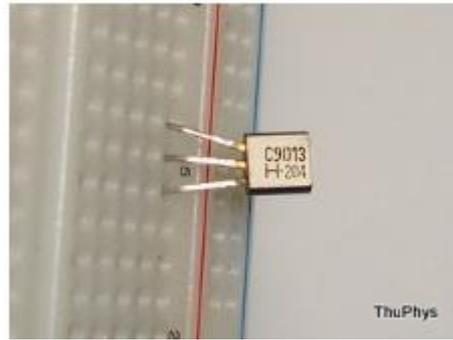
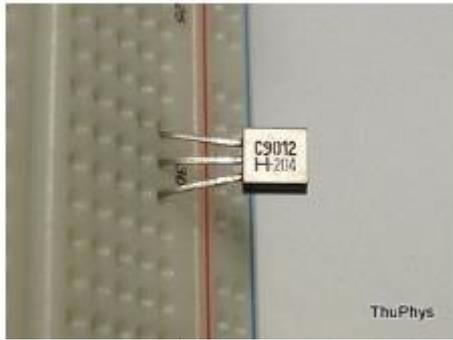


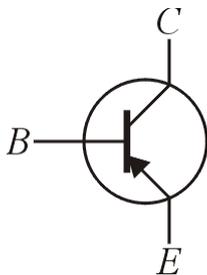
# 電晶體



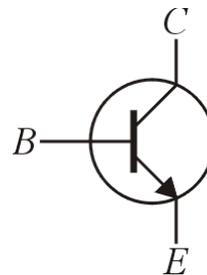
## (一)電晶體的結構與符號

電晶體共有三端點、兩界面，其中三端點分別為射極(emitter，簡稱 E)、基極(base，簡稱 B)與集極(collector，簡稱 C)，兩界面分別為基-射極界面(B-E 界面)和基-集極界面(B-C 界面)，所以電晶體又稱為三極體或雙接合面電晶體(bipolar junction transistor，簡稱 BJT)。

因組合的半導體材料不同，共分 NPN 與 PNP 兩大類，以 NPN 電晶體為例：在 E、B、C 三極中，射極負責發射電子，集極負責接收電子，至於基極則是控制電流大小的端子，其主要結構與符號如(圖 1a)和(圖 1b)所示，圖中有箭頭的接腳為射極，在以箭頭方向表示電晶體的類型，箭頭朝外為 NPN，箭頭朝內為 PNP。



(圖 1a) PNP 電晶體

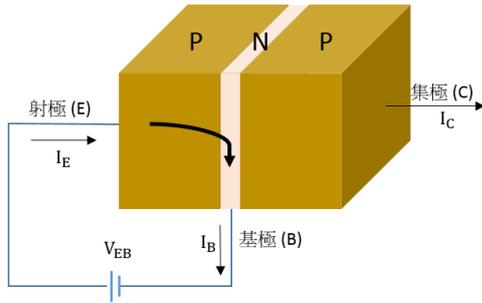


(圖 1b) NPN 電晶體

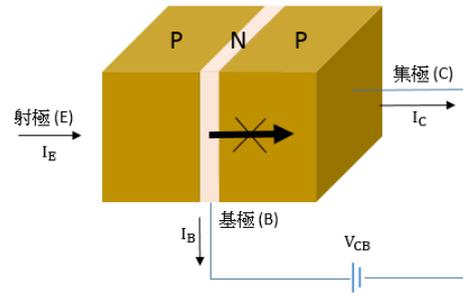
## (二)電晶體的工作原理

如圖(2-a)在 E-B 間加上順向電壓時，只要 $V_{BE}$  偏壓大於 P-N 接合面的障礙電位(Si 約 0.7V，Ge 約 0.2V)，即有一順向電流且 $I_E=I_B$ ，此為二極體之特性；圖(2-b)在 C-B 極間加逆向偏壓 $V_{CB}$ ，因集極接和面為逆向偏壓 P-N 接合面不導電沒電流。

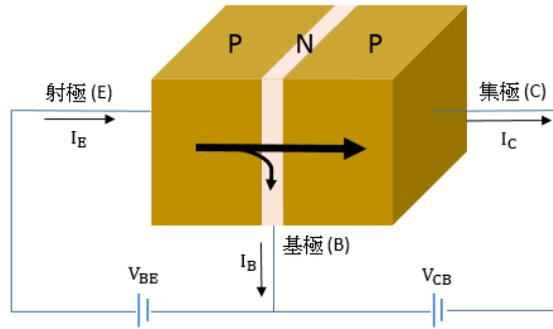
但是，若將圖(2-a)與圖(2-b)結合成圖(2-c)則發現 $I_E=I_B+I_C$ 且 $I_C \cong I_E \gg I_B$ ，可知由射極流入之電流幾乎完全由集極流出，而基極電流只佔很小一部分。因為電晶體的基極很薄且雜質的濃度很低，在 $V_{BE}$ 的偏壓下射極(P 半導體)內的電洞大量進入基極(N 半導體)，由於基極很薄，只有極少數的電洞與基極內之電子結合而成微小的 $I_B$ ，大部分進入基極的電洞因受到 $V_{CB}$ 的負極電場強度吸引，進入集極(P 半導體) $V_{CB}$ 偏壓的負極電子結合而形成大量的 $I_C$ 。



(圖 2-a) E 與 B 間加順向偏壓， $I_E = I_B$



(圖 2-b) C 與 B 間加逆向偏壓， $I_E, I_B=0$



(圖 2-c) E-B 間加順向偏壓，B-C 間加逆向偏壓時  $I_E = I_B + I_C$

進入基極的電洞因受到  $V_{CB}$  的負極電場強度吸引，進入集極(P 半導體)與  $V_{CB}$  偏壓的負極電子結合而形成大量的  $I_C$ 。

當電晶體動作在線性曲時，電晶體的 E-B 端偏壓要接順向偏壓，C-B 端偏壓要逆向偏壓，如(圖 1-c)偏壓的接法，電晶體才有放大作用，電晶體是電流型的控制，必須要有電流  $I_B$  才有  $I_C$ ，亦即由  $I_B$  控制  $I_C$ ，電晶體的電流放大率以  $\beta_{dc}$  或  $h_{FE}$  表示，其定義為：

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B}$$

$$I_C = \beta_{dc} I_B$$

一般  $\beta_{dc} \cong 10 \sim 300$  之間，因為  $\beta_{dc}$  與  $\beta_{Ac}$  值很相近，有時直接稱為  $\beta$ 。

除了  $\beta_{dc}$  之外，另一個電晶體電氣參數為  $\alpha$ ，其定義為：

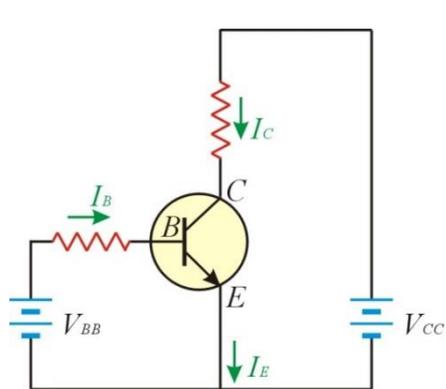
$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

$$I_E = \alpha I_C \quad (\alpha \text{ 值} < 1, \text{ 約 } 0.999)$$

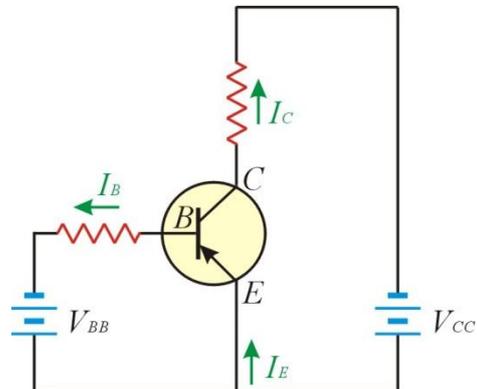
### (三)電晶體電路符號中箭頭的意義

當電晶體要正常動作在線性區時，電晶體的 E-B 端要接順向偏壓，B-C 端要逆向偏壓如(圖 3-a) 電晶體電路符號的接法，意義如下：

1. 區分 NPN 或 PNP 電晶體，箭頭向外圍 NPN，箭頭向內為 PNP。
2. 區分 E 或 C 極，有箭頭為 E 極，沒有箭頭為 C 極。
3. 箭頭表示電流的方向，如下圖，(圖 3-a) NPN ; (圖 3-b) PNP
4. 以電流的方向開始端供應的電壓正端。



(圖 3-a) NPN



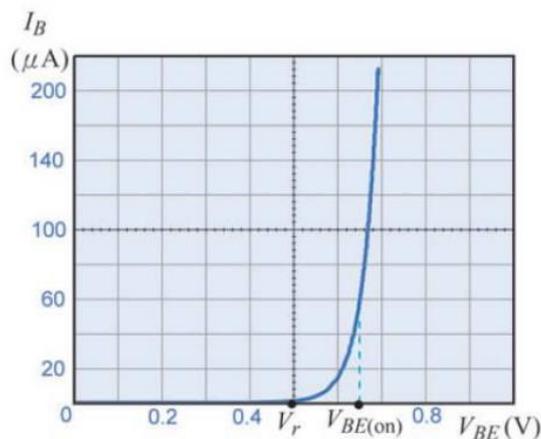
(圖 3-b) PNP

#### (四)電晶體 V-I 特性曲線

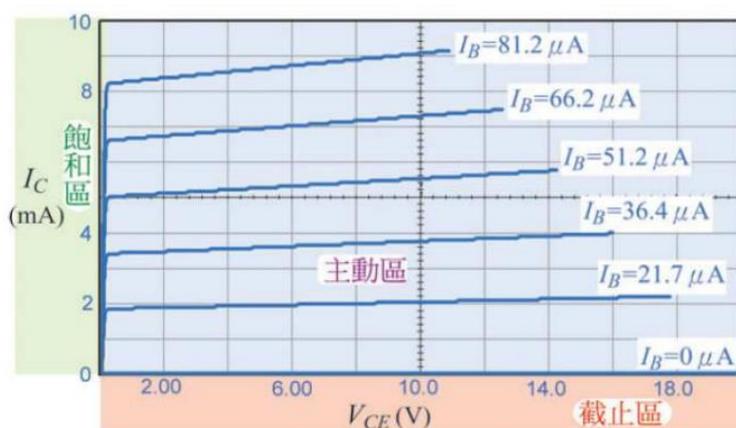
電晶體的特性曲線是了解電晶體電氣特性最常用也是最有效的方法，電子元件中電氣特性有關係的不外電壓、電流、電阻，電晶體也不例外，一般分析電晶體的特性是以輸入端電壓-電流特性為分析對象。

(圖 4) 為  $V_{BE} - I_B$  輸入特性曲線圖，是以(圖 2-a) E 極為共點的模式產生的輸入端特性曲線圖，由圖中可以看出與二極體特性曲線圖相同，所以 E-B 端的特性是二極體特性。

(圖 5) 為 C-B 端  $V_{CE} - I_C$  特性曲線圖，電晶體動作有三個區：



(圖 4)  $V_{BE} - I_B$  輸入特性曲線圖



(圖 5)  $V_{CE} - I_C$  輸入特性曲線圖

電晶體依所加偏壓不同，可分成三個工作區域。

### 1) 飽和區 (saturation region)

$V_{BE}$  及  $V_{BC}$  均為順偏。當電晶體給足夠大的  $I_B$  時，已無法再增加  $I_C$ ，此時電晶體為飽和狀態，將此時的  $I_C$  記錄為  $I_{C(sat)}$ ， $I_C$  為最大值。

集極 C 和射極 E 間的電阻  $R_{CE}$  非常小， $V_{CE} = 0.1 - 0.3V$ ，此時電晶體為飽和狀態（即，電晶體處在 ON-通路的狀態常應用在需要開關動作的電路中。

### 2) 主動區 (active region)

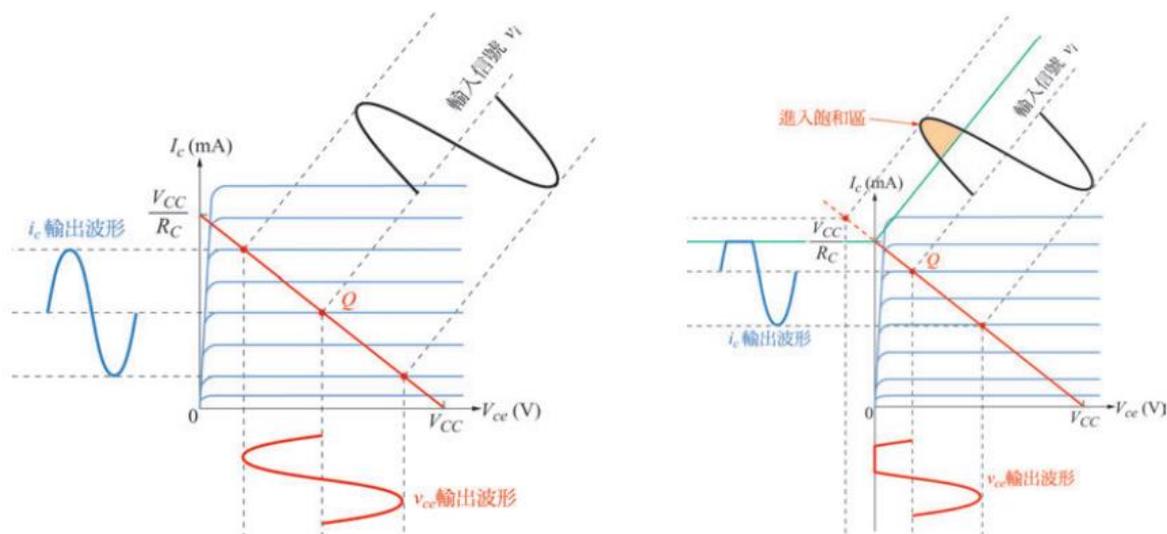
在動作區電晶體可以完成小信號的線性放大，至於放大倍數可依據實際需求設計。為了讓電晶體能完成小信號線性放大，必須提供電晶體接面適當的直流電壓，這時所加的電壓稱為偏壓(bias)。加了偏壓以後，電晶體就可以開始工作，而這電晶體因偏壓所得到的工作位置，稱為工作點(即 Q 點)。因為輸入信號變化時，會造成電晶體工作點的位移，連接這些位移點，可畫出一條直線，這條直線稱為負載線。

綜合上述，正確的偏壓，可讓電晶體工作在正確的工作點，而外加的輸入信號，會透過這條負載線轉移至輸出。為完成所謂的線性放大，一般會將電晶體的工作點，設計在電晶體特性曲線的中心，如(圖 5)所示，為不同位置的工作點所造成的不同輸出情形。

當  $V_{BE}$  順偏、 $V_{BC}$  逆偏。此時  $I_C = \beta I_B$ ，電晶體工作於線性放大區， $I_B$  控制  $I_C$ ，BJT 電晶體當成訊號放大器使用。

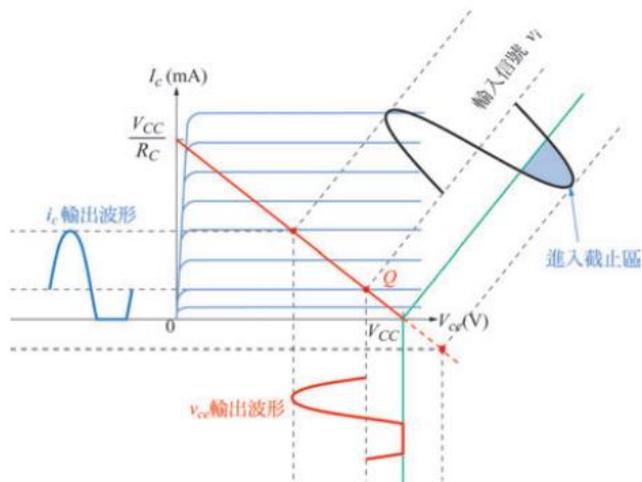
### 3) 截止區 (cutoff region)

當  $V_{BE}$ 、 $V_{BC}$  均為逆偏。此時  $I_B = 0$ ，所以  $I_C = 0$ ，集極 C 和射極 E 間的電阻非常大， $V_{CE(cut-off)} = V_{CC}$ 。此時電晶體為截止狀態（即，電晶體處在 OFF-關閉的狀態。）



(a) 正確的工作點

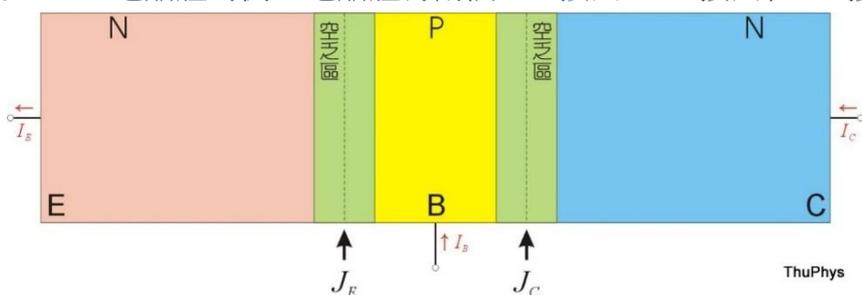
(b) 上移的工作點



(c) 下移的工作點

(圖 5) 電晶體特性曲線上的工作點

下圖以 NPN 電晶體為例。電晶體有兩個 PN 接面， $J_E$  接面和  $J_C$  接面。



在  $J_E$  接面和  $J_C$  接面施予不同偏壓，使得電晶體在不同工作區域工作。

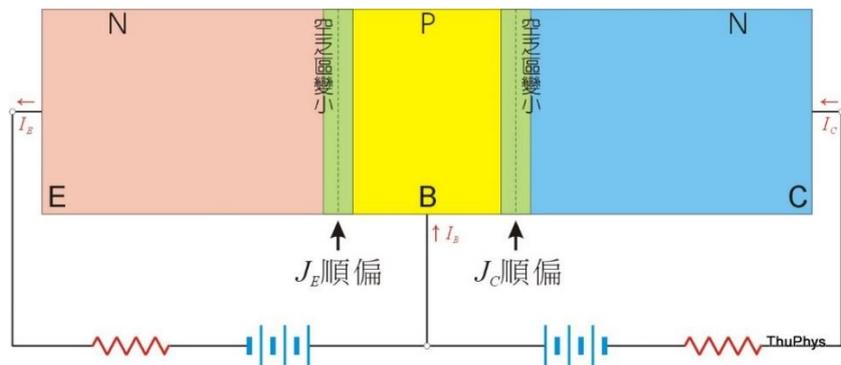
施加偏壓方式：

	$J_E$ 介面	$J_C$ 介面	工作區
(1)	順偏	順偏	飽和區
(2)	順偏	逆偏	主動區
(3)	逆偏	順偏	主動區
(4)	逆偏	逆偏	截止區

(1)  $J_E$  順偏和  $J_C$  順偏：

$$I_C = I_{C(max)}。$$

此時電晶體視為飽和（ON）的狀態。

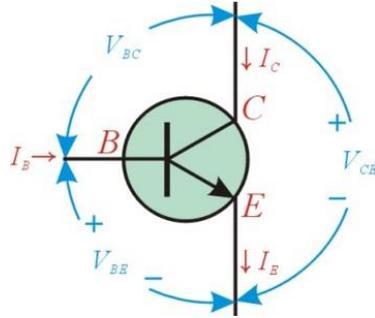
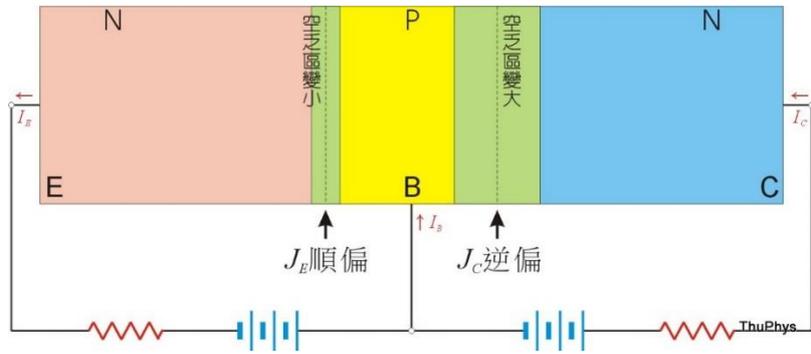


(2)  $J_E$  順偏和  $J_C$  逆偏：

一般作為線性放大電路使用。又稱為順向主動區。

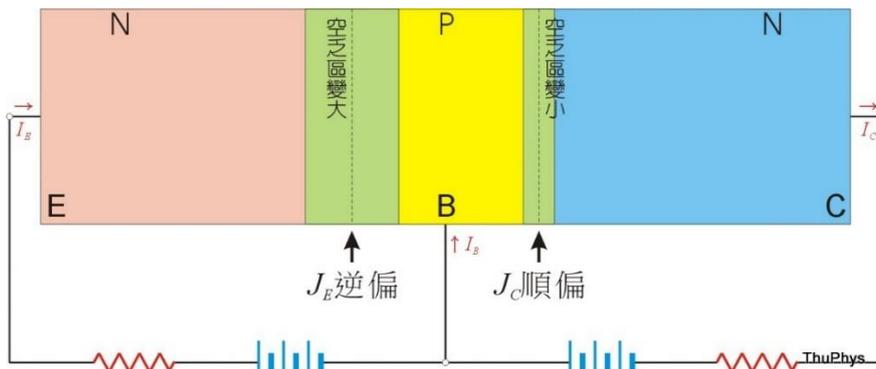
$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_C = \beta I_B$$



(3)  $J_E$  逆偏和  $J_C$  順偏：

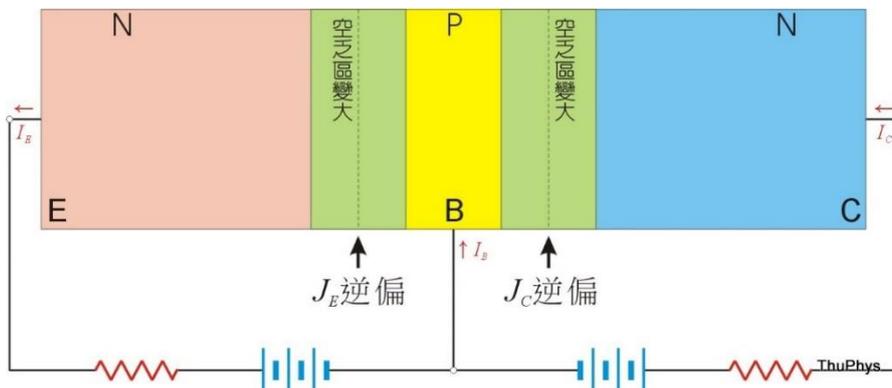
此為逆向主動區。  $I_C = I_B + I_E$



(4)  $J_E$  逆偏和  $J_C$  逆偏：

$$I_E = I_B = I_C = 0$$

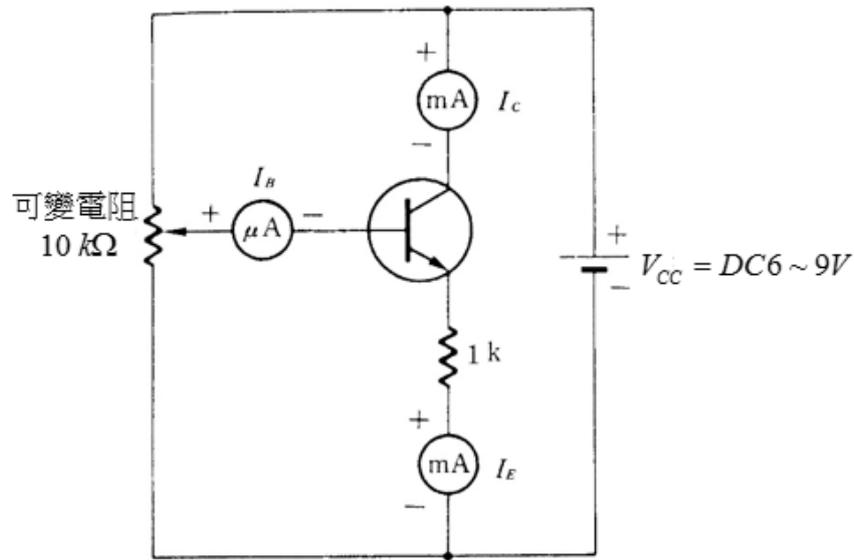
此時電晶體為截止 (OFF) 狀態。



# 實驗項目與數據

## 項目一：測量 $I_E$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 電流

[NPN 電晶體]



(圖 a) 使用 NPN 電晶體

1. 將電路如上(圖 a)在麵包板上裝好，電壓表和電流表使用三用電表，直流電壓源  $V_{CC} = DC 6 \sim 9V$ 。
2. 調整  $10 k\Omega$  的可變電阻，使集極電流固定為  $I_C = 2mA$ ，紀錄下列各電流值。

$$I_B = \text{_____} \mu A, I_E = \text{_____} mA, I_C = \text{_____} mA$$

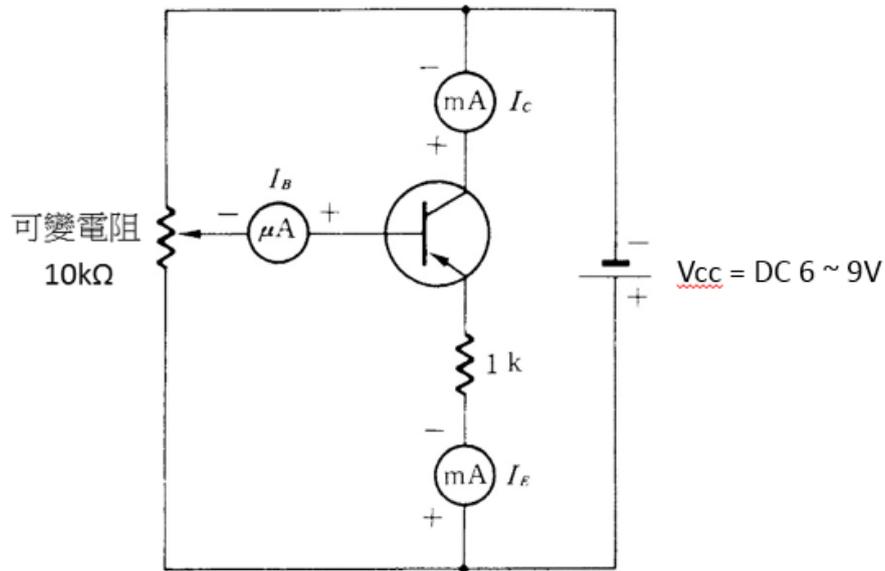
3. 根據第 2 項的電流數據計算下列各值：

(1)  $\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \text{_____}$  [ $I_C = 2 mA$  時之  $\alpha$  值]

(2)  $\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} = \text{_____}$  [ $I_C = 2 mA$  時之  $\beta$  值]

- (3) 請問  $I_B + I_C = I_E$  成立嗎？如上式無法成立，試說明其原因。

[PNP 電晶體]



(圖b) 使用PNP電晶體

- 將電路如上(圖 b)在麵包板上裝好，電壓表和電流表使用三用電表，直流電壓源  $V_{CC} = DC 6 \sim 9V$ 。
- 調整  $10k\Omega$  的可變電阻，使集極電流固定為  $I_C = 2mA$ ，紀錄下列各電流值。

$$I_B = \text{_____} \mu A, I_E = \text{_____} mA, I_C = \text{_____} mA$$

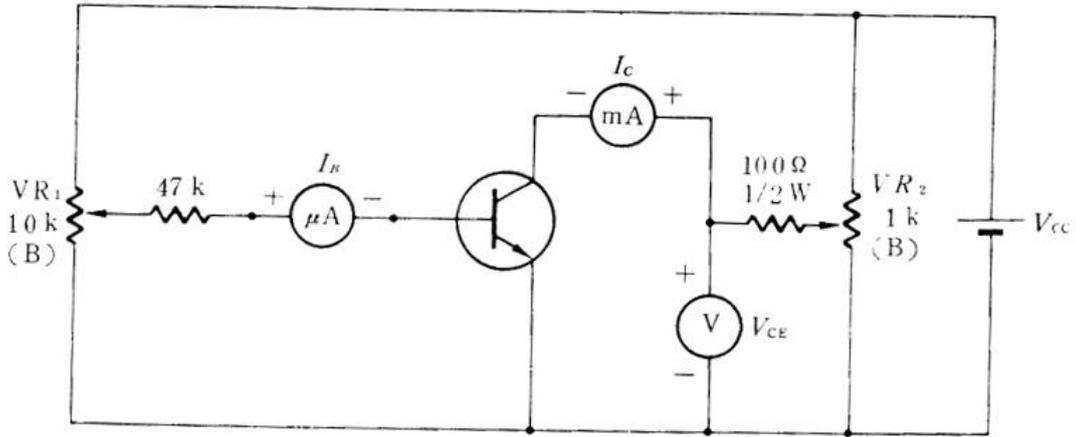
- 根據第 5 項的電流數據計算下列各值：

(1)  $\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \text{_____}$  [ $I_C = 2mA$ 時之  $\alpha$  值]

(2)  $\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} = \text{_____}$  [ $I_C = 2mA$ 時之  $\beta$  值]

(3) 請問  $I_B + I_C = I_E$  成立嗎？如上式無法成立，試說明其原因。

## 項目二：測繪電晶體之 $V_{CE} - I_C$ 特性曲線



(圖 c) 使用 NPN 電晶體

1. 將電路如上(圖 c)在麵包板上裝好，電壓表和電流表使用三用電表。
2. 電源 $V_{CC}$ 使用 $DC7 \sim 10V$ 皆可。調節 $VR_1$ 使 $I_B = 0\mu A$ 。
3. 調節 $VR_2$ 使 $V_{CE}$ 依次為 $0.1V \rightarrow 0.2V \rightarrow 0.3V \rightarrow 0.5V \rightarrow 1.0V \rightarrow 2.0V \rightarrow 3.0V \rightarrow 4.0V \rightarrow 5.0V \rightarrow 6.0V$ （電源 $V_{CC} = 7V$ 時，若 $V_{CE}$ 無法達到 $6V$ ，則只做到 $V_{CE} = 5.0V$ 即可），並記下每一次之對應 $I_C$ 值於表 2 中。  
（注意！調節 $VR_2$ 時，可能會變動 $I_B$ ，此時應調節 $VR_1$ 使 $I_B$ 為指定之恆值。）
4. 轉動 $VR_1$ 使 $I_B$ 值如表列之 $I_B$ 值，仿照第 2 步驟之方法測量 $V_{CE}$ 與 $I_C$ 之關係，並將結果分別記錄於表 1 之對應位置。
5. 仿照(圖 5)之形式，利用表 1 之資料，繪製 $V_{CE} - I_C$ 特性曲線於圖 14 中。

$I_C$ (mA)	$V_{CE}$ (V)									
	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
$I_B = 0 \mu A$										
$I_B = 10 \mu A$										
$I_B = 20 \mu A$										
$I_B = 30 \mu A$										
$I_B = 40 \mu A$										
$I_B = 50 \mu A$										
$I_B = 60 \mu A$										

(表 1)