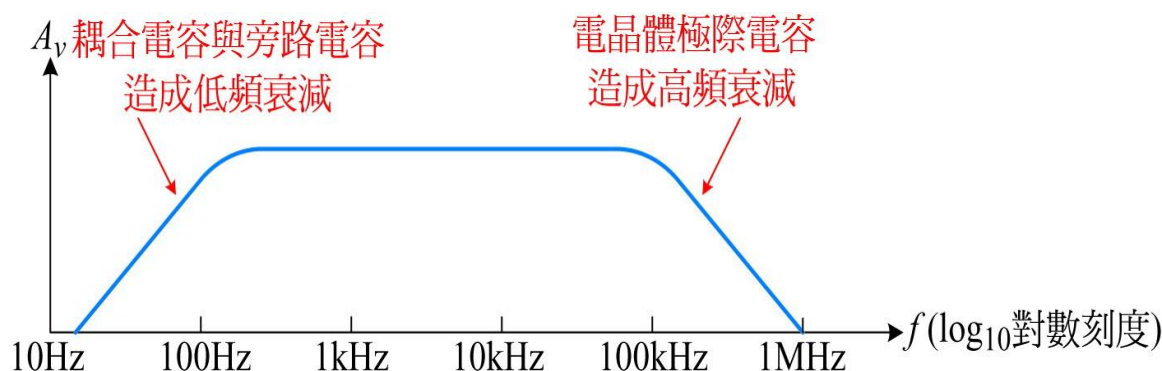
#### (六)、阻抗耦合( Impedance coupling )

為了在兩級不同之輸出、入阻抗條件下而使用，此阻抗可為電晶體或匹配電壓器(變壓器耦合)構成，阻抗耦合適用於低電源電壓，如手提收音機等，其輸出功率大於電阻電容耦合方式，但其缺點為：

1. 成本較電阻電容耦合方式高。
2. 頻率響應不甚良好，大多使用於頻率較為固定之放大器，大範圍之音頻放大器很少使用。

#### (七)、串級放大電路的比較－頻率響應

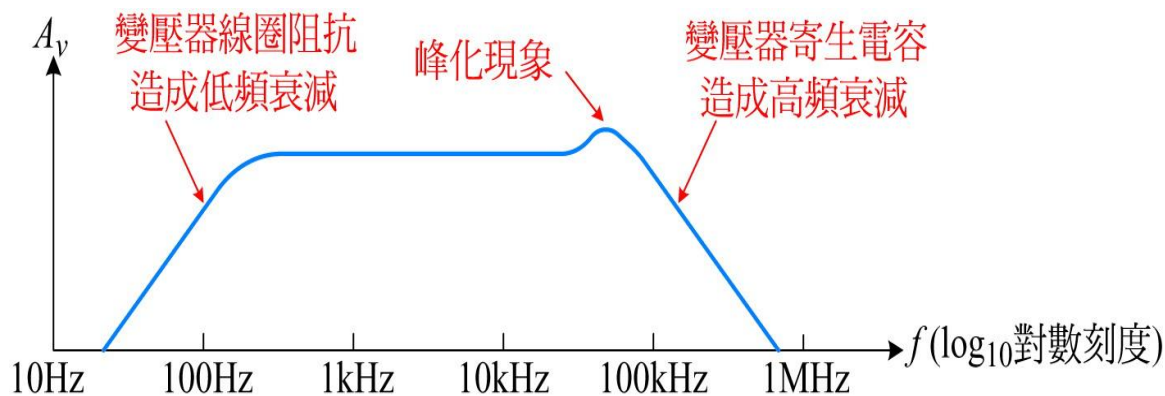
##### 1. RC 耦合串級放大電路之頻率響應



圖(十八)：耦合串級放大電路之頻率響應圖[4]

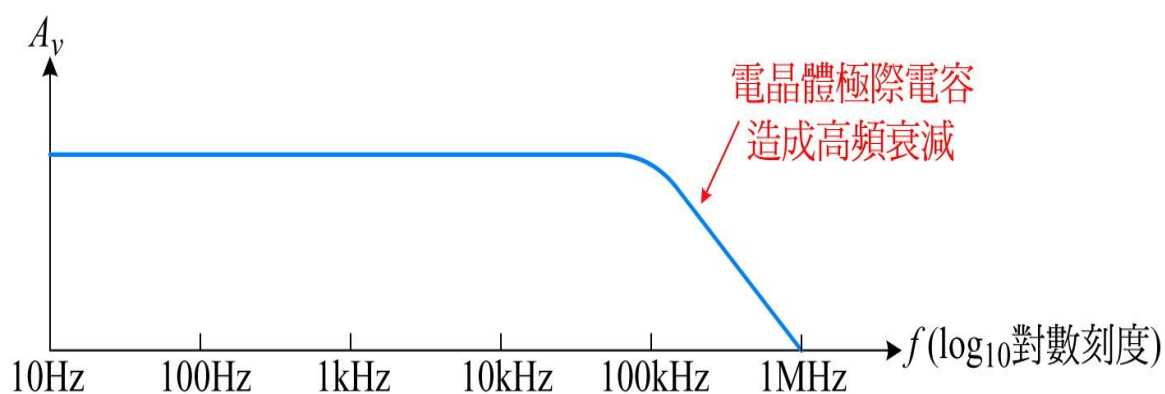
##### 2. 變壓器耦合串級放大電路之頻率響應





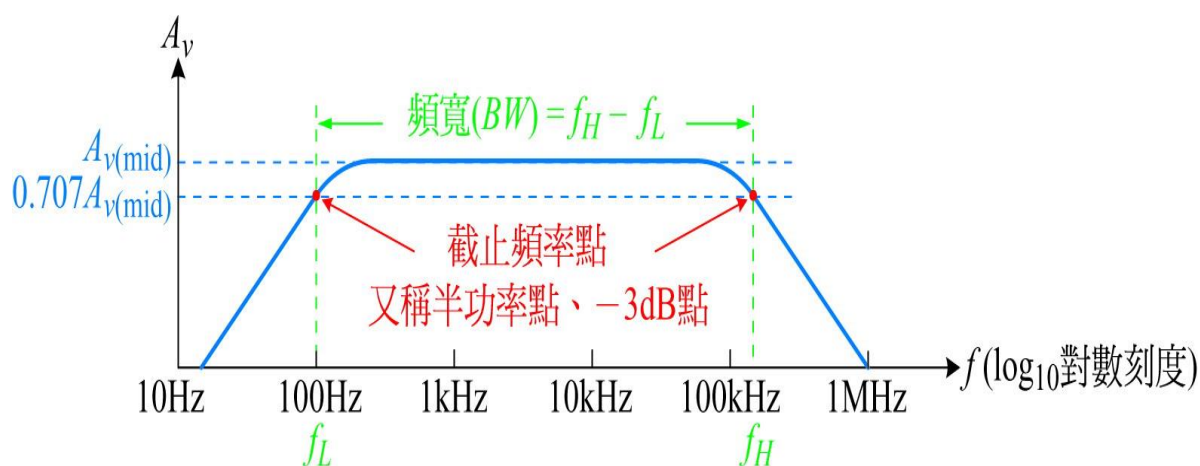
圖(十九)：變壓器耦合串級放大電路之頻率響應圖[4]

## 3. 直接耦合串級放大電路之頻率響應



圖(二十)：直接耦合串級放大電路之頻率響應圖[4]

## 4. 截止頻率

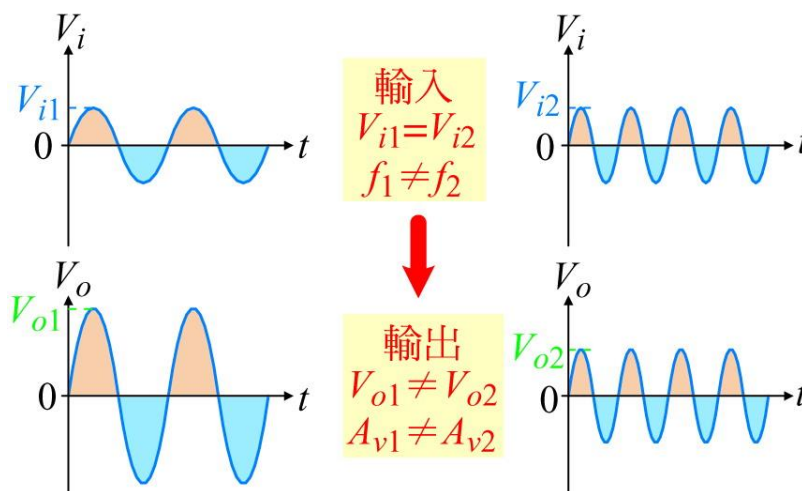


圖(二十一)：頻率響應圖之截止頻率點[4]



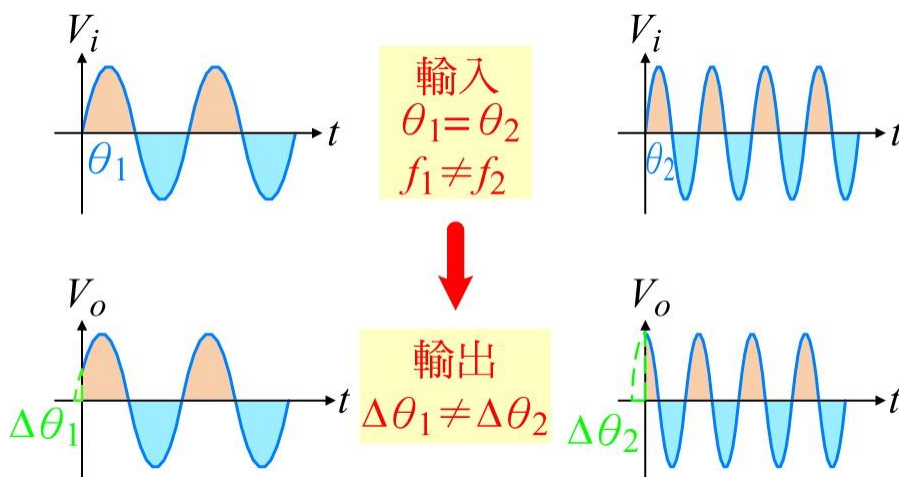
## (八)、失真

## 1. 頻率失真



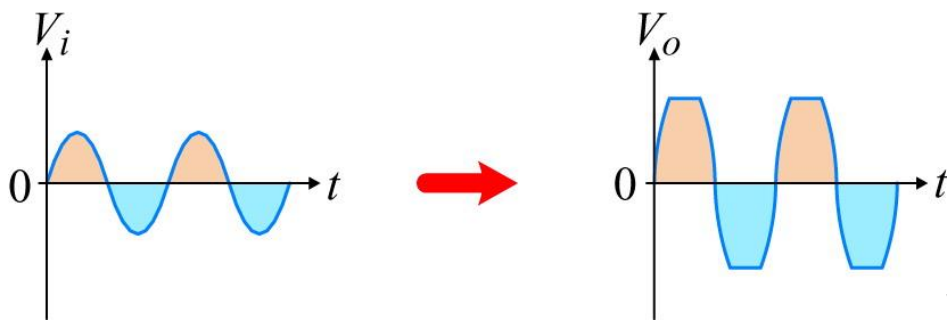
圖(二十二)：頻率失真[4]

## 2. 相位失真



圖(二十三)：相位失真[4]

## 3. 非線性失真



圖(二十四)：非線性失真[4]

## 四.含射極電阻及旁路電容的共射極串級放大器電路

### (1).電路規格：

①.電源電壓：DC 20V

②.電壓增益： $Gain = \frac{VO1}{V1} = A_{v1} \geq 200(46dB)$ 。

③.輸入阻抗： $Z_{i1} \geq 1K\Omega$ 。

④.輸出阻抗： $Z_o \leq 2K\Omega$ 。

⑤.頻率響應：頻寬 $\geq 1MHz$ ， $f_{L(-3dB)} < 100Hz$ 。

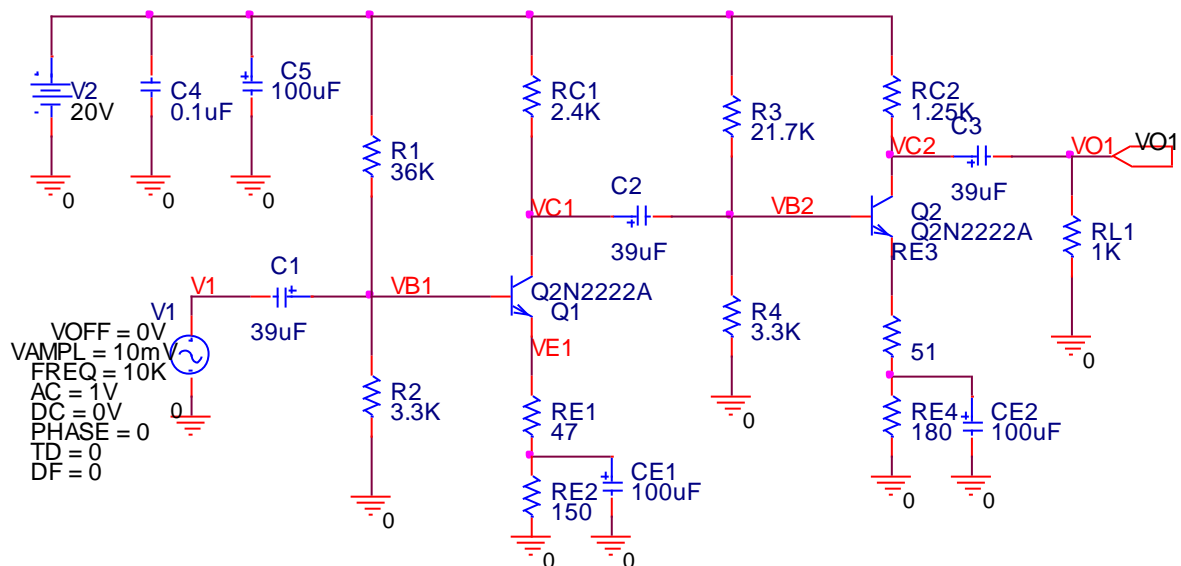
⑥.觀測、記錄弦波波型：測試條件： $V1 = 20mV_{p-p}$ ， $frequency = 1KHz$ ， $R_{L1} = 1K\Omega$ 。

(2).電晶體電路設計，其中電晶體工作點選取值如下所示。

①.Q1( $I_{C1Q} = 5mA, V_{CE1Q} = 8V$ )。

②.Q2( $I_{C2Q} = 8mA, V_{CE2Q} = 8V$ )。

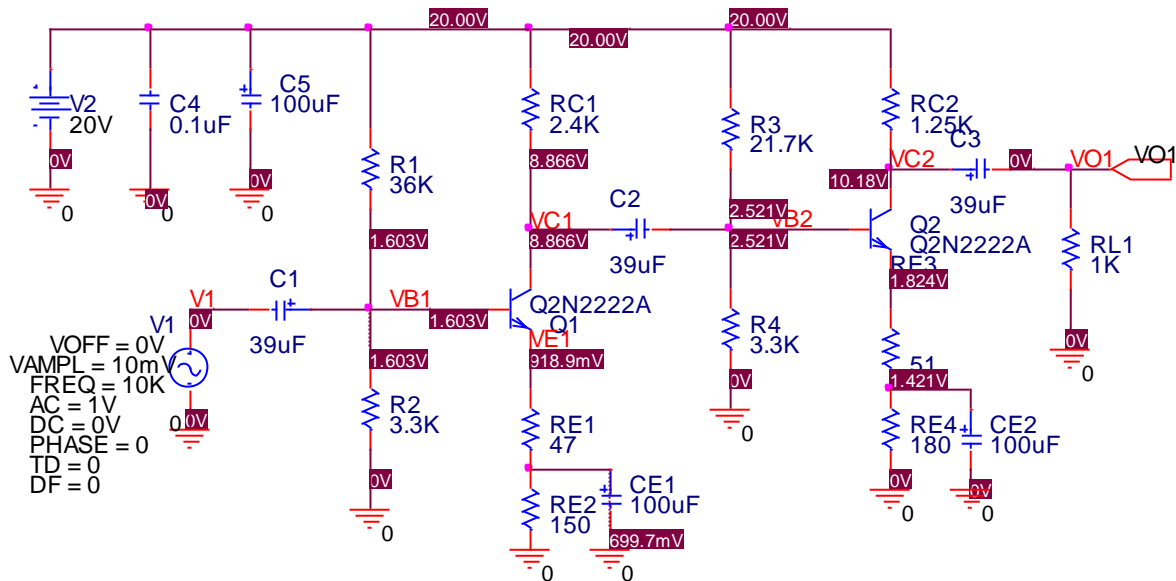
### (3).實驗電路



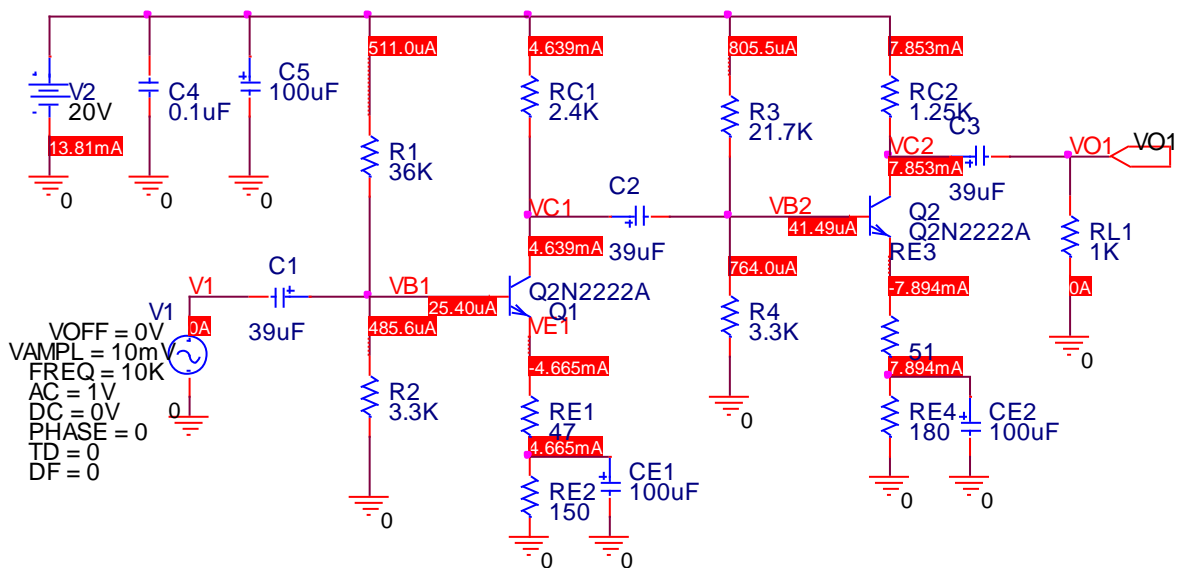
圖(二十四)：實驗電路圖(範例)

## (4).實驗電路模擬

## ①.實驗偏壓及電流值。



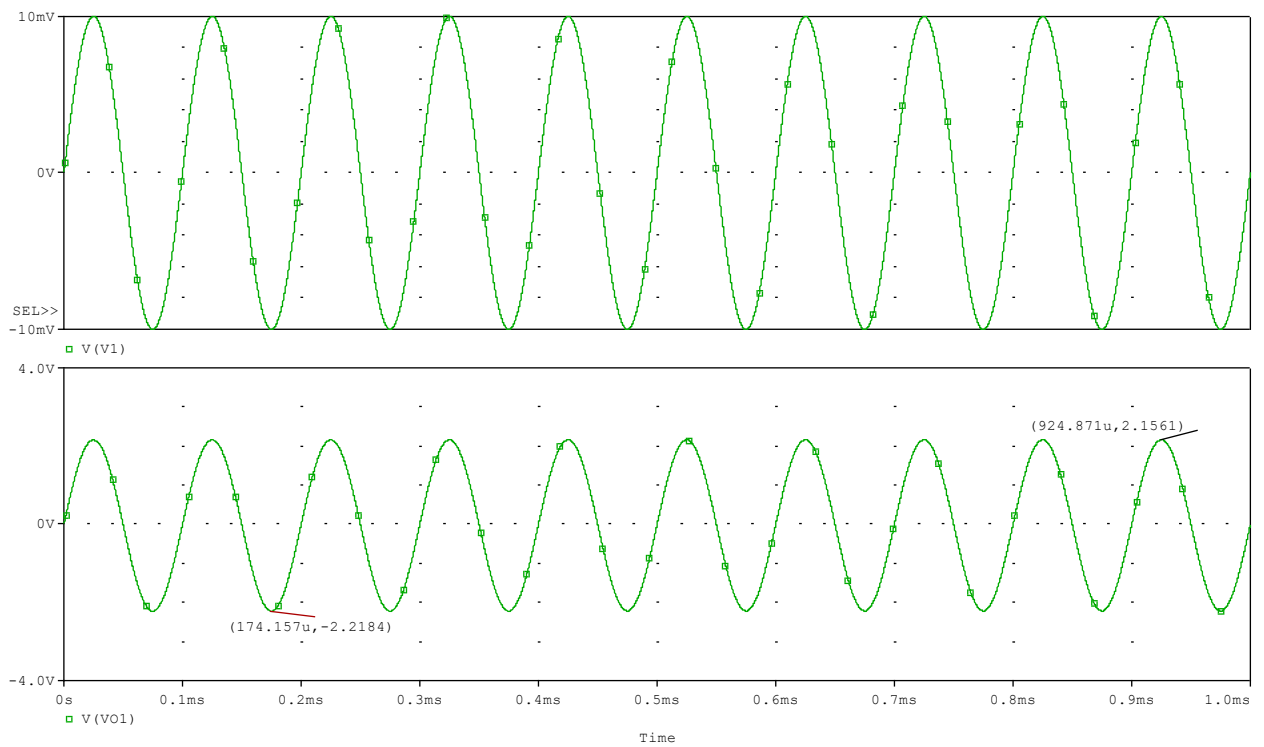
圖(二十五)：偏壓模擬值



圖(二十六)：電流模擬值

## ②.時域波形

◎電壓增益=218.725>200(合乎規格)



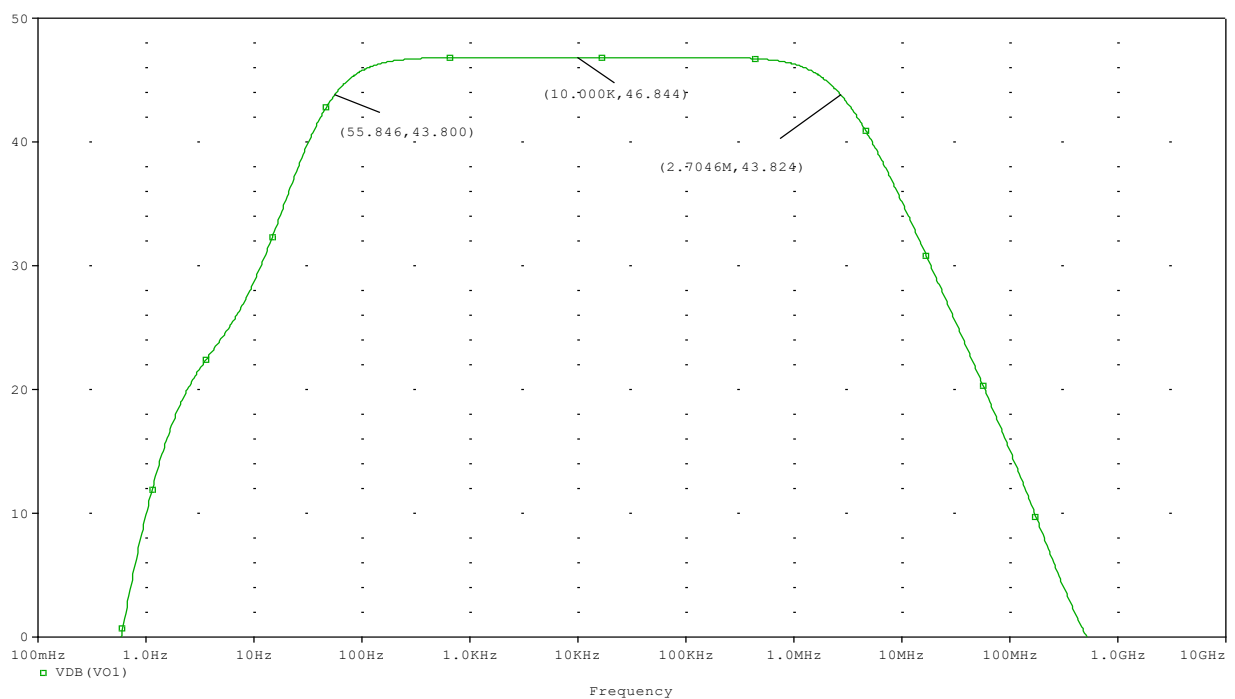
圖(二十七)：輸出波形圖

### ③. 頻率響應

(1). 中頻增益=46.844(dB)(合乎規格)

(2).  $f_{-3dB} = 55.846\text{Hz} < 100\text{Hz}$ (合乎規格)

(3).  $f_{H(-3dB)} \approx 2.705\text{MHz} > 1\text{MHz}$ (合乎規格)



圖(二十八)：放大器頻頻響應模擬圖

## 五、實驗電路設計

### 1. 實驗電路設計規格

①. 電源電壓：DC 30V

②. 電壓增益： $Gain = \frac{VO1}{V1} = A_{v1} \geq 50dB$ 。

③. 輸入阻抗： $Z_{i1} \geq 1K\Omega$ 。

④. 輸出阻抗： $Z_o \leq 2K\Omega$ 。

⑤. 頻率響應：頻寬 $\geq 1MHz$ ， $f_{L(-3dB)} < 100Hz$ 。

2. 設計程序：參閱實驗例題設計偏壓電阻及完成電路模擬，完成實作電路圖，使用麵包版組裝電路，依實驗步驟測試電路及紀錄實驗數據，擷取波形，最後要焊接電路板，測試輸出波形，模擬電路檢查時，列入實驗檢查項目，需繳交上課筆記。

## 六、測試步驟及數據測量與記錄

依據前項實驗電路說明，完成下列各項測量項目：

※注意各位同學輸入測試頻率值，依表格(三)而定。示波器測試波形時應使用示波器的測量功能，測量 CH1 及 CH2 峰-峰值大小及輸入測試頻率值，如未在輸出波形中顯示上述之結果，應重新擷取波形。

表(三)：各組頻率值

組別	頻率值	組別	頻率值	組別	頻率值	組別	頻率值
NO.1-1	1.1KHz	NO.8-2	2.6KHz	NO.16-1	4.1KHz	NO.23-2	5.6KHz
NO.1-2	1.2KHz	NO.9-1	2.7KHz	NO.16-2	4.2KHz	NO.24-1	5.7KHz
NO.2-1	1.3KHz	NO.9-2	2.8KHz	NO.17-1	4.3KHz	NO.24-2	5.8KHz
NO.2-2	1.4KHz	NO.10-1	2.9KHz	NO.17-2	4.4KHz	NO.25-1	5.9KHz
NO.3-1	1.5KHz	NO.10-2	3.0KHz	NO.18-1	4.5KHz	NO.25-2	6.0KHz
NO.3-2	1.6KHz	NO.11-1	3.1KHz	NO.18-2	4.6KHz	NO.26-1	6.1KHz
NO.4-1	1.7KHz	NO.11-2	3.2KHz	NO.19-1	4.7KHz	NO.26-2	6.2KHz
NO.4-2	1.8KHz	NO.12-1	3.3KHz	NO.19-2	4.8KHz	NO.27-1	6.3KHz

組別	頻率值	組別	頻率值	組別	頻率值	組別	頻率值
NO.5-1	1.9KHz	NO.12-2	3.4KHz	NO.20-1	4.9KHz	NO.27-2	6.4KHz
NO.5-2	2.0KHz	NO.13-1	3.5KHz	NO.20-2	5.0KHz	NO.28-1	6.5KHz
NO.6-1	2.1KHz	NO.13-2	3.6KHz	NO.21-1	5.1KHz	NO.28-2	6.6KHz
NO.6-2	2.2KHz	NO.14-1	3.7KHz	NO.21-2	5.2KHz	NO.29-1	6.7KHz
NO.7-1	2.3KHz	NO.14-2	3.8KHz	NO.22-1	5.3KHz	NO.29-2	6.8KHz
NO.7-2	2.4KHz	NO.15-1	3.9KHz	NO.22-2	5.4KHz	NO.30-1	6.9KHz
NO.8-1	2.5KHz	NO.15-2	4.0KHz	NO.23-1	5.5KHz	NO.30-2	7.0KHz

※實驗注意事項－使用萬用電錶測量電壓時，請設定為 4 位半顯示測量值，測量電阻時，請設定為 4 位半顯示測量值。測量弦波或方波石，輸入電壓或輸出電壓，皆使用測量峰-峰值( $V_{p-p}$ )。

■測試頻率值=\_\_\_\_\_KHz

(一)、測量項目(一)：元件測量。

1. 使用數位電表直接測量電晶體的  $\beta$  值，並可得知 B、C、E 腳位。

記錄：電晶體 Q1 及 Q2 的  $\beta$  值=\_\_\_\_\_。

(二)、測量項目(二)：BJT Q1 及 Q2 偏壓點調整與測量

1. 參閱實驗電路圖(4-1)，補上原實驗電路圖中電阻值(OrCAD 畫好)，附在實驗結報中，依據實驗設計值完成電路元件選用與組裝電路。

◎附上實驗電路圖。

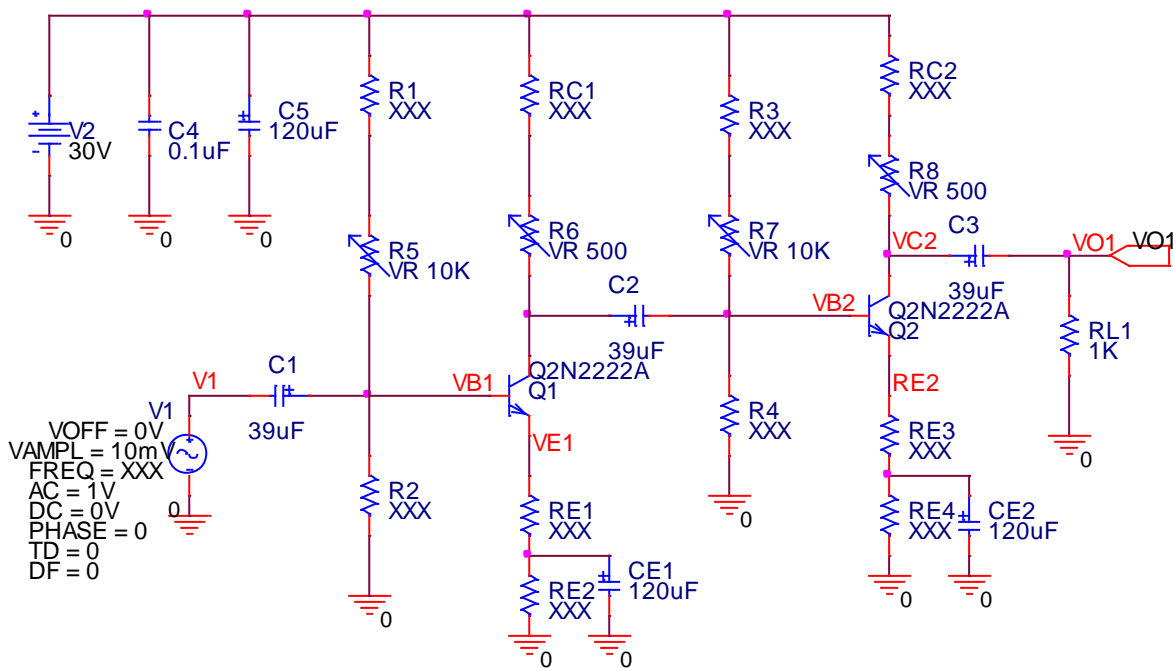
2. 接上 30V 直流電壓源，應注意是否有短路發生，請確認您所接的電路是否正常工作，最簡單的方法就是使用萬用電表，檢驗電路模擬圖所完成的偏壓值是否差異過大，如有過大值存在，就要找出錯誤的原因。

3. 調整可變電阻，改變電晶體的偏壓點，應儘量調整出實驗規格值，使用三用電表測量下列電壓，並記錄之，完成表格(4-1)內容。

表(4-1)：電晶體 Q1、Q2 偏壓點測量值及計算值

測 量 值	測 量 值	計 算 值
$V_{BE1} =$	$V_{RE2} =$	$I_{E1Q} = I_{RE2} =$
$V_{B1Q} =$	$V_{R1} =$	$I_{R1} =$
$V_{CE1Q} =$	$V_{RC1} =$	$I_{C1Q} = I_{RC1} =$
	$V_{R2} =$	$I_{R2} =$
$V_{BE2} =$	$V_{RE4} =$	$I_{E2Q} = I_{RE4} =$
$V_{B2Q} =$	$V_{R3} =$	$I_{R3} =$
$V_{CE2Q} =$	$V_{RC2} =$	$I_{C2Q} = I_{RC2} =$
	$V_{R4} =$	$I_{R4} =$

※附上設計完成之實驗電路圖。



圖(4-1)：實驗電路圖

圖(4-1-1)：設計完成之實驗電路圖(列入檢查項目)



### (三)、測量項目(三)：BJT 輸出節點電壓增益的測量

#### 1.調整訊號產生器設定

- 輸入波形：正弦波[V1]
- 輸入頻率：依各組之頻率值
- 輸入峰-峰值(Vp-p)：20mV
- 以下各項目測試，CH1、CH2 兩測試波形皆分開顯示。
- 測試探棒[CH1，CH2]=[V1，VT]，VT 為各測試節點。

#### 2.擷取下列各節點波形，輸出節點[VO1] 峰-峰值應合乎實驗要求。

- 節點[V1，VC1]： $A_{v3} = \frac{VC1}{V1} = \underline{\hspace{2cm}}$ ，(相位關係：☐同相、☐反相)。
- 節點[V1，VO1]： $A_{v7} = \frac{VO1}{V1} = \underline{\hspace{2cm}}$ ，(相位關係：☐同相、☐反相)。

#### 3.方波測試，調整訊號產生器的輸出為下列波形：

- 輸出波形：方波
- 輸出頻率：依各組別之頻率值
- 輸出峰-峰值(Vp-p)：20mV

#### 4.續前步驟已調整好的電路，擷取下列節點波形，測試探棒[CH1，CH2]=[V1，VO1]。

### (四)、測量項目(四)：頻率響應特性測試

#### 1.探棒[CH1、CH2]=[V1、VO1]。F.G.頻率=1KHz，[VO1]峰-峰值電壓( $V_{p-p}$ )= 20mV(雜訊多，以 F.G.輸入值為準)。調整可變電阻，需輸出[VO1]合乎實驗設計規格。

#### 2.分別改變輸入頻率，觀察節點[VO1]波形，記錄下[VO1]峰-峰值大小及輸入與輸出的相位差且計算出 dB 值，完成表格(4-2)內容。使用 Excel 軟體繪製出如下的頻率響應圖(峰-峰值大小(dB 值)及相位差)。

#### 3.輸出圖表

- 多級放大器頻率響應圖(Excell 作圖)：增益對頻率之關係。
- 多級放大器頻率響應圖(Excell 作圖)：相位對頻率之關係。

表(4-2)：BJT 放大器頻率響應測試資料記錄表

頻率 (Hz)	輸入 V1 (峰-峰值)	輸出 VO1 (峰-峰值)	計算電壓增益值 (dB)	記錄相位差 (度)
2				
10				
100				
500				
1K				
10K				
30K				
60K				
90K				
100K				
300K				
600K				
900K				
1MHz				
2 MHz				
4MHz				
6MHz				
10MHz				

**(五)、實驗項目(五)：測量出-3dB 截止點頻率**

- 調整訊號產生器頻率：微調頻率旋鈕(頻率調小於 1KHz)，在微調頻率時示波器測得[CH1] ( $V_{p-p}$ ) = 20mV，電壓增益依實作結果，若訊號產生器輸出峰-峰值如有變動，需微調訊號產生器的振幅旋鈕。當頻率調整到-3dB 截止點頻率時，即為  $f_{L(-3dB)}$  截止點頻率，節點[VO1]輸出峰-峰值( $V_{p-p}$ )合乎實驗設計規格的 0.707 倍，此時記錄頻率值，記錄 CH1 對 CH2 的相位差，並擷取此波形。
- 調整訊號產生器頻率：微調頻率旋鈕(頻率調大於 1KHz)，在微調頻率時示波器測

得[CH1] ( $V_{p-p}$ )=20mV，其峰-峰值如有變動，需微調訊號產生器的振幅旋鈕。當頻率調整到-3dB 截止點頻率時，即為  $f_{H(-3dB)}$  截止點頻率，節點[VO1]輸出峰-峰值合乎實驗設計規格的 0.707 倍，此時記錄頻率值，記錄 CH1 對 CH2 的相位差，並擷取此波形。

### 3.測量低頻-3dB 截止頻率：

- a.頻率=1KHz 時，輸出 VO1=\_\_\_\_\_，擷取波形：[CH1、CH2]=[V1、VO1]。
- b.頻率= $f_{L(-3dB)}$ =\_\_\_\_\_，輸出 VO1=\_\_\_\_\_，擷取波形：[CH1、CH2]=[V1、VO1]。
- c.記錄：CH1 對 CH2 的相位差=\_\_\_\_\_。

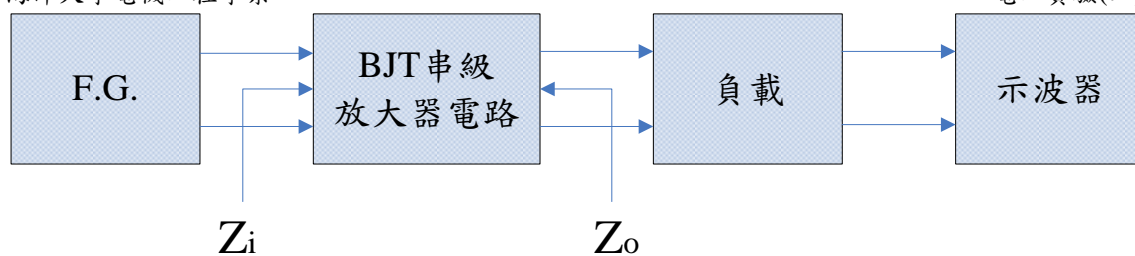
### 4.測量高頻-3dB 截止頻率：高頻截止頻率過高時，測量數據以儀器所能測試的最高頻率就可以了。

- a.頻率=1KHz 時，輸出 VO1=\_\_\_\_\_，擷取波形：[CH1、CH2]=[V1、VO1]。
- b.頻率= $f_{H(-3dB)}$ =\_\_\_\_\_，輸出 VO1=\_\_\_\_\_，擷取波形：[CH1、CH2]=[V1、VO1]。
- c.記錄：CH1 對 CH2 的相位差=\_\_\_\_\_。

### 5.計算頻寬增益乘積=\_\_\_\_\_。

## (六)、測量項目(六)：輸出阻抗測試。

- 1.示波器探棒接妥[CH1、CH2]=[V1、VO1]。F.G.設定頻率=1KHz，示波器 CH1 測得峰-峰值電壓 ( $V_{p-p}$ )=20mV。調整可變電阻，使得[VO1]峰-峰值電壓 ( $V_{p-p}$ ) 合乎實驗設計規格。
- 2.更換負載測試：去除負載電阻，測量無負載下的電壓值  $V_{OPEN}(p-p)$ ，並擷取此結果，示波器測量時，需標示出電壓值。
- 3.接負載電阻=2K $\Omega$  於負載處，測量放大器的輸出電壓值，其輸出電壓  $V_{LOAD}(p-p)$ ，並擷取此結果，示波器測量時，需標示出電壓值。



圖(4-2)：輸出阻抗測試接線方塊圖

4. 計算下列數學式，此為放大器在 1KHz 時的輸出阻抗為  $Z_o$ 。

$$Z_o = R_L (2K\Omega) \times \left[ \frac{V_{OPEN}}{V_{LOAD}} - 1 \right]。$$

5. 公式推導：

a.  $V_{OPEN} = V_{LOAD} (R_L = \infty)$

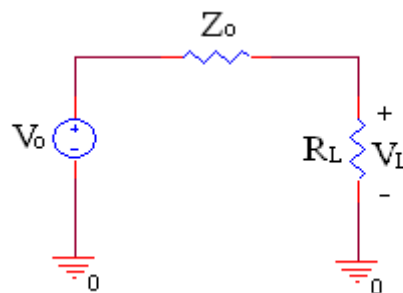
b. 接負載下  $V_{LOAD} < V_{OPEN}$

c. 由戴維寧等效電路，分壓定理知

$$\frac{V_{LOAD}}{V_{OPEN}} = \frac{R_L}{Z_o + R_L}$$

$$\frac{V_{OPEN}}{V_{LOAD}} = \frac{R_L + Z_o}{R_L} = 1 + \frac{Z_o}{R_L}$$

$$Z_o = R_L \times \left( \frac{V_{OPEN} - V_{LOAD}}{V_{LOAD}} \right)$$



圖(4-3)：輸出阻抗等效電路圖

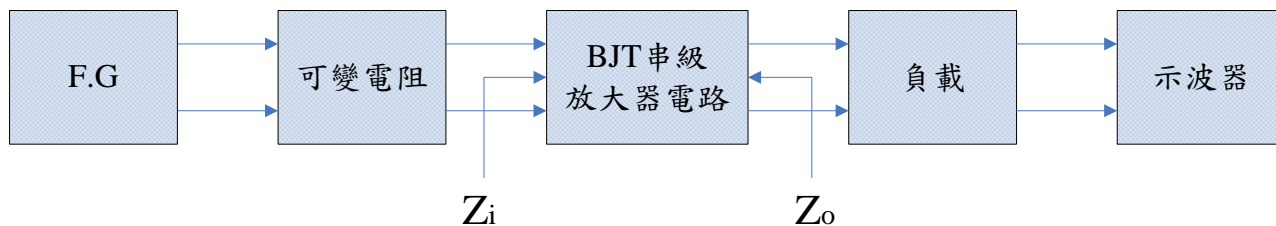
6. 擷取波形(OPEN)：節點[V1，VO1]。

記錄： $V_{OPEN}(p-p) = \underline{\hspace{2cm}}$ ，頻率值 =  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

7. 擷取波形(LOAD)：節點[V1，VO1]。

記錄： $V_{LOAD}(p-p) = \underline{\hspace{2cm}}$ ，頻率值 =  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

8. 計算  $Z_o = R_L (2K\Omega) \times \left[ \frac{V_{OPEN}}{V_{LOAD}} - 1 \right] = \underline{\hspace{2cm}} \Omega。$

**(七)、測量項目(七)：輸入阻抗測試。**

圖(4-4)：測試輸入阻抗的測試連接圖

- 1.原電路中示波器探棒接妥[CH1、CH2]=[V1、VO1]。F.G.設定頻率=1KHz，示波器CH1 測得峰-峰值電壓( $V_{p-p}$ )=20mV。調整可變電阻，使得[VO1] 峰-峰值電壓合乎實驗設計規格。
- 2.參閱圖(4-4)，在原電路的輸入端串接一個可變電阻 5K $\Omega$ ，調整可變電阻，直到放大器的輸出電壓為前一項輸出電壓的一半為止，並擷取此結果，示波器測量時，需標示出電壓值。
- 3.擷取波形。
  - a.輸出 VO1 峰-峰值電壓合乎實驗設計規格的一半=\_\_\_\_\_。
  - b.擷取波形：[CH1、CH2]=[V1、VO1]。
  - c.記錄：測試頻率值=\_\_\_\_\_。
- 4.可變電阻與原電路間開路(OPEN)，使用萬用電表測量可變電阻 5K $\Omega$  其電阻值，此電阻值即為放大器在 1KHz 時之輸入阻抗  $Z_i$ ，記錄  $Z_i$  = \_\_\_\_\_ $\Omega$ 。

**(八)、實驗電路板電路檢查，接著後續焊接電路板。****(九)、焊接電路板測試電路**

- 1.調整訊號產生器設定：正弦波[V1]、輸入頻率依各組之頻率值、輸入峰-峰值( $V_{p-p}$ )：20mV、測試探棒[CH1，CH2]=[V1，VO1]。
- 2.擷取節點[CH1，CH2]=[V1，VO1]波形，輸出節點[VO1] 峰-峰值輸出合乎實驗要求。節點[V1，VO1]： $A_{v7} = \frac{VO1}{V1} = \underline{\hspace{2cm}}$ ，(相位關係：☐同相、☐反相)。

## 七、實驗問題與討論

- 1.在設計串級放大器時，應考慮那些因素？
- 2.同學設計了單一級放大器電路，增益  $A_{v1} = 20(dB)$ ，他做了兩個相同的放大器，然後串接起來，他發現增益不會是  $A_{v2} = 20(dB) \times 2 = 40(dB)$ ，請問是發生什麼原因，讓增益不會是40(dB)呢？
- 3.實驗中同學裝錯元件  $CE1=10\mu F$ ，請問會對那一個實驗測量項目造成影響？就您的答案，說明一下為何會這樣回答。

## 八、實驗結論與實驗心得

## 九、實驗綜合評論

- 1.實驗測試說明、實驗補充資料及老師上課原理說明，是否有需要改善之處。
- 2.實驗模擬項目內容，是否有助於個人對實驗電路測試內容的了解。
- 3.實驗測量結果，是否合乎實驗目標及個人的是否清楚瞭解其電路特性。
- 4.就實驗內容的安排，是否合乎相關課程進度。
- 5.就個人實驗進度安排及最後結果，自己的評等是幾分。
- 6.在實驗項目中，最容易的項目有那些，最艱難的項目包含那些項目，並回憶一下，您在此實驗中學到了那些知識與常識。

## 十、附上實驗進度紀錄單(照片檔)、麵包板電路組裝圖檔(照片檔) 及印刷電路板(PCB)組裝圖檔(照片檔)

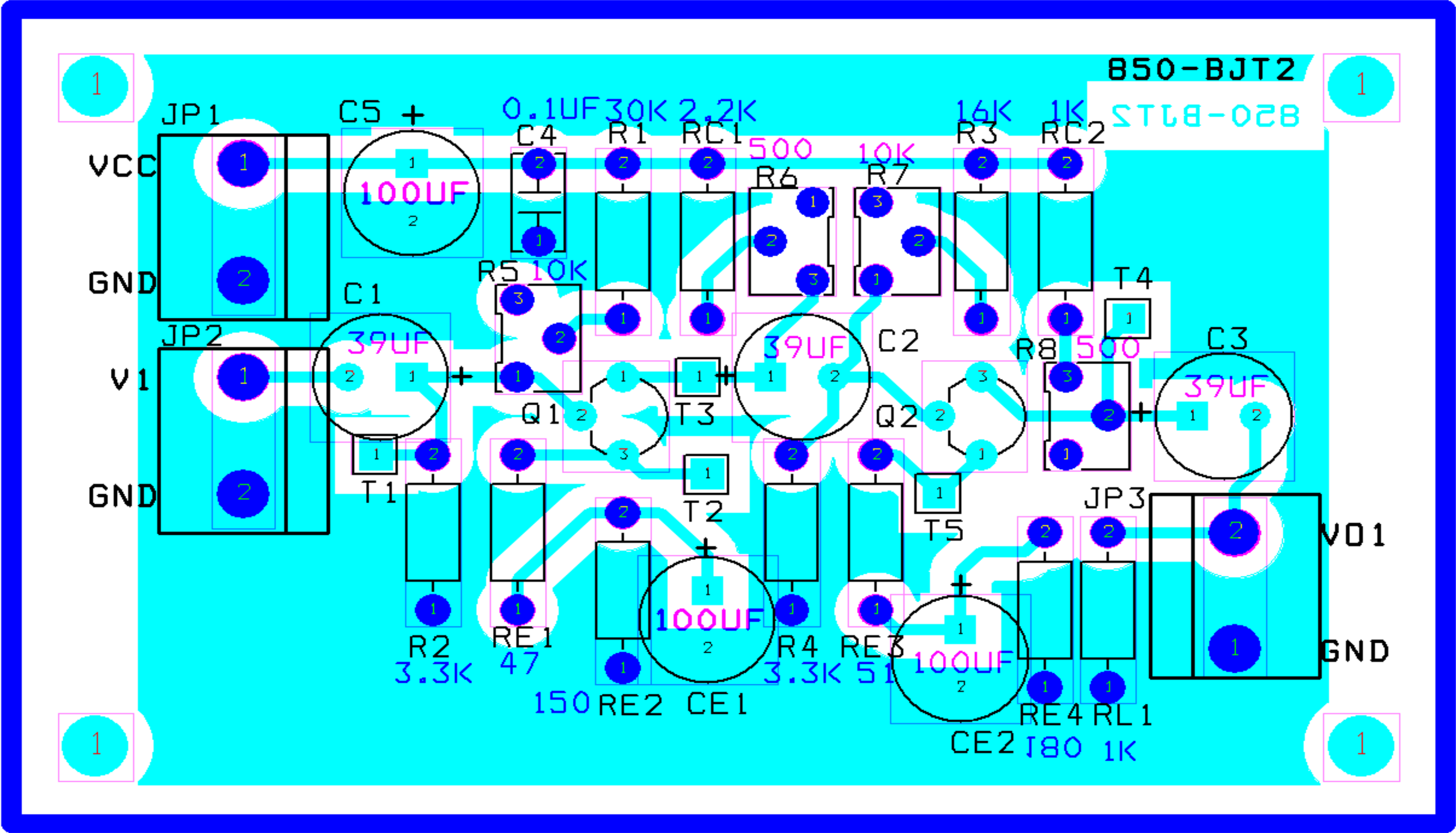
## 十一、實驗參考資料來源

- [1]. SEDRA & SMITH ，“MICROELECTRONIC CIRCUITS” ， Copyright by Oxford University Press,Inc, sixth edition 2010,P.218～P.333.
- [2]. “電子元件與電路理論”，張順雄、張忠誠、李榮乾編譯，東華書局出版,第三版,1999,P.151～P.286.
- [3].陳瓊興，電子學實驗(上)修訂版，實驗 12 串級放大器電路。
- [4].第七章串級放大器,台科大圖書股份有限公司  
<http://210.60.110.19/串級放大器電路.ppt>
- [5].串級放大器  
[http://dragon.ccut.edu.tw/~cflu/doc/CH11T\\_Cascade-amplifier.DOC](http://dragon.ccut.edu.tw/~cflu/doc/CH11T_Cascade-amplifier.DOC)
- [6].Logarithm  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Logarithm#properties\\_of\\_the\\_logarithm](http://en.wikipedia.org/wiki/Logarithm#properties_of_the_logarithm)



十二、實驗電路板

◎提供 PCB LAYOUT 電路板圖檔給各位同學參考。



- ※說明：
- 1. 電解質電容 100uF 改使用 120uF。
  - 2. PCB 上標示之實驗電阻值，請依據設計電路來選用。