

認識二極體及電晶體特性曲線

一、實習目的

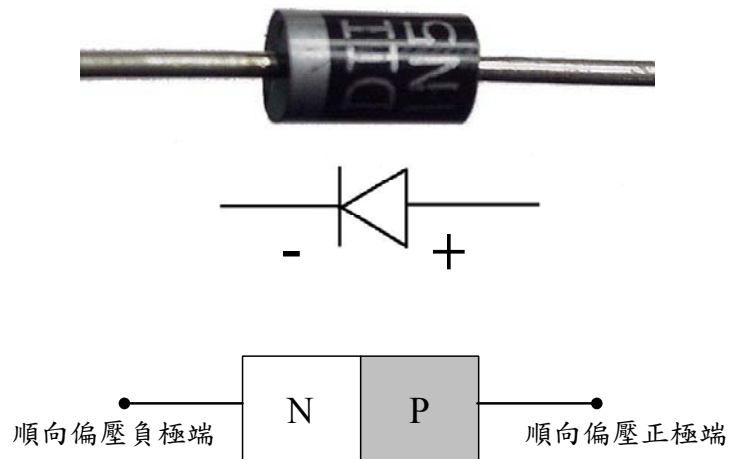
- (1) 了解二極體及電晶體基本結構。
- (2) 認識二極體及電晶體的種類與特性。
- (3) 了解二極體及電晶體特性曲線的量測與及描繪。

二、使用材料

零件名稱	零件值	數量
電阻	10 Ω	2
電阻	100 Ω	1
電阻	1 K Ω	1
電阻	1.5 K Ω	1
電阻	10 K Ω	1
可變電阻	10 K Ω	1
可變電阻	100 K Ω	1
二極體	1N4004	1
齊納二極體	耐壓 5 V	1
BJT	9013	1

三、相關知識

【二極體】

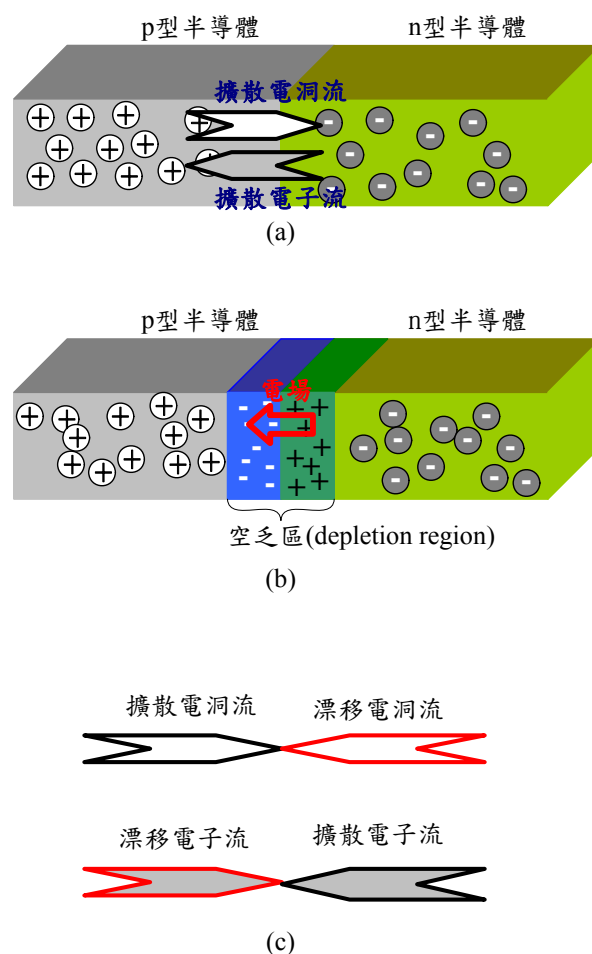


圖(1) 二極體介紹

二極體因為具有單向導電功能，且是在 PN 順向（P 加正壓，N 加負壓）時才會導通，所以就以一箭頭方向由 P 指向 N 的符號來代表，如上圖(1)。

當熱平衡(未施加偏壓)時，就電子濃度而言，因 N 型多於 P 型，故電子將由 N 型區擴散到 P 型區而和電洞結合，進而消失。同理，因為 P 型區的電洞濃度大於 N 型區，故電洞自 P 型區擴散到 N 型區，如圖(2-a)。不過，N 型區內本屬電中性，現因界面處喪失電子而留下 5A 的陽離子，電位因而升高；相對的，P 型區內原本亦是屬電中性，現因喪失電洞而留下 3A 的陰離子，使得電位因而降低。因此，在界面處將形成內建電場，由 N 型區朝向 P 型區，如圖(2-b)。在界面處兩側，因為流失大量載子，使得此區間的載子濃度明顯減少，遂稱為空乏區(depletion region)；此外，又因為界面兩側生成極向相反又無法移動的雜質離子，故又稱為空間電荷區(space charge region)。

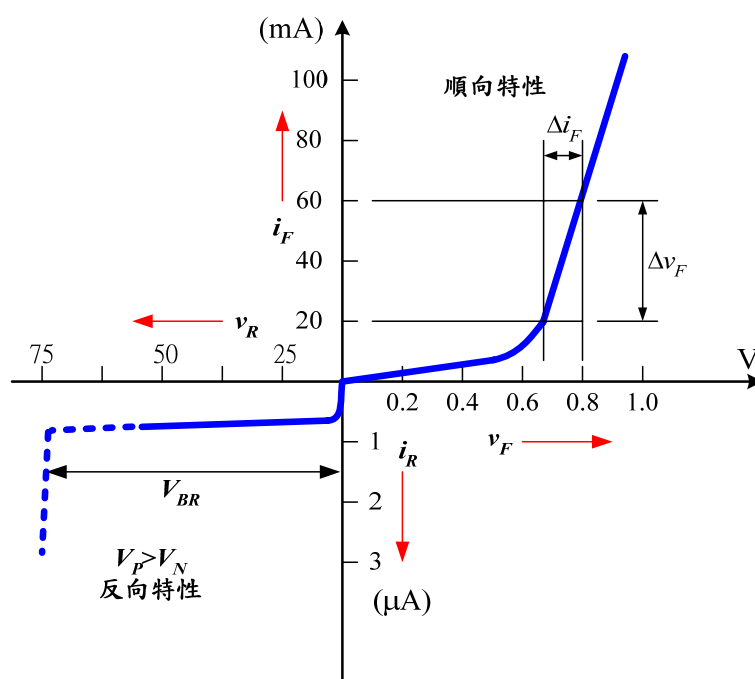
擴散現象乃多數載子所為，但空乏區內之內建電場，其方向由 N 型指向 P 型。因此，N 型中的少數載子(電洞)將受此電場驅動而漂移越過界面，形成漂移電洞流；同理，P 型中的少數載子(電子)將受此電場驅動而漂移越過界面，形成漂移電子流，其方向都和擴散電子(電洞)流相反，如圖(2-c)。到達平衡時，在任一位置的漂移和擴散電子(電洞)流會相互抵銷，所以總電子流和電洞流均為零。



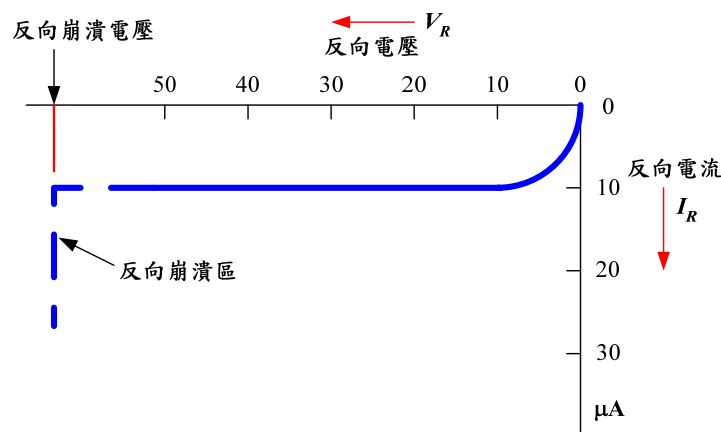
圖(2) PN 二極體形成時載子之移動

若外加偏壓 V_{bias} 大於零，則可提高 P 型區電位或降低 N 型區電位，就是 P 型半導體端施加正偏壓，N 型半導體端施加負偏壓，使 P 較 N 為正。當 PN 順向偏壓超過切入電壓（矽材料約為 0.6 V，鍺材料約為 0.2 V）時，電流很大，所以阻抗很小，故稱為順向偏壓。若外加偏壓 V_{bias} 小於零，則會使 P 型區電位更低，就是 P 型半導體加負偏壓，N 型半導體加正偏壓，使 P 較 N 為負；因為 PN 兩側的多數載子受逆向偏壓所吸引，而湧向外加偏壓兩端，使接面空乏區變大，使得空乏區電位越來越大，多數載子就越不能流過接面，導致多數載子之擴散現象更加困難，故稱為逆向偏壓。但是，這時候仍然有少數載子流過接面，縱然逆向偏壓繼續增加，少數載子流也達到飽和而不會再增加，稱為反向飽和電流 (I_S)。

$$I = I_S (e^{V_D/nV_T} - 1)$$



圖(3) 二極體的特性曲線



圖(4) PN 接面的反向特性

實際二極體導通時兩端的電位差並不一定是 0.7 V，而與電流大小有關，電流增加時，電位差也略為增大。不過，除了非常精確的分析之外，在一般應用上只需記住，二極體導通時兩端電位差約等於 0.7 V。

當逆向偏壓增加到某一特定的電壓值時，電流會急速的增加，此時的電壓稱為崩潰電壓 (breakdown voltage)。半導體二極體在進入崩潰時所能承受的最大逆向偏壓稱為逆向峰值電壓 (peak inverse voltage)，簡稱 PIV。

【齊納二極體】

特別設計的二極體被製造出來，專門用在崩潰區，這樣的二極體被稱為崩潰二極體，或稱為齊納二極體。

齊納二極體在順向導通時，和一般的PN二極體相同；而當逆向達到崩潰電壓時，齊納二極體的逆向電流 (I_Z) 則會大幅增加；而在一個電流範圍內時(介於 $I_{Z,max}$ 與 $I_{Z,min}$ 之間)，齊納二極體兩端之電壓能保持於 V_D ，因此被用來製作穩壓電路的元件。在 I_Z 小於 $I_{Z,min}$ 時，會使齊納二極體兩端電壓成曲線關係，則不能供應；尤其注意在 I_Z 大於 $I_{Z,max}$ 時，齊納二極體會燒掉，所以必須串聯一電阻，使 I_Z 介於 $I_{Z,max}$ 與 $I_{Z,min}$ 間而有良好穩定的工作電壓。

一般製造半導體的廠商都會提供以下的數值 (參考元件 datasheet)，使用時均不可大於此標準，否則容易造成元件的損壞。

- (1) 最大順向電壓
- (2) 最大順向電流
- (3) 最大逆向電流
- (4) 最大逆向峰值電壓
- (5) 最高工作溫度
- (6) 最高額定功率 ($P_{max}=V_D*I_D$)
- (7) 其他：如頻率範圍等。

【電晶體】

下圖(5)說明在主動模式(EB 接面順偏，CB 接面逆偏)下，BJT 內電流的流向圖。各分支電流說明如下：

I_n^{EB} = 注入基極的射極電流 $\equiv I_{En}$ 。

I_p^{EB} = 注入射極的基極電流 $\equiv I_{Ep}$ 。

I_{BE}^R = 基極區內的復合電流。

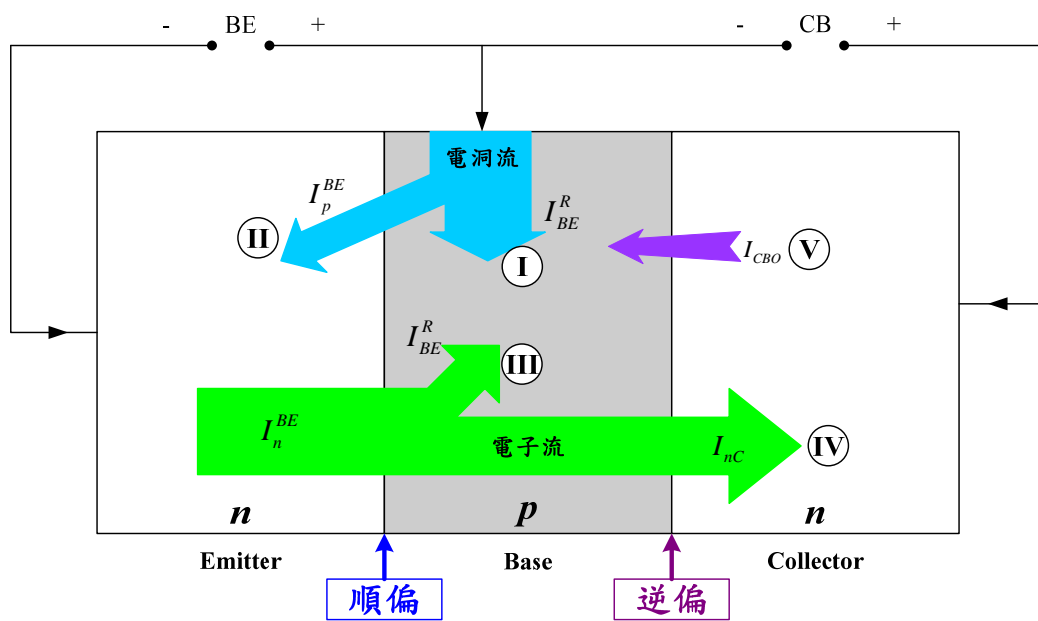
I_{CBO} = 逆偏下的反向飽和電流，因為 BC 接面反偏，使空乏區加寬之故，所以並

無擴散電流生成，只有逆偏飽和電流(屬偏移電流)。

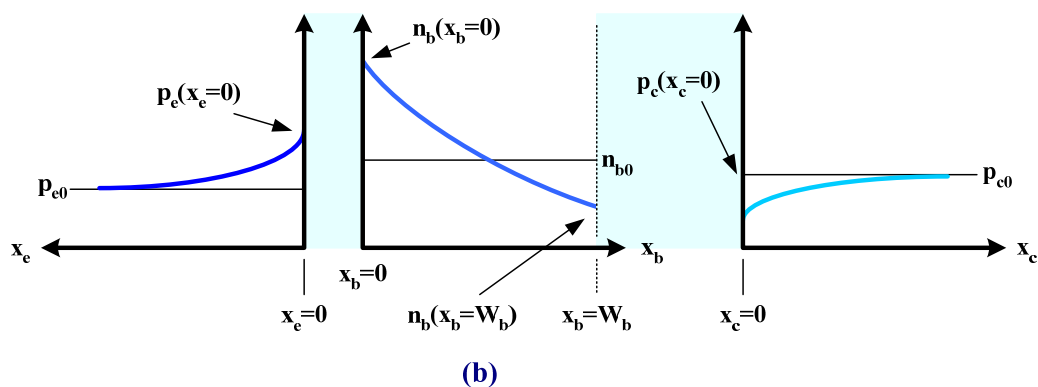
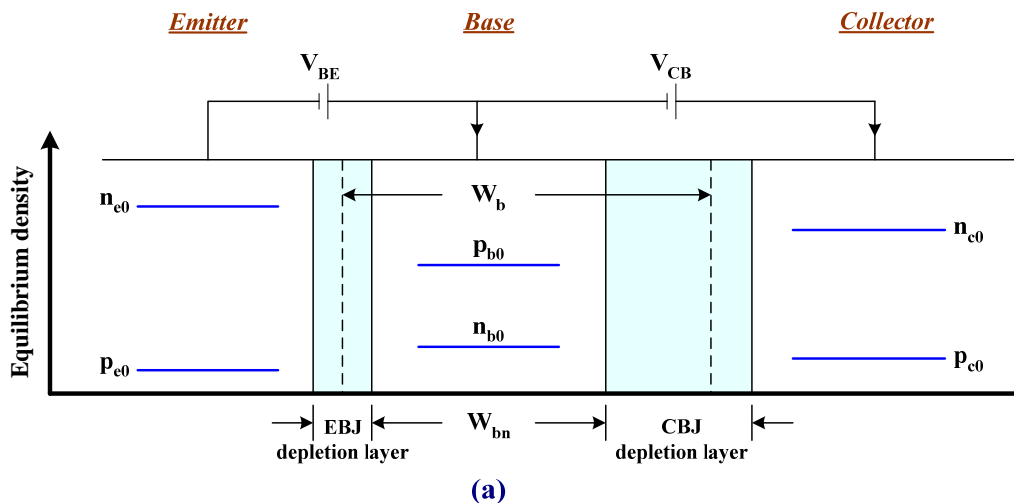
I_{nC} = 從射極來的電子流($\approx I_C$)；因為 B 極過薄，以致於射極所發射電子的大部分通過基極而不入，直接擴散至集極。

基極電流包括與從射極注入的電子復合的電動流(I)和通過 EB 接面並注入射極的電洞(II)。射極電流包括在基極區和電洞復合的電流(III)以及注入集極的電流(IV)。

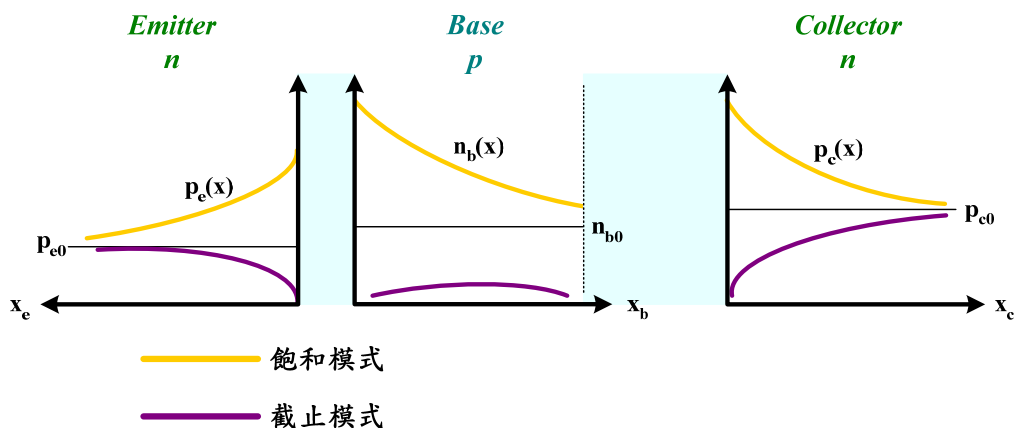
圖(6, 7)分別說明電晶體在三種不同偏壓模式(主動模式、飽和模式、截止模式)下，少數載子的濃度分布圖。主動模式就是 BE 順偏，BC 反偏(即 $V_{BE} > 0.5\text{ V}$ ， $V_{BC} < 0.5\text{ V}$)；飽和模式就是 BE 順偏，BC 順偏(即 $V_{BE} > 0.5\text{ V}$ ， $V_{BC} > 0.5\text{ V}$)；截止模式就是 BE 反偏，BC 反偏(即 $V_{BE} < 0.5\text{ V}$ ， $V_{BC} < 0.5\text{ V}$)。



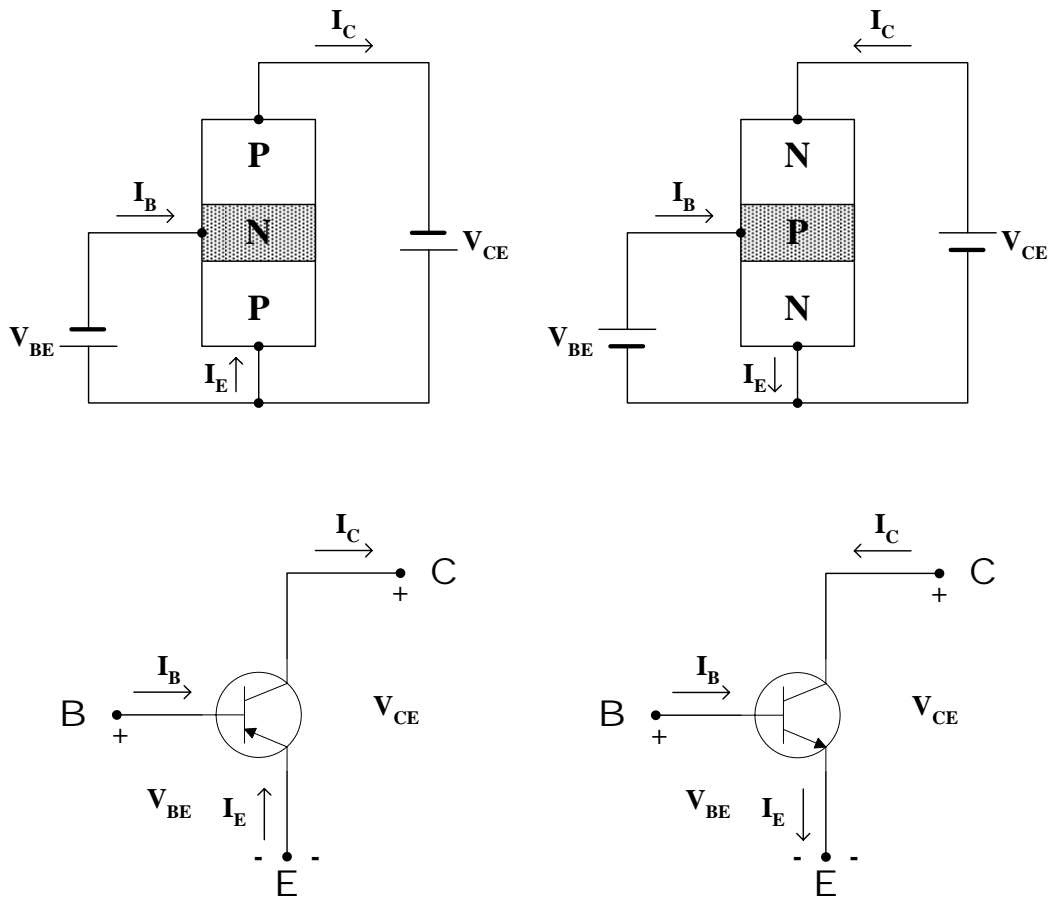
圖(5) BJT 電流分析圖



圖(6) (a)熱平衡狀態下，載子濃度及空乏界面位置；(b)順向主動模式下，少數載子的分佈，並且假設真實的基極寬度(W_b)和基極中性區寬度(W_{bn})是一樣的



電晶體放大器依實際需要與工作的模式可分為共基極組態 (CB)、共射極組態 (CE)、共集極組態 (CC)，以下舉共射極組態模式加以說明，如下圖(6)為 PNP 和 NPN 電晶體的共射極組態。



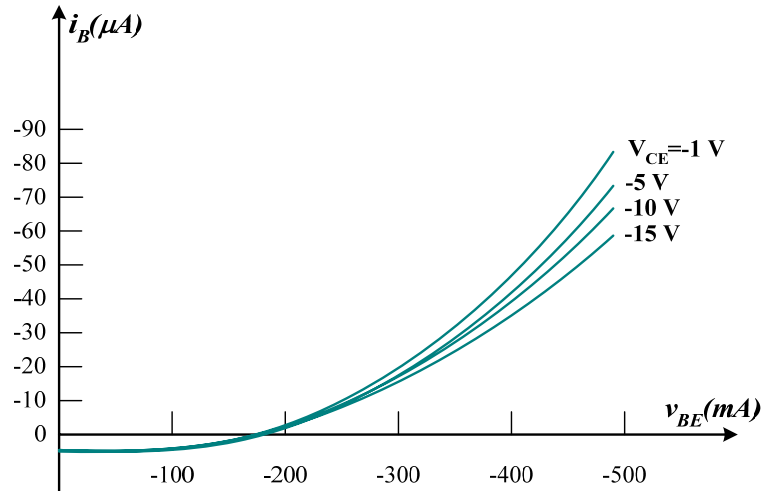
圖(8) 共射極組態模式

(1) 輸入曲線

如圖(9)所示，由該特性曲線可得知：

1、在某 v_{CE} 下， $|v_{BE}|$ 越大， $|i_B|$ 越大。

2、在某 v_{BE} 下， $|v_{CE}|$ 越大，因厄立效應，會使基極有效寬度變小，所以 $|i_B|$ 越小。



圖(9) 共射極組態模式的輸入曲線

(2) 輸出曲線

如圖(10)所示，由該特性曲線可得知：

- 1、工作區： J_E 順向， J_C 反向，在 $V_{CE(sat)}$ 的垂直線右邊以及 $I_b=0$ 的曲線以上的區域，可作電壓、電流、功率的放大。同時 $I_B=0$ 時，反向飽和電流 $I_C=I_{CEO}$ ，其值不等於零。由圖(8)中可由克希荷夫電流定律得知：

$$I_E + I_C + I_B = 0$$

$$\alpha \cong -\frac{I_C}{I_E}$$

$$I_C = -\alpha I_E + I_{CO} \quad (\text{note: } I_{CO} = I_{CBO})$$

$$I_E = -\frac{I_C - I_{CO}}{\alpha}, I_B = -\left[I_C - \left(\frac{I_C - I_{CO}}{\alpha} \right) \right]$$

$$-I_E = I_C + I_B = \frac{I_C - I_{CO}}{\alpha}$$

$$\alpha I_C + \alpha I_B = I_C - I_{CO}$$

$$I_C = \frac{\alpha I_B}{1 - \alpha} + \frac{I_{CO}}{1 - \alpha}$$

$$I_{CEO} = \frac{I_{CO}}{1 - \alpha} \Big|_{I_B=0}$$

在共射極組態下，在某一 v_{CE} 下，集極電流變化量 ΔI_C 與基極電流變化量 ΔI_B 的比值稱為共射極順向電流放大因數，以 β 表示，其值約在 20~200 之間。

$$\beta = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{V_{CE}=\text{constant}} \cong \frac{I_C}{I_B}$$

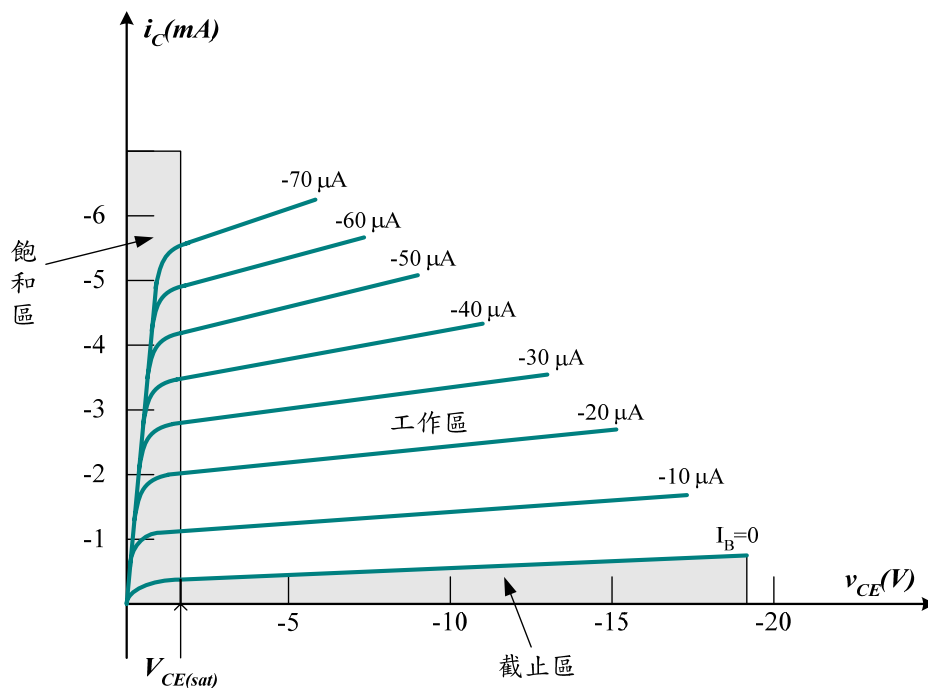
因為在工作區內，某一 v_{CE} 下， $I_C = \beta I_B$ ，因此

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

所以， $I_{CEO} = (1 + \beta)I_{CBO} \cong \beta I_{CBO} (\because \beta \gg 1)$

- 2、飽和區： J_E 和 J_C 都順偏，在 $0 \sim V_{CE(sat)}$ 之間， v_{CE} 略有變動時， i_C 會做指數式的變化。
- 3、截止區： J_E 和 J_C 都反偏，矽晶體只要 $I_B = 0$ 或 $I_C = I_{CBO}$ 時， I_C 就約為零，而鍺晶體的截止必須在 $I_C \neq I_{CBO}$ 且 $I_{CBO} = I_{CO}$ 以下的條件。



圖(10) 共射極組態模式的輸出曲線

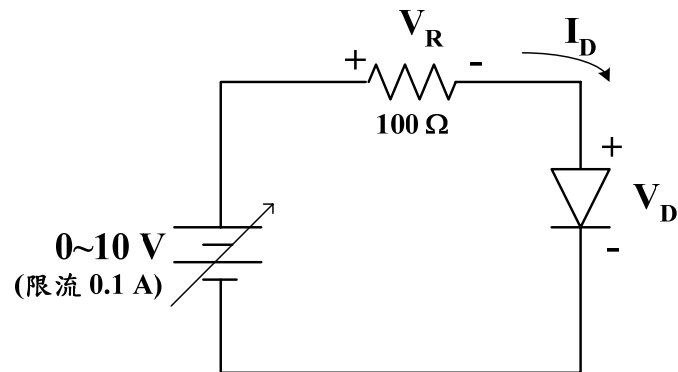
表(1) 日本電晶體的編制

項次	1	2	3	4	5
符號	2	S	C	372	A

項次	符號	意義
1	0	光電晶體或光電二極體
	1	二極體
	2	三極體
	3	四極體
2	S	半導體
3	A	PNP 高頻
	B	PNP 低頻
	C	NPN 高頻
	D	NPN 低頻
	F	P 型 SCR
	G	N 型 SCR
	J	P 通道 FET
	K	N 通道 FET
	M	雙向 SCR
4	XXX	電晶體序號，由 11 開始
5	A~D	改良序號
	O	h_{FE} : 70~140
	Y	h_{FE} : 120~240
	GR	h_{FE} : 200~400
	BL	h_{FE} : 350~700

四、實習項目

(一) 二極體 I-V 特性曲線量測



圖(11) 電路圖

爲了能提到較精確的數值本實驗以三用電表進行電壓量測，如能使用數字式電表更加準確。

調整電源供給器，使二極體兩端電壓 V_D 達下表(2)中所列，量測電阻的端電壓 V_R 並填入表中，以 $I_D = V_R/R$ 計算對應的 I_D 值填入表(2)中。

將二極體反向，調整電源供給器由 5 V 至 25 V，每 5 V 變化一次，紀錄量測之 V_D 、 I_D 於表(3)中。

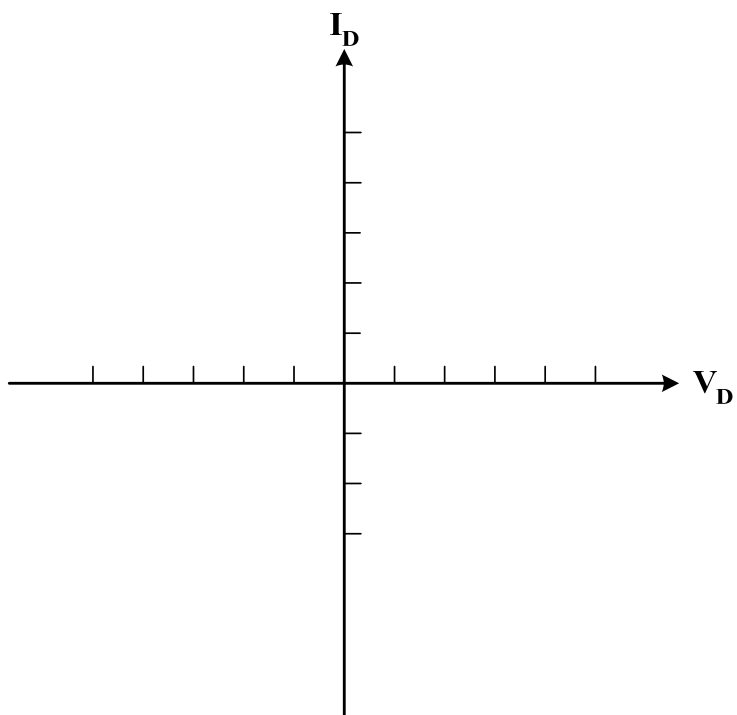
將表(2)、(3)量得的數據描繪於座標圖中，即可得二極體 I-V 特性曲線。沿著順向導通陡峭曲線，用色筆劃出一條近似直線此直線和 V 軸相交的一點即爲膝點電壓(V_k)，直線則代表二極體兩端電壓超過 V_k 時的順向導通電阻值，在此值線上任取一段以 $\Delta V/\Delta I$ 計算得其電阻值爲 r_B 。我們已由觀 V-I 特性曲線掌握住這個二極體的兩個重要特性(膝點電壓和順向導通電阻)，在大多數近似分析中均將 r_B 忽略不計，做過本實驗後證實 r_B 確實只有幾歐姆而已。

表(2)

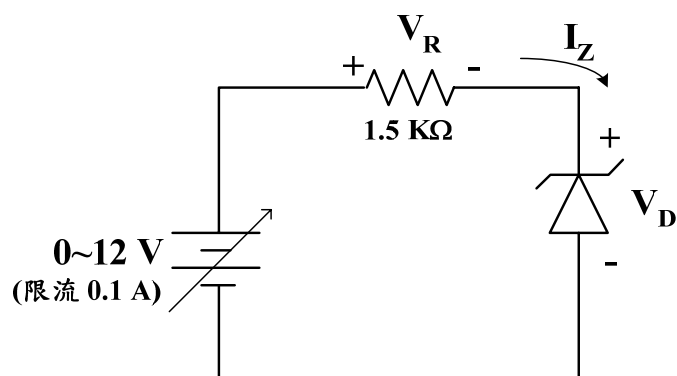
V_D (V)	V_R (V)	I_D
0.1		
0.2		
0.3		
0.4		
0.5		

表(3)

V_D (V)	V_R (V)	I_D
5		
10		
15		
20		
25		



(二) 齊納二極體 I-V 特性曲線量測

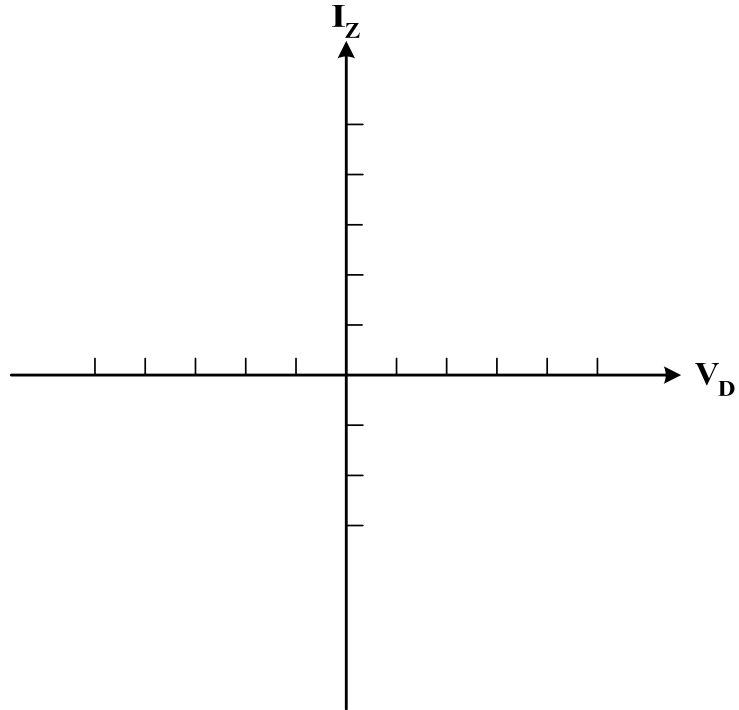


圖(12) 電路圖

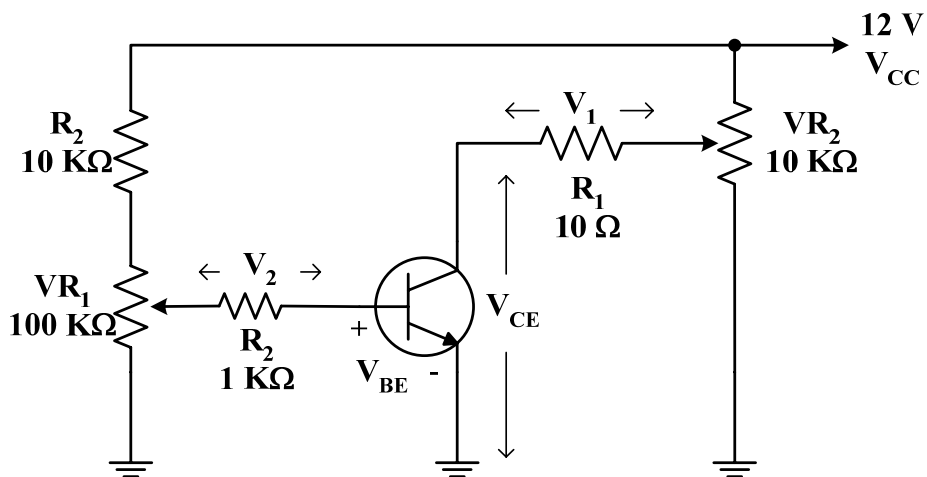
使用直流電源供應器讓由0 V逐漸增加至12 V，然後使用三用電表量測 V_D ，將資料紀錄至實驗結果表(4)，並在實驗結果中，畫出 V_D 與 I_Z 的關係圖。

表(4)

輸入電源電壓	0 V	3 V	5 V	7V	9 V	12 V
V_D						
I_Z						



(三) 電晶體輸出曲線量測



圖(13) 電路圖

- 1、電路圖如圖(13)。
- 2、調整 $VR_1(100K)$ 及 $VR_2(10K)$ 使 V_2 與 V_{CE} 如表(5)所示各值，用示波器量測 V_1 ，並加以計算轉換成 $I_C = V_1/R_1$ ，紀錄於表中。

- 3、將表(5)中的值以(V_{CE} , I_C)的座標標示在下圖座標中，並標明 V_{CE} 的值為水平一格 1 V，而 I_C 的值為垂直一格 1 mA。
- 4、將同一 I_B 的各點座標連接成曲線。

表(5)

I_C \ V_{CE}	0.15	0.2	0.3	0.5	0.8	1	2	5	8	10
V_2										
5 mV										
10 mV										
20 mV										
50 mV										
60 mV										
80 mV										
100 mV										

