

# 第 4 章

## 雙載子接面電晶體 (BJTs)

Adel S. Sedra · Kenneth C. Smith 著

# 簡介

- 在本章中你將學到
  - 雙載子電晶體的物理結構及其如何動作
  - 電晶體兩端之間的電壓如何控制流經第三端的電流，以及描述這些電流-電壓的特性
  - 如何分析及設計包括了雙載子電晶體、電阻，及直流電源的電路

# 4.1.元件構造與物理操作

- 圖 4.1 顯示一個 BJT 的簡化結構
- 由三個半導體區所組成：
  - 射極區 ( $n$  型)
  - 基極區 ( $p$  型)
  - 集極區 ( $n$  型)
- 上述的電晶體稱為  $npn$  電晶體
  - 但也存在  $pnp$  電晶體

## 4.1.1.簡化的構造以及操作模式

- 電晶體由兩個  $pn$  接面所組成：
  - 射極-基極接面(EBJ)
  - 集極-基極接面(CBJ)
- 操作模式是根據這些接面的偏壓情況
  - 主動模式 – 作為放大器時
  - 截止與飽和模式 – 用於開關或切換

## 4.1.1.簡化的構造以及操作模式

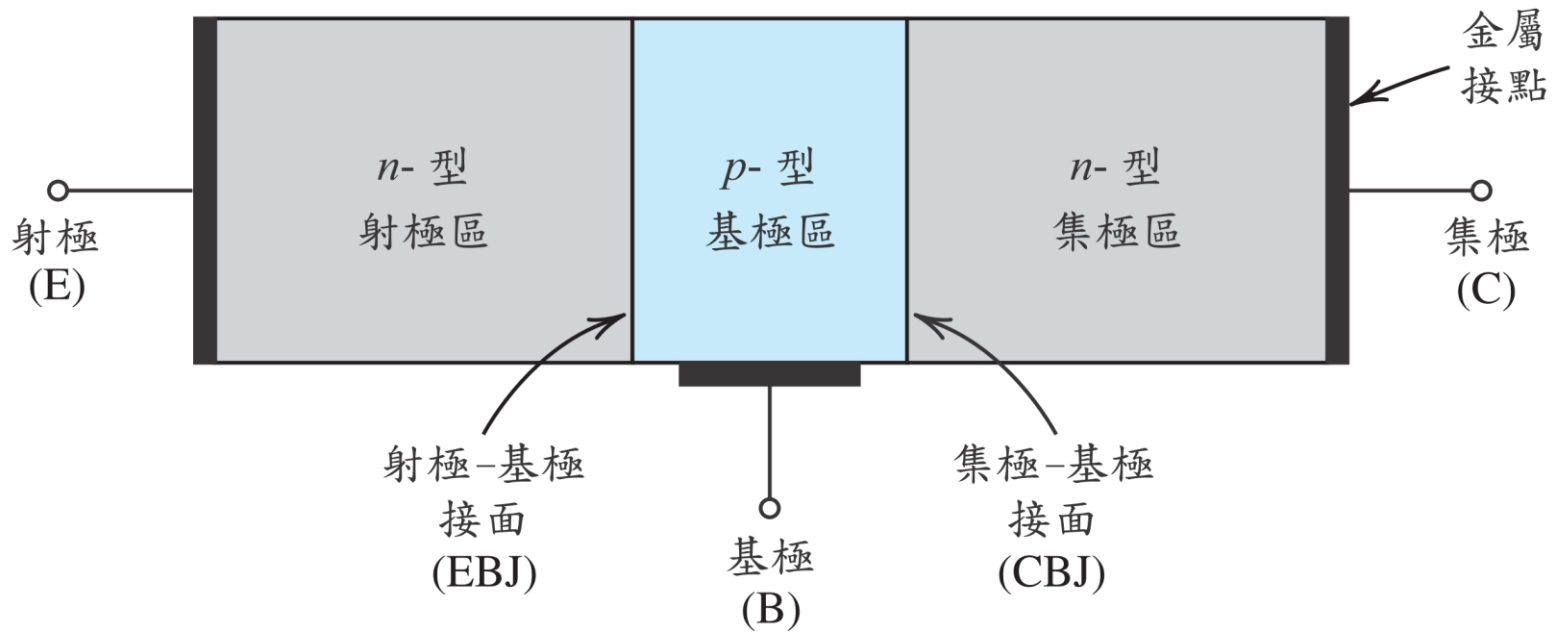


圖4.1: *n*pn 電晶體簡化後的結構

## 4.1.1.簡化的構造以及操作模式

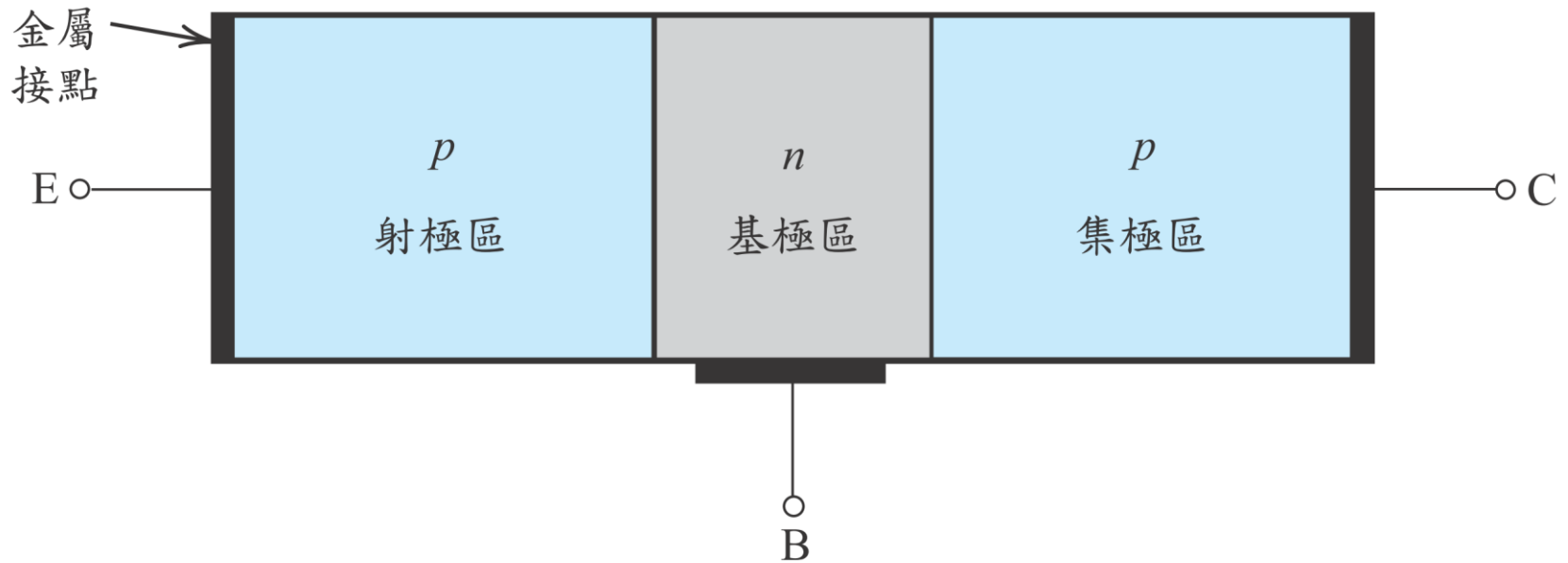


圖4.2: *pnp* 電晶體簡化後的結構

## 4.1.1.簡化的構造以及操作模式

表 4.1 BJT 操作模式		
模式	EBJ	CBJ
截止	反向	反向
主動	順向	反向
飽和	順向	順向

## 4.1.2. *npn* 電晶體於主動模式的運作

- 主動模式是“最重要的”
- 兩個外部電壓源用來建立主動模式操作所需的偏壓情況
- 參考圖 4.3.

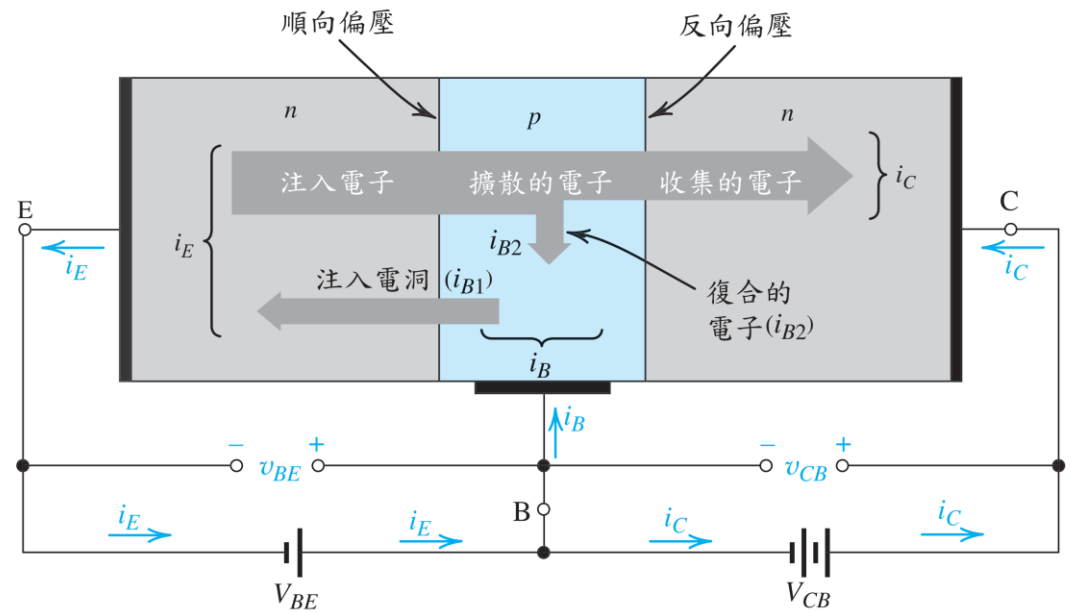


圖4.3: 偏壓操作於主動模式之電晶體中的電流 (由熱生成產生的少數載子所造成之反向漂移電流成分並未顯示)。



# 電流的流動

- 射極-基極接面順向偏壓將導致電流流過此接面
- 此電流具兩個成分：
  - 由射極注入基極的電子
  - 由基極注入射極的電洞
- 此兩種成分中，第一種成分是我們較希望的
  - 可透過將射極重度摻雜而將基極輕度摻雜來完成

# 電流的流動

- 射極電流 ( $i_E$ ) – 流過射極–基極接面(EBJ)的電流
  - 流「出」射極端
- 少數載子– 在  $p$ -型基極區
  - 這些電子被由射極注入基極
  - 方向相反
- 由於基極非常薄，內部過量的少數載子將呈現固定梯度

# 集極電流

- 大多數的擴散電子將會到達集極-基極空乏區的邊界.

$$\text{(eq4.1) } i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

$$\text{saturation current: } I_S = \frac{A_E q D_n n_{p0}}{W}$$

# 集極電流

- $i_C$  的大小與  $v_{CB}$  無關
  - 只要集極電位相對於基極是正的
- 飽和電流 ( $I_S$ ) – 與  $W$  成反比，與EBJ區成正比
  - 通常介於  $10^{-12}$  與  $10^{-18}A$  之間
  - 也被稱為比例電流

# 基極電流

- 基極電流 ( $i_B$ ) – 由兩個成分所組成：
  - $i_{B1}$  – 由基極區注入射極電洞所造成
  - $i_{B2}$  – 由外部電路所補充的電洞所造成，補充在基極區中因復合程序所導致的電洞損失

$\beta =$  transistor parameter

$$\text{(eq4.2)} \quad i_B = \frac{i_C}{\beta}$$

---

$$\text{(eq4.3)} \quad i_B = \left( \frac{I_S}{\beta} \right) e^{v_{BE}/V_T}$$

# 基極電流

- 共射極電流增益 ( $\beta$ ) – 受兩個因子影響：
  - 基極區域的寬度 ( $W$ )
  - 基極區與射極區的相對摻雜量 ( $N_A/N_D$ )
- 高值 $\beta$ 
  - 基極要薄 ( $W$  小至奈米程度)
  - 基極輕度摻雜，而射極重度摻雜 ( $N_A/N_D$  變小)

# 射極電流

- 因所有進入電晶體的電流也必須離開它

- $i_E = i_C + i_B$

- 式 (4.2) 至式 (4.10) 是依據此概念展開的

this expression is generated through combination of (4.2) and (4.4)

$$\text{(eq4.4/4.5)} \quad i_E = \frac{\beta + 1}{\beta} i_C = \frac{\beta + 1}{\beta} \underbrace{\left( I_S e^{v_{BE}/V_T} \right)}_{i_C}$$

---

$$\text{(eq4.7)} \quad i_C = \alpha i_E$$

this parameter is referred to as **common-base current gain**

$$\text{(eq4.8)} \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}, \quad \text{(eq4.10)} \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

---

$$\text{(eq4.9)} \quad i_E = \left( \frac{I_S}{\alpha} \right) e^{v_{BE}/V_T}$$

$n_p(x)$  = concentration of minority carriers a position  $x$  (where 0 represents EBJ boundary)  
 $n_{p0}$  = thermal-equilibrium value of minority carrier (electron) concentration in base region  
 $v_{BE}$  = voltage applied across base-emitter junction  
 $V_T$  = thermal voltage (constant)

# 直線代表穩定梯度

$$(eq4.11) \quad n_p(0) = n_{p0} e^{v_{BE}/V_T}$$

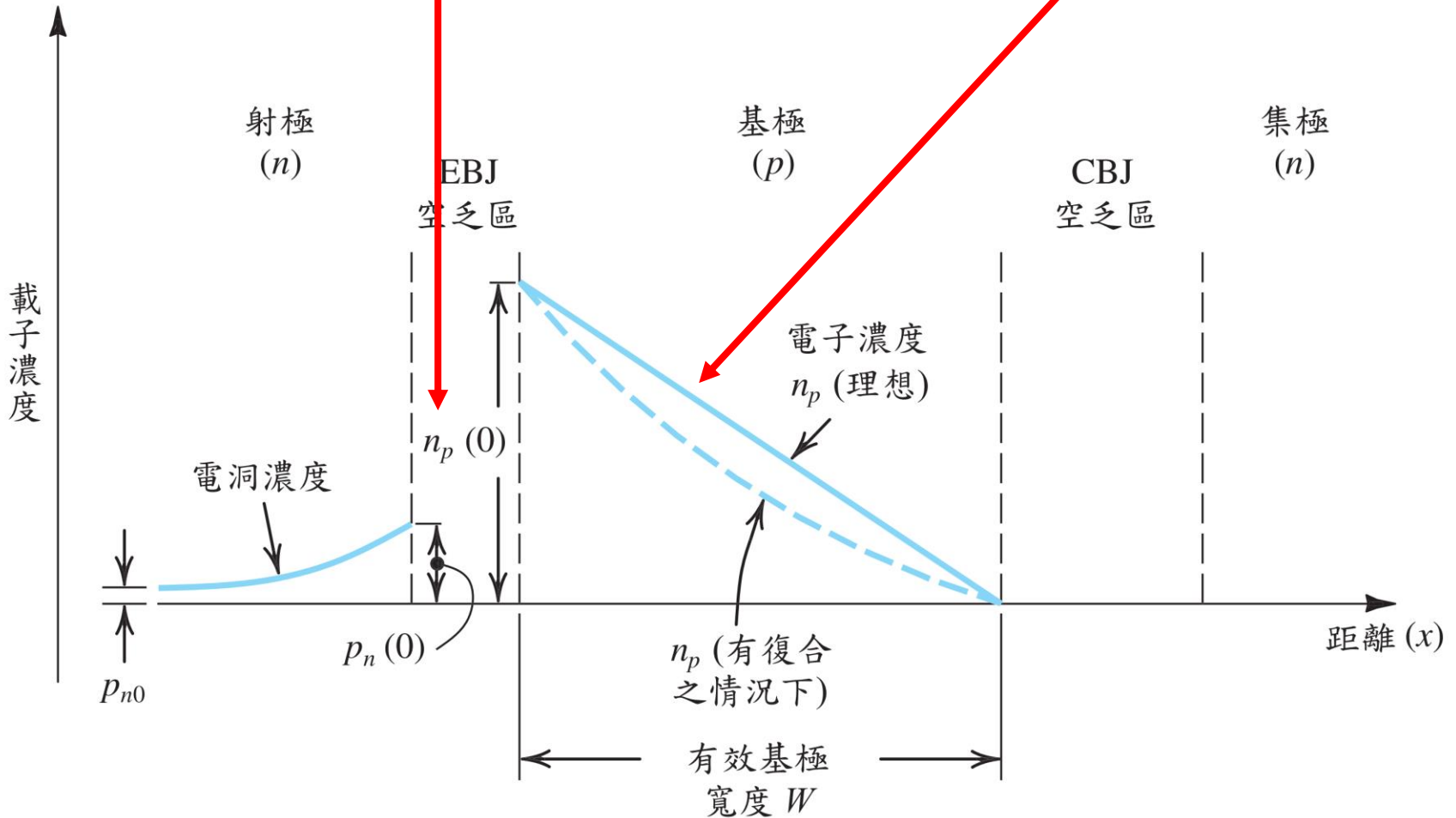


圖4.4 操作於主動模式 ( $v_{BE} > 0$  且  $v_{CB} \geq 0$ ) 之  $npn$  電晶體，其基極與射極之少數載子濃度分布。



# 少數載子分布

- 少數載子在EBJ邊界的濃度 $n_p$ 可表示如式(4.11)
- 少數載子在CBJ邊界的濃度 $n_p$ 為零
  - 正值的 $v_{CB}$ 會使得這些電子被掃過界面

$n_p(x)$  = concentration of minority carriers a position  $x$   
(where 0 represents EBJ boundary)

$n_{p0}$  = thermal-equilibrium value of minority carrier  
(electron) concentration in base region

$v_{BE}$  = voltage applied across base-emitter junction  
 $V_T$  = thermal voltage (constant)

$$\text{(eq4.11)} \quad n_p(0) = n_{p0} e^{v_{BE}/V_T}$$

# 少數載子分布

- 漸漸減少的少數載子濃度分布是存在的
- 導致注入基極的電子會透過擴散穿越基極而到集極
- 因此存在電子擴散電流( $I_n$ )

$A_E$  = cross-sectional area of the base-emitter junction  
 $q$  = magnitude of the electron charge  
 $D_n$  = electron diffusivity in base  
 $W$  = width of base

$$\text{(eq4.12)} \quad I_n = A_E q D_n \frac{dn_p(x)}{dx}$$

$$\text{(eq4.12)} \quad I_n = A_E q D_n \left( \frac{-dn_p(0)}{W} \right)$$

this simplification  
may be made if  
gradient assumed  
to be straight line

# 少數載子分布

- 有一些“擴散”電子會與電洞結合 (在基極的多數載子)
- 不過基極很薄，且復合量很少
- 基極區的復合雖然輕微，仍導致濃度梯度稍微偏離一直線
  - 直線為假設的

# 少數載子分布

- 由於集極的正值大於基極，  
電子會被掃去集極
  - 集極電流 ( $i_C$ ) 大約等於  $I_n$
  - $i_C = I_n$

$$(eq4.13) \quad I_S = \frac{A_E q D_n}{W} \frac{n_i^2}{N_A}$$

$n_i$  = intrinsic carrier density  
 $N_A$  = doping concentration of base

$n_p(x)$  = concentration of minority carriers a position  $x$  (where 0 represents EBJ boundary)  
 $n_{p0}$  = thermal-equilibrium value of minority carrier (electron) concentration in base region  
 $v_{BE}$  = voltage applied across base-emitter junction  
 $V_T$  = thermal voltage (constant)

$$(eq4.11) \quad n_p(0) = n_{p0} e^{v_{BE}/V_T}$$

復合導致梯度呈曲線，而非直線。

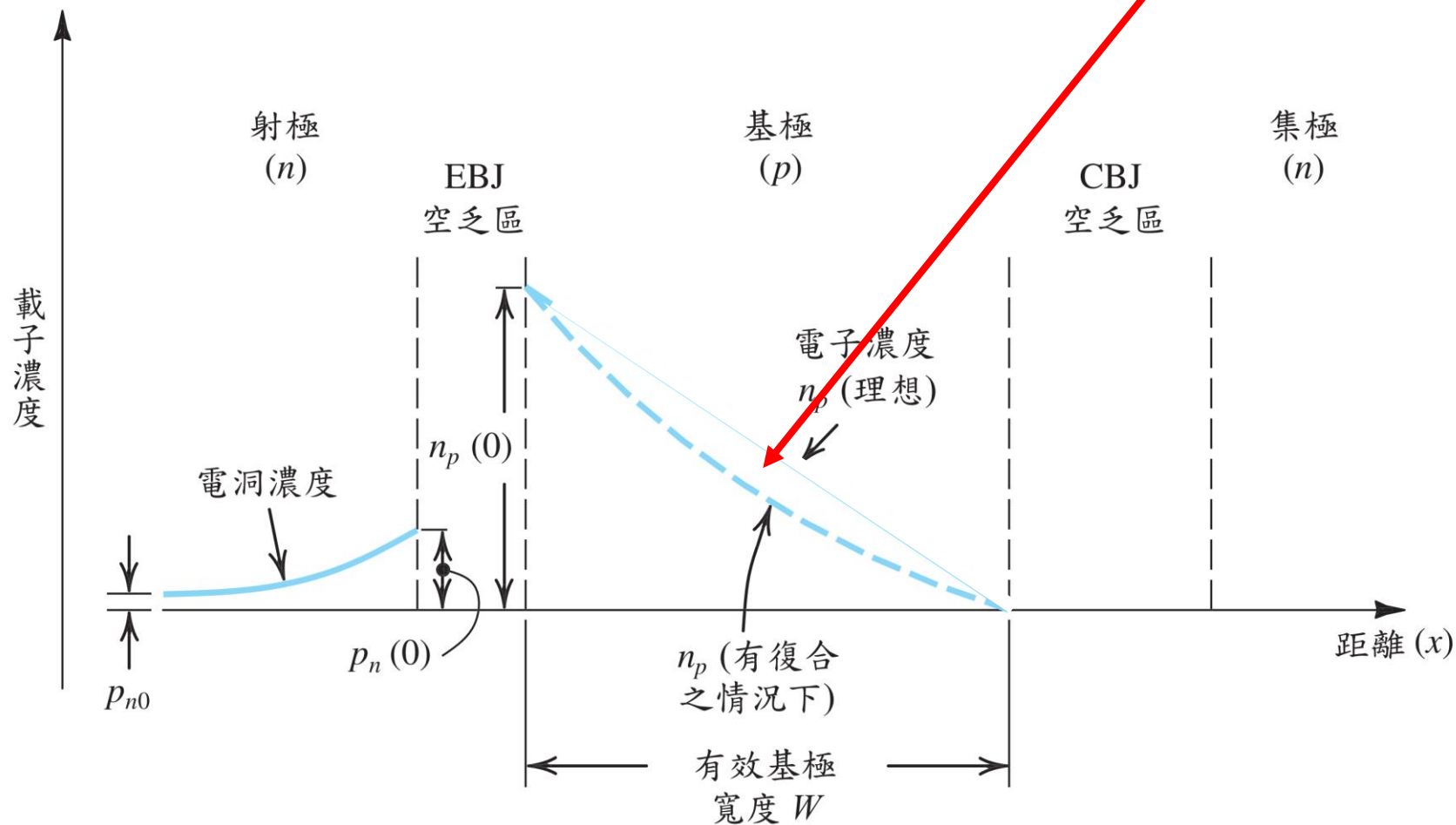


圖4.4 操作於主動模式 ( $v_{BE} > 0$  且  $v_{CB} \geq 0$ ) 之  $n-p-n$  電晶體，其基極與射極之少數載子濃度分布。 21

# 重點重述及等效電路模型

- 前述頭影片呈現一階BJT模型
  - 假設 *npn* 電晶體在主動區的模型
- 基本上，順向偏壓電壓( $v_{BE}$ )導致一個與其呈指數函數關係之集極電流( $i_C$ )
  - 集極電流 $i_C$  與集極電壓 $v_{CB}$ 無關，只要集極-基極界面保持反向偏壓
    - $v_{CB} > 0$

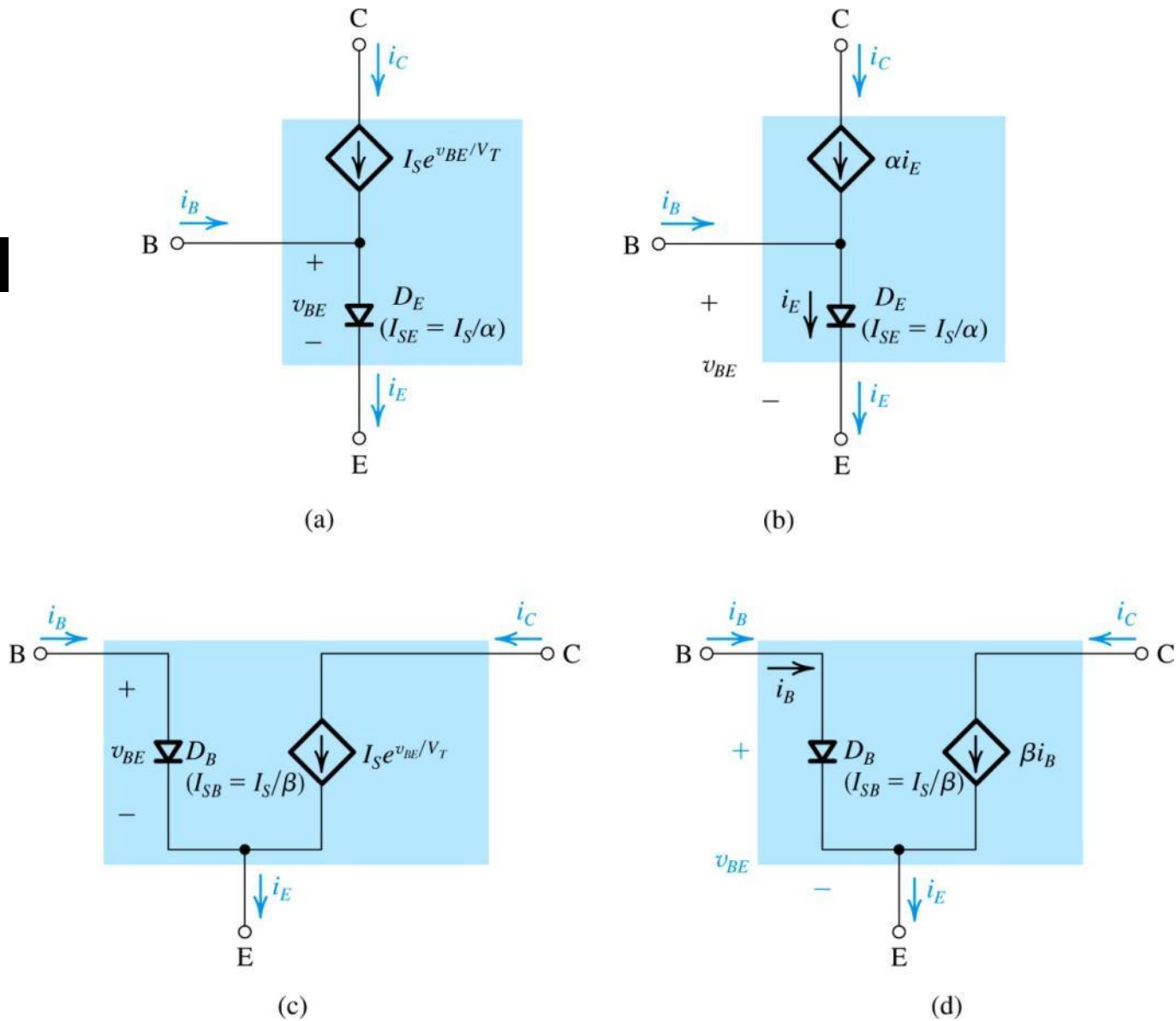


圖4.5: 操作在順向主動模式之 *n*pn BJT 的大信號等效電路模型

## 例題 4.1.

- 一個具有  $I_s = 10^{-15}$  且  $\beta = 100$  的電晶體以下列方式連接：射極接地，基極饋以定電流源而提供  $10 \mu\text{A}$  的電流，集極透過一個  $3 \text{ k}\Omega$  的電阻  $R_C$  連接到一個  $5\text{-V}$  直流電源。假設電晶體操作於主動區，求  $V_{BE}$  與  $V_{CE}$ 。使用這些值來驗證主動模式操作。用從基極連接到  $5\text{-V}$  直流電源的一個電阻來取代電流源。若要得到相同的操作狀況，需要什麼樣的電阻值



# 例題 4.1.

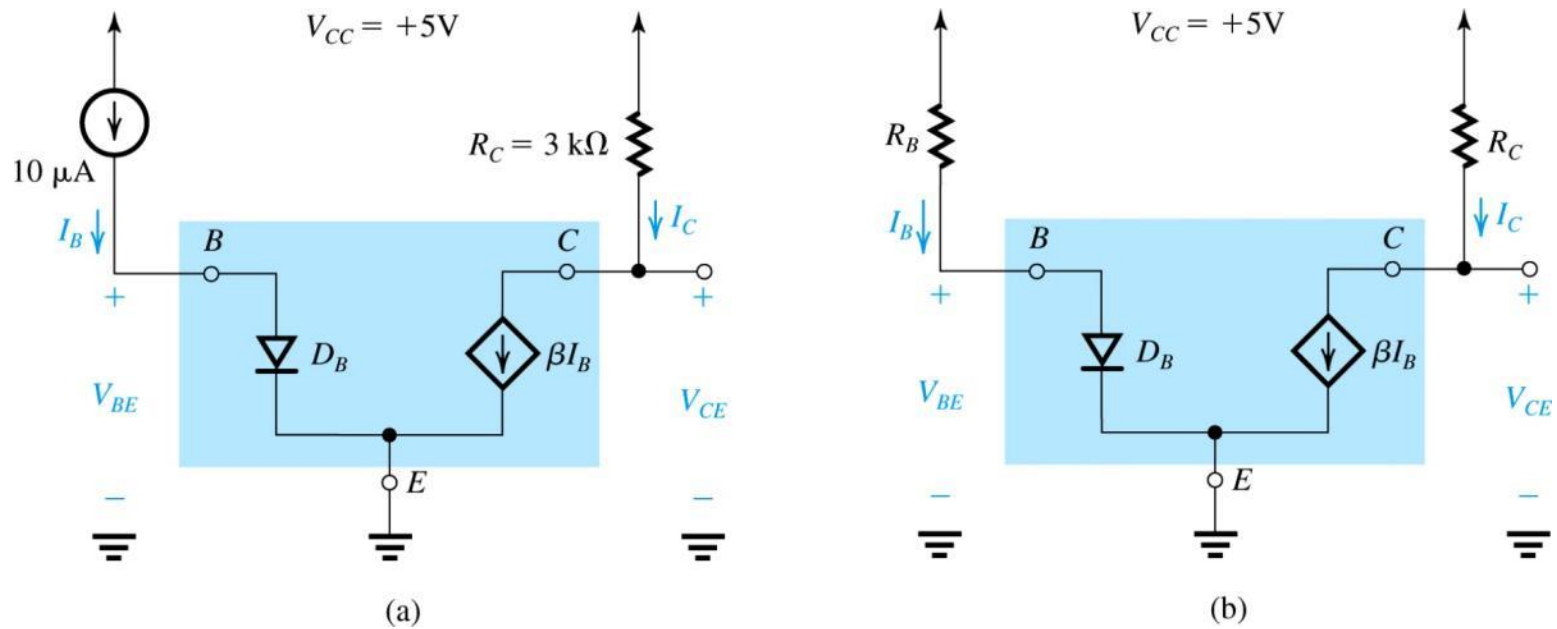


圖4.6:例題 4.1 的電路

## 例題 4.1.

$$V_{BE} = V_T \ln \frac{I_B}{I_s / \beta} = 25 \ln \left( \frac{10 \times 10^{-6}}{10^{-17}} \right) = 690 \text{mV} = 0.69 \text{V}$$

- 得知

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

其中

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 10 \times 10^{-6} = 10^{-3} \text{A} = 1 \text{mA}$$

- 所以  $V_{CE} = 5 - 3 \times 1 = +2 \text{V}$

- 如圖4.6(b) , 
$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{10 \mu\text{S}} = 431 \text{k}\Omega$$

## 4.1.3.真實電晶體的構造

- 圖 4.7 顯示一個較為實際的BJT截面積
- 集極事實上完全將射極區域團團圍住
  - 這使得注入到薄基極的電子難以逃離集極
- 元件並非對稱
  - 因此射極和集極不可以交換使用。
  - 元件是單向的

### 4.1.3.真實電晶體的構造

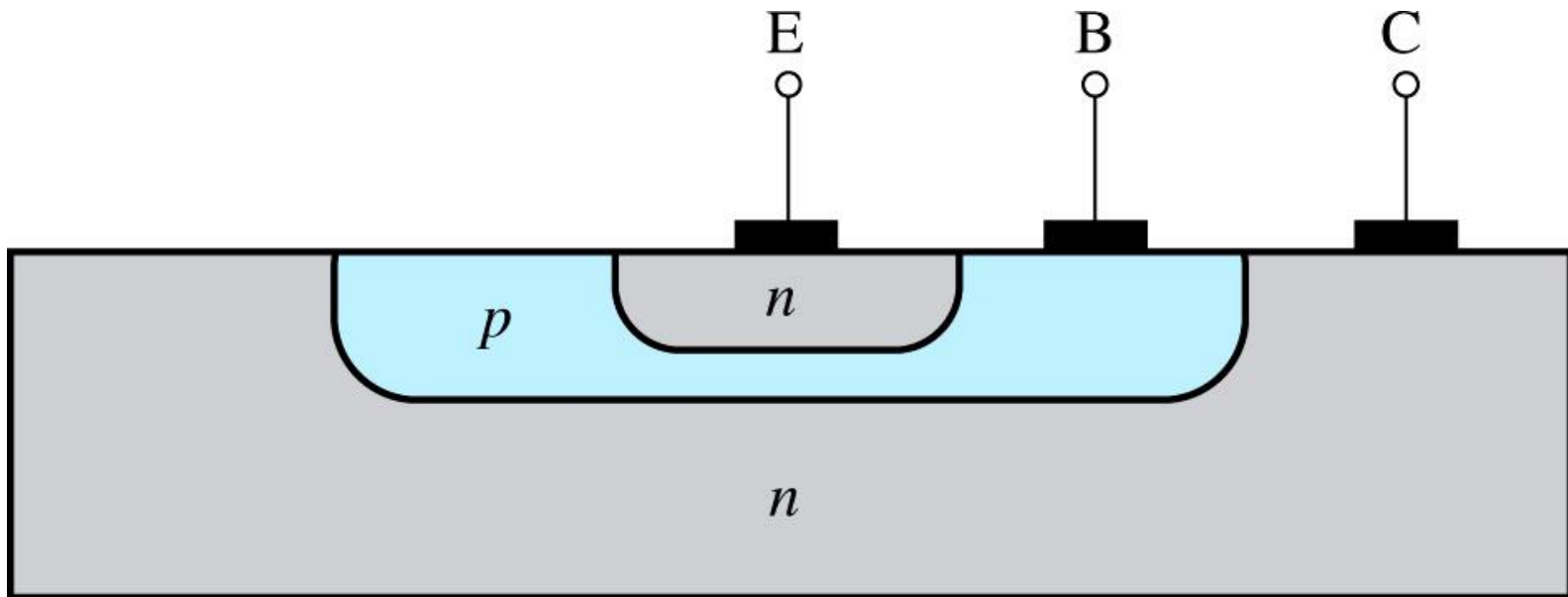


圖4.7:  $nnp$ 雙載子電晶體的截面積

## 4.1.4.飽和模式的操作

- 為了讓 BJT 操作於主動區，**CBJ 必須反向偏壓**
  - 然而對於**小的順向偏壓值**而言，*pn*-接面無法有效的操作
- 因此，**即使  $v_{CB}$  負值達到  $-0.4V$  之前**，*npn* 電晶體仍可保持在主動模式操作
  - 只有**在達到此點之後**，“二極體”才會開始真正通導

## 4.1.4.飽和模式的操作

(eq4.14) 飽和區內的集極電流: 
$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} - \overbrace{I_{SC} e^{v_{BC}/V_T}}^{I_{SC} =}$$
  
this terms plays bigger role as  $v_{BC}$  exceeds 0.4V

---

(eq4.15) 飽和區內的基極電流: 
$$i_B = \frac{I_S}{\beta} e^{v_{BE}/V_T} + I_{SC} e^{v_{BC}/V_T}$$

---

(eq4.16) 受迫  $\beta$ : 
$$\beta_{\text{forced}} = \left. \frac{i_C}{i_B} \right|_{\text{saturation}} \leq \beta$$

As  $v_{BC}$  is increased, the value of  $\beta$  is forced lower and lower.

## 4.1.4.飽和模式的操作

- 要判定BJT是否在飽和模式，有兩個問題必須確認：
  1. CBJ是否有超過0.4V的順向偏壓？
  2.  $i_C/i_B$ 是否低於 $\beta$ ？

# 4.1.5. *pn*p 電晶體

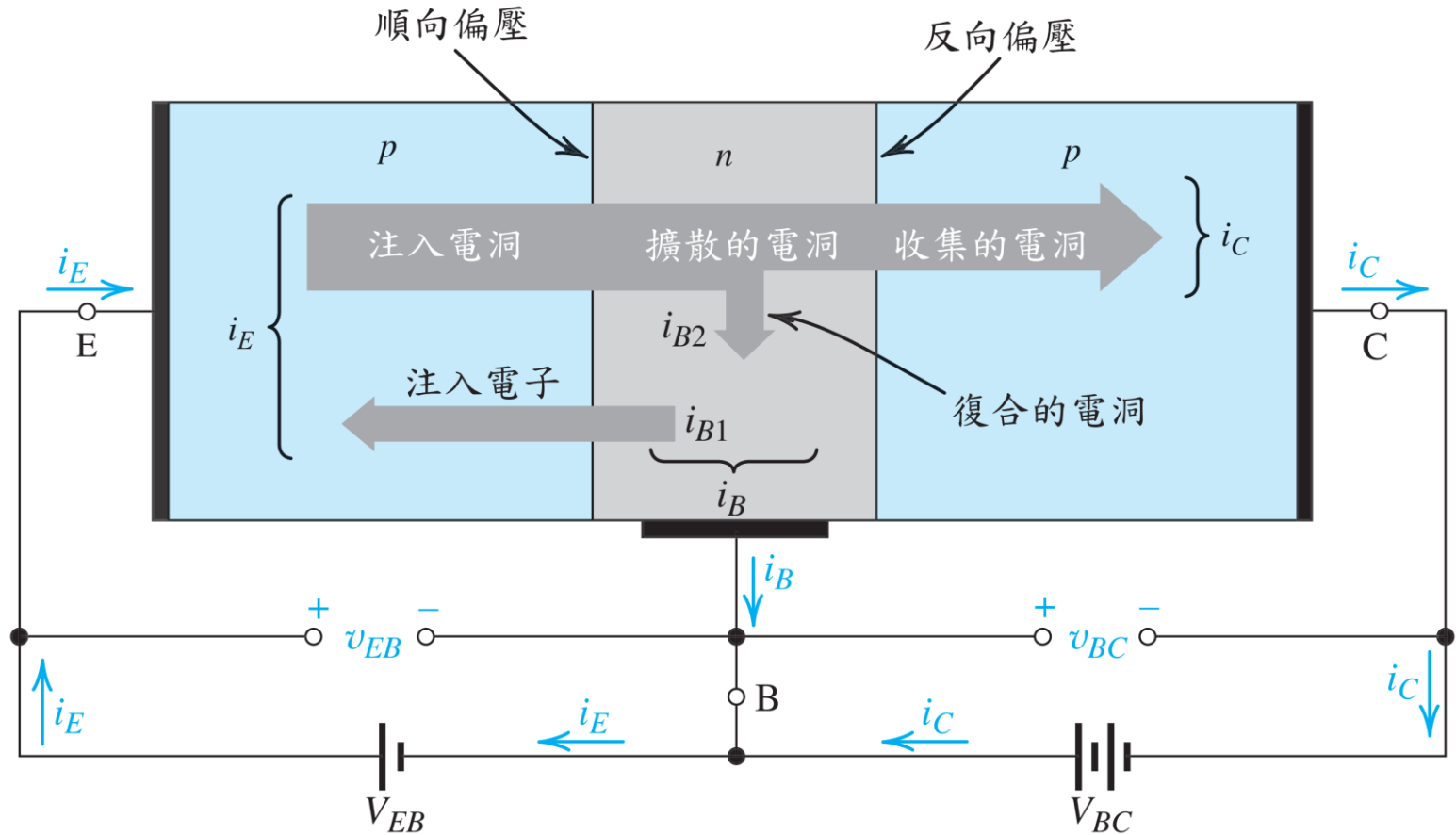


圖4.10: 偏壓在主動模式之 *pn*p 電晶體中的電流



# 4.1.5. *pn*p 電晶體

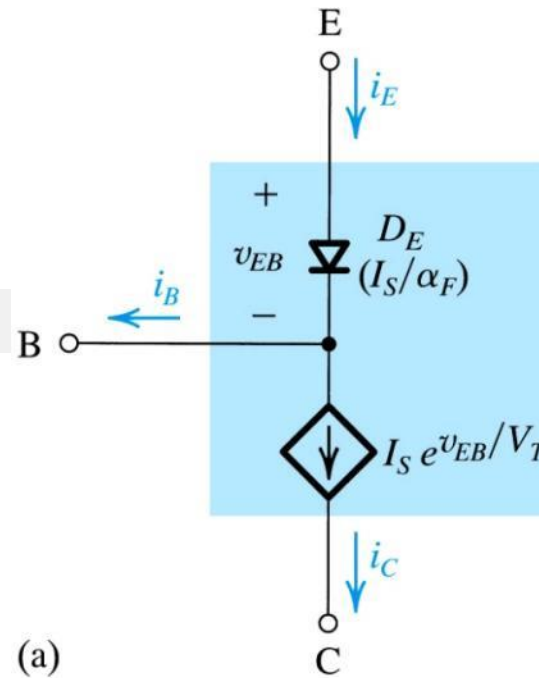
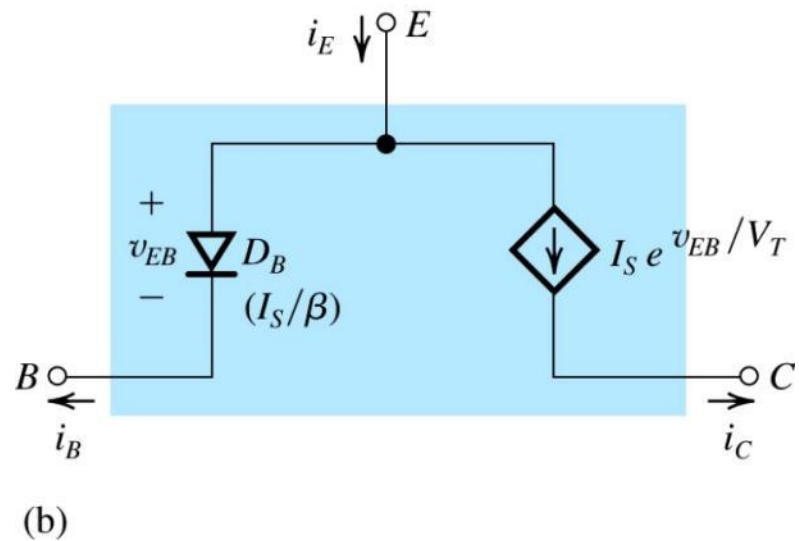
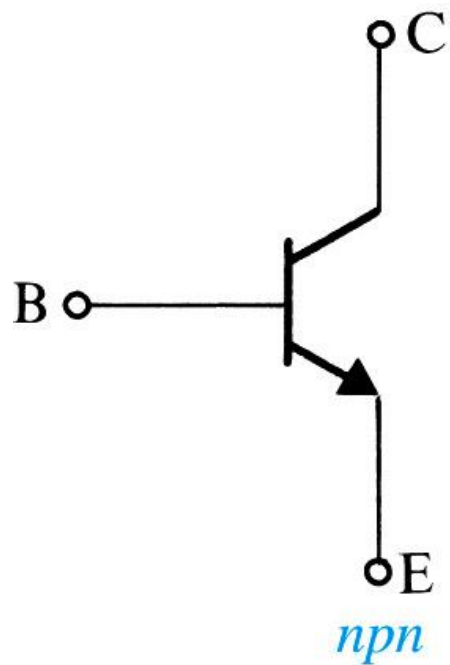


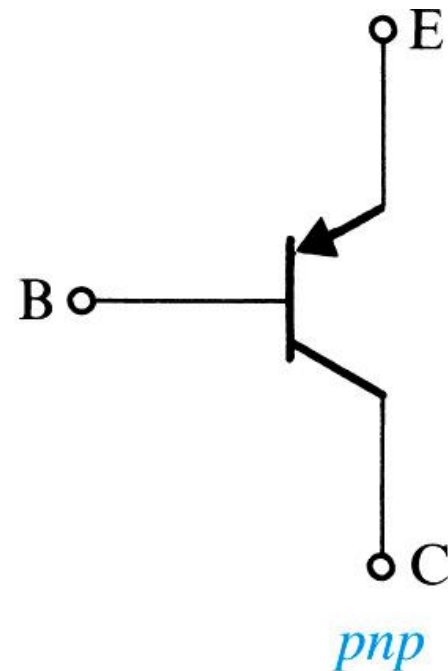
圖4.11: 兩種操作於主動模式之 *pn*p 電晶體的大信號模型



## 4.2. 電流-電壓特性



(a)



(b)

圖4.12: BJTs 的電路符號

## 4.2.1. 電路符號與慣例

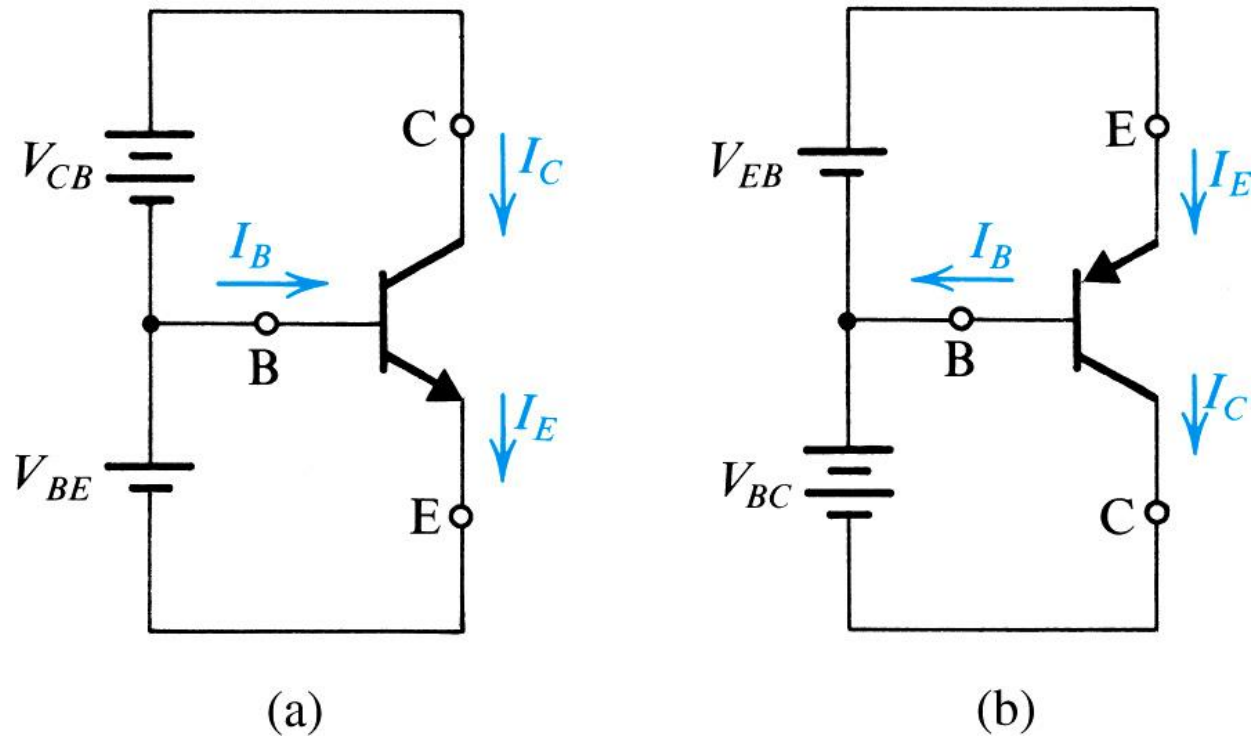


圖4.13: 電壓極性與主動模式操作下的電晶體電流

## 4.2.1. 電路符號與慣例

表 4.2 主動模式下 BJT 的電流-電壓關係式

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \left(\frac{I_S}{\beta}\right) e^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \left(\frac{I_S}{\alpha}\right) e^{v_{BE}/V_T}$$

注意：若是 *pnp* 電晶體，用  $v_{EB}$  取代  $v_{BE}$ 。

$$i_C = \alpha i_E \qquad i_B = (1 - \alpha)i_E = \frac{i_E}{\beta + 1}$$

$$i_C = \beta i_B \qquad i_E = (\beta + 1)i_B$$

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

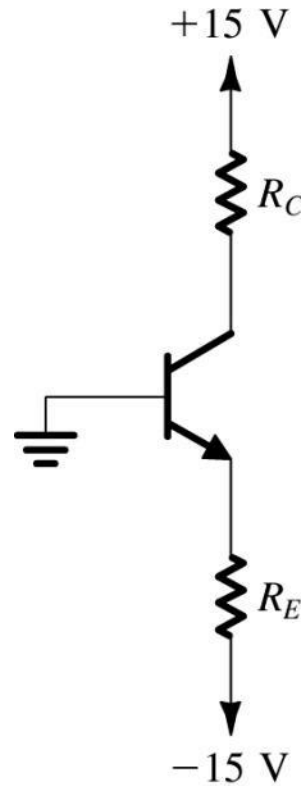
$$V_T = \text{熱電壓} = \frac{kT}{q} \simeq 25 \text{ mV (室溫時)}$$

# 集極-基極反向電流( $I_{CBO}$ )

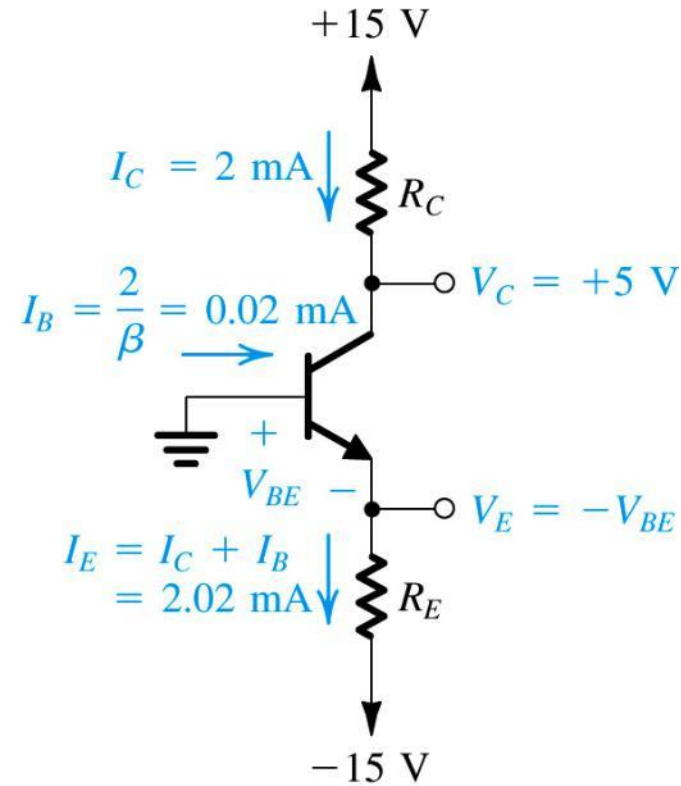
- 在此之前，微小的反向電流是被忽略的
  - 這是由熱產生的少數載子
- 不過，這仍值得探討
- 集極-基極接面反向電流 ( $I_{CBO}$ ) 通常只有奈安培範圍
  - 其值比理論上的預估值要高上數倍

## 例題 4.2.

- 在圖 4.15(a) 電路中的電晶體，其  $\beta = 100$ ，且在  $i_C = 1 \text{ mA}$  時，有  $0.7 \text{ V}$  的  $v_{BE}$ 。設計這個電路使流經集極的電流為  $2 \text{ mA}$  且集極電壓為  $+5 \text{ V}$ 。



(a)



(b)

圖4.15 例題 4.2 的電路

## 例題 4.2.

$$R_C = \frac{(15-5)V}{2mA} = 5k\Omega, \quad V_{BE} = 0.7 + V_T \ln\left(\frac{2}{1}\right) = 0.717V$$

- 因為基極電壓為0 V,

$$V_E = -0.717V$$

- $\beta = 100$ ,  $\alpha = 100/101 = 0.99$

$$I_E = \frac{I_C}{\alpha} = \frac{2}{0.99} = 2.02mA$$

$$R_E = \frac{V_E - (-15)}{I_E} = \frac{-0.717 + 15}{2.02} = 7.07k\Omega$$

## 4.2.2. 電晶體特性的圖形表示

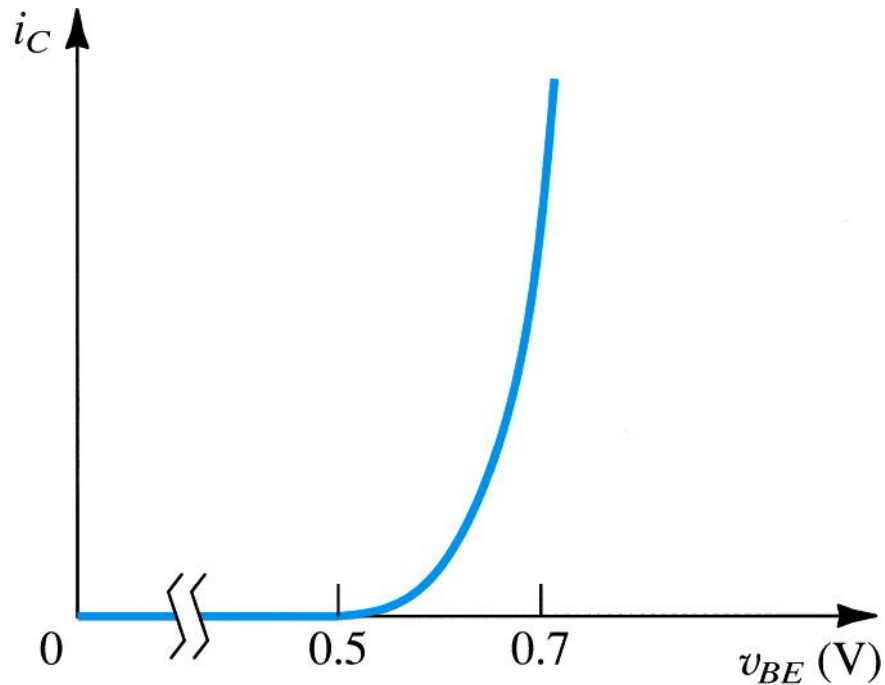


圖4.16: 一個 *npn* 電晶體的  $i_C$ - $v_{BE}$  特性

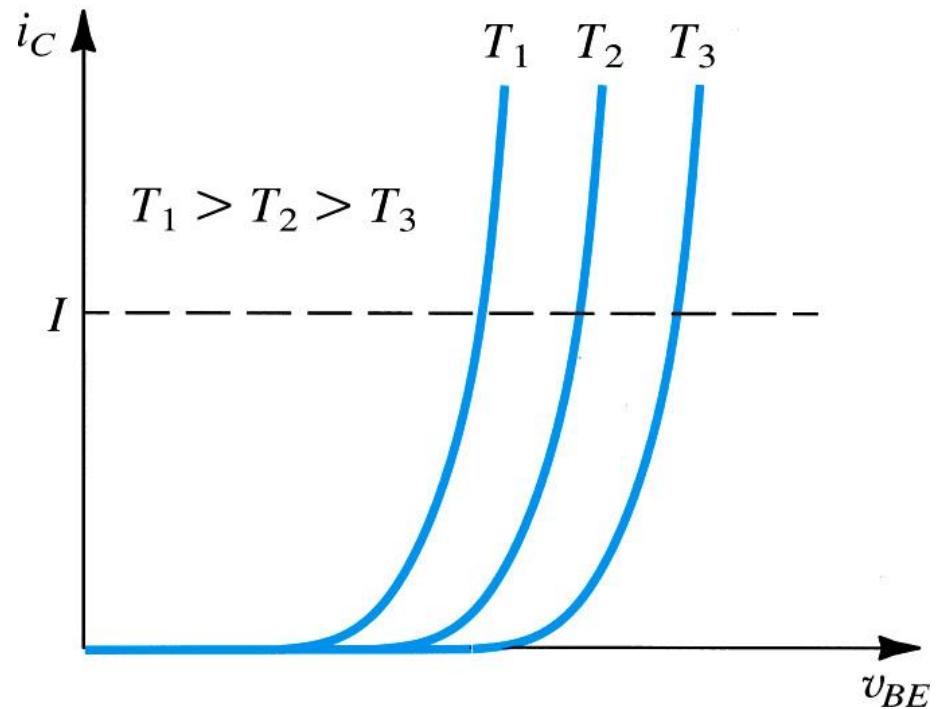


圖4.17: 溫度對  $i_C$ - $v_{BE}$  特性的效應。在固定的射極電流情況下 (虛線),  $v_{BE}$  的變化率為  $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ 。



## 4.2.3. $i_C$ 與集極電壓的關聯性 — 爾利效應

- 當在主動區操作時，實際的BJT表現出集極電流對集極電壓的依賴性
- 因此， $i_C-v_{CE}$ 的特性並非直線

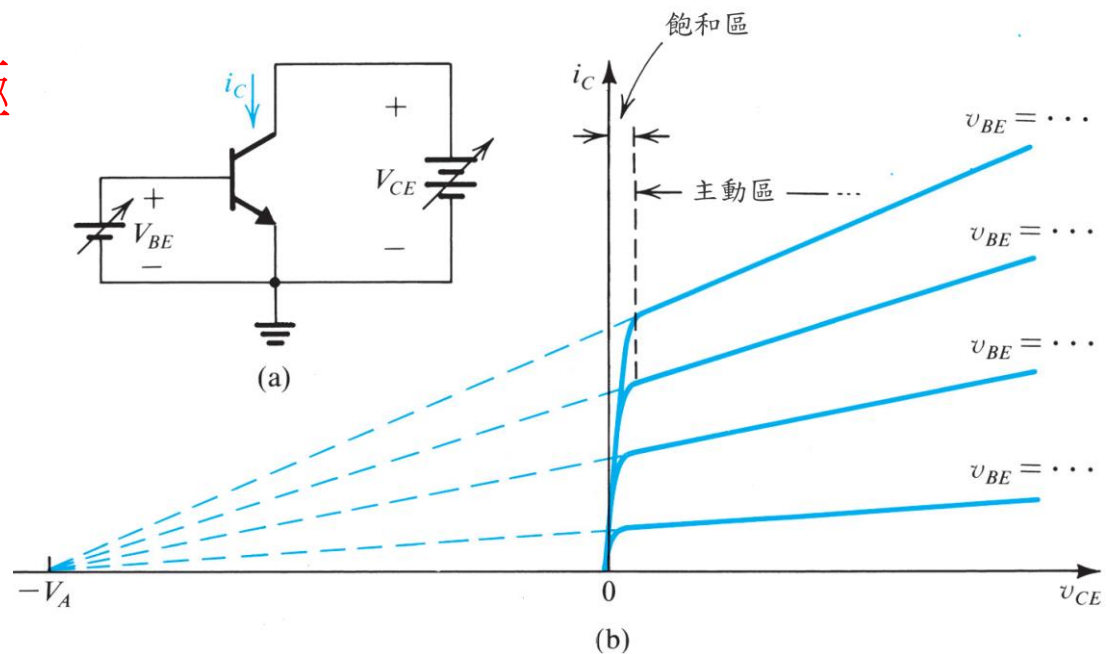


圖4.18: (a) 用以測量 BJT  $i_C-v_{CE}$  特性的觀念電路；(b): 實際 BJT 的特性

### 4.2.3. $i_C$ 與集極電壓的關聯性 — 爾利效應

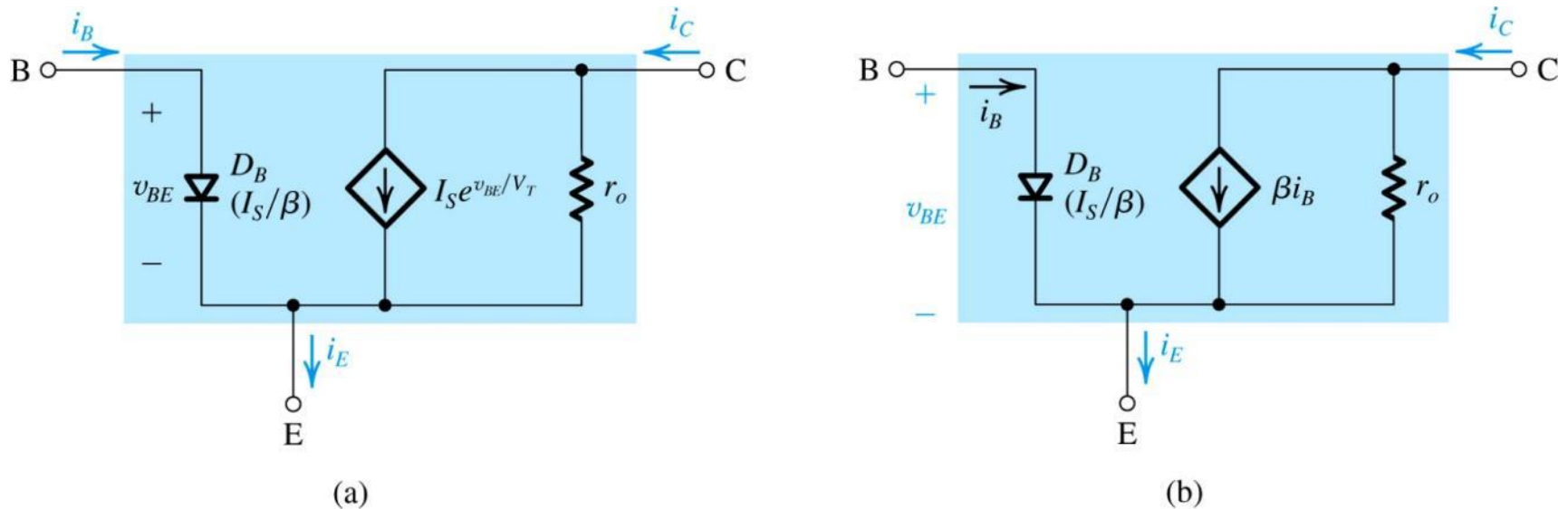


圖4.19: 將  $npn$  BJT 電晶體的輸出電阻 併入其主動模式時的等效電路，此為共射極組態時的大信號等效電路

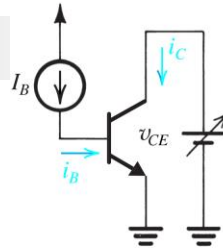
## 4.2.4.共射極特性的另一種形式

- 共射極電流增益
  - 另一個量測 $\beta$ 的方法：改變基極電流 $\Delta i_B$ ，並測量增加量 $\Delta i_C$ .
- 飽和電壓 $V_{CEsat}$  與飽和電阻 $R_{CEsat}$

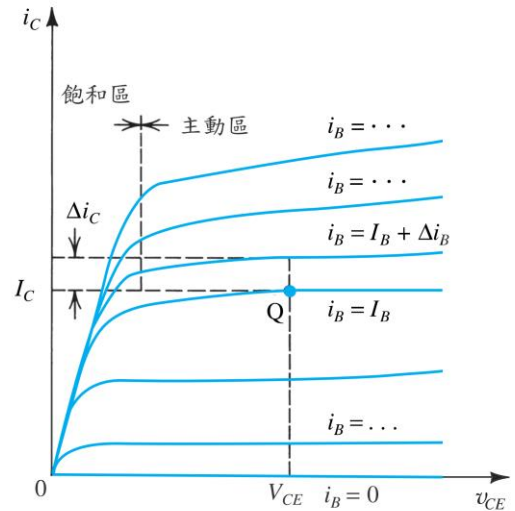
$$(eq4.23) R_{CEsat} \equiv \left. \frac{\partial v_{CE}}{\partial i_C} \right|_{\substack{i_B = I_B \\ i_C = I_{Csat}}}$$

## 4.2.4.共射極特性的另一種形式

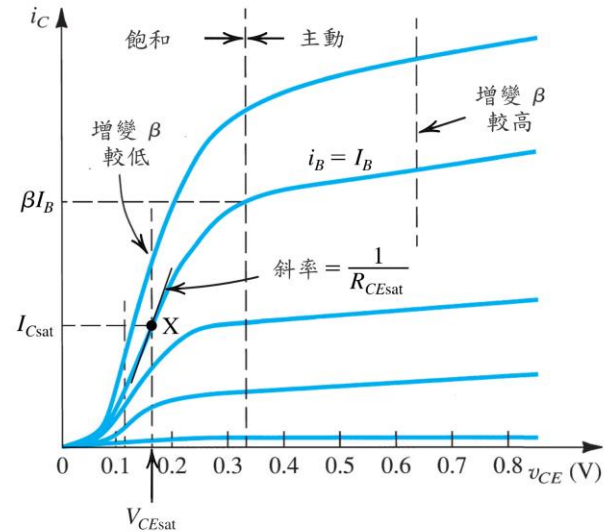
- 圖4.20:共射極的特性圖。**(a) 基本 CE 電路圖；注意為了將飽和區內的特性表示清楚，我們刻意拉長圖 (b) 中接近原點的橫軸刻度；而圖 (c) 則是將飽和區內刻度更為放大後的結果。



(a)



(b)



(c)

## 4.2.4. 共射極特性的另一種形式

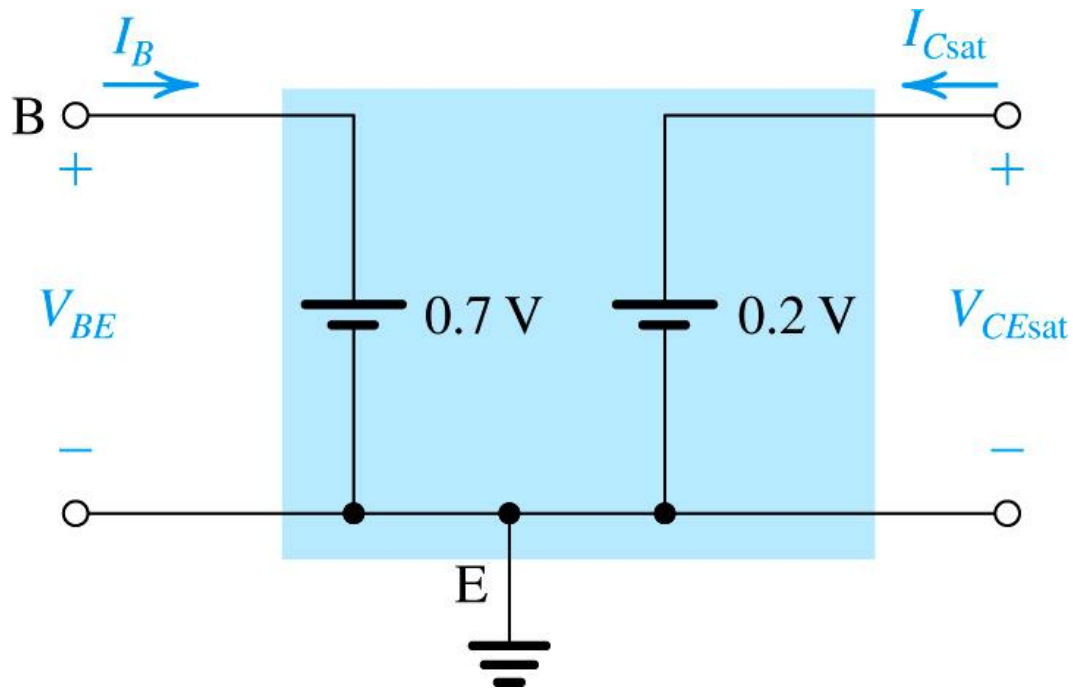


圖4.21: BJT 電晶體在飽和區時的簡化等效電路

## 例題 4.3

- 如圖 4.22，求  $V_{BB}$  電壓值為多少時可使得電晶體操作在
  - (a) 主動模式且  $V_{CE} = 5V$
  - (b) 主動區與飽和區的邊界
  - (c)  $\beta_{\text{forced}} = 10$  的深飽和區
- 為了簡化分析，我們假設  $V_{BE}$  固定在  $0.7V$ ，且  $\beta$  為  $50$

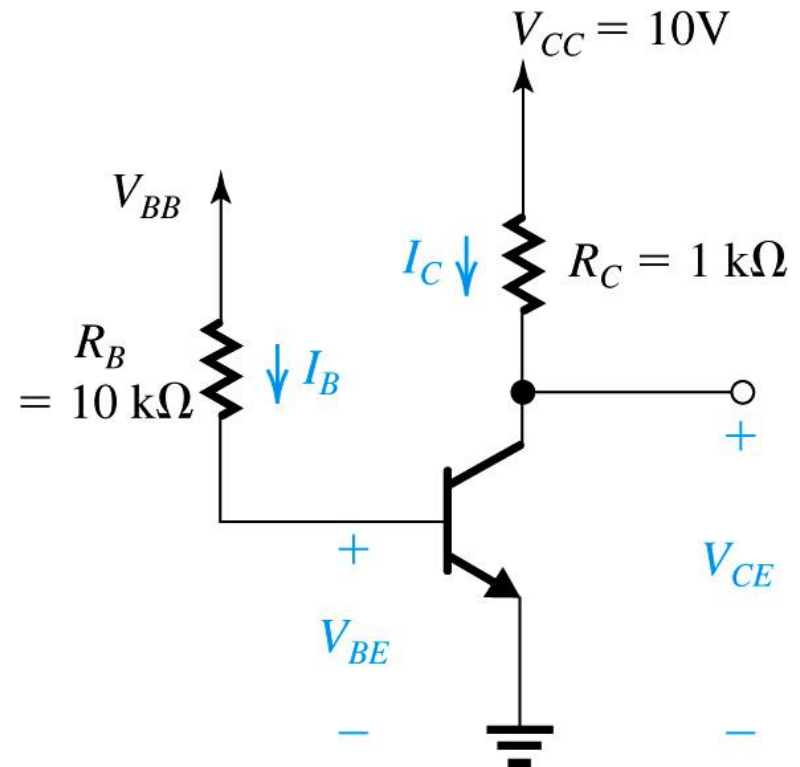


圖 4.22: 例題 4.3 的電路圖

## 例題 4.3

(a) 欲使其操作在主動區且  $V_{CE} = 5\text{V}$

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \\ &= \frac{10 - 5}{1 \text{ k}\Omega} = 5 \text{ mA} \end{aligned}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{5}{50} = 0.1 \text{ mA}$$

可根據下式計算出  $V_{BB}$  的值：

$$\begin{aligned} V_{BB} &= I_B R_B + V_{BE} \\ &= 0.1 \times 10 + 0.7 = 1.7 \text{ V} \end{aligned}$$

## 例題 4.3

(b) 當電晶體操作在主動區與飽和區邊界， $V_{CE} = 0.3\text{V}$ ，故

$$I_C = \frac{10 - 0.3}{1} = 9.7 \text{ mA}$$

在飽和區邊界時， $I_C$  與  $I_B$  的比值仍為  $\beta$ ，故

$$I_B = \frac{9.7}{50} = 0.194 \text{ mA}$$

可求出  $V_{BB}$  的電壓如下：

$$V_{BB} = 0.194 \times 10 + 0.7 = 2.64 \text{ V}$$



## 例題 4.3

(c) 當電晶體操作在深飽和區時，

$$V_{CE} = V_{CEsat} \approx 0.2 \text{ V}$$

故

$$I_C = \frac{10 - 0.2}{1} = 9.8 \text{ mA}$$

利用 $\beta_{forced}$  可以計算出基極電流  $I_B$ ，

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{forced}} = \frac{9.8}{10} = 0.98 \text{ mA}$$

並計算出 $V_{BB}$  的電壓

$$V_{BB} = 0.98 \times 10 + 0.7 = 10.5 \text{ V}$$

觀察到電晶體進入飽和區後，因為 $V_{CEsat}$  電壓只會隨著  $I_B$  稍微變化，所以增加 $V_{BB}$  且提高 $I_B$ 所造成的 $I_C$  變化量將十分小且可忽略，此時我們稱 $I_C$  飽和了，這也是為何此操作區被稱為飽和區的原因。

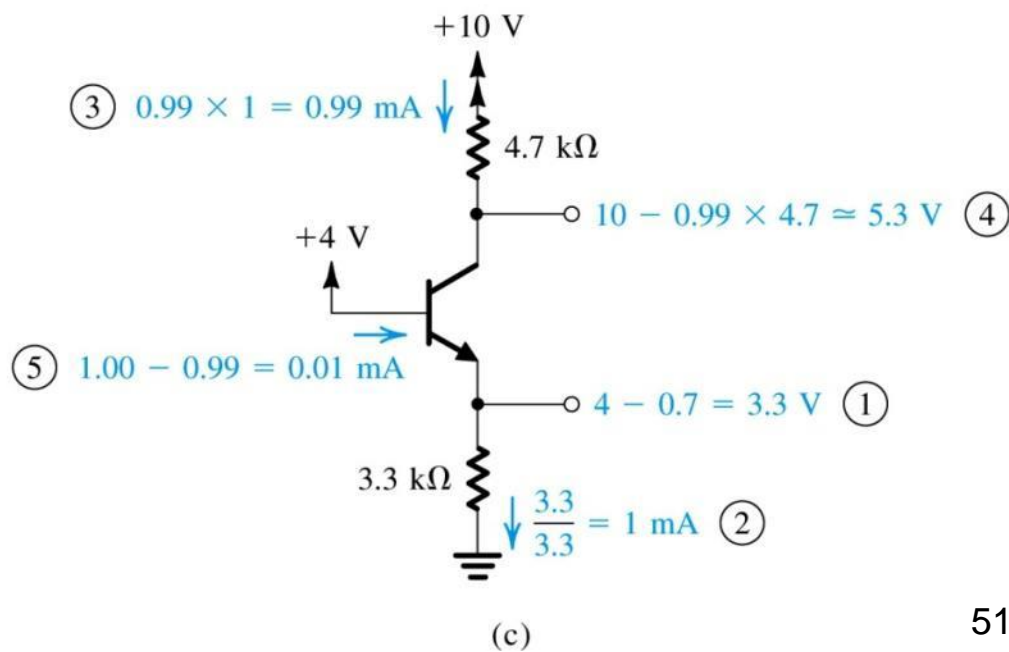
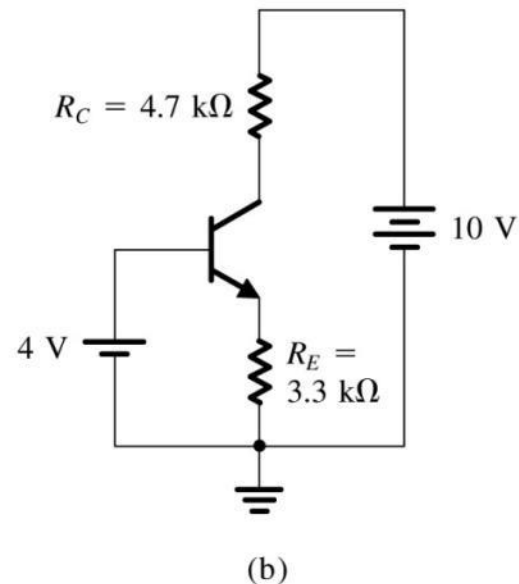
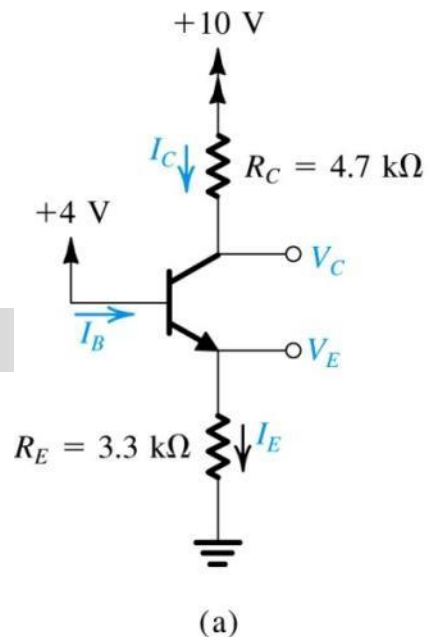
# 4.3. 雙載子接面電晶體 (BJT) 電路的直流操作

## ■ 表4.3 經簡化過的 BJT 直流操作電路模型

表 4.3 經簡化過的 BJT 直流操作電路模型		
	<i>nnp</i>	<i>ppp</i>
<b>主動區</b> EBJ : 順向偏壓  CBJ : 反向偏壓		
<b>飽和區</b> EBJ : 順向偏壓  CBJ : 順向偏壓		

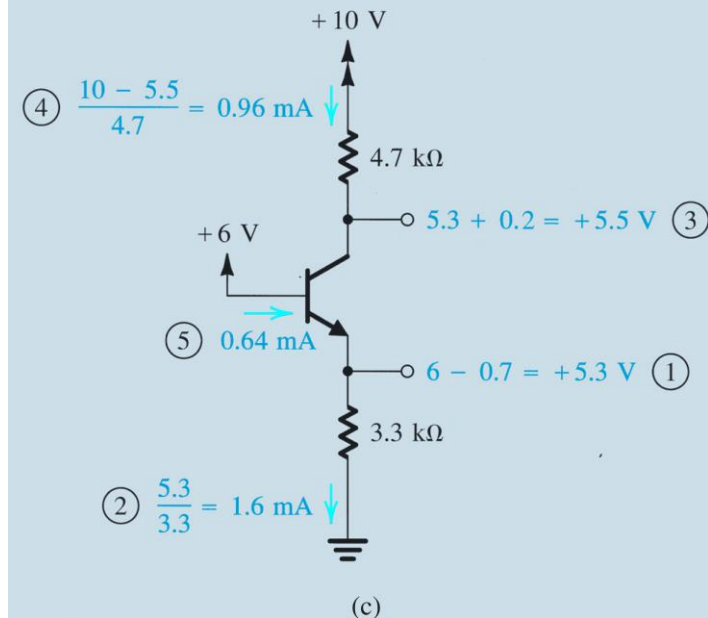
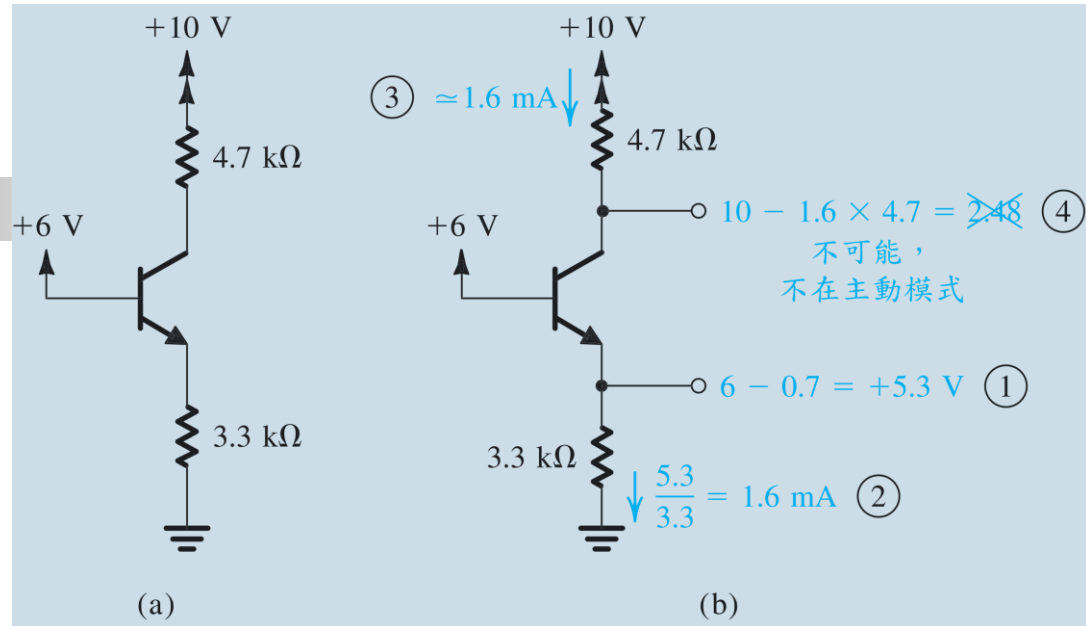
# 例題 4.4

- 圖4.23:** 例題 4.4 的電路分析：(a) 電路圖；(b) 重新繪製電路使讀者了解本書電路圖如何表示直流源的連接方式；(c) 以數字標記分析的步驟。



# 例題 4.5

- 圖4.24 例題 4.5 的電路分析，注意圓圈圈選的數字表示分析的步驟。



# 例題 4.6

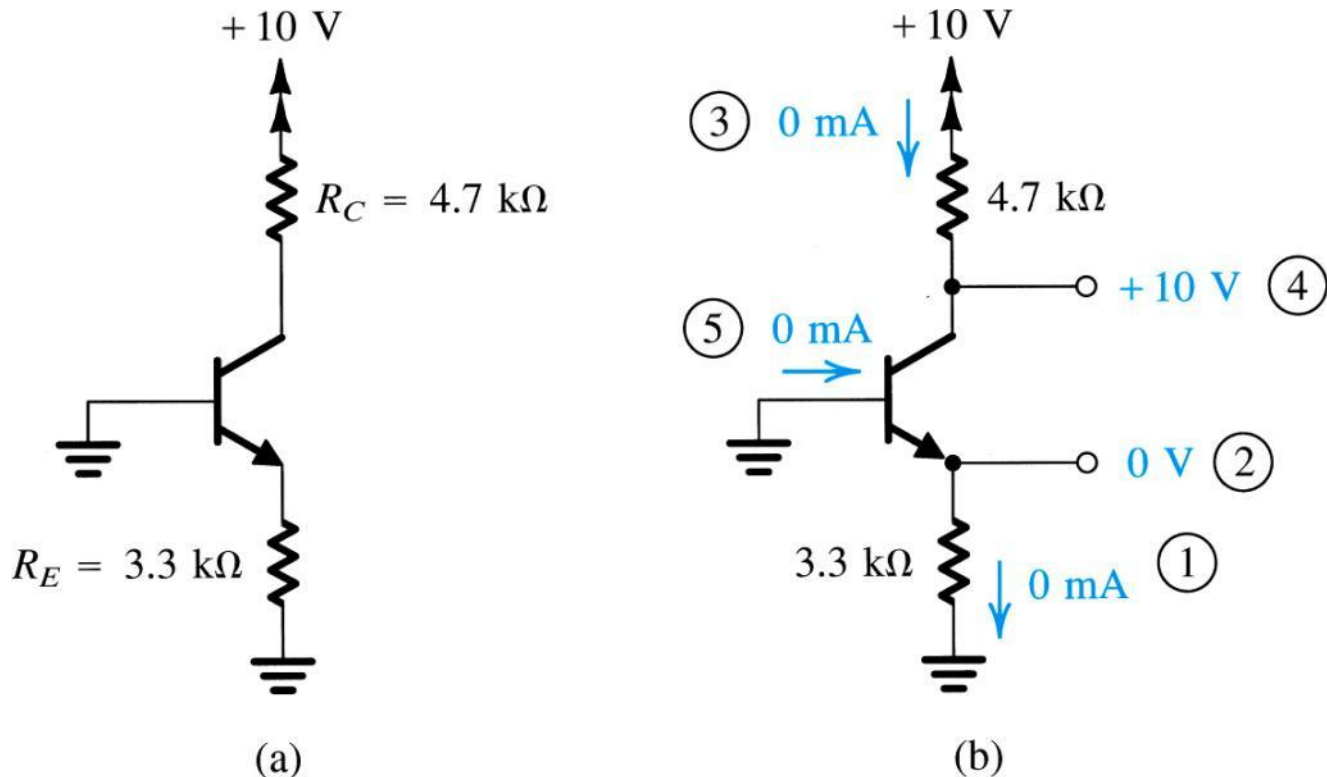


圖4.25 例題 4.6：(a) 電路圖；(b) 以圓圈圈選數字依序標示分析步驟。

# 例題 4.7

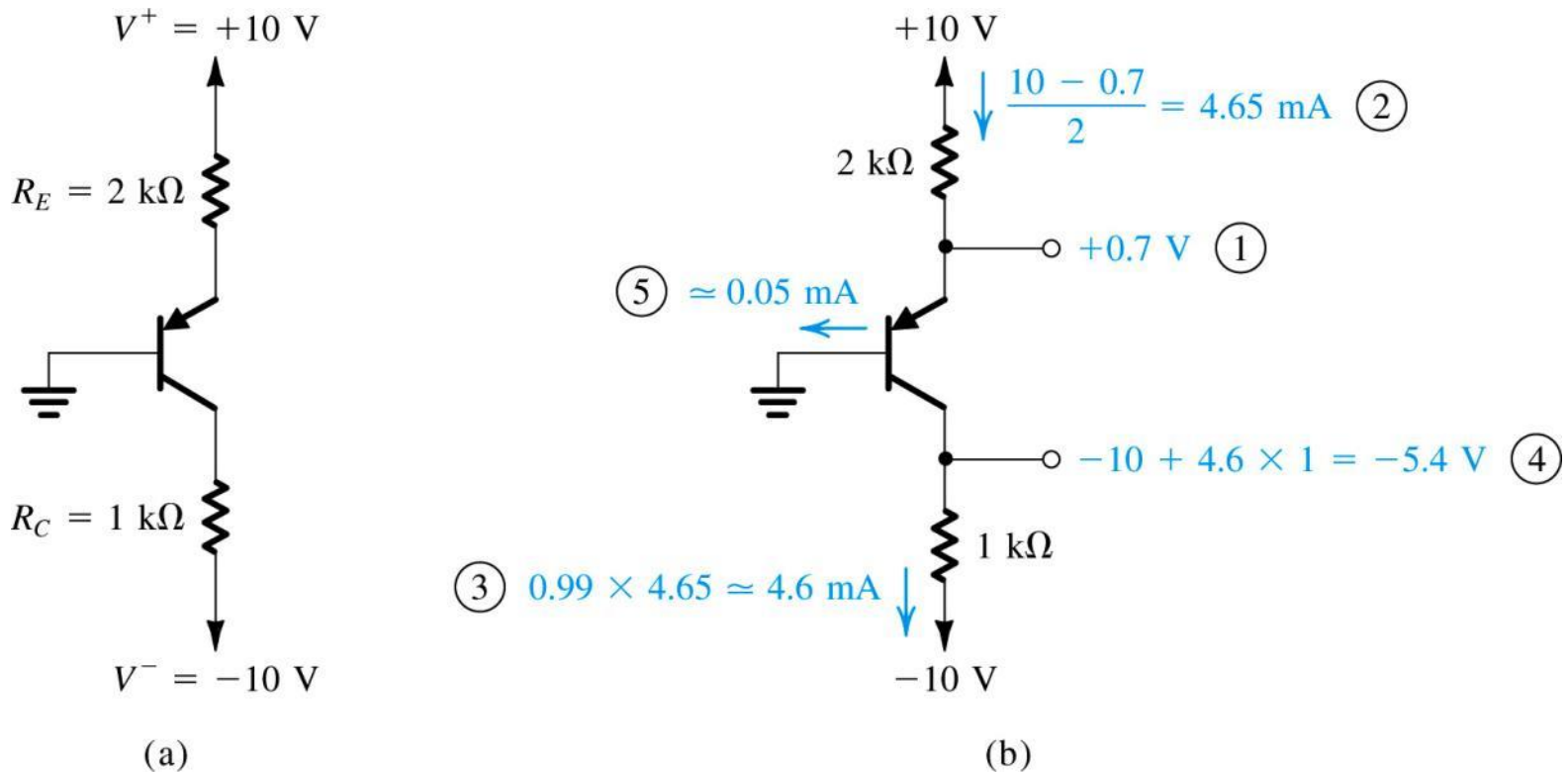


圖4.26 例題 4.7：(a) 電路圖；(b) 以圓圈圈選數字依序標示分析步驟。

# 例題 4.8

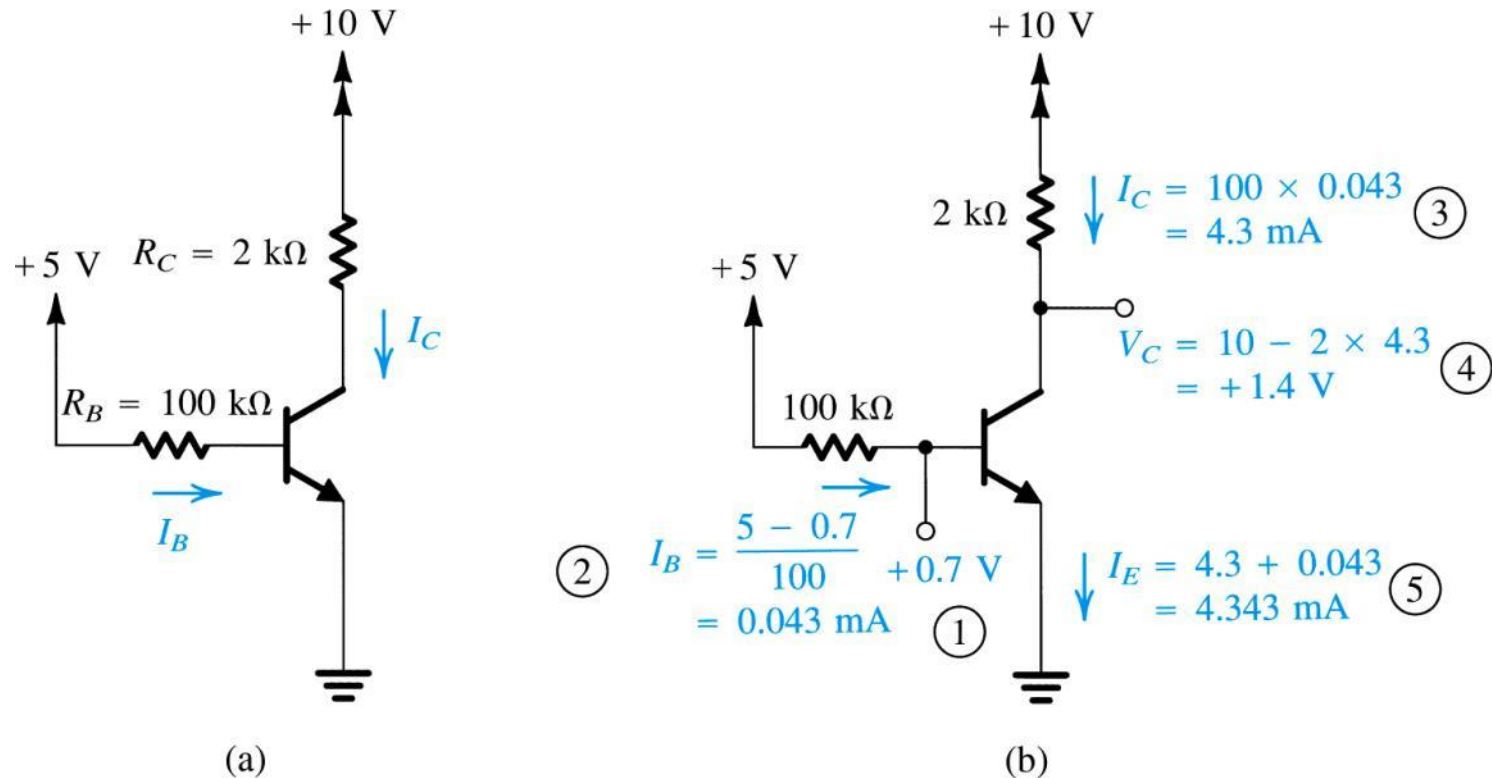
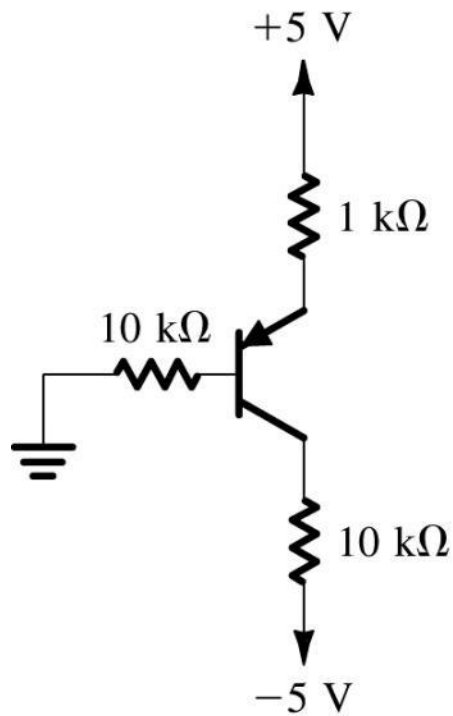
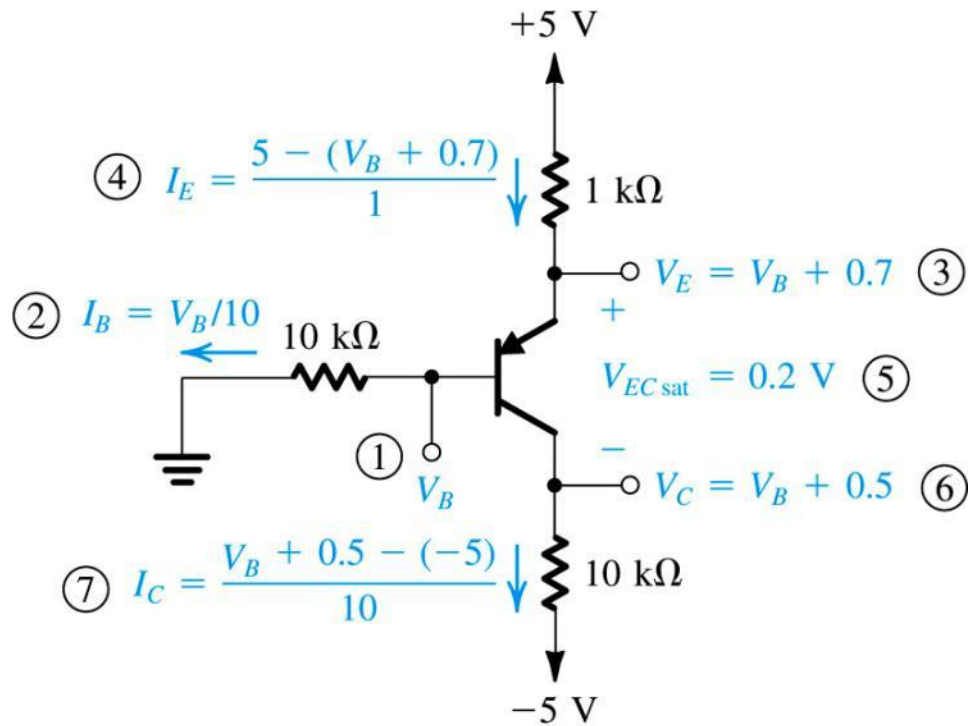


圖4.27 例題 4.8：(a) 電路圖；(b) 以圓圈圈選之數字依序標示分析步驟。

# 例題 4.9



(a)

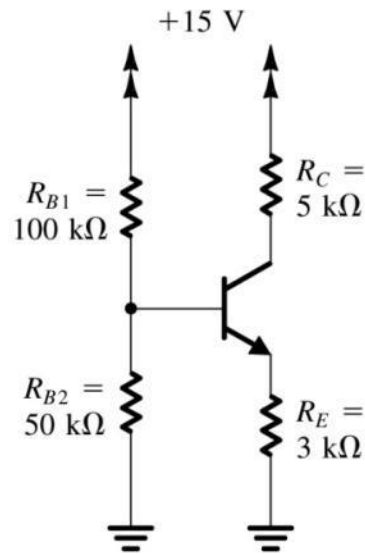


(b)

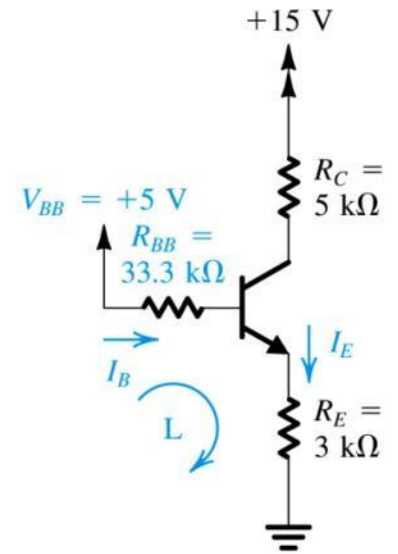
圖4.28 例題 4.9：(a) 電路圖；(b) 以圓圈圈選之數字依序標示分析步驟。



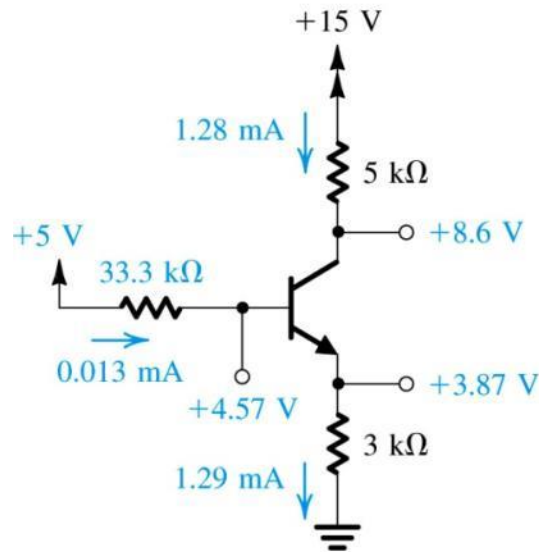
# 例題 4.10



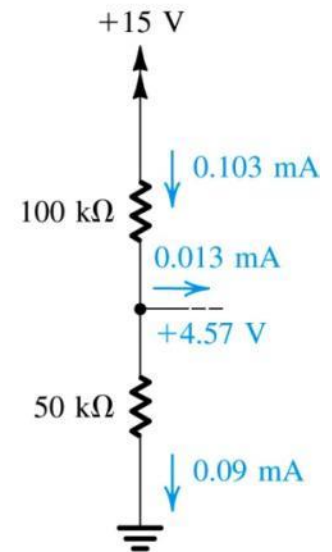
(a)



(b)



(c)



(d)

圖4.29 例題 4.10 的電路圖。

# 例題 4.11

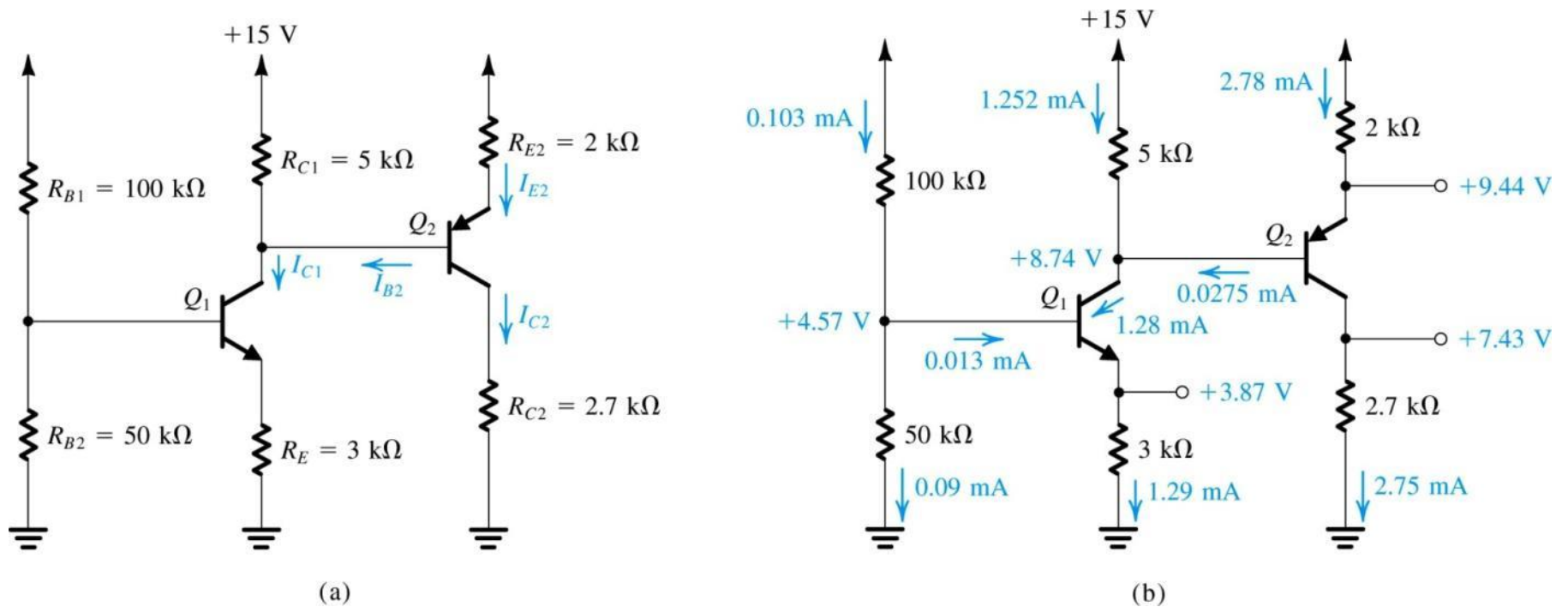


圖4.30 例題 4.11 的電路圖。

# 例題 4.12

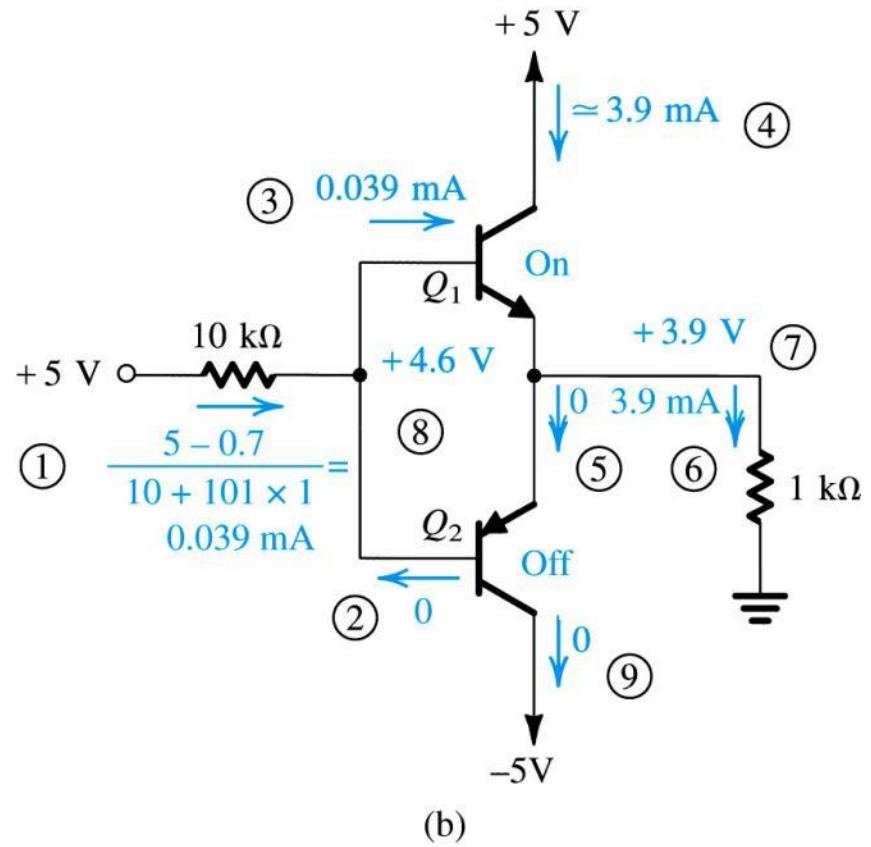
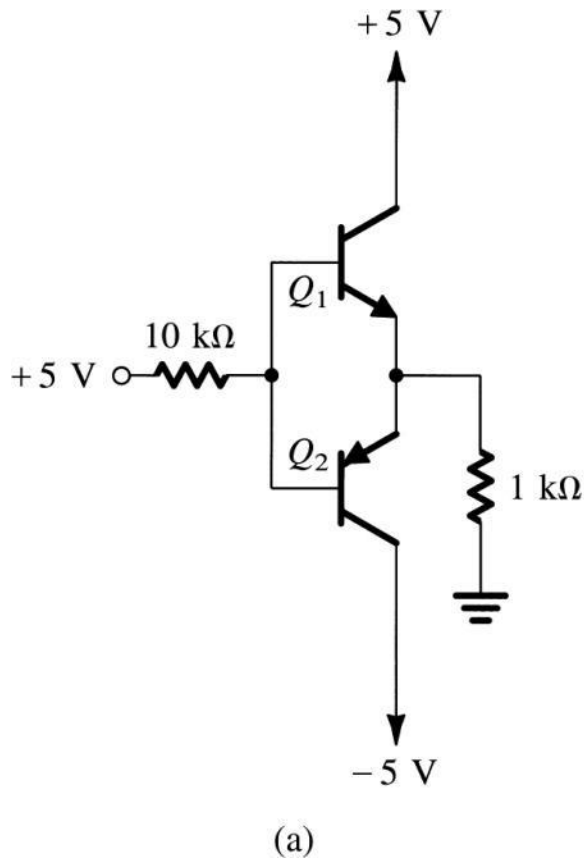


圖4.31 例題 4.12：(a) 電路圖；(b) 以數字標記分析的步驟。

# 4.4.1 電晶體的崩潰特性

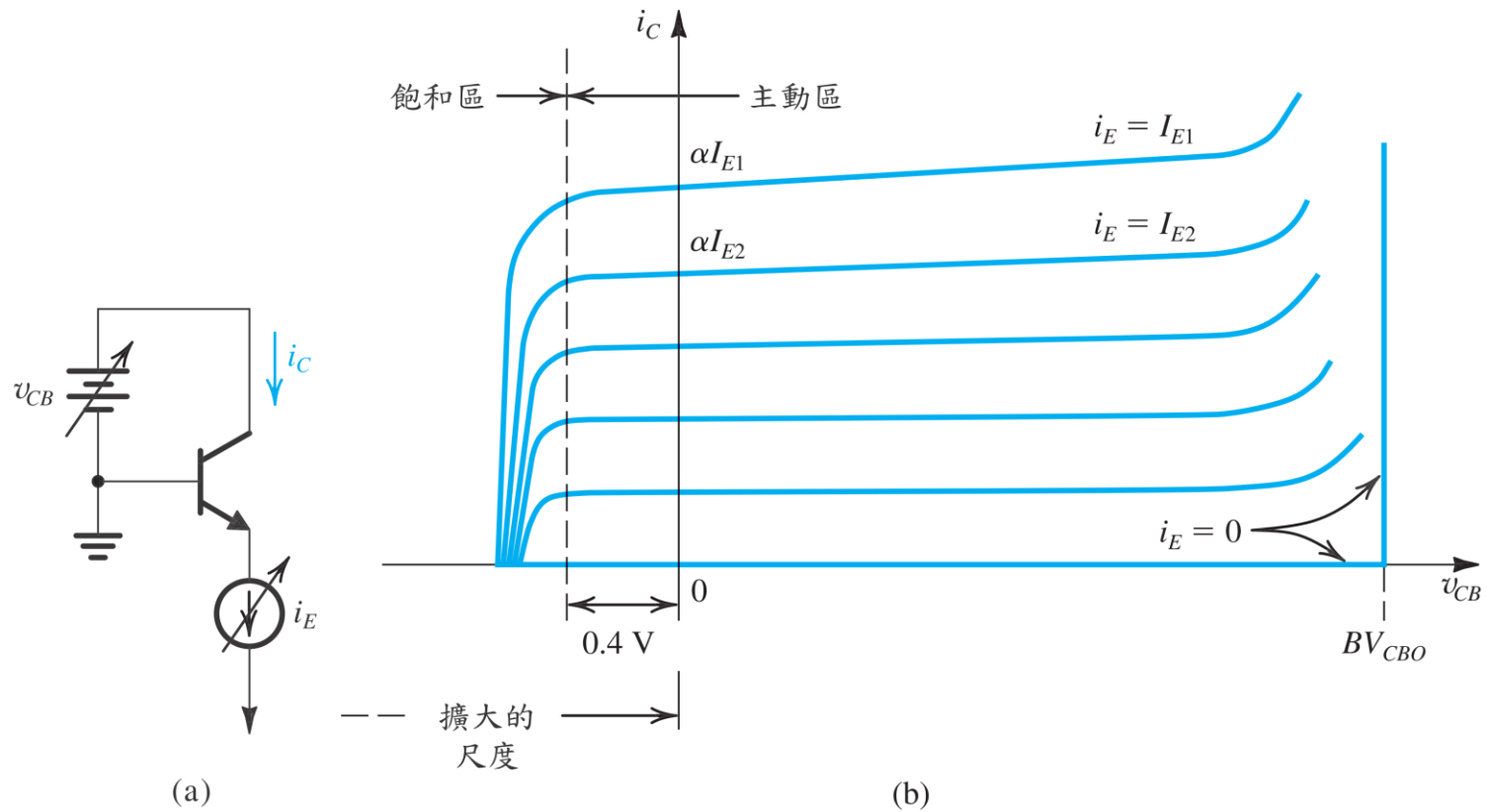
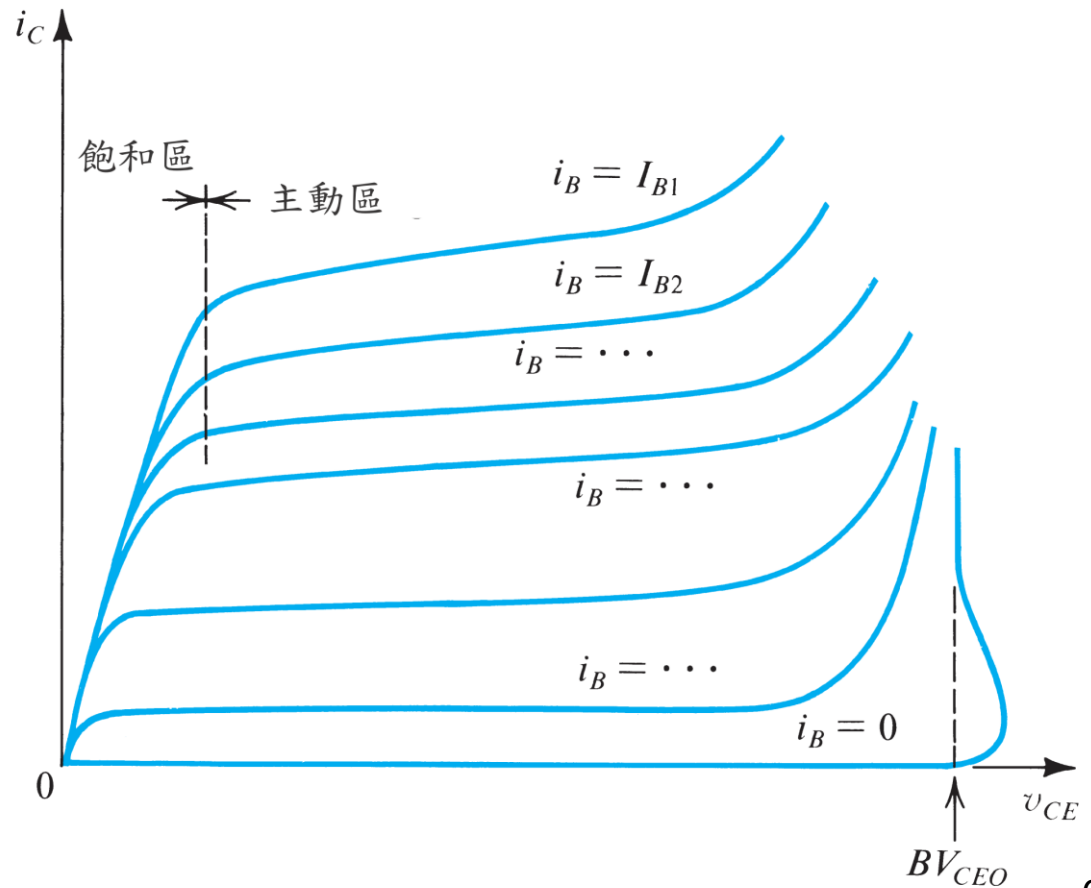


圖4.32 包含崩潰區的 BJT 共基極特性曲線

## 4.4.1 電晶體的崩潰特性

圖4.33 包含崩潰區的 BJT 共射極特性曲線。



## 4.4.2 $\beta$ 對於 $I_C$ 及溫度的相依性

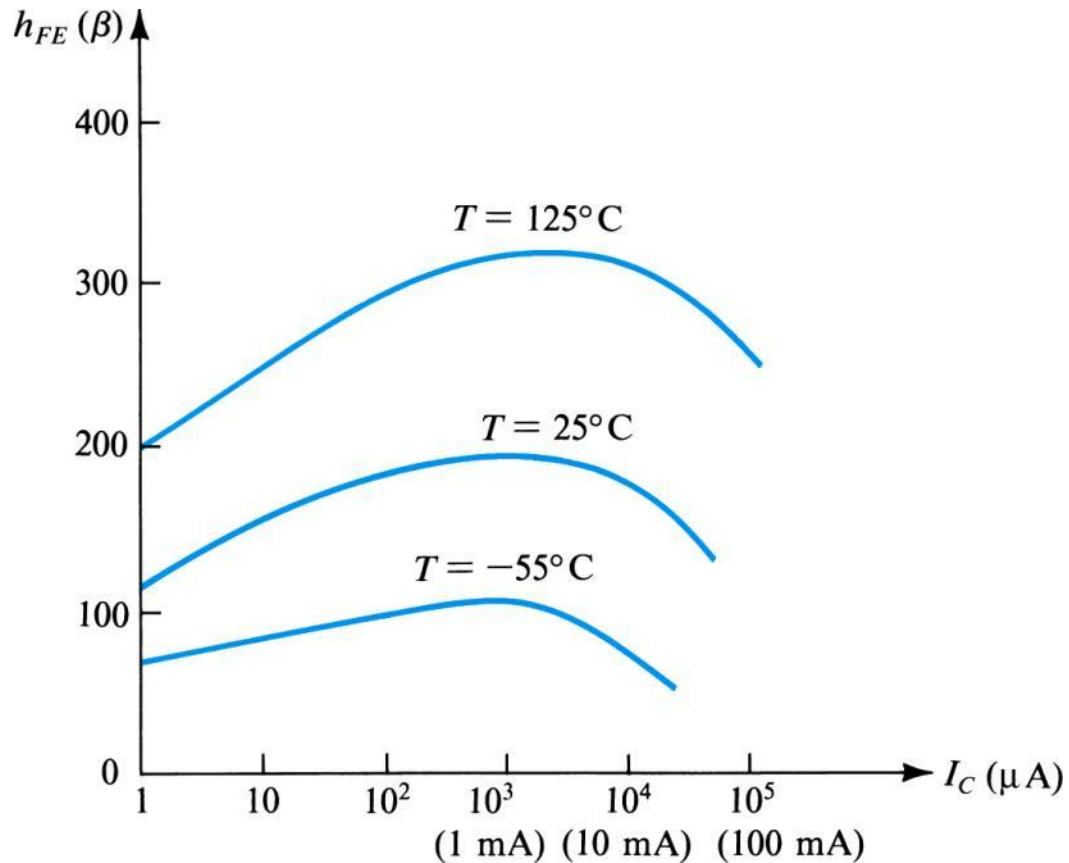


圖4.34 典型的 $\beta$  對 $I_C$  及溫度的相依特性 (約 1 mA 操作下的積體電路 npn 矽電晶體)。

# 總結

- BJT 電晶體可以由其兩個接面的偏壓情形來決定其操作在三種可能的模式之一：
  - 截止 (兩個接面皆反偏)
  - 主動 (射極-基極接面順偏且集極-基極接面反偏)
  - 飽和 (兩接面皆偏)
- 在放大器的應用中，BJT 操作在主動模式。而在切換開關的應用則會利用到截止以及飽和模式。
- BJT 操作在主動區時，其集極電流為  $i_C = I_s \exp(|v_{BE}|/V_T)$ 。基極電流  $i_B = i_C/\beta$ ，以及射極電流  $i_E = i_C + i_B$ 。

# 總結

- 為了確保在主動區的操作，*nnp* 電晶體的集極電壓必須保持高於基極電壓再減大約 $0.4V$ 的值，而 *pnp* 電晶體的集極電壓必須保持低於基極電壓再加約  $0.4V$  的值。否則集極–基極接面就會變成順偏，而電晶體會進入飽和區操作
- 在一個固定的集極電流之下，溫度每升高 $1^{\circ}C$ ， $V_{BE}$  量值就會減少約
- 當  $|v_{CE}|$  減低至約  $0.3V$  時，BJT 會處於飽和區的邊緣。



# 總結

- 在主動區中， $i_C$ 對於 $v_{CE}$ 有輕微的相依性。這現象稱之為爾利效應，可以用一個有限大小 (亦即非無限大) 的輸出電阻 $r_o$ 來模擬這個效應： $r_o = |V_A| / I'_C$ ，其中 $V_A$ 是爾利電壓，而 $I'_C$ 是不計爾利效應的直流集極電流
- 如果直接假設 $|V_{BE}| \cong 0.7V$ ，電晶體電路的直流分析可以大大地簡化。