

實 習 七

雙極性接面電晶體元件之基本特性

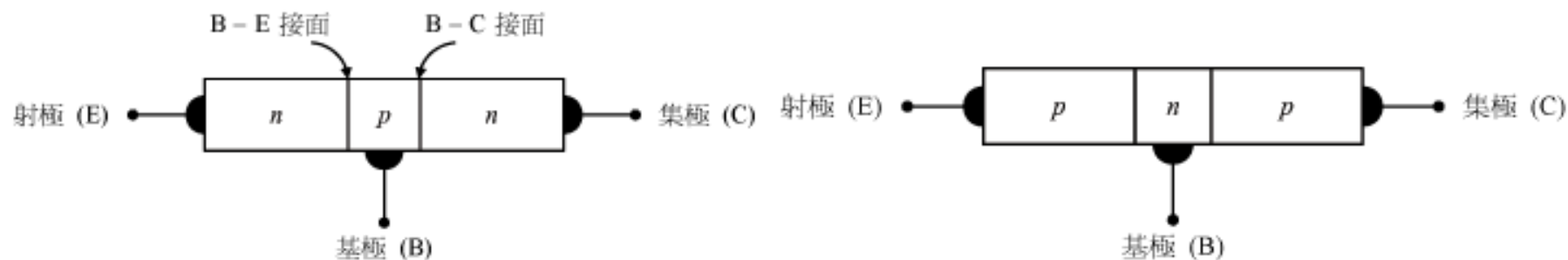
◆ 實習目的

1. 學習判斷 npn 與 npn 雙極性接面電晶體種類之方法。
2. 學習判斷雙極性接面電晶體之基極 (B)、射極 (E) 與集極 (C) 等 3 個接腳的方法。
3. 藉由實習過程，以瞭解雙極性接面電晶體之基本原理與各種電路組態之輸入、輸出的電壓 - 電流特性曲線。



相關知識

- ◆ 一種分別由射極 (Emitter; E)、基極 (Base; B) 與集極 (Collector; C) 等 3 個半導體區域所組合成的電子元件，稱為**雙極性接面電晶體** (Bipolar Junction Transistors; BJTs)。
- ◆ 依所組合之半導體材料來區分，**雙載子接面電晶體**可分為 *npn* 電晶體與 *pnp* 電晶體等兩種，如下圖所示。

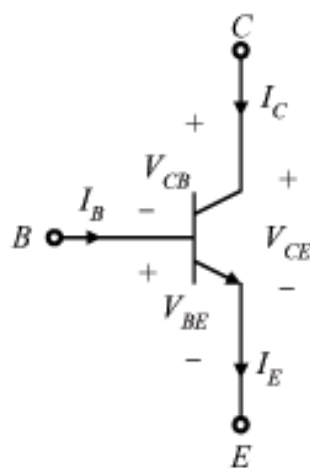


- ◆ 觀察左上圖可知，兩端較寬之區域為 *n* 型材料之半導體，分別為射極 (E) 與集極 (C) 區，而中間夾以較窄之 *p* 型材料之半導體為基極 (B) 區，此為 *npn* 電晶體之基本構造。
- ◆ 觀察右上圖可知，兩端較寬之區域為 *p* 型材料之半導體，分別為射極 (E) 與集極 (C) 區，中間夾以較窄之 *n* 型材料之半導體為基極 (B) 區，此為 *pnp* 電晶體之基本構造。

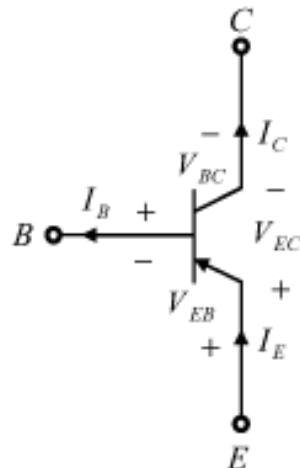


- ◆ 雙載子接面電晶體是由 3 個不同面積與摻雜濃度之半導體材料所組合而成，且每一個半導體區之面積與摻雜濃度皆不相同，其中射極區之面積比集極小（比基極大），而摻雜濃度最高之區域，它的主要功能是發射多數載子進入基極；集極區之面積是三個區域中最大，而摻雜濃度為最低，它的主要功能是收集射極所發射之多數載子，基極區佔用之面積為三個區域中面積最小的，而摻雜濃度介於射極與集極之間。

- ◆ 雙極性接面電晶體之種類，可分為 *npn* 和 *pnp* 等兩種，而這兩種電晶體之電路符號，如右圖所示。觀察右圖可知，字母符號 *E*、*C* 與 *B* 分別表示雙極性電晶體之射極、集極與基極，而射極之箭頭方向表示射 - 基極接面接受順向偏壓之電流方向（即箭頭之方向是指向 *n* 型半導體）。



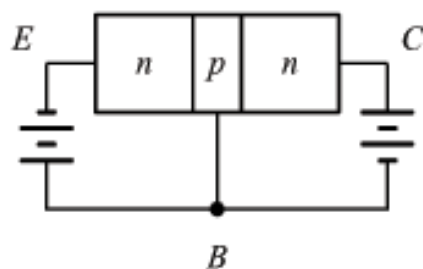
(a) *npn* 電晶體



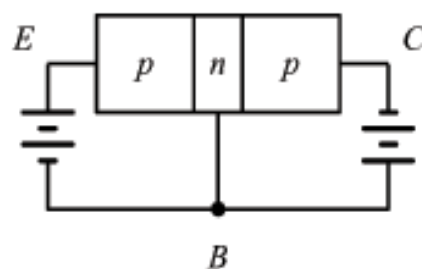
(b) *pnp* 電晶體



- ◆ 以 *npn* 電晶體作為放大用途之動作原理，當對 $E-B$ 接面施以順向偏壓超過障壁電壓，且 $C-B$ 接面接受逆向偏壓時， $E-B$ 接面之順向偏壓會產生足夠之能量，使射極 (E) 所發射之電子通過 $E-B$ 接面注入基極 (B)，而這些越過 $E-B$ 接面之電子會與基極之多數載子 (電洞) 結合後，以形成基極電流 (I_B) 之主要部分，因基極之面積與摻雜濃度相對射極小了許多，因此由射極進入基極之電子，大部分會受到 $C-B$ 接面之逆向偏壓，所產生之高電場吸引，而加速進入集極，以形成集極電流 (I_C) 之主要部分。對雙載子接面電晶體而言，射極是發射電子的來源，因此射極電流 (I_E) 等於其它兩端 (基即與集極) 之電流和，即 $I_E = I_C + I_B$ 。



(a) *npn* 電晶體



(b) *pnp* 電晶體



◆ 若將雙載子接面電晶體之**基極** (B)、**射極** (E) 與**集極** (C) 等 3 個端點，分別對應至**雙埠網路**之**訊號輸入端**(I/P)、**訊號輸出端**(O/P) 與**共同端**(COM)等 3 個端子，即可構成 3 種不同之**電晶體電路組態**如下：

1. **共射極** (CE)：具有高電壓與高電流增益，故適合用來作訊號放大（功率放大）之用途。
2. **共集極** (CC)：具有高輸入阻抗與低輸出阻抗之特性，故適合用來作阻抗匹配之前級緩衝器之用途。
3. **共基極** (CB) 組態：具有低輸入阻抗與高輸出阻抗之特性，故適合用來作後級緩衝器之用途。

◆ 電晶體之**基極**、**射極**與**集極**等 3 個端子，分別對應至**輸入**、**輸出**與**參考訊號端**之情況，所組成之 3 種電晶體電路組態，如下表所示。

組 態	輸入端	輸出端	共同端
共基極：CB	射 極	集 極	基 極
共射極：CE	基 極	集 極	射 極
共集極：CC	基 極	射 極	集 極

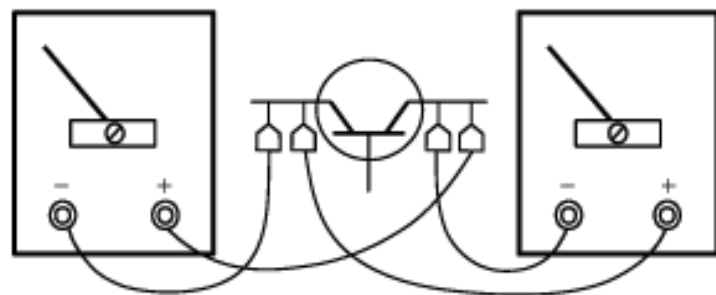
◆ 使用 BJT 設計電子電路時，首先需判斷**電晶體種類** (nnp 或 $pnnp$) 與射極 (E)、基極 (B) 與集極 (C) 等 3 個**接腳位置**，再依實際所需之電晶體電路組態，對電晶體施予**適當的偏壓**後，以探討各種電晶體電路組態之輸入與輸出迴路的**電壓 - 電流特性曲線**，以進一步瞭解雙載子接面電晶體之各種**電氣特性**。



辨別電晶體種類 (*npn* 或 *pnp*) 之方法

- ◆ BJT 可視為兩個背對背放置之 *pn* 接面二極體，若 $B-E$ 接面接受順向偏壓，且此順向偏壓超過障壁電位時，便會有電流通過這個接面 ($B-E$ 接面) 之空乏區，導致接面阻抗降低，即可用三用電表 (若接受順向偏壓之接面，會使置於歐姆檔之三用電表的指針產生相當大的偏轉) 來判斷 BJT 之種類。
- ◆ 接著討論使用三用電表之歐姆檔，以判斷 BJT 之基極 (B) 與種類的方法如下：

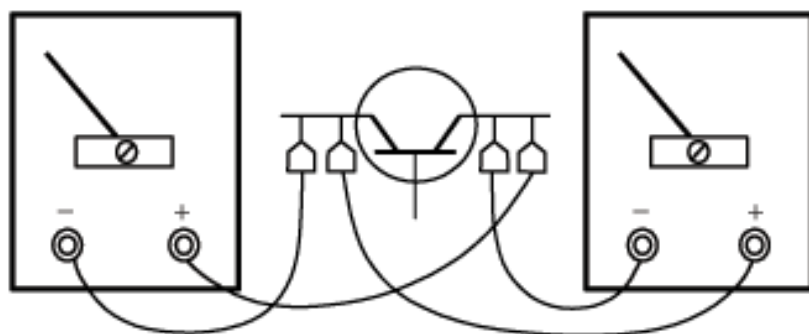
1. 將類比式三用電表 (使用指針顯示之電表) 之測量範圍選擇鈕撥至「 $R \times 10$ 」的歐姆檔位，並確定電表之正、負電壓輸出端與進行歸零調整。
2. 將三用電表之兩支測試棒，分別接觸 BJT 之任意 2 支接腳，若測量所得之結果，呈現高電阻 (三用電表之指針不偏轉或僅小幅度偏轉)，接著將電表之兩支測試棒所接觸的接腳交換，再重複上述動作，如右圖，



所示若亦呈現高電阻，則可判定這兩支接腳為射極 (E) 與集極 (C) 接腳，而剩下一支未測量之接腳，即可判斷為基極 (B) 接腳。

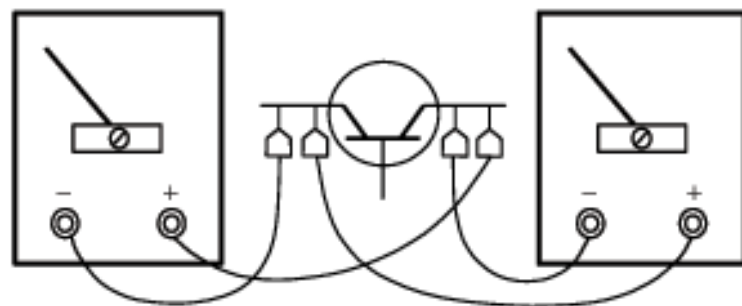


3. 接著將三用電表之**正輸出**電壓接觸 BJT 之**基極** (B)，而**負輸出**電壓接觸**剩下任一**支接腳，如下圖所示，若電表之指針有**大幅度之偏轉**，則表示待測電晶體之種類為 npn 。反之，將三用電表之**負輸出**電壓「-」接觸 BJT 之基極 (B)，而**正輸出**電壓接觸**剩下任一**支接腳，若電表之指針有**大幅度之偏轉**，則表示待測電晶體之種類為 pnp 。



使用三用電表來辨別電晶體種類之注意事項

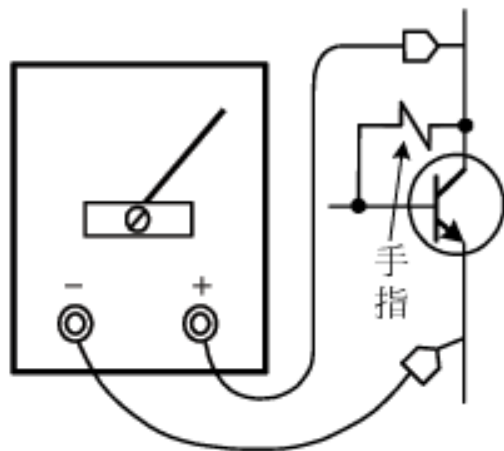
- (1) 對類比式三用電表而言，當測量範圍選擇鈕置於「 Ω 」之檔位時，其「正、負兩端測試插孔」，將會輸出直流電壓。一般而言，日本規格之三用電表，負端測試插孔輸出正電壓，而正端測試插孔輸出負電壓。為進一步確定電表之輸出直流電壓的極性（正、負電壓輸出端），可使用另一個三用電表，將測量範圍選擇鈕置於「DCV」之檔位判斷。
- (2) 下圖之「+」（正輸出電壓）與「-」（負輸出電壓）分別為電表之直流輸出電壓極性，而非直接三用電表之面板之「+」與「-」的標示。
- (3) 上述之測量方法，僅可判斷所測量 BJT 的 2 支接腳為射極 (E) 與集極 (C)，而無法分辨射極 (E) 與集極 (C) 等 2 接腳之確定位置，而剩下一支接腳，便可確定為基極 (B) 之位置。
- (4) 若利用上述之方法，任意交換 6 次測量 BJT 之 3 支接腳後，而三用電表之指針皆不偏轉或僅小幅度偏轉，則表示待測 BJT 為不良品。



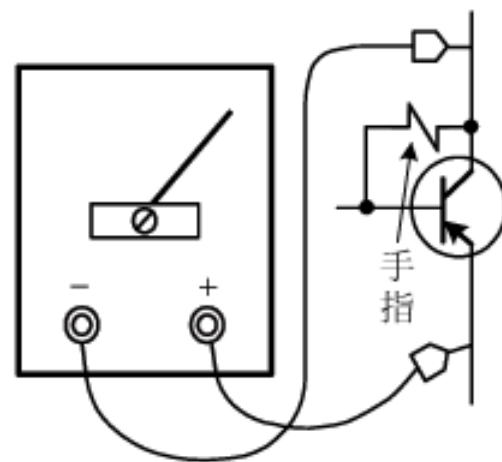
分辨電晶體射極 (E)、基極 (B) 與集極 (C) 等 3 支接腳之方法

◆ 根據前面測量，僅可確定 BJT 之種類 (*npn* 或 *pnp*) 與基極 (B) 接腳位置，而無法分辨剩下之兩支接腳位置，何者為射極 (E) 與集極 (C)。接著利用下列方法，以進一步確定射極 (E) 與集極 (C) 接腳位置之方法如下：

1. 將三用電表之旋鈕撥至「 $R \times 10$ 」的歐姆檔位，並確定電表之正、負電壓輸出端與進行歸零調整。
2. 假設待測 BJT 之種類為 *npn*，首先將三用電表之正、負電壓輸出端，分別接觸尚未判定之 2 支接腳位置上，接著用手指（取代電阻）跨接正電壓輸出端（此端點與 BJT 之其中一支接腳接觸）與基極 (B) 後，如右圖所示，若電表之指針有大幅度之偏轉，則電表之正輸出電壓端所接觸之端點為集極 (C)，而電表之負輸出電壓端所接觸之端點為射極 (E)。若電表之指針沒有偏轉，則對調正、負電壓輸出端所接觸之接腳，再重複上述動作。

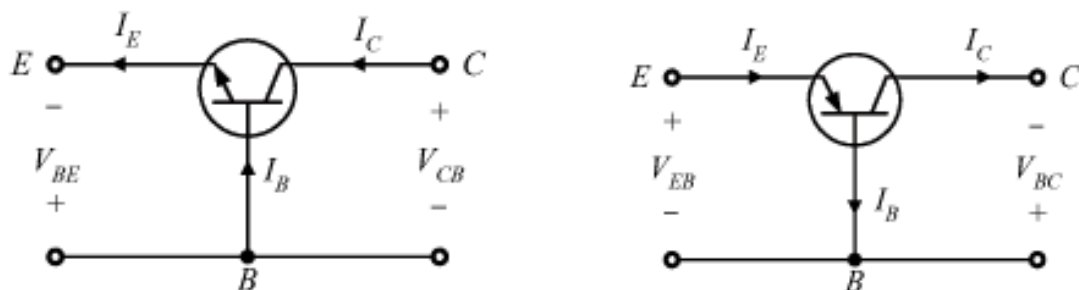


3. 假設待測 BJT 之種類為 *pn*p，首先將三用電表之正、負電壓輸出端，分別接觸尚未判定之 2 支接腳位置上，接著用手指（取代電阻）跨接正電壓輸出端（此端點與 BJT 之其中一支接腳接觸）與基極（*B*）後，如右圖所示，若電表之指針有大幅度之偏轉，則電表之正輸出電壓端所接觸之端點為射極（*E*），而電表之負輸出電壓端所接觸之端點為集極（*C*）。若電表之指針沒有偏轉，則對調正、負電壓輸出端所接觸之接腳，再重複上述動作。



共基極(CB)組態之電壓 - 電流特性

- ◆ 雙載子電晶體若以基極當作共同端、射極當輸入端、集極當輸出端，稱為共基極(CB)組態 (Common-base configuration)，接著分別繪出 *npn* 與 *pnp* 電晶體共基極組態，操作於主動區時之電流方向與電壓極性，如下圖所示。

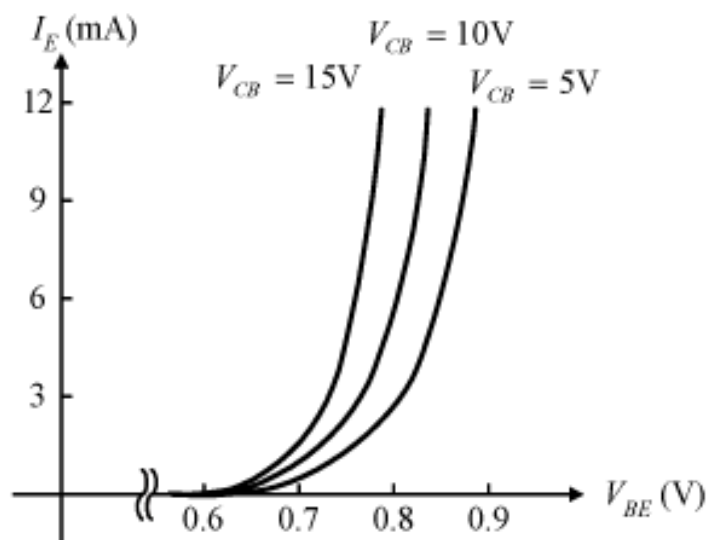


- ◆ 觀察上圖可知，不管是何種形式之電晶體，基極電流 I_B 與集極電流 I_C 之方向是相同的，而恰好與射極電流 I_E 之方向相反，即 $I_E = I_B + I_C$ 。



共基極(CB)組態之輸入特性曲線

- ◆ 共基極電晶體組態之訊號輸入端(B-E 接面)，可模擬成為一個二極體，因此其輸入特性曲線(輸入電壓 V_{BE} 對輸入電流 I_E 之關係，而以不同之 V_{CB} 當參考)與二極體之 $V-I$ 特性曲線相似。

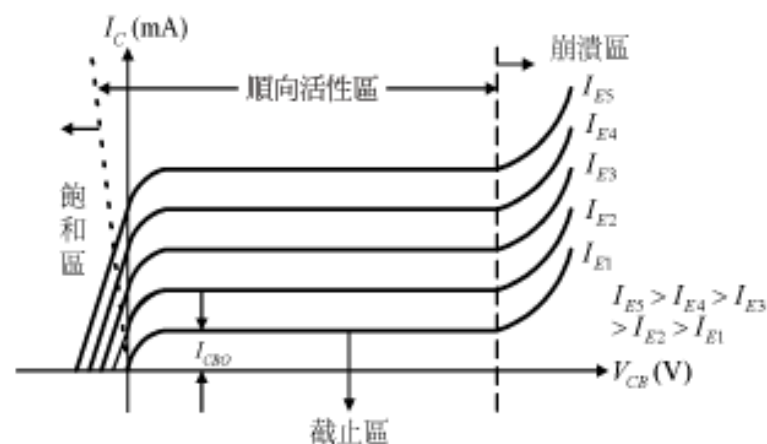


- 1、當 B-E 接面之順向偏壓超過 V_D ($V_{BE} > V_D$)，C-B 接面之逆向偏壓大於零時 ($V_{CB} > 0$)，電晶體會操作於順向活性區。
- 2、但當 V_{CB} 之逆向偏壓逐漸增加時，會使電晶體之有效基極寬度會縮小(歐萊效應)，因而導致注入基極之少數載子更容易進入集極，傳導效益增加，致使射極電流 I_E 增加，故可繪出輸入 $I_E - V_{BE}$ 特性曲線，如左圖所示。



共基極(CB)組態之輸出特性曲線

- ◆ 若考慮輸出電流 I_C 與輸出電壓 V_{CB} 之關係，而以不同之輸入電流 I_E 當參考，即可得輸出 $I_C - V_{CB}$ 特性曲線，如下圖所示。接著利用下圖來說明共基極組態之電晶體的 3 種操作模式：

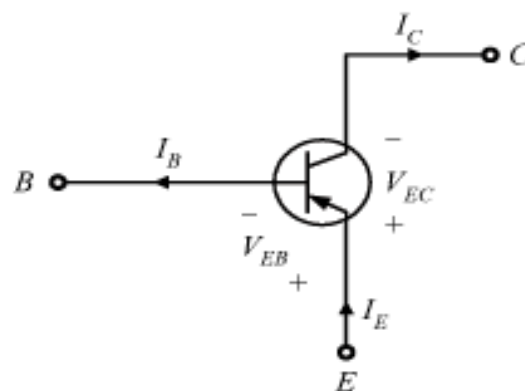
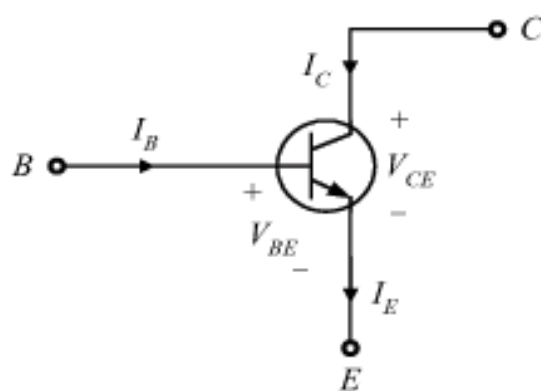


- 1、當 $V_{CB} < 0$ 時，因 B-E 接面與 B-C 接面皆接受順向偏壓，此時電晶體會**在飽和區**工作。
- 2、當 $V_{CB} > 0$ 時，B-C 接面接受逆向偏壓，此偏壓會使此接面空乏區**提供一個電場**驅使由**基極之少數載子**進入**集極**，若不考慮基極之載子復合效應，則 I_C 之大小不會隨 V_{CB} 之大小變化 (I_C 為一定值)，此時電晶體是操作於**順向活性區**。
- 3、當 $I_E = 0$ 時，因射極沒有少數載子注入基極，集極電流是由 B-C 接面之**逆向飽和電流** I_{CBO} 所組成的，因此於 $I_E = 0$ 以下之區域稱為**截止區**。



共射極(CE)組態之電壓 - 電流特性

- ◆ 雙載子電晶體若以射極當作共同端、基極當輸入端、集極當輸出端，即為共射極(CE)組態 (Common-emitter configuration)，接著繪出 *npn* 與 *pnp* 電晶體操作於主動區時之電流方向與電壓極性，如下圖所示。

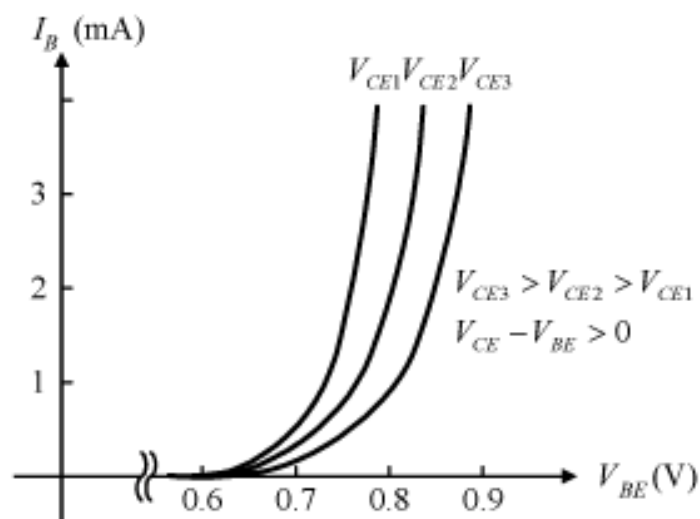


- ◆ 當共射極組態操作於順向活性區時，可同時提供電壓與電流放大，因此常用來作為功率放大電路。



共射極(CE)組態之輸入特性曲線

- ◆ **共射極組態之輸入端 (B-E 接面)** 可視為一個**二極體**，因此**輸入特性曲線**(輸入電壓 V_{BE} 對輸入電流 I_B 之關係，而以不同之 V_{CE} 當參考)亦與**二極體之 $V-I$ 特性曲線**相似。



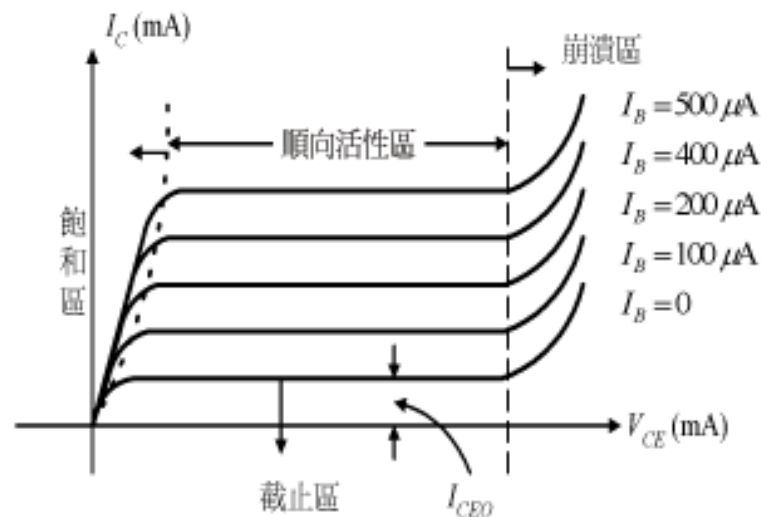
- 1、當 B-E 接面之**順向偏壓**超過 V_D ($V_{BE} > V_D$)，C-B 接面**逆向偏壓**時 ($V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} > 0$)，此時電晶體會操作於**順向活性區**，即可進行**訊號放大**之工作。
- 2、當 B-E 接面之**順向偏壓** V_{BE} **保持固定** ($V_{BE} > V_D$) 時，隨著 V_{CE} 之**增加**，則 C-B 接面**空乏區寬度**會隨之加寬，使**基極之中性區寬度**縮小，導致由**射極注入之多數載子**與**基極之多數載子復合率**會減少，因此會使 I_B 減少，故 I_B 之大小與 V_{CE} 成**反比**關係，如左圖所示。



共射極(CE)組態之輸出特性曲線

- ◆ 考慮輸出電流 I_C 與輸出電壓 V_{CE} 之關係，而以不同之輸入電流 I_B 當參考，即可得共射極組態之輸出 $I_C - V_{CE}$ 特性曲線，如下圖所示。接著利用下圖來說明共射極組態之電晶體的 3 種操作模式：

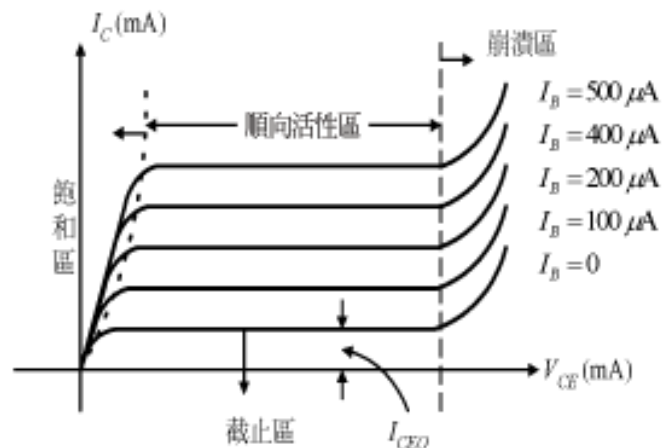
1、當 $I_B = 0$ 時 (當 $V_{BE} < V_D$ 時，即 B-E 接面之順向偏壓未超過基-射極之障壁電位)，導致射極沒有多數載子注入基極，而集極電流是由 C-E 接面之逆向飽合電流 I_{CEO} 所組成的，因此於 $I_B = 0$ 以下之區域稱為截止區。



- 2、當 B-E 接面接受順向偏壓產生足夠大之基極電流 I_B ，且 C-B 接面接受逆向偏壓 ($V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} > 0$) 時，由射注入基極之少數載子大部分會流向集極，以構成集極電流 I_C ，故集極電流 I_C 將會維持一定值 ($I_C \approx I_E$)，即 I_C 之大小不會隨 V_{CE} 之變化而改變，此時電晶體操作於順向活性區。

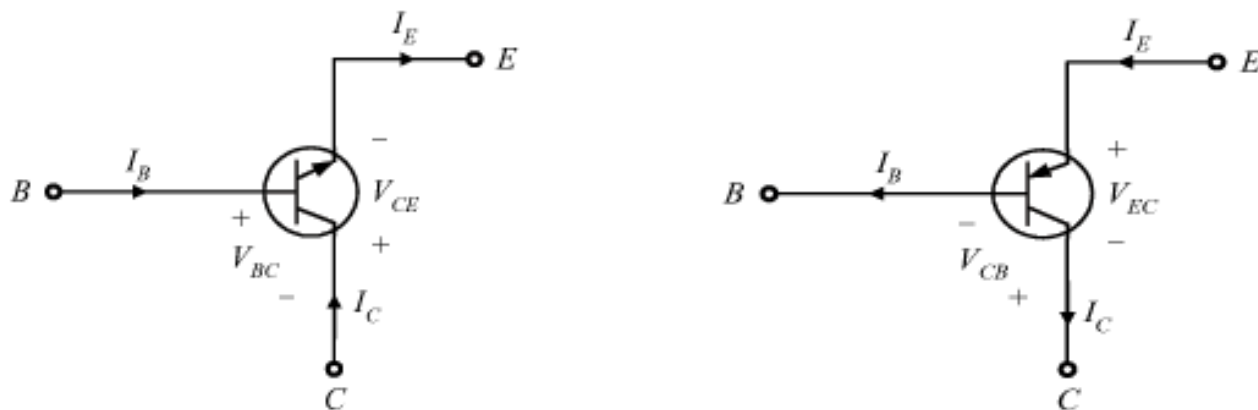


- 3、當電晶體之兩個接面皆接受順向偏壓時，由於 C-B 接面之逆向偏壓已不存在，由射極擴散至基極之少數載子無法有效進入集極，會導致電晶體之作用開始減弱(I_C 與 I_B 無關)，而 V_{CE} 之電壓會減少至約 0.2 至 0.3 伏特之間，此時表示電晶體進入飽合區操作。



共集極(CC)組態之電壓 - 電流特性

- ◆ 雙載子電晶體若以**集極當作共同端**、**基極當輸入端**、**射極當輸出端**，即為**共集極(CC)組態** (Common-collector configuration)，接著繪出 *npn* 與 *pnp* 電晶體操作於**主動區**時之**電流方向與電壓極性**，如下圖所示。

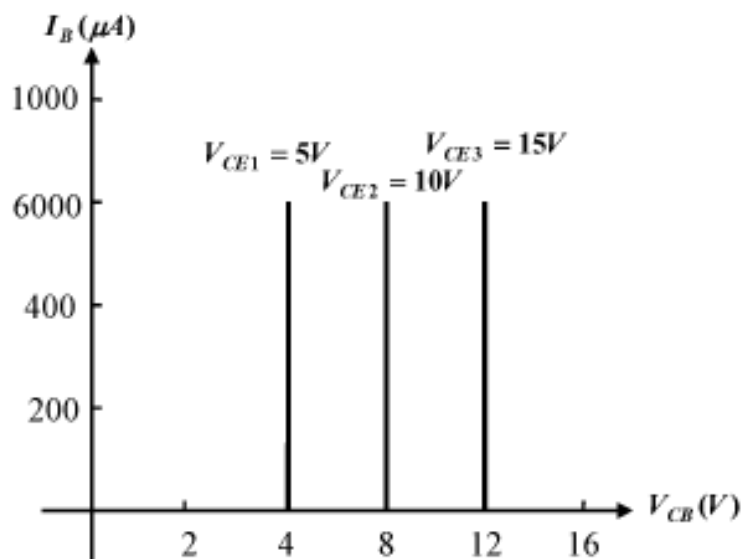


- ◆ 共集極組態能提供**高輸入阻抗**、**低輸出阻抗**、**高電流增益**與**低電壓增益** (接近於 1，但小於 1)，因此其主要之用途為**阻抗匹配之緩衝級** (Buffer Stage)。



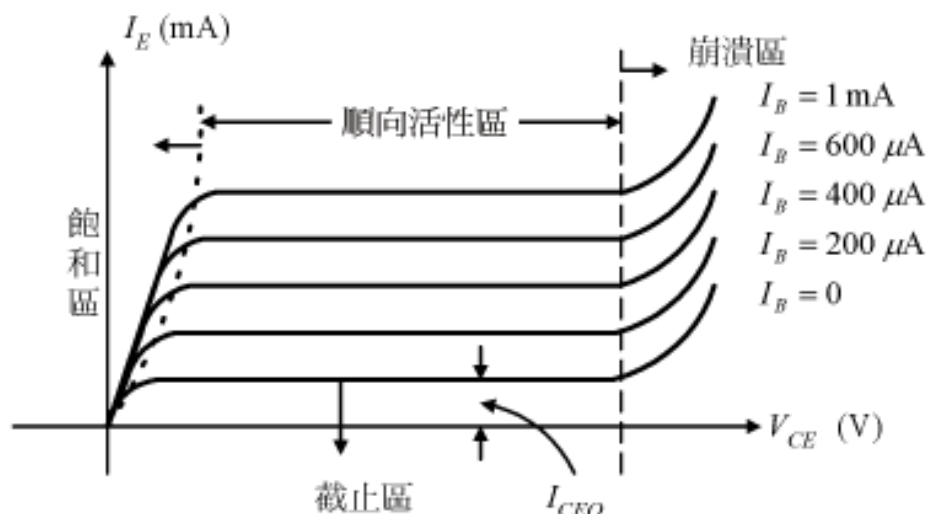
共集極(CC)組態之輸入特性曲線

- ◆ 對 *npn* 電晶體而言，當 $-(V_{CB} - V_{CE}) < V_D$ 時，基極電流 I_B 等於零；但若 $-(V_{CB} - V_{CE}) > V_D$ 時，B-E 接面便會接受順向偏壓，此時基極電流 I_B 將會以指數函數增加，而共集極組態之輸入 $I_B - V_{CB}$ (輸入電壓 V_{CB} 對輸入電流 I_B 之關係，而以不同之 V_{CE} 當參考) 特性曲線，如下圖所示。



共集極(CC)組態之輸出特性曲線

- ◆ 因電晶體之 $I_C \approx I_E$ 之故，導致**共集極組態(CC)**之輸出($I_E - V_{CE}$)特性曲線與**共射極組態(CE)**之輸出($I_C - V_{CE}$)特性曲線相類似，如下圖所示。



實習步驟與結果

(一) 辨別 *npn* 或 *pnp* 之電晶體組態

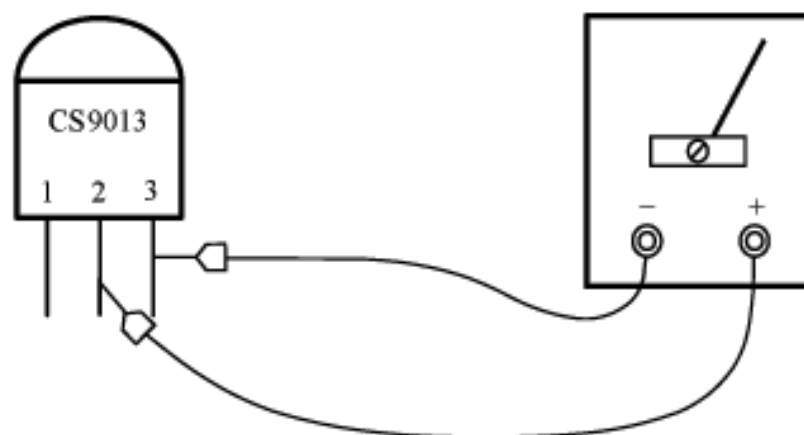


表 7-2 判斷 BJT 之基極 (B) 與種類

BJT 種類	測量 接腳	正電壓輸出端	1	1	2	2	3	3	判斷測量結果	
		負電壓輸出端	2	3	1	3	1	2	B 極接腳	種 類
CS9013	電阻值(Ω)		∞	∞	65	65	∞	∞	2	<i>npn</i>
CS9012	電阻值(Ω)		60	∞	∞	∞	∞	60	2	<i>pnp</i>



(二) 判斷射極 (E)、基極 (B) 與集極 (C) 等 3 個接腳之方法

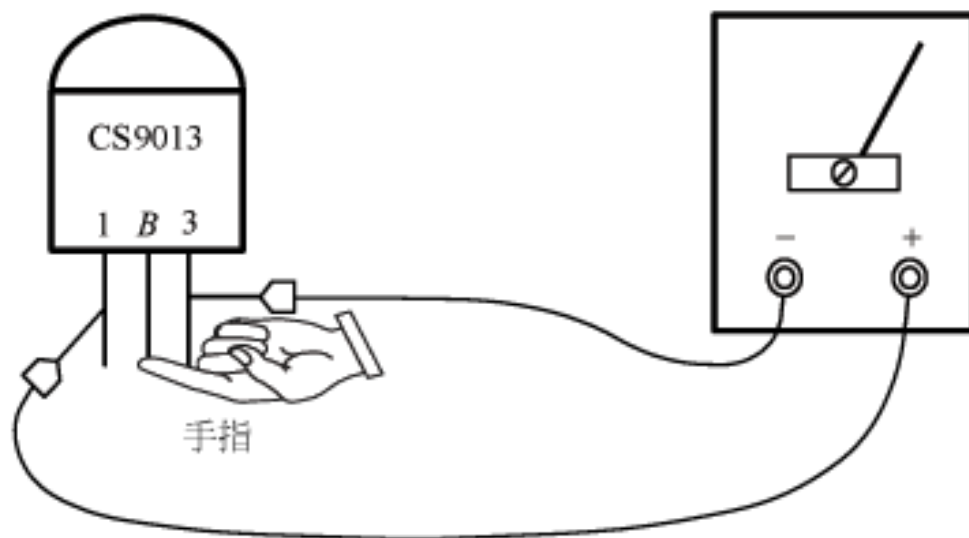


表 7-3 判斷 BJT 之射極 (E) 與集極 (C) 接腳位置

BJT 種類	測量 接腳	正電壓輸出端	1	3	判斷測量結果	
		負電壓輸出端	3	1	射極 (E) 接腳	集極 (C) 接腳
CS9013	電阻值(Ω)		10 K	650	1	3
CS9012	電阻值(Ω)		600	3K	1	3



(三) 共射極 (CE) 組態之輸入電壓 - 電流 ($V_{BE} - I_B$) 特性曲線

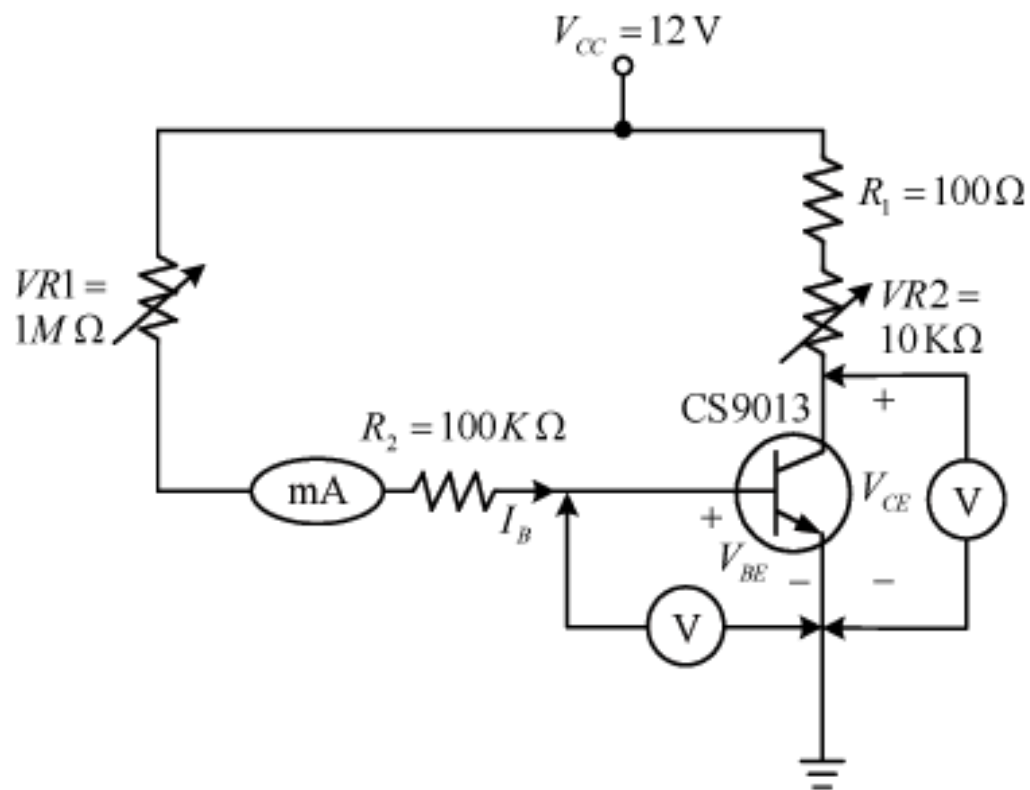
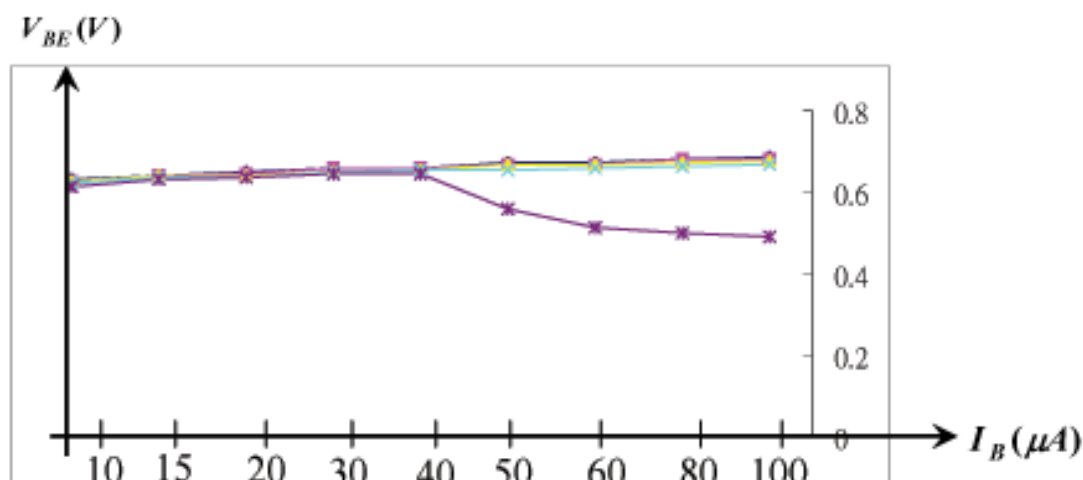


表 7-4 共射極 (CE) 組態之 V_{BE} 、 I_B 與 V_{CE} 的關係

$I_B (\mu A)$ $V_{CE} (V) \backslash V_{BE} (V)$	10	15	20	30	40	50	60	80	100
1	0.630	0.641	0.649	0.660	0.661	0.671	0.672	0.684	0.685
2	0.628	0.640	0.644	0.658	0.660	0.669	0.670	0.681	0.684
4	0.626	0.639	0.641	0.652	0.656	0.666	0.668	0.674	0.678
6	0.621	0.637	0.638	0.650	0.654	0.656	0.658	0.662	0.668
9	0.615	0.633	0.636	0.644	0.647	0.561	0.512	0.501	0.49



(四) 共射極 (CE) 組態之輸入電壓 - 電流 ($V_{CE} - I_C$) 特性曲線

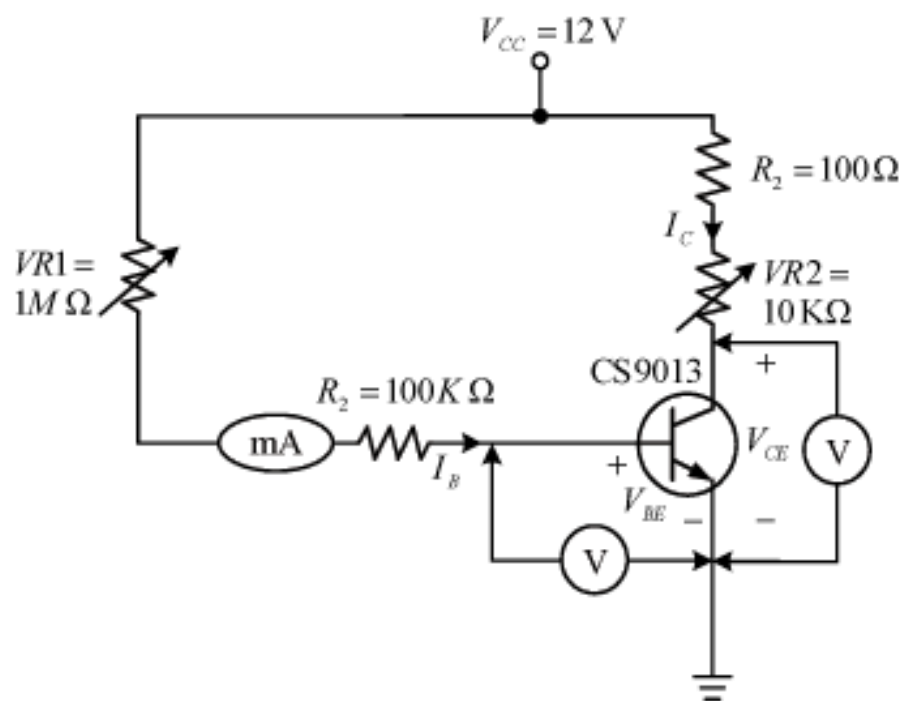
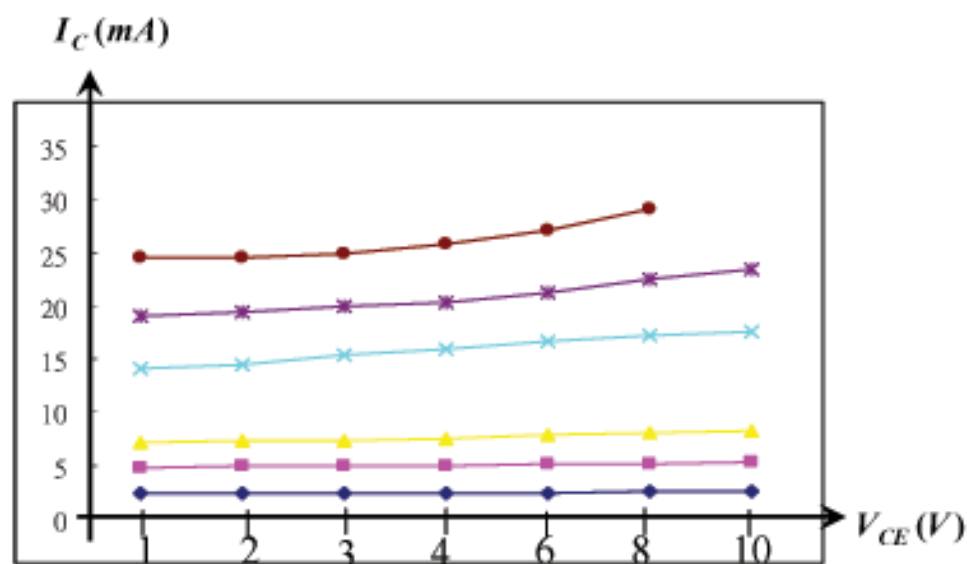
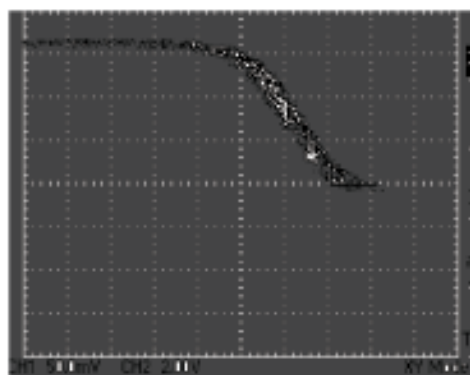
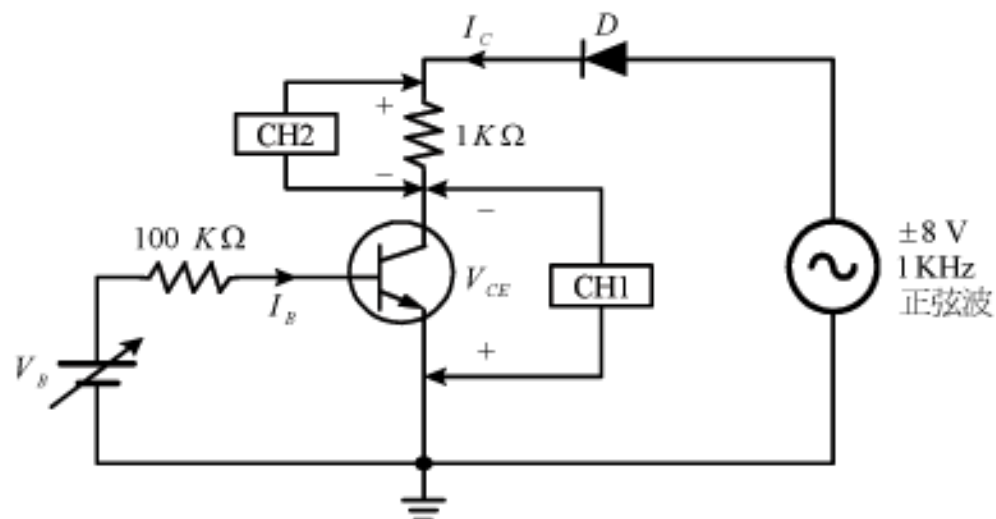


表 7-5 共射極 (CE) 組態之 V_{CE} 、 I_C 與 I_B 的關係

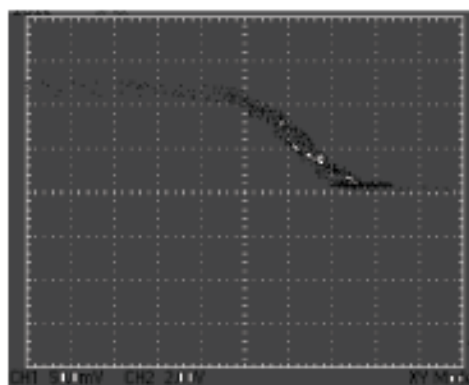
$I_B (\mu A)$ $I_C (mA)$ $V_{CE} (V)$	10	20	30	50	80	100
1	2.3	4.8	7.1	14.1	19	24.5
2	2.3	4.9	7.3	14.4	19.4	24.5
3	2.4	4.9	7.4	15.4	19.9	25
4	2.4	5	7.6	15.9	20.3	25.9
6	2.4	5.1	7.9	16.6	21.3	27.2
8	2.5	5.2	8.1	17.2	22.5	29.1
10	2.5	5.3	8.3	17.6	23.5	--



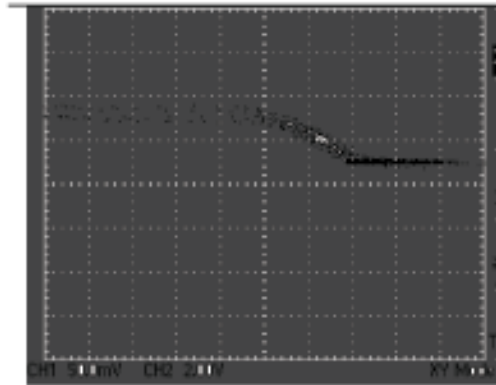
(五) 利用示波器直接測量共射極組態之 $V_{CE} - I_C$ (以 I_B 作參考) 特性曲線



(a) $V_B = 3.5\text{ V}$



(b) $V_B = 2.5\text{ V}$



(c) $V_B = 1.5\text{ V}$

