



Ch. 11 雙極性接面電晶體 01



參考資料:

1. 電子學 I/ Ch. 04 陳清良 編著 龍騰文化
2. 基本電學 I/ Ch. Ch. 01 – 04. 07-08 康嘉宗
李天良 李源永 陳昭博 編著 復文書局
3. 電子學/ Ch. 04 /高立圖書出版
原著：Mitchel E. Schultz
審訂：沈志忠
編譯：余永平 郭有順 蔡忠良

[4. http://score.ptivs.ptc.edu.tw/chenjy/ELECTRN/ELECTRON.HTM](http://score.ptivs.ptc.edu.tw/chenjy/ELECTRN/ELECTRON.HTM)



11-1 電晶體的構造



- 電晶體(Transistor)是一個三層的半導體裝置，俗稱又叫三極體或稱雙極性接面電晶體(Bipolar Junction Transistor/ BJT)；用於必須放大電壓、電流或功率的場合，共有三個摻雜區：
基極 (B/ Base)是狹小的區域，被夾在較大的集極(C/ Collector)區與射極(E/ Emitter)區之間。
- 射極顧名思義是發射載子的電極。
- 基極顧名思義是控制載子多寡的電極。
- 集極顧名思義是收集載子的電極。

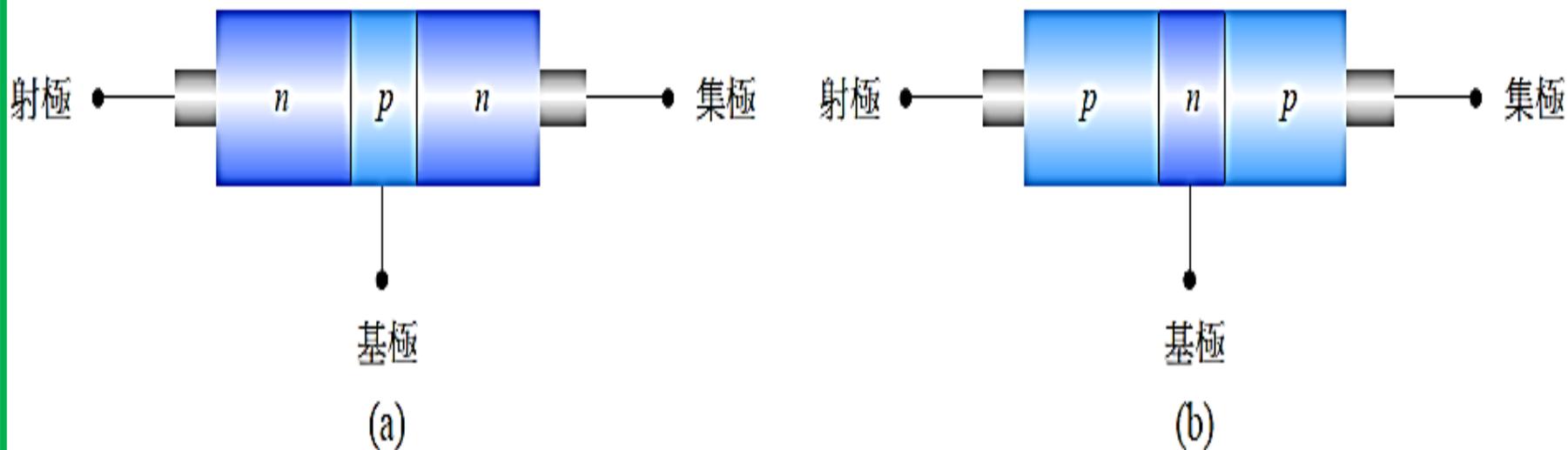


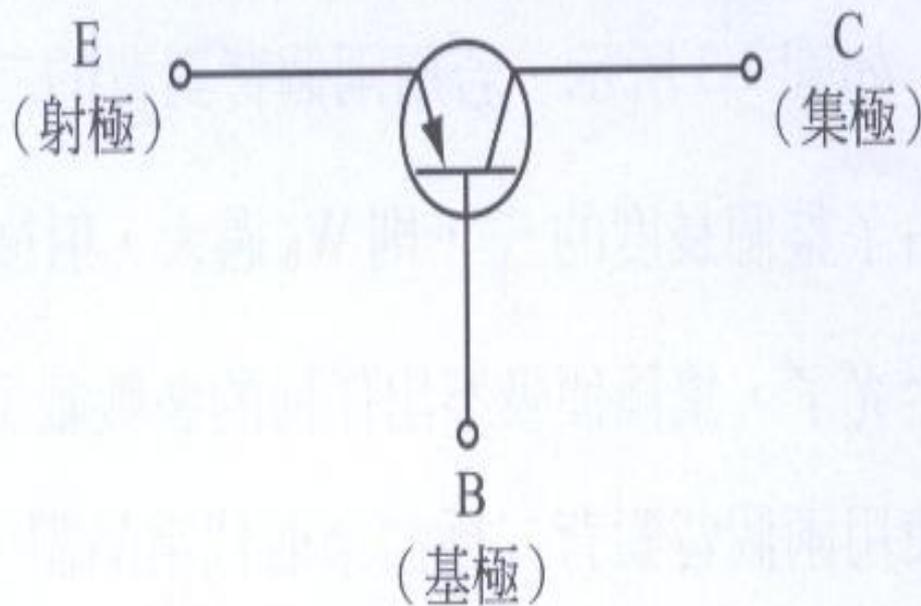
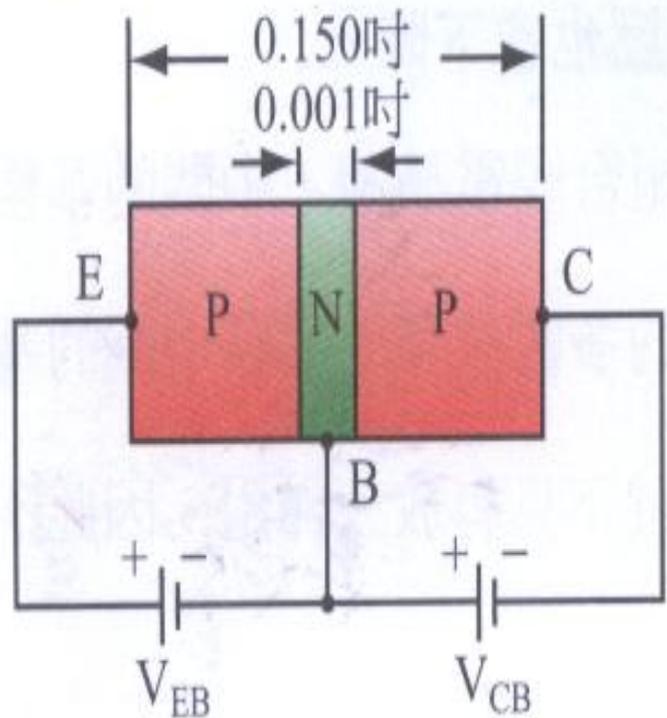
圖 4-1 顯示電晶體中三個摻雜區的電晶體構造：(a) npn 電晶體；(b) pnp 電晶體。



PNP型以電洞為主要載子

就製造的寬度而言，其總寬度與夾層之比約為**150 : 1**。

雙極性（即電流載子有電洞、電子均加具正、負兩種極性）元件



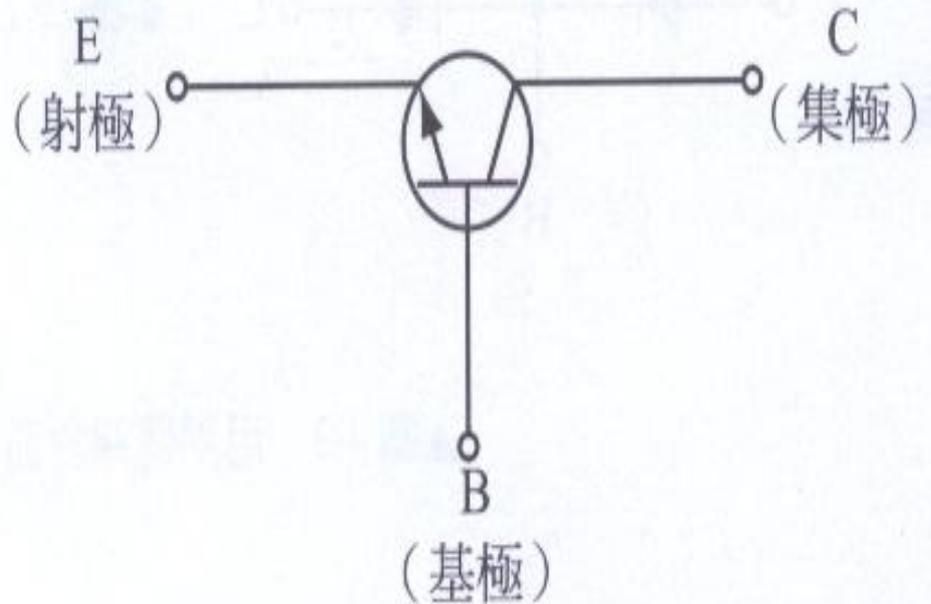
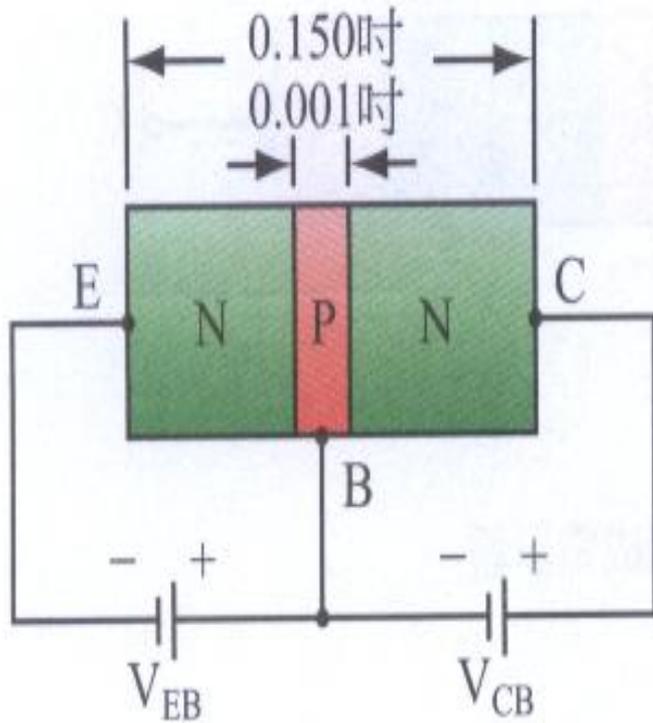
▲圖 4-1 PNP 型電晶體的物理結構及電路符號



NPN型以電子為主要載子



▲圖 4-1 PNP 型電晶體的物理結構及電路符號



▲圖 4-2 NPN 型電晶體的物理結構及電路符號



- 射極(E)區摻雜濃密的雜質原子，它的工作是發射或注射電流載子進入基極。
- 基極(B)區域極為細薄而且摻雜稀疏的雜質原子。
- 集極(C)區具有適度摻雜的雜質原子，是三個區域中最大的區域，因為它必須散逸比射極或基極區更多的熱(Heat)。



- 圖4-2顯示存在於未偏壓npn電晶體的空乏層。
- 從兩個n型摻雜區到p型基極區的電子擴散，造成障壁電壓 V_B 存在於兩個接面。
- 在左邊的np接面是射—基接面（窄），而在右邊的np接面是集—基接面（寬）。



- 就摻入雜質的濃度而言是 $E \gg B > C$ ，射極最高，基極次之，集極最少。射極是發射載子的電極，若摻入雜質濃度越高，則多數載子的數量越多，其導電性能越佳。
- 就製造的寬度而言是 $W_C \cong W_E \gg W_B$ ，其中C略大於E；基極 W_B 越薄，其放大效率越高。
- 就小量的 I_B 可造成大量的 I_C 即具放大效果。



NPN型以電子為主要載子

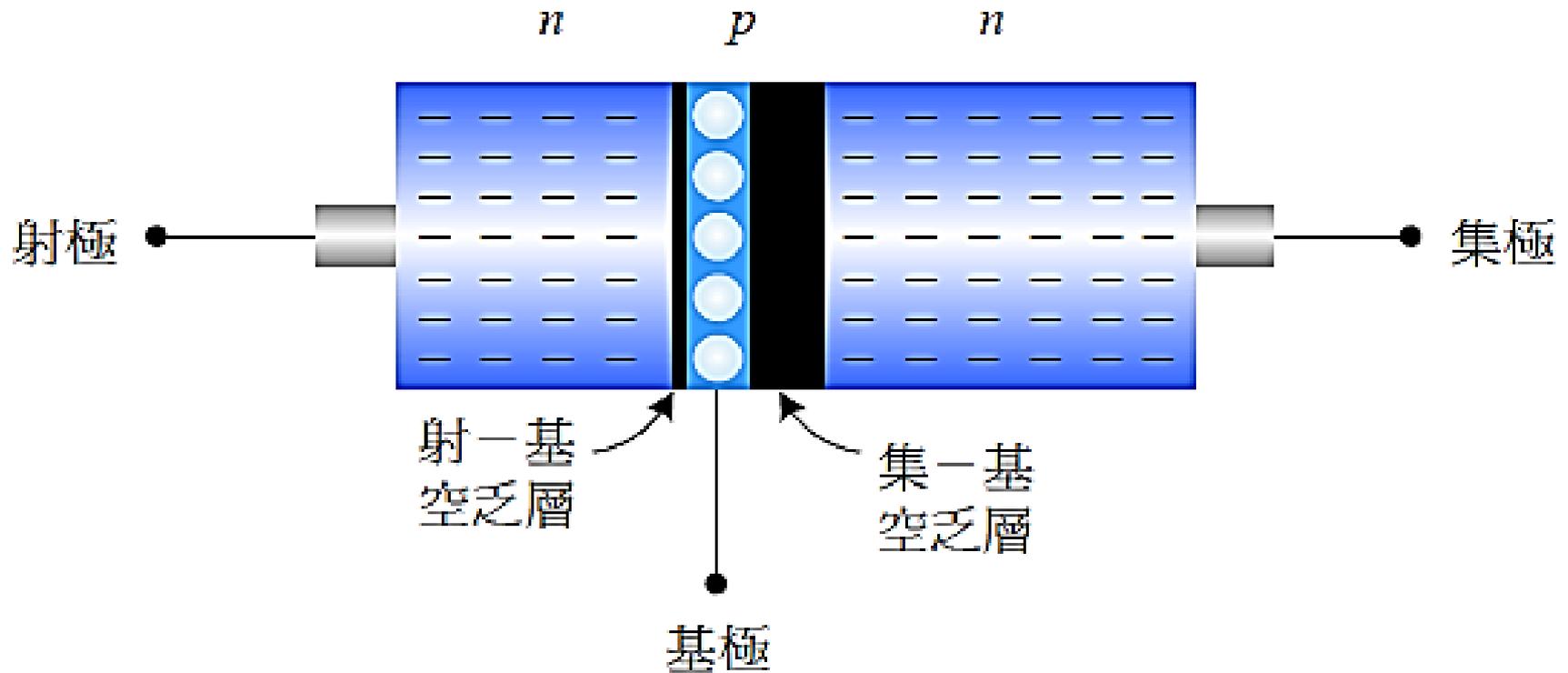


圖 4-2 在 *npn* 電晶體中的空乏層。



- 對矽材質半導體而言，於射-基(EB)與集-基(CB)接面之障壁電壓(V_B)皆約等於0.7V。
- EB空乏層比CB空乏層狹窄。
- 造成空乏層不同寬度的原因，可歸因於射極區與集極區的不同摻雜程度。



示意符號



- 以放大電壓、電流或功率能力的角度來看，**npn**及**pn**p電晶體並無不同。
- 只是，每一類型電晶體所需之工作電壓極性不同。
- 例如，**n**pn電晶體其射-集電壓 V_{CE} 必須是正的，而對於**p**np電晶體之射-集電壓 V_{CE} 必須是負的。



NPN型以電子為主要載子



PNP型以電洞為主要載子

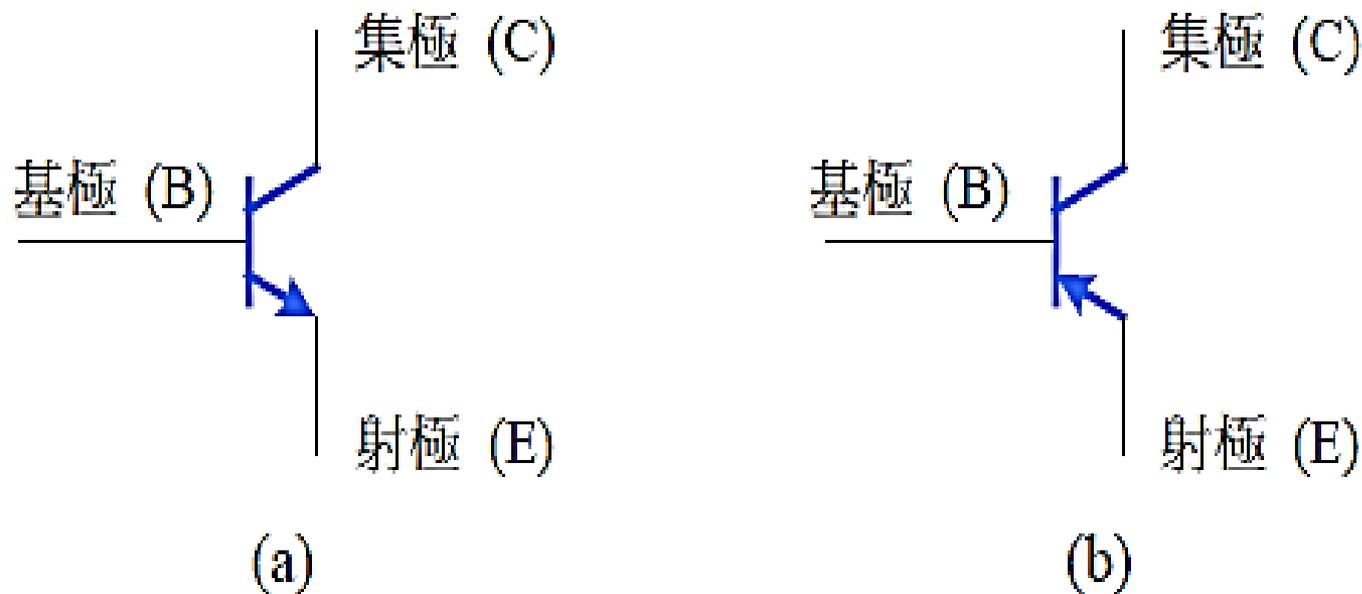
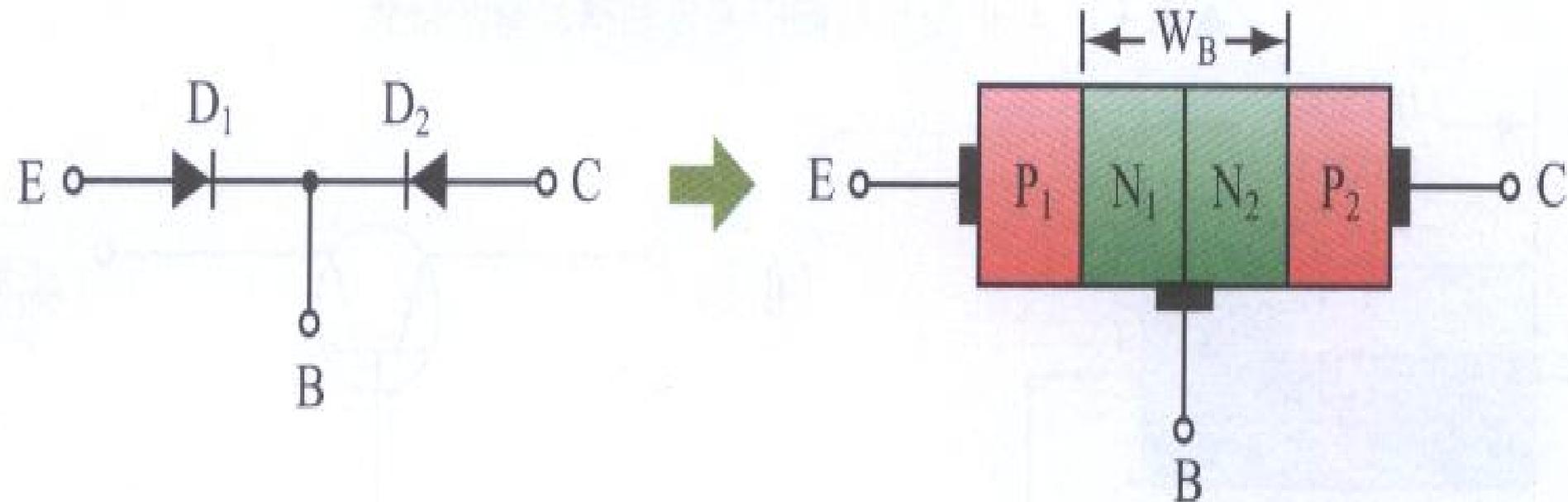


圖 4-3 電晶體之示意符號：(a) *n*pn 電晶體；(b) *p*np 電晶體。

箭頭所指方向即代表電流方向。



Q: 請問如圖4-3所示的組合電晶體具有放大效果否?



▲圖 4-3 用兩個背對背二極體來組成電晶體



Q: 請問如圖4-3所示的組合電晶體具有放大效果否?

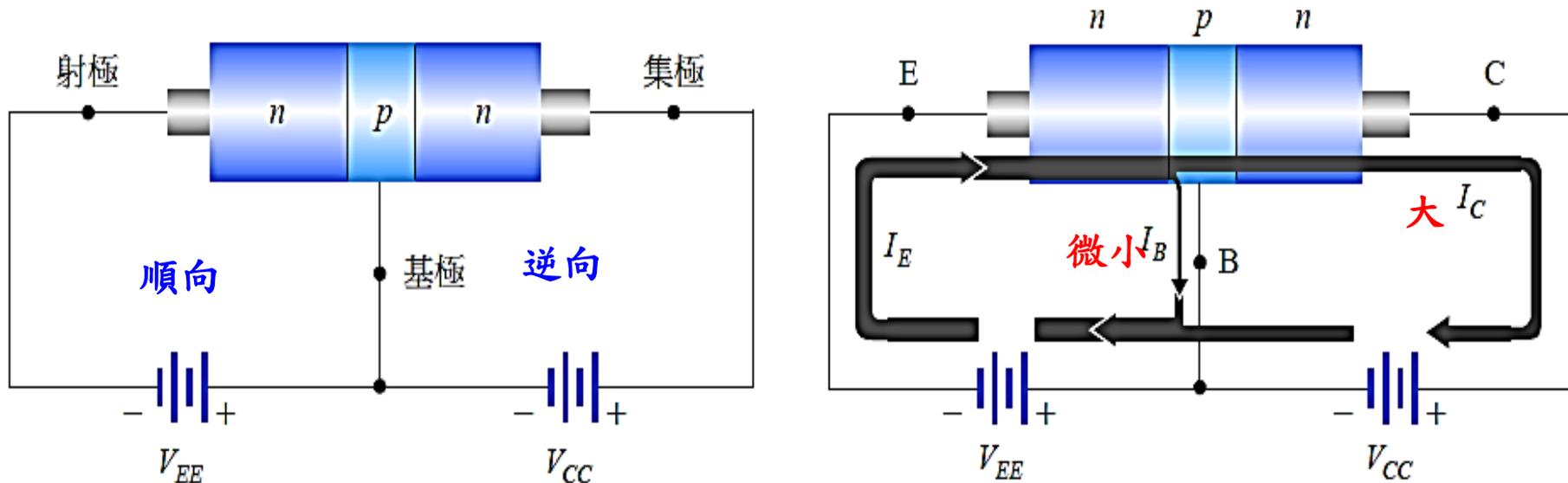


兩個背對背的二極體來組合成電晶體，中間的基極寬度占了整個長度的 $2/4$ ，則 W_B 過大，射極所發射的多數載子全部被中間的基極結合光了，集極便吸不出任何的多數載子，所以就不具有放大的作用，因此不可以使用兩個背對背二極體來取代電晶體。



11-2 電晶體偏壓

- 為了使電晶體能確實發揮放大器的功能，射-基接面必須順向偏壓，而集-基接面必須逆向偏壓。電子流方向與電流方向剛好相反。



$$V_{EE} = V_{EB} + I_B \cdot R_B \quad (a)$$

$$I_E = I_B (\text{微小}) + I_C (\text{大}) \quad (b)$$

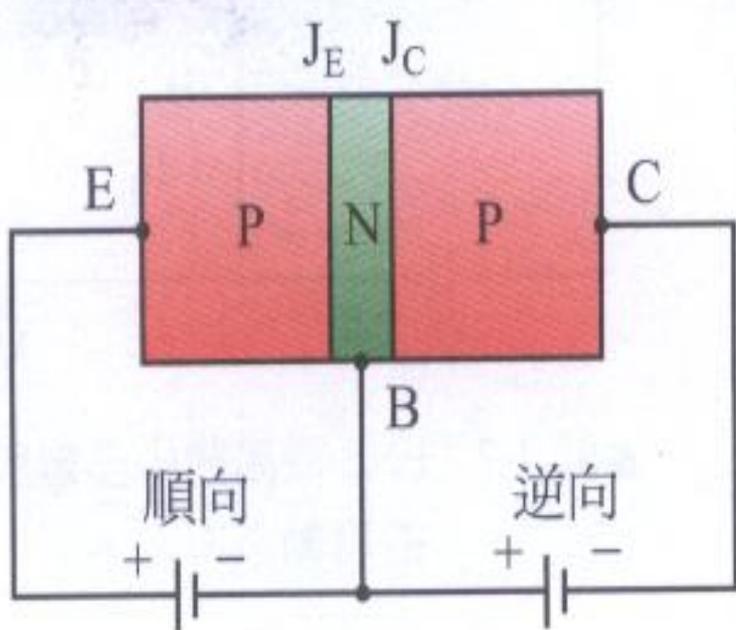
圖 4-4 共基極接線的電晶體偏壓：(a) npn 電晶體適當的偏壓。EB 接面被射極電壓 V_{EE} 順向偏壓，而 V_{CC} 將 CB 接面逆向偏壓；(b) 電晶體中的電子流。



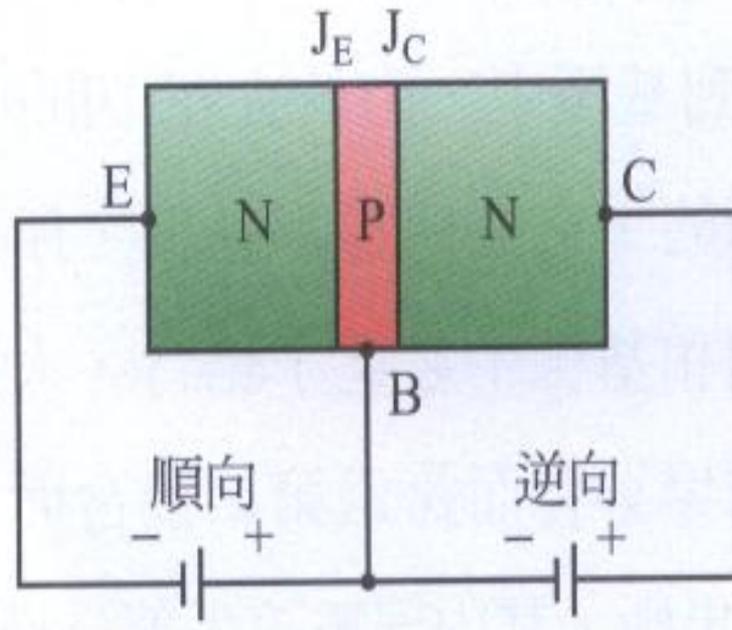
For any type: PNP or NPN.



電晶體有兩個PN接面，射極與基極PN接面稱為射極接面 J_E ；集極與基極PN接面稱為集極接面 J_C 。一般電晶體在正常工作時， J_E 必須加上直流順向偏壓，而 J_C 必須加上逆向偏壓。



(a) PNP 電晶體



(b) NPN 電晶體

▲圖 4-4 電晶體的偏壓接法



電晶體電流



NPN型以電子為主要載子

如圖4-4中：n型射極的電子被射極供應電壓 V_{EE} 的負端推斥進入基極。

因為基極很薄且輕度摻雜(只有微少電洞)，只有少數的電子能和基極內的電洞結合。

從基極導線流出的微小電流(即基極電流 I_B) 稱為再結合電流(Recombination Current)，這是因為注入基極的自由電子在流出基極導線之前必掉進電洞內。



- 大部分由射極注入(或發射)的電子微量通過基極區而大量進入集極區；
- 其原因有二：(1)在基極(P type)只有微量的電洞可作為再結合之用；(2)正極的集-基電壓 V_{CC} 吸引在p型基極中的自由電子，在未與基極中的電洞再結合之前，大部分直接跨越到集極區。



在大部分的電晶體中，集極電流 I_C 幾乎和射極電流 I_E 一致；意謂 I_B 非常小。

- 只需要小的電壓，就可以在集-基接面產生足夠強的電場，以收集注入基極中幾乎所有的自由電子。
- 在集-基電壓達到某一程度後，即使再增加些電壓，對於影響進入集極的自由電子數目幾乎沒有效果(飽和了)。

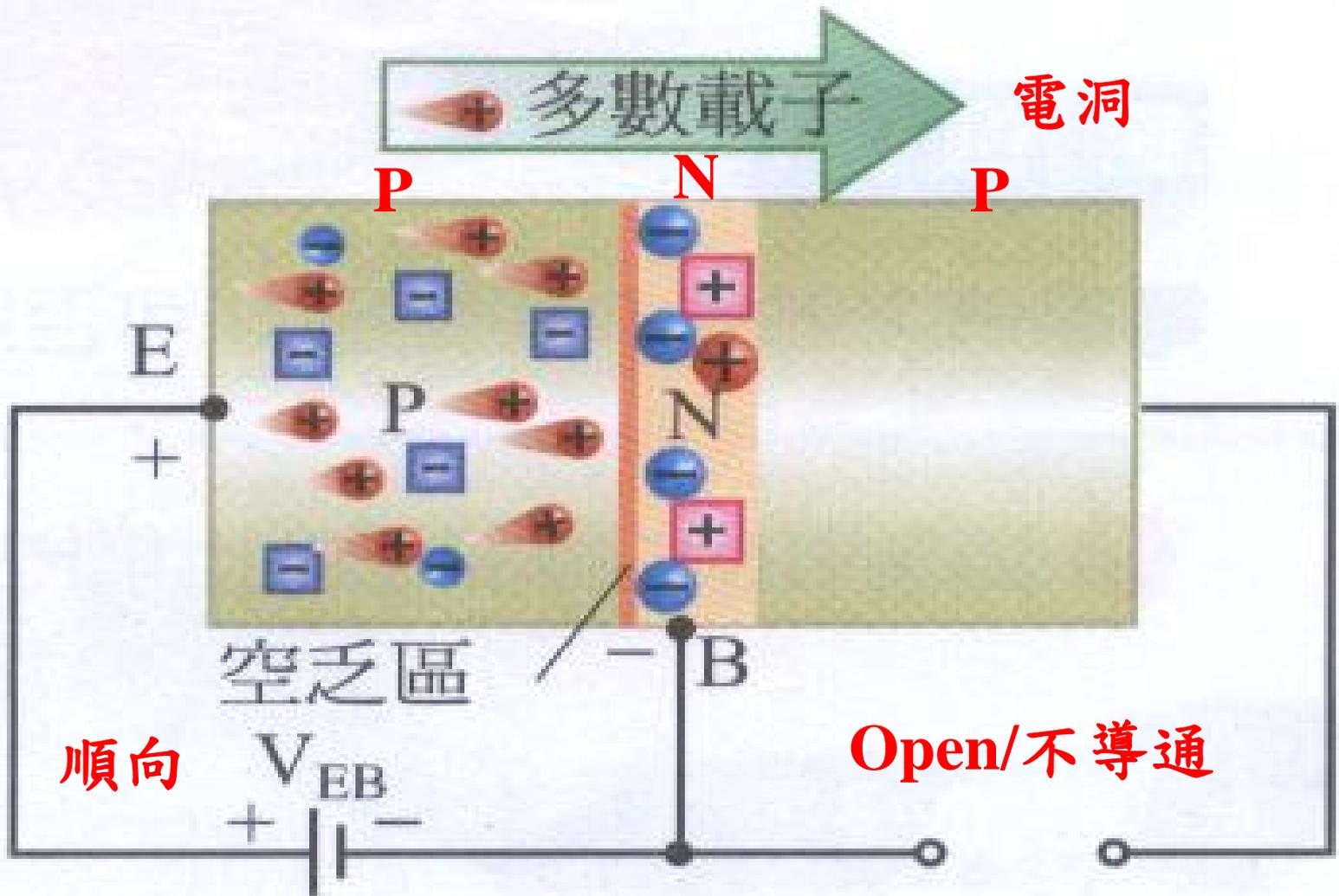


- 電晶體的電流關係如(4-1)、(4-2)及(4-3)式所示：

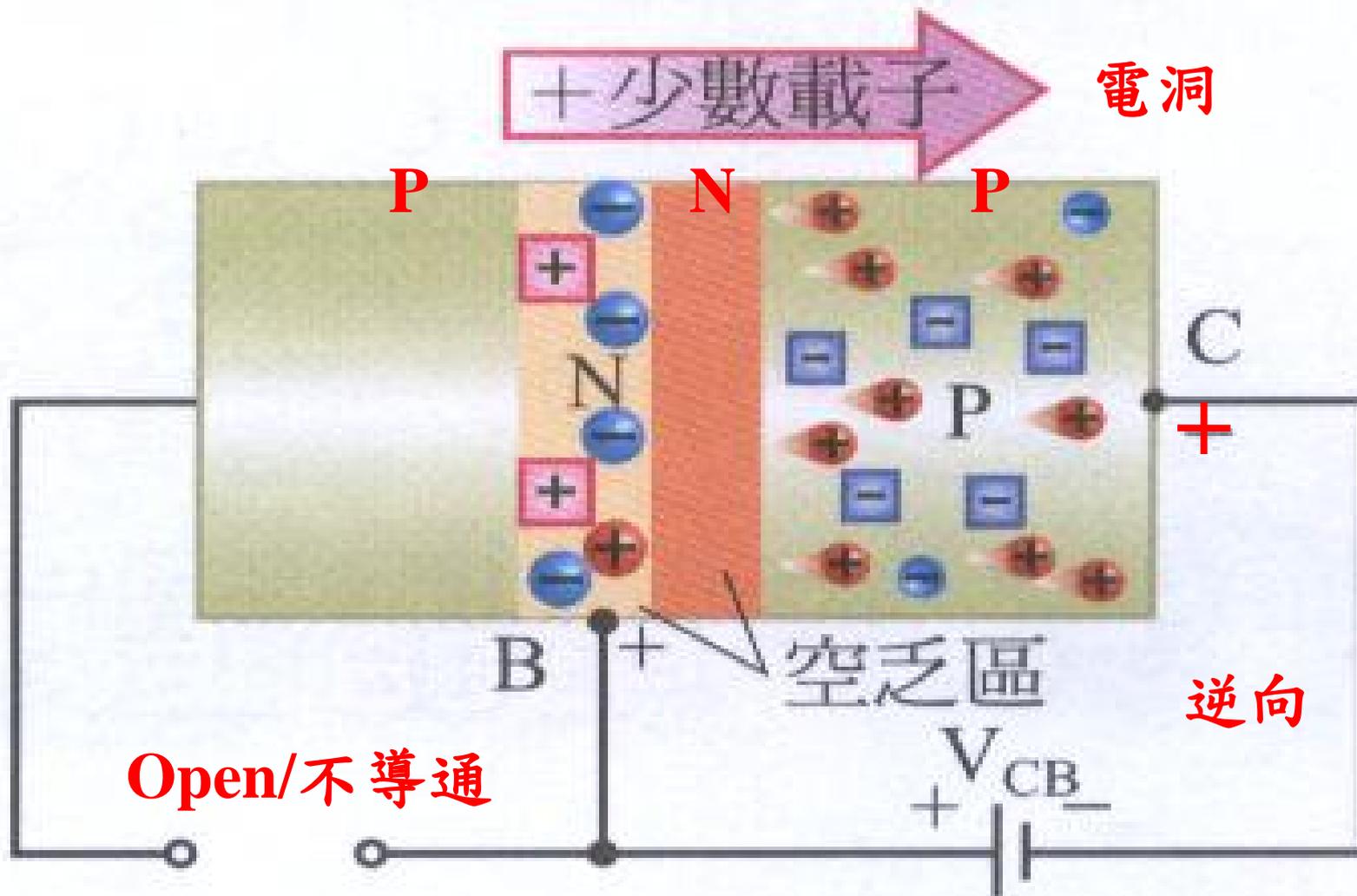
$$I_E = I_B + I_C \quad (4-1)$$

$$I_C = I_E - I_B \quad (4-2)$$

$$I_B = I_E - I_C \quad (4-3)$$

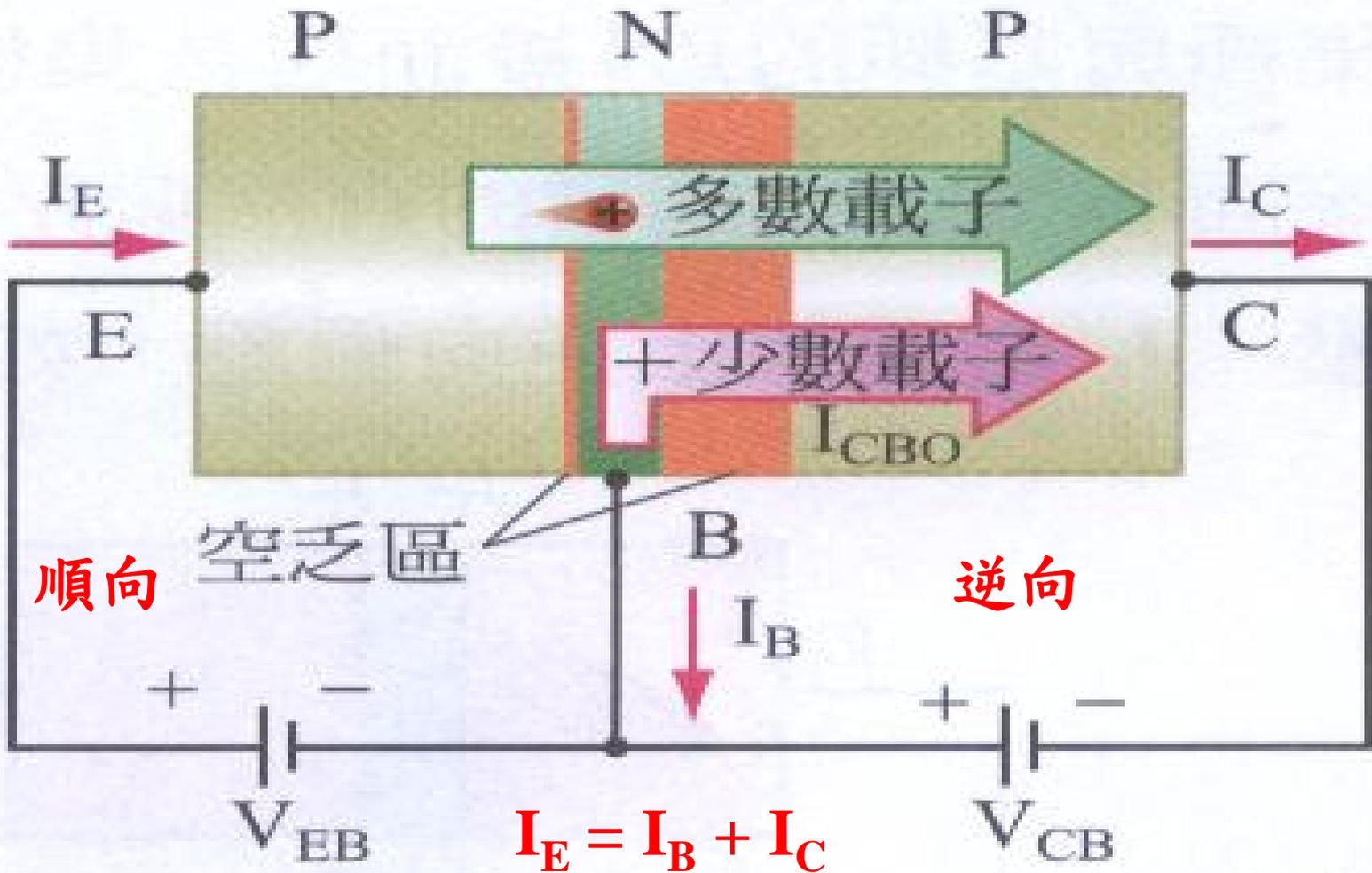


▲ 圖 4-5 PNP 電晶體的順偏接面



▲ 圖 4-6 PNP 電晶體的逆偏接面

▲圖 4-6 PNP 電晶體的逆偏接面



▲圖 4-7 PNP 電晶體中多數與少數載子的流動



A: 計算題 1



例題 1

一個電晶體具有下列電流： $I_B = 20 \text{ mA}$ 、 $I_C = 4.98 \text{ A}$ 。計算 I_E 。

答：利用 (4-1) 式，計算如下

$$\begin{aligned} I_E &= I_B + I_C \\ &= 20 \text{ mA} + 4.98 \text{ A} \\ &= 0.02 \text{ A} + 4.98 \text{ A} \\ &= 5 \text{ A} \end{aligned}$$





A: 計算題 2



例題 2

一個電晶體具有下列電流： $I_E = 100 \text{ mA}$ 、 $I_B = 1.96 \text{ mA}$ 。計算 I_C 。

答：利用 (4-2) 式，計算如下

$$\begin{aligned} I_C &= I_E - I_B \\ &= 100 \text{ mA} - 1.96 \text{ mA} \\ &= 98.04 \text{ mA} \end{aligned}$$



A: 計算題 3



例題 3

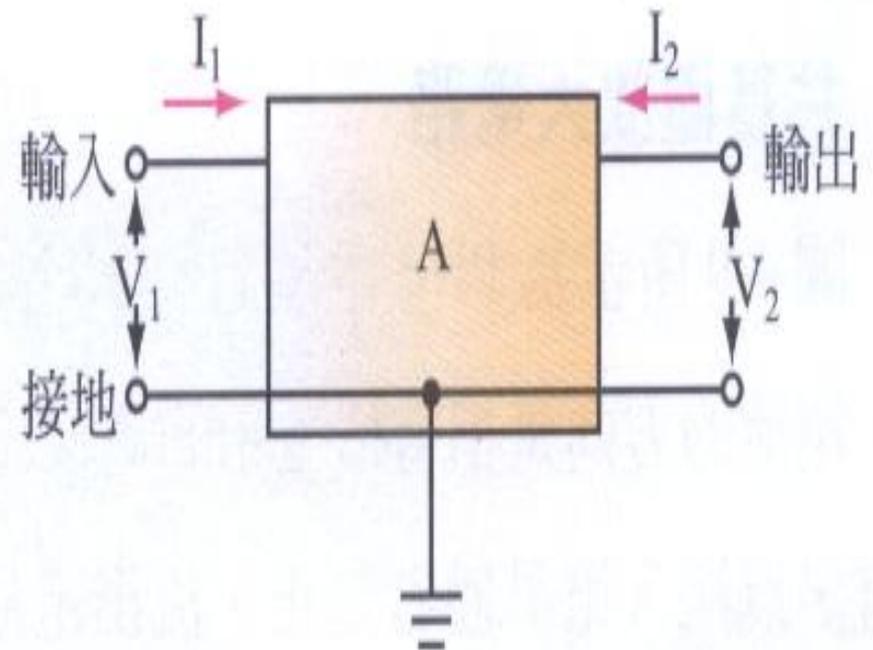
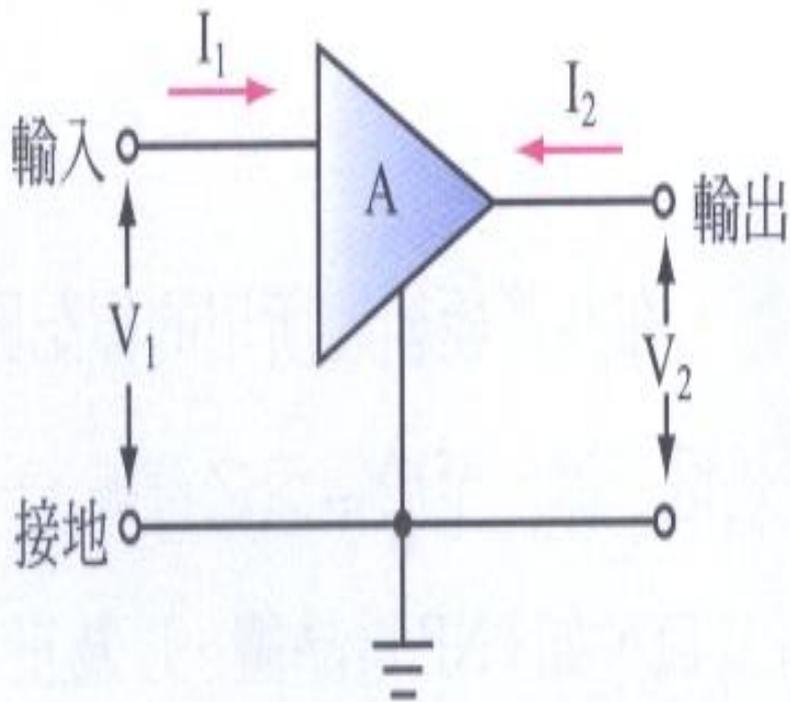
一個電晶體具有下列電流： $I_E = 50 \text{ mA}$ 、 $I_C = 49 \text{ mA}$ ，計算 I_B 。

答：利用 (4-3) 式，計算如下

$$\begin{aligned} I_B &= I_E - I_C \\ &= 50 \text{ mA} - 49 \text{ mA} \\ &= 1 \text{ mA} \end{aligned}$$



地端接物



▲圖 4-8 放大器之符號

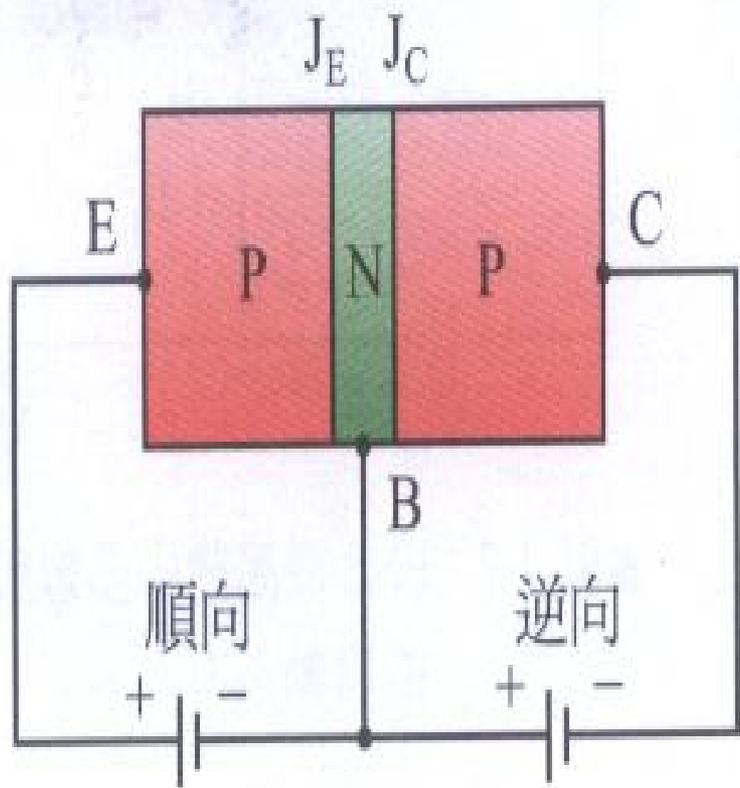


電晶體放大電路依其接法有三：

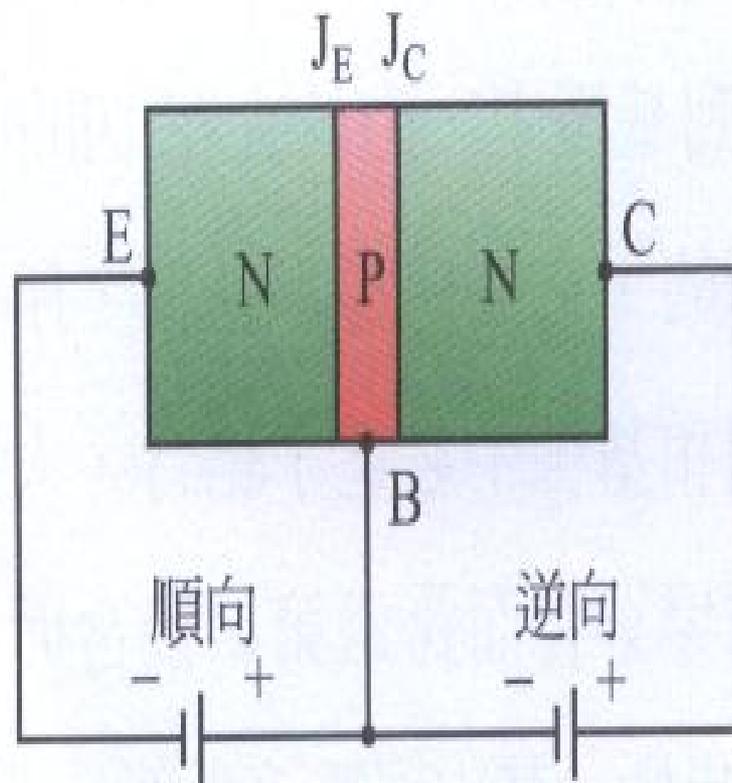
CB/ CE/ CC

▼表 4-1 電晶體放大器三個不同端點之區分

端點 電路名稱	接地端	輸入端	輸出端
共基極 (CB) 放大器	B	E	C
共射極 (CE) 放大器	E	B	C
共集極 (CC) 放大器	C	B	E



(a) PNP 電晶體



(b) NPN 電晶體

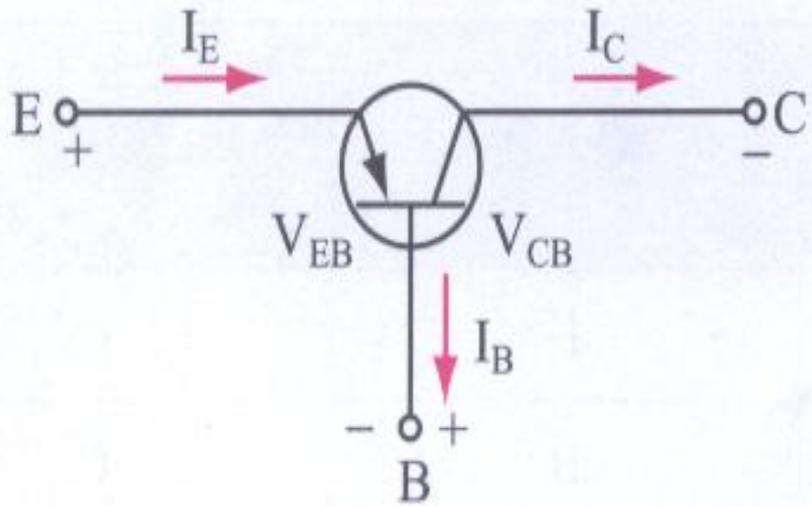
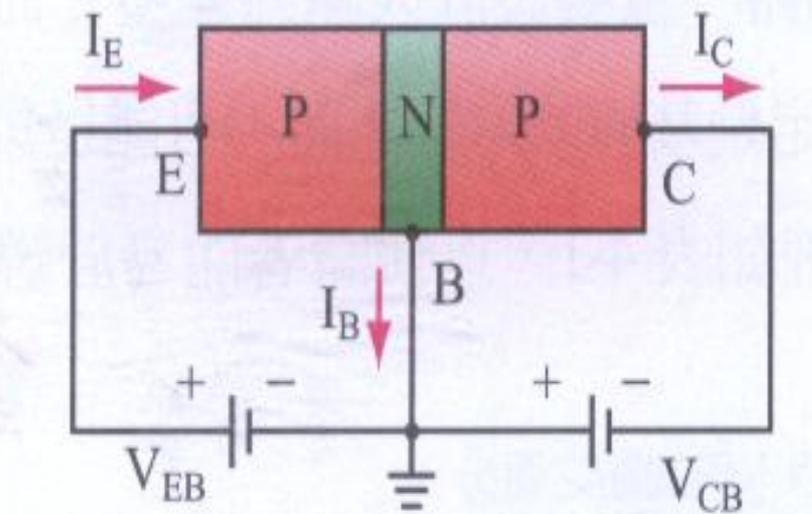
▲圖 4-4 電晶體的偏壓接法



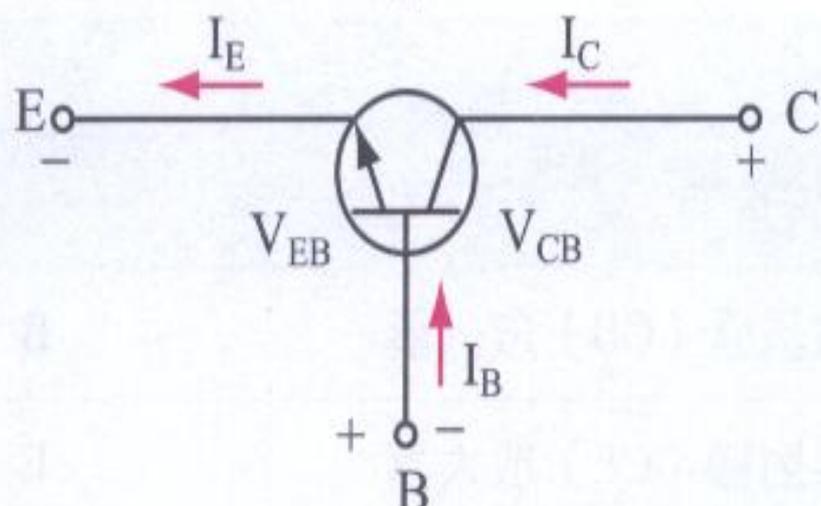
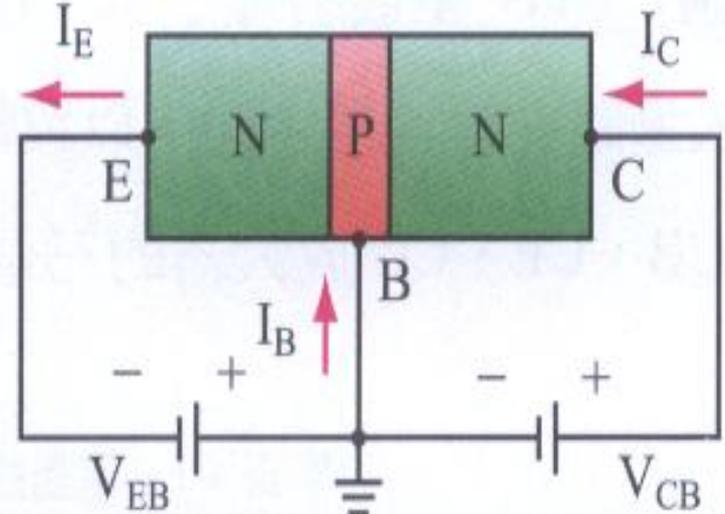
直流 α 值 (DC Alpha)

圖4-4所示之電路稱為共基極(CB/ Common Base)接線，因為基極導線端共同連接到電路的輸入/ I_E 及輸出/ I_C 端；稱為直流 α 值(DC Alpha/ α_{dc})，以(4-4)式表示

$$\alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E} \quad (4-4)$$



(a) PNP 電晶體



(b) NPN 電晶體

▲圖 4-9 共基極組態所用的標記與符號



直流 α 值(DC Alpha/ α_{dc}) ; α 值 < 1 。

代表 I_C 與 I_E 有多近似或相等的程度

$I_C \doteq$ or $\cong I_E$;

$$\alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E} \quad (4-4)$$

$$I_E = I_B + I_C$$

I_B 越小， I_C 越大即代表放大效果越佳。

在大部分的情況下，直流 α 值為0.99或更大，但一定小於1。基極愈薄且摻雜程度愈輕， α 值就愈接近1。

例題 4

一電晶體具有下列電流： $I_E = 15 \text{ mA}$ 、 $I_B = 60 \mu\text{A}$ ，計算 α_{dc} 。

答：首先利用 (4-2) 式，計算 I_C 如下

$$\begin{aligned} I_C &= I_E - I_B \\ &= 15 \text{ mA} - 60 \mu\text{A} \\ &= 15 \text{ mA} - 0.06 \text{ mA} \\ &= 14.94 \text{ mA} \end{aligned}$$

其次以 (4-4) 式計算 α_{dc}

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{dc}} &= \frac{I_C}{I_E} \\ &= \frac{14.94 \text{ mA}}{15 \text{ mA}} \\ &= 0.996 \end{aligned}$$

A: 計算題 4





直流 β 值 (DC Beta)

- 圖4-5，這種接線方式稱為共射極(CE / Common Emitter)接線，因為射極導線共同連接電路的輸入與輸出端。
- 在共射極接線中，電晶體的直流電流增益稱為直流 β 值(dc beta) β_{dc} 。

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} \quad (4-5)$$

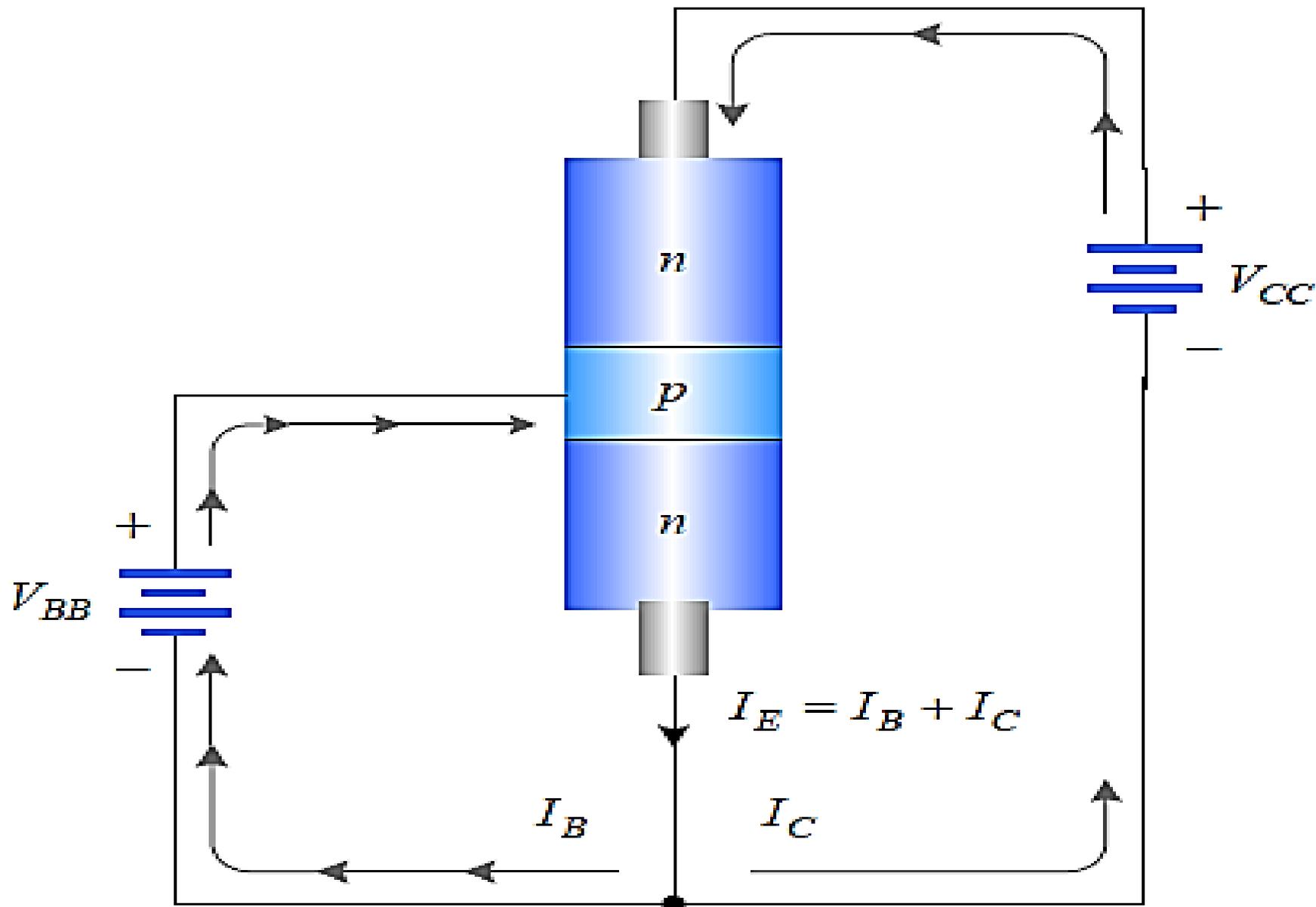


圖 4-5 共射極接線之電晶體偏壓。



A: 計算題 5



例題 5

一電晶體具有下列電流： $I_C = 10 \text{ mA}$ 、 $I_B = 50 \mu\text{A}$ ，計算 β_{dc} 。

答：利用 (4-5) 式，計算如下

$$\begin{aligned}\beta_{dc} &= \frac{I_C}{I_B} \\ &= \frac{10 \text{ mA}}{50 \mu\text{A}} \\ &= 200\end{aligned}$$





A: 計算題 6



例題 6

一電晶體，其 $\beta_{dc} = 150$ 且 $I_B = 75 \mu\text{A}$ ，計算 I_C 。

答：首先

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

其次，整理 (4-5) 式求解 I_C

$$\begin{aligned} I_C &= \beta_{dc} \times I_B \\ &= 150 \times 75 \mu\text{A} \\ &= 11.25 \text{ mA} \end{aligned}$$





β_{dc} 與 α_{dc} 之關係



- 由(4-1)、(4-2)及(4-3)式可導出 β_{dc} 與 α_{dc} 的關係

$$\alpha_{dc} = \frac{\beta_{dc}}{1 + \beta_{dc}} \quad (4-6)$$

$$\beta_{dc} = \frac{\alpha_{dc}}{1 - \alpha_{dc}} \quad (4-7)$$



A: 計算題 7



例題 7

一電晶體之 $\beta_{dc} = 100$ ，計算 α_{dc} 。

答：利用 (4-6) 式，計算如下

$$\begin{aligned}\alpha_{dc} &= \frac{\beta_{dc}}{1 + \beta_{dc}} \\ &= \frac{100}{1 + 100} \\ &= 0.99\end{aligned}$$



A: 計算題 8



例題 8

一電晶體之 $\alpha_{dc} = 0.995$ ，計算 β_{dc} 。

答：利用 (4-7) 式，計算如下

$$\begin{aligned}\beta_{dc} &= \frac{\alpha_{dc}}{1 - \alpha_{dc}} \\ &= \frac{0.995}{1 - 0.995} \\ &= 199\end{aligned}$$

在例題 7 中，注意 α_{dc} 有多麼接近 1。因為這個理由，在大部分電晶體電路分析中，通常可以把 α_{dc} 假設為 1。 ■



課後重點整理 1



- 電晶體是由三個摻雜區組成。
- 基極是一個極為狹窄的區域，並且夾在較大的射極與集極之間。
- 基極區非常薄且為輕度摻雜，射極區是重度摻雜，它的工作是發射或注射電流載子進入薄而輕度摻雜的基極。
- 集極區是適度摻雜而且是三區中最大的。



課後重點整理 2



- 在電晶體中，電流的關係是： $I_E = I_B + I_C$ 、 $I_C = I_E - I_B$ 、 $I_B = I_E - I_C$ 。
- 直流 α_{dc} 是直流集極電流對直流射極電流之比， $\alpha_{dc} = I_C / I_E$ 。
- 直流 β_{dc} 是直流集極電流對直流基極電流之比， $\beta_{dc} = I_C / I_B$ 。

