

電晶體放大器

一、目的：

了解電晶體放大器的工作原理，並測量電晶體的一些參數。

二、原理：

(一)電晶體放大器的偏壓：

在前面的實驗中我們分析過電晶體的放大作用，並且估計過如圖 1 電路的電流放大率和電壓放大率。在作估計時，我們一直假設這個電路工作在線性區域裡，使 $v_o \propto i_c \propto i_b \propto v_i$ ，因此輸出電壓 v_o 是輸入電壓的翻版，只是振幅變大而已。為了使電路工作在線性區域，至少要時時保持電晶體在「暢通」的狀況，也就是說，當 v_i 、 v_o 起伏時， v_{BE} 和 v_{CE} 仍然要維持為正值。因此，在 B，E 之間及 C，E 之間必須施以直流電壓，我們稱為「偏壓」。圖 1 中，左右兩個直流電源供應電路所需的偏壓。在一般的電路中，B，E 間及 C，E 間的偏壓都是由同一個直流電源供應，以免去裝置兩個直流電源的麻煩。

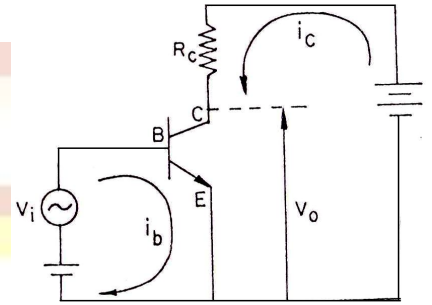


圖 1

(二)固定偏壓方式：

直流電源經過偏壓網路供應 B，E 間和 C，E 間的偏壓，圖 2 的電路採用的偏壓網路最為簡單。

I_B 由直流電源 V_{CC} 經電阻 R_B 供應，由環路定理可得

$$R_B I_B + V_{BE} = V_{CC}$$

因此

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

在正常工作中， $V_{BE} \approx 0.7V$ ， V_{CC} 通常在 10V 以上，因此

$$I_B \approx \frac{V_{CC}}{R_B}$$

I_B 是固定值，因此這種偏壓稱為「固定偏壓」。

由另一個環路，可得

$$R_C I_C + V_{CE} = V_{CC}$$

因此

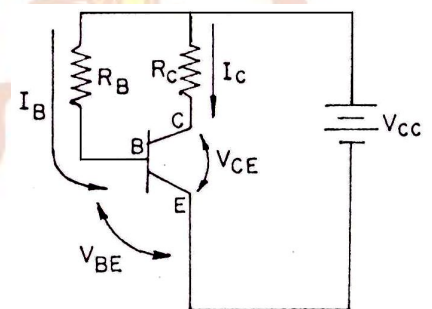


圖 2 固定偏壓方式

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = V_{CC} - \beta R_C I_B$$

可見 C, E 之間的偏壓 V_{CE} 和 β 值有關。當溫度變化使 β 值改變時, V_{CE} 會隨著改變。更換電晶體時, β 值通常不會和原來的電晶體相同, V_{CE} 會改變。在大量生產的場合, 電晶體的 β 值通常有一個範圍, 不會是一個定值, V_{CE} 也會有一個範圍, 不會是一個定值。由這幾點就可知道固定偏壓是很差的偏壓方式。雖然如此, 由於電路簡單, 往後的實驗中我們仍然採用固定偏壓方式。

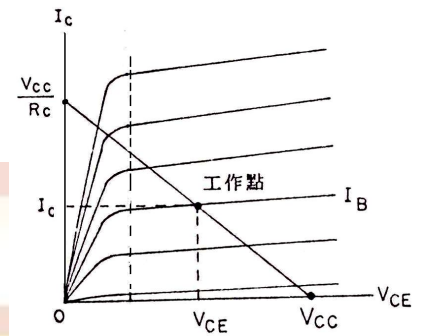


圖 3

(三)工作點的選擇：

在上面的分析中, 我們已經求出 I_B , I_C 和 V_{CE} , 這一節中我們以圖解的方式來求出這些值。圖解法使我們對電晶體的動作有更具體的了解。

圖 3 是電晶體的一組輸出特性曲線, 每一條 I_C - V_{CE} 曲線對應於一個 I_B 值。由前面的分析中, 知道

$$I_B \doteq \frac{V_{CC}}{R_B}$$

故我們知道 (I_C, V_{CE}) 在那一條 I_C - V_{CE} 曲線上前面的分析, 同時告訴我們

$$R_C I_C + V_{CE} = V_{CC}$$

因此 (I_C, V_{CE}) 在一條 x 截距為 V_{CC} , y 截距為 V_{CC}/R_C 的直線上, 這條直線稱為「負載線」。負載線和 I_C - V_{CE} 曲線的交點就是 (I_C, V_{CE}) 的值。這個交點稱為「工作點」, 它代表無信號輸入時的 (i_C, v_{ce}) 值, 也就是直流偏壓值。

當我們把欲放大的信號輸入時, i_B 會在 I_B 附近振動, 因此交點會沿著負載線上下振動。 v_{ce} 在 V_{CE} 附近振動, 由圖解很容易看出。 v_{ce} 的波形和 v_i 的波形是反向的, 如圖 4 所示。

在上面例子中, 電晶體始終在線性區域裡工作, 因此輸出波形和輸入波形相同。現在如果把工作點定在靠近飽和區, i_B 增加時 i_C 並不等比例增加, v_{ce} 波形下端會被削平, 如圖 5 所示。

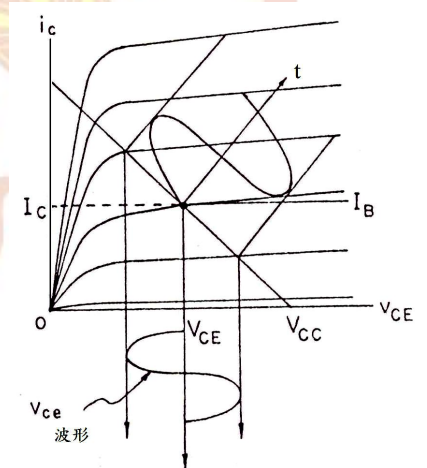


圖 4

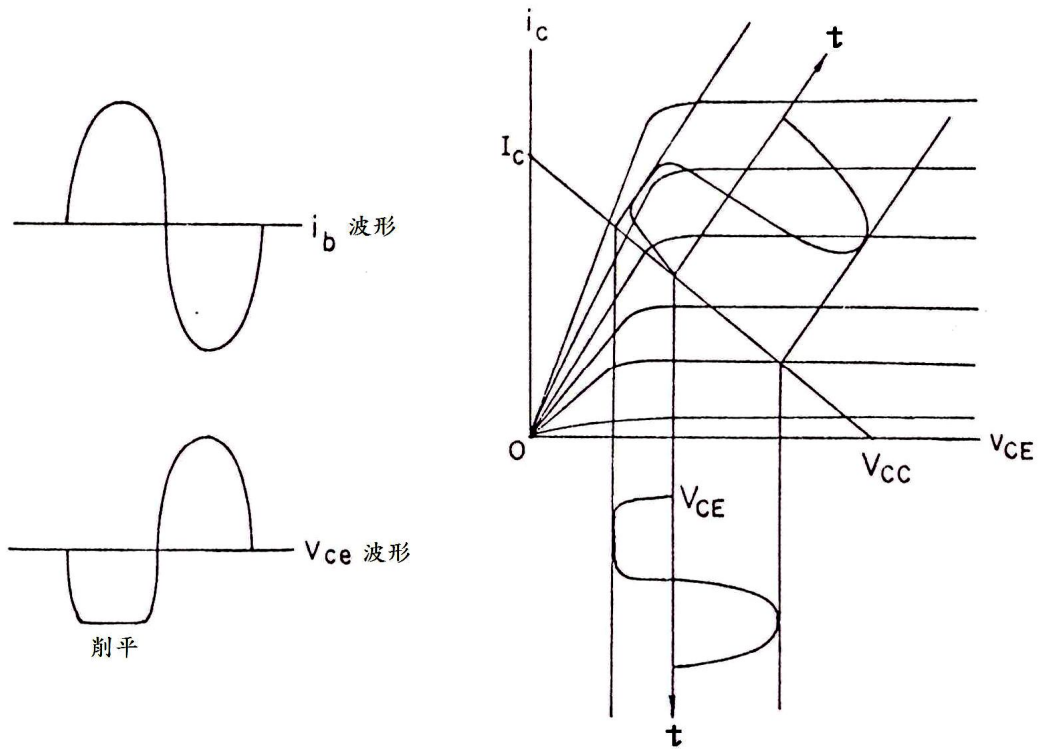


圖 5

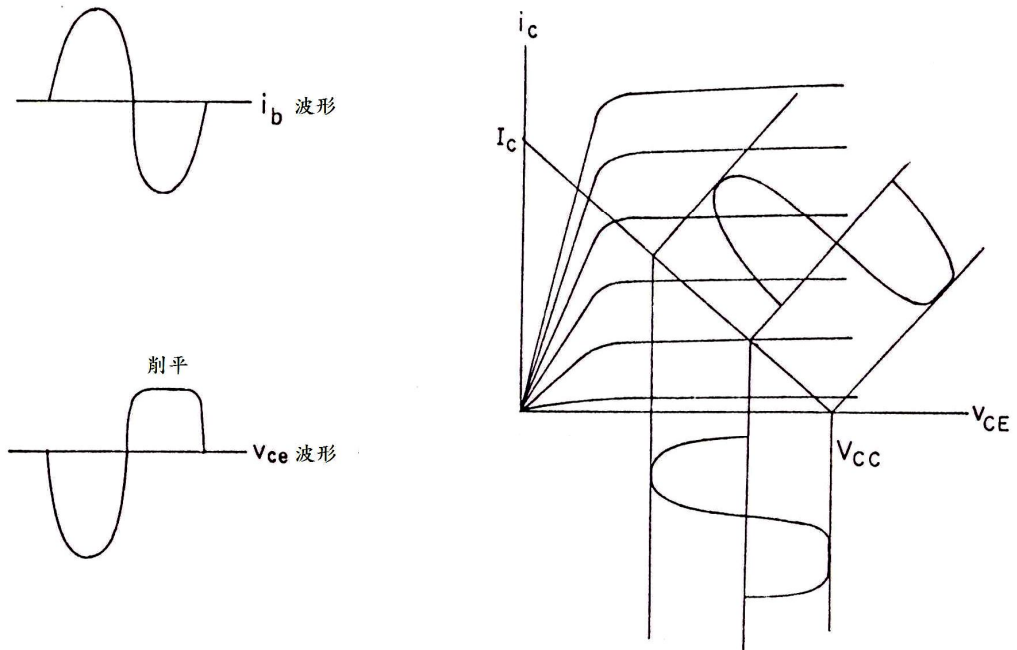


圖 6

反之，如圖 6 所示，若工作點靠近截止區， i_B 波形下端會被削平。因此， v_{ce} 波形上端會被削平。

當電晶體進入飽和區或靠近截止區時，處在非線性的區域，輸出波形會出現變形，並不是輸入波形的翻版。

因此，盡量把工作點定在負載線的中央，使不被削平的輸出波形可以最大。因此通常定 $V_{CE} = 1/2 V_{CC}$ 。

(四)小信號模型：

假設圖 7 是我們要討論的放大器電路，欲放大的信號經過串聯的 R_S ， C_S 輸入 B 極。 R_S 代表信號源的內電阻或電路上加上去的電阻或兩者的和。電容器 C_S 用來阻止直流電流流入信號源而使 I_B 減少。若信號的頻率不太低，通過電容器時受影響很少。通常 R_B 比 BE 間的電阻大很多，可當作所有從信號源來的電流都流入 B 極。因此

$$v_s = R_S i_b + v_{be} = (R_S + r_i) i_b$$

若 R_S 比 r_i 大很大

$$v_s \doteq R_S i_b, \quad i_b \doteq v_s / R_S$$

通常我們重視的是交流部分而不是直流部分，直流部分只是為了讓電晶體工作在線性區域而已。我們可以再作一個圖，把直流電源和偏壓網路去掉，只畫和交流部分有關的部分，如圖 8 所示。

當信號很小時 i_c, v_{be} 和 i_b, v_{ce} 的關係可當作線性的，我們取 i_b, v_{ce} 為自變數，則 i_c, v_{be} 可寫成

$$i_c = h_f i_b + h_o v_{ce}$$

$$v_{be} = h_i i_b + h_r v_{ce}$$

由這兩個關係式，可以得到電晶體的小信號模型如圖 9。 h_f, h_o, h_i, h_r 的定義如下：

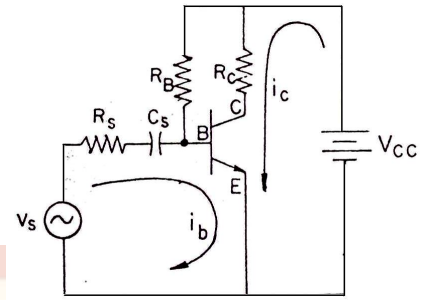
$$h_f = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce} = 0} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{V_{CE} \text{ 固定}}$$

稱為輸出短路時的電流增益，其意義如圖 10 所示

$$h_o = \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b = 0} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta v_{CE}} \right|_{i_B \text{ 固定}}$$

稱為輸入斷路時的輸出電導，其意義如圖 11 所示

$$h_r = \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{v_{ce} = 0} = \left. \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta i_B} \right|_{V_{CE} \text{ 固定}}$$



(直流電流未畫出)

圖 7

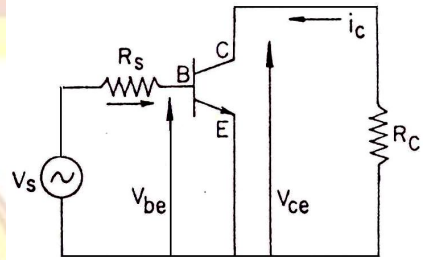


圖 8

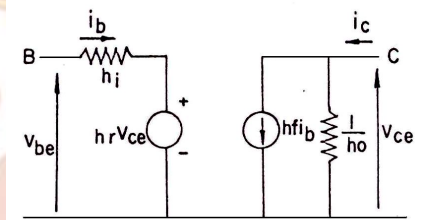


圖 9 小信號模型

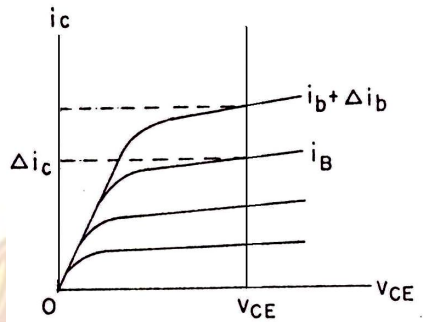


圖 10 h_f 的意義

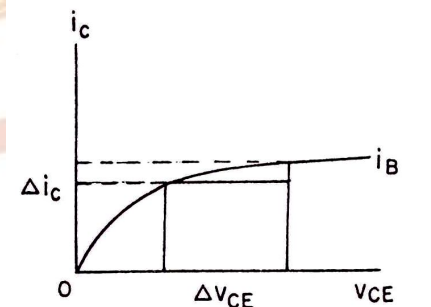


圖 11 h_o 的意義

稱為輸出短路時的輸入電阻，其意義如圖 12 所示

$$h_f = \left. \frac{v_{be}}{i_{ce}} \right|_{i_b = 0} = \left. \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta v_{CE}} \right|_{i_B \text{ 固定}}$$

稱為輸入斷路時的反向電壓傳送比，其意義如圖 13 所示。

通常 $h_r \doteq 10^{-4}$ ，當做 $h_r v_{ce}$ 比 v_{ce} 小很多，可以忽略，而 $1/h_o \doteq 40k\Omega$ 比我們加上去的電阻 R_C 大很多，也可以忽略。因此，上面的模型可以化簡成如圖 14 所示的情形。

如果我們不要求很精確的話

$$h_r \doteq r_i$$

$$h_f \doteq \beta$$

整個放大器的電路可以化成圖 15 的等效電路。我們很容易求出電流放大率和電壓放大率。

$$A_i = \frac{i_c}{i_b} \doteq \frac{\beta i_b}{i_b} \doteq \beta$$

$$A_v = \frac{v_{ce}}{v_{be}} \doteq \frac{-i_c R_c}{i_b r_i} \doteq -\beta \frac{R_c}{r_i}$$

$$A_p = -A_v A_i \doteq -\beta^2 \frac{R_c}{r_i}$$

$$i_b \doteq \frac{v_S}{R_S}$$

這個結果和上個實驗中的估計相同，因為已經取了近似值。

(五) 電晶體的頻率響應：

如圖 16，電晶體的 E 極和 B 極之間相當於一個二極體，順向偏壓時，E 極的電子會擴散到 B 極裡去，然後再擴散到 C 極。在穩定狀況下總有一些電子儲存在 B 極裡。當電壓變化時，這些儲存電子的量也隨著改變。因此，在 E 極和 B 極之間好像有一個電容存在，這個電容稱為「擴散電容」。在二極體那個實驗中，我們曾大略估計二極體的擴散電容為

$$C = \tau / r$$

τ 是載子的半生期， r 是二極體的動態電阻。這個結果可以引用到電晶體的 E 極和 B 極之間。

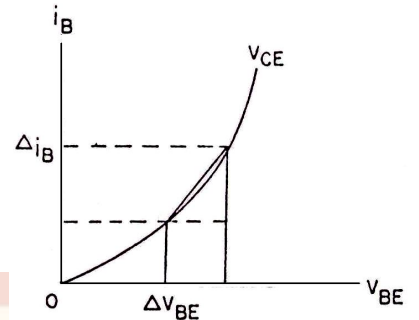


圖 12 h_i 的意義

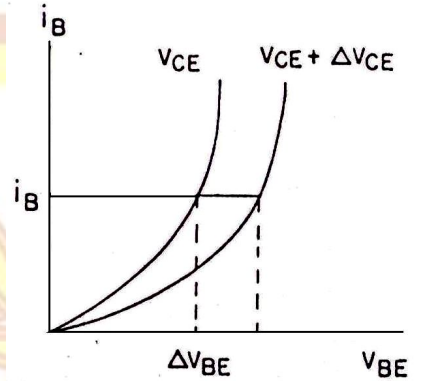


圖 10 h_r 的意義

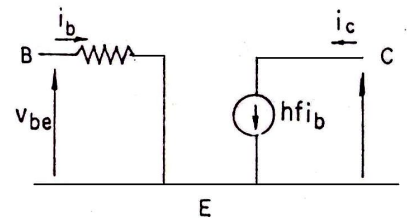


圖 14 化簡的模型。

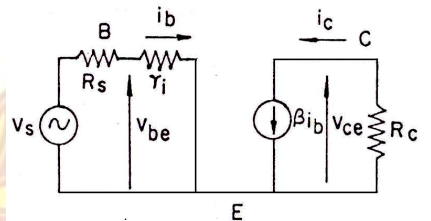


圖 15 放大器的等效電路。

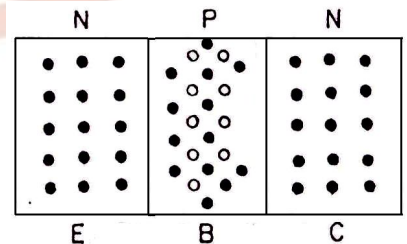


圖 16

因此前面的等效電路應改為圖 17 的形式。 C_i 代表輸入端的電容，這個電容主要為上面提到的擴散電容，當然輸出端反射過來的電容也佔了一部分。

i_b 的一部分是這個電容充電和放電所造成的，這一部分和 i_c 無關，我們以 i_2 表示，另一部分流過 r_i ，和 i_c 成正比，以 i_1 表示。在低頻率時 C_i 幾乎不通， i_2 很小，可以忽略。當頻率提高時，流過 C_i 的電流比例會愈來愈大，到

$$f_{1/2} = \frac{1}{2\pi r_i C_2} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

頻率時， $i_1 = i_2 = (1 + \sqrt{2}) |i_b|$ (參看圖 18)，故 i_c 從低頻的 βi_b 降為 $(1 + \sqrt{2}) \beta i_b$ ， v_{ce} 從低頻的 $\beta i_b R_C$ 降為 $(1 + \sqrt{2}) \beta i_b R_C$ ，因此 $f_{1/2}$ 是這個放大器的半功率點，超過這個頻率時，放大率就愈降愈低，如圖 19 所示。由這個半功率點，可以大略估計電子在期極的半生期和擴散電容。

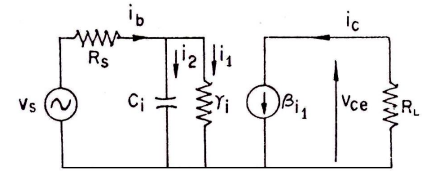


圖 17

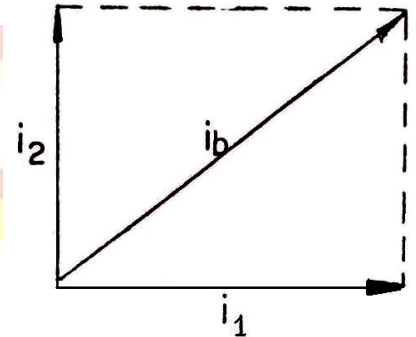


圖 18 ($|i_1| = |i_2| = \frac{1}{\sqrt{2}} |i_b|$)

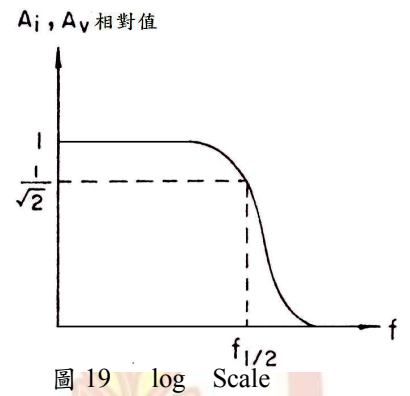


圖 19 \log Scale

三、儀器：

示波器，電源供給器、信號產生器、波型產生器，三用電表，數字型三用電表。

四、步驟：

電晶體放大器的電路如圖 20 所示。注意：電晶體 MJE340 的 E 極，B 極，C 極的位置，請參考圖 21

(一)工作點對輸出波形的影響：

1. 先把信號產生器的輸出調到很小。調節 $500k\Omega$ 可調電阻使 C 極的直流電壓為 5V。
2. 再把信號產生器的輸出調大，觀察 C 極輸出波型的變化。信號產生器的輸出調到最大時，C 極輸出波型變為圖 22 的樣子。
3. 把信號產生器的輸出慢慢調小，直到 C 極的輸出波型變回完美的正弦波。
4. 調節 $500k\Omega$ 可調電阻使 I_B 增加，使電晶體的工作點上移，C 極輸出變為圖 23 的波形。下端因為電晶體進入飽和區而被削平。
5. 調節 $500k\Omega$ 此可調電阻使 I_B 減少，使電晶體的工作點下移，C 極輸出變為圖 24 的波形。上端因為電晶體進入截止區而被削平。

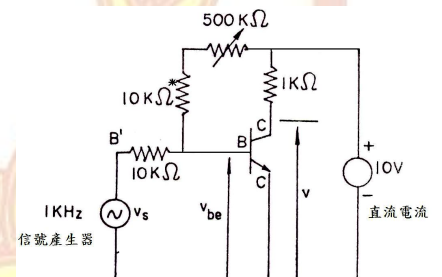


圖 20

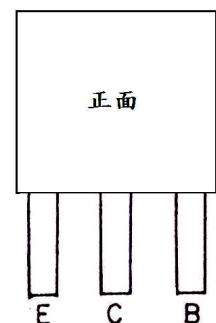


圖 21

6.調節 500k Ω 可調電阻，使 C 極輸出的波形又變回完美的正弦波。

(二)輸入波形和輸出波形的極性：

將 v_s 輸入示波器 CH1，將 C 極的波形輸入示波器的 CH2，它們的極性是否相反？

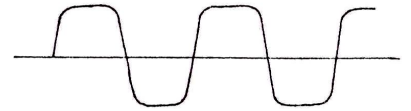


圖 22

(三)放大率的測量：

1.將 v_{be} 輸入示波器 CH1， v_{be} 並不是正弦波。將信號產生器的輸出調小，直到 v_{be} 變小到趨近正弦波。

2.以示波器測量 v_{ce} 和 v_{be} 波形的高度，算出電壓放大率。
電壓放大率 = v_{ce} / v_{be} 。

3.將 v_s 的波形輸入示波器 CH1，測量波形的高度，這就是 v_s 。算出 i_c 和 i_b 為，並由兩者算出電流放大率。

$i_b = v_s / 10k\Omega$ ， $i_c = v_{ce} / 1k\Omega$ ，電流放大率 = v_{ce} / v_{be} 。

4.計算功率放大率：

功率放大率 = 電壓放大率 \times 電流放大率。

5.計算 B、E 之間的動態電阻並加 267 mV / I_B 比較。動態電阻 $r_i = v_{be} / i_b$ 。 I_B 是基極直流電流，可以用 DMM 測量 10k Ω 電阻的直流電壓而得知。

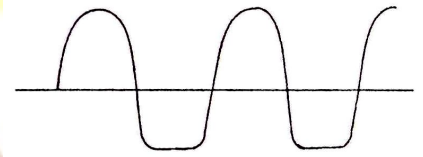


圖 23

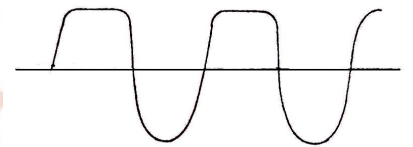


圖 24

(四)頻率響應：

1.將信號產生器的頻率調高，但不要改變輸出振幅。觀察 C 極輸出波形的高度隨頻率調高而變小的情形。

2.記下 C 極輸出波形高度降到 1kHz 時的 0.707 倍時的頻率 $f_{1/2}$ ， $f_{1/2}$ 就是這個放大器的半功率點。

3.由 $f_{1/2}$ 和 r_i ，估計 C_i 值。

五、問題：

如果信號產生器的輸出直接輸入 B 極，不經過串聯 10k Ω 電阻，C 極輸出的波形是否為正弦波？解釋之。

六、參考資料：

1. J. Millman & A. Grabel : Microelectronics, 2nd ed., (McGraw-Hill Book company), §3-9 ~ §3-10, p.114 ~ p.123。

2. A. S. Sedra & K. C. Smith : Microelectronic Circuits, 2nd ed., (HRW Inc.), §8-7 ~ §8-9, p.425 ~ p.453。