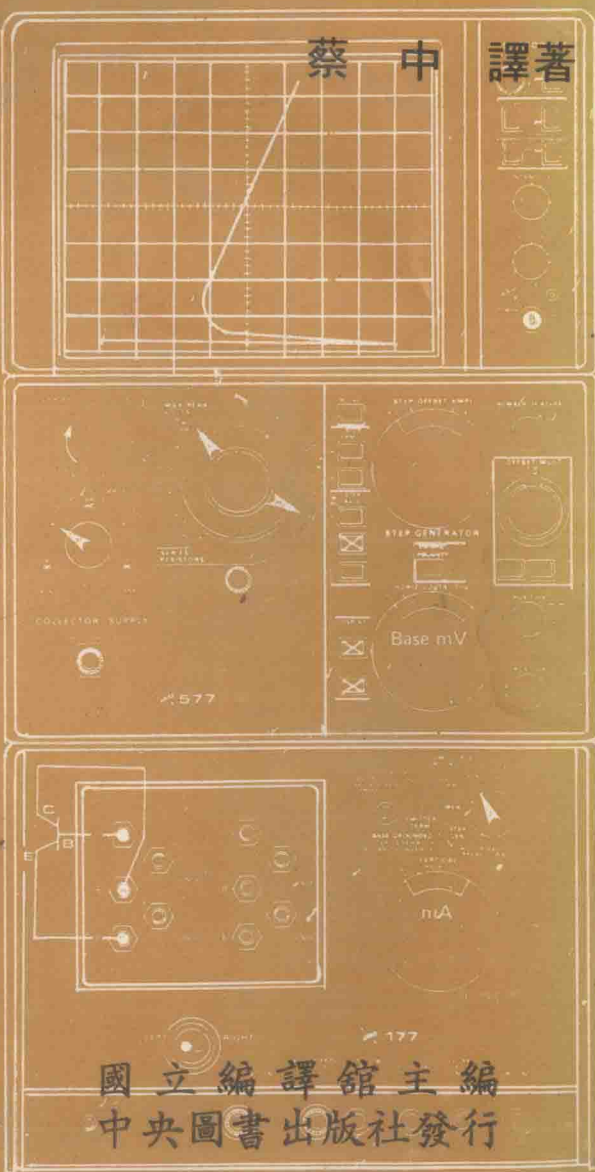


# 雙極電晶體之模式

Modelling  
The  
Bipolar  
Transistor

蔡中譯著



國立編譯館主編  
中央圖書出版社發行

# 雙極電晶體之模式

蔡 中 譯著

江苏工业学院图书馆  
藏 书 章

國立編譯館主編  
中央圖書出版社發行

行政院新聞局出版事業登記證，  
局版台業字第〇九二〇號

國立編譯館主編

雙極電晶體之模式

版權所有・翻印必究

實價新台幣壹佰貳拾元整

原著者：Ian Getreu

譯著者：蔡

出版者：中

央圖書出版社  
台北市重慶南路一段一四一號

發行人：林

發行所：中

央圖書供應社  
台北市重慶南路一段一四一號

電話：三三一五七二六

郵政劃撥帳戶：三七一九八九三

印刷所：利康印刷有限公司

三重市民生東街廿六之一號

中華民國七十一年十一月初版

編號：2803

# 目 錄

## 第一部分 緒 言

|                   |   |
|-------------------|---|
| 計算機輔助設計的價值·····   | 1 |
| 本書的目的·····        | 2 |
| 本書的結構·····        | 2 |
| 本書的符號·····        | 3 |
| 輸入參數與模式參數·····    | 3 |
| 由元件物理特性決定的模式····· | 5 |
| 模式記號·····         | 5 |
| 模式的選用?·····       | 6 |

## 第二部分 模式的理論推導

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 2-1 前 言·····                      | 7  |
| 2-2 $EM_1$ 模式·····                | 7  |
| 2-2-1 注入型·····                    | 9  |
| 2-2-2 傳渡型·····                    | 12 |
| 2-2-3 另一可選之型式——非線性混合 $\pi$ 型····· | 14 |
| 2-2-4 溫度的影響·····                  | 16 |
| 2-2-5 摘要與另外的說明·····               | 17 |
| 2-3 $EM_2$ 模式·····                | 18 |
| 2-3-1 改良的直流特性·····                | 18 |
| A. $r'_c$ ·····                   | 20 |
| B. $r'_e$ ·····                   | 21 |
| C. $r'_b$ ·····                   | 22 |

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| 2-3-2 電荷儲存效應                                  | 23 |
| A. 接面電容器                                      | 23 |
| B. 擴散電容器                                      | 26 |
| C. 基底電容器                                      | 30 |
| 2-3-3 小信號(線性化之) $EM_2$ 模式                     | 31 |
| 2-3-4 摘 要                                     | 32 |
| 2-4 $EM_3$ 模式                                 | 33 |
| 2-4-1 在固定溫度時所改良的直流模式                          | 34 |
| A. 基極寬度調制                                     | 34 |
| B. $\beta_{dc}$ 與電流的變化                        | 38 |
| (一) 區域二：中間電流                                  | 39 |
| (二) 區域一：低電流                                   | 40 |
| (三) 區域三：大電流                                   | 44 |
| (四) 全部：區域一，二與三                                | 44 |
| (五) 歐米電阻的影響                                   | 45 |
| (六) 在 SLIC 與 SINC 程式中 $\beta_F$ 對 $I_C$ 的輸入參數 | 45 |
| (七) $\beta_{FAC}$ 與它對電流的變化                    | 48 |
| 2-4-2 定溫時的一個改良的空間電荷模式                         | 48 |
| A. 改良的 $C_{JC} - r'_b$ 模式                     | 48 |
| B. $\tau_F$ 對電流的變化                            | 48 |
| 2-4-3 可與工作溫度變化的改良                             | 50 |
| A. 物性為基礎的溫度變化                                 | 51 |
| (一) $\tau_F$                                  | 51 |
| (二) $C_{JC}$ 與 $C_{JE}$                       | 52 |
| B. 需要額外輸入參數的溫度有關參數                            | 52 |
| 2-4-4 小信號(線性化)的 $EM_3$ 模式                     | 53 |
| 2-4-5 摘要與結論                                   | 53 |
| 2-5 GP 模式                                     | 54 |
| 2-5-1 前 言                                     | 54 |
| 2-5-2 $I_s$ 的物理的定義                            | 58 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| $Q_B$ 的觀念 .....         | 64 |
| 2-5-3 $Q_B$ 之諸成份 .....  | 65 |
| A. $Q_B$ 成份的數學推導 .....  | 66 |
| B. $Q_B$ 成份的物理意義 .....  | 68 |
| (一) $Q_{B0}$ .....      | 68 |
| (二) $Q_E$ .....         | 68 |
| (三) $Q_C$ .....         | 69 |
| (四) $Q_F$ .....         | 70 |
| (五) $Q_R$ .....         | 70 |
| (六) 工作區的影響 .....        | 70 |
| (七) 摘要 .....            | 71 |
| 2-5-4 求 $q_b$ 的值 .....  | 72 |
| A. 成份 $q_e$ .....       | 72 |
| B. 成份 $q_o$ .....       | 75 |
| C. 成份 $q_f$ .....       | 77 |
| D. 成份 $q_r$ .....       | 78 |
| E. 近似空乏法的影響 .....       | 78 |
| (一) $Q_B$ .....         | 79 |
| (二) $I_{ss}$ .....      | 79 |
| (三) $Q_E$ , $Q_C$ ..... | 79 |
| (四) $Q_F$ , $Q_R$ ..... | 79 |
| F. $q_b$ 的解 .....       | 82 |
| G. 高階注入時的解 .....        | 83 |
| (一) 高電流解之證實 .....       | 83 |
| (二) $q_2$ 的簡化 .....     | 84 |
| H. 最後之分解 .....          | 86 |
| I. 與岡蒙與朋之推導的比較 .....    | 86 |
| 2-5-5 基極變寬效應 .....      | 87 |
| A. 直流特性 .....           | 89 |
| B. 交流特性 .....           | 89 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| (一) 基極變寬對 $\tau_B$ 的影響      | 89  |
| (二) 射極遲緩( $\tau_1$ )對 $I_C$ | 91  |
| (三) $\tau_F$ 對 $I_C$        | 92  |
| 2-5-6 GP 模式與 $EM_3$ 模式的比較   | 93  |
| A. 基極寬度調制                   | 93  |
| B. 高階注入                     | 94  |
| C. $\beta$ 對 $I$            | 95  |
| D. $\tau_F$ 對 $I_C$         | 97  |
| 2-5-7 小信號(線性化)GP 模式         | 97  |
| 2-5-8 摘 要                   | 97  |
| A. 直流模式                     | 97  |
| B. 電荷儲存模式                   | 98  |
| C. 溫度變化的模擬                  | 98  |
| 2-6 模式的限制                   | 99  |
| A. 參方向的效應                   | 99  |
| B. 崩 潰                      | 100 |
| C. 飽 和                      | 100 |

### 第三部分 參數測試

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 3-1 前 言             | 103 |
| 3-2 $EM_1$ 模式參數的測試  | 104 |
| $\beta_F$           | 105 |
| $\beta_R$           | 107 |
| $I_S$               | 108 |
| $T_{nom}$           | 111 |
| $E_g$               | 112 |
| 3-3 $EM_2$ 模式參數的測試  | 113 |
| $r'_e$              | 114 |
| $r'_e$              | 118 |
| A. 兩個 $r'_e$ 的界限值定義 | 118 |

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| B. $r'_{c_{normal}}$ 與 $r'_{c_{sat}}$ 的測試                                                                                          | 119 |
| $r'_b$                                                                                                                             | 124 |
| A. 前 言                                                                                                                             | 124 |
| B. $r'_b$ 測試技術的比較                                                                                                                  | 124 |
| C. 小信號的測試                                                                                                                          | 125 |
| D. 脈衝測試法                                                                                                                           | 129 |
| E. 雜訊測試法                                                                                                                           | 134 |
| $C_{Jo}$ , $\phi$ 與 $m$                                                                                                            | 135 |
| $\tau_F$ (或在 $I_C$ , $V_{CE}$ 之 $f_T$ )                                                                                            | 139 |
| A. 由 $f_T$ 求 $\tau_F$                                                                                                              | 140 |
| B. 測 $f_T$                                                                                                                         | 142 |
| $\tau_R$ (或 $\tau_{SAT}$ )                                                                                                         | 145 |
| $C_{SUB}$ 或 $C_{CS}$                                                                                                               | 148 |
| 3-4 $EM_3$ 模式參數的測試                                                                                                                 | 149 |
| $V_A$                                                                                                                              | 150 |
| $\beta_{FM}$ , $C_2$ , $n_{EL}$ , 與 $\theta$ (或 $\beta_{FMAX}$ , $I_{CMAX}$ , $\beta_{FLOW}$ ,<br>$I_{CLOW}$ , $BCEC$ 與 $V_{CE}$ ) | 155 |
| $\beta_{RM}$ , $C_4$ , $n_{EL}$ 與 $\theta_R$                                                                                       | 165 |
| RATIO                                                                                                                              | 166 |
| $L_E/W$ , $I_{Co}$                                                                                                                 | 167 |
| $TC_1$ , $TC_2$                                                                                                                    | 169 |
| 3-5 $GP$ 模式參數的測試                                                                                                                   | 170 |
| $I_{SS}$                                                                                                                           | 171 |
| $V_B$                                                                                                                              | 172 |
| $I_K$                                                                                                                              | 177 |
| $I_{KR}$                                                                                                                           | 179 |
| B                                                                                                                                  | 180 |
| 附錄1 傳渡型之表示法與注入型之表示法的比較                                                                                                             | 183 |
| 附錄2 $EM_3$ 模式基極寬度調制之分析                                                                                                             | 186 |

|      |                                   |     |
|------|-----------------------------------|-----|
| 附錄 3 | 推導在 GP 模式內 $Q_B$ 之五個成份·····       | 192 |
| 附錄 4 | $EM_3$ 與 GP 對基極寬度調制之模擬的準確性·····   | 195 |
| 附錄 5 | $EM_3$ 與 GP 之小信號線性模式·····         | 200 |
| 附錄 6 | SLIC, SINC 與 SPICE 之輸入參數的相互參照表··· | 207 |
| 參考文獻 | ·····                             | 215 |
| 索 引  | ·····                             | 223 |

# 第一部份

## 緒 言

### 計算機輔助設計的價值

這幾乎已成了一種習慣，每當提到用計算機作為一種工具來設計電路時，不管它是設計積體的（Integrated）或分立的（Discrete），都要對它發展迅速的原因加以說明。雖然計算機經常只被想成一種便宜而快速的工具，然而事實上，計算機輔助設計（Computer Aided Design，或簡稱CAD）尚能使電路設計者獲得無法從其他技術取得的資料。使用計算機的人，他還能：

- 觀察電路上各個電壓與電流的波形及頻率反應而不會像用實際電路來觀察時探針會加載電路。
- 預測積體電路在高頻率時之性能而不會加進電路板的寄生（Parasitics）元素的影響。
- 選用理想的元件，諸如有無窮大的頻寬（Bandwidth）或非常大的增益（Gain），來隔離各種元件參數對電路性能上的影響，或做將來“產品合格保證”的分析。
- 對一個電路加一理想的波形，諸如快速的脈衝或一脈衝與弦波的混合波等。
- 去掉電路上的直流部分來了解此電路的基本部分。
- 取開電路的回饋環路而不妨礙直流層階。
- 甚至對複雜電路也能求出它的轉移函數的極位（Poles）與零位（Zeros）。
- 做雜訊（Noise），敏感性（Sensitivity），最壞狀況（Worst case）與統計（Statistics）方面的分析。

## 本書的目的

現在的電路設計者有許多計算機程式可作許多各式各樣的分析。然而，不同的程式有不同的輸入格式（Input Format），不同的法則，不同的符號，與不同的元件模式（Device Model）可使沒有經驗的使用者感到非常困惑與氣餒。好在程式的輸入格式與法則通常都有完美的文件記錄，所以如有錯誤的話，比較起來還是容易經由計算機，程式，或使用者檢視出來。因此，最大的困難乃是對那些符號與元件的模式缺乏統一的標準，對所使用的元件模式與模式參數（Model Parameter）的測定也缺乏一致。

本書的目的是想以有系統地描述，如何來模擬一個雙極接面電晶體（Bipolar Junction Transistor 或簡稱BJT），減少有關模式上的困惑。因為許多模式上的問題均在於有關非線性的直流與暫態（Transient）的分析，所以本書的重點是敘述對此要用的非線性大信號的模式。其線性模式，是一種大家所熟知的混合 $\pi$ 型模式（Hybrid- $\pi$  Model）。所以簡單的說就是提出一個非線性模式的線性型態而已。線性模式已經是相當完美地被整理了，也很容易使用。本書僅談其從非線性模式轉化到線性的過程。

## 本書的結構

本書以已經確立的模式加上雙極接面電晶體模式最近的發展，照這樣的方法，即使不是全部分，讀者也能使用大部分目前可用的電路分析程式。為了達到這個目的，本書含蓋了模式的兩面：

其一是對那些模擬的效應以元件的物理性質來解釋。這將在本書的第二部分說明。這可使讀者對模式的假設（Assumptions）與限制（Limitations）有所了解，並有能力處理他所使用的各種不同的符號。其敘述是最簡單的模式開始而逐步達到最複雜的模式。

另一是對模式參數的測定。在第三部分內將包含那些從端點測試

(Terminal measurements)來求得這些參數的方法。

## 本書的符號

模式參數與它們的符號是以 SLIC<sup>(1)</sup> (到第 I 版), SINC<sup>(2)</sup> (到第 D 版) 與 SPICE<sup>(3)</sup> (第一版) 等三個計算機程式為藍本。這三個程式都可從加州大學柏可雷校區獲得\*。本書之所以選用這些程式來作詳細的說明,是因為:(甲)它們的電晶體模式包容了從最簡單到最複雜的全部範圍,(乙)這些模式大都以元件的物理現象構成而導出簡明的資料輸入要求,(丙)這些程式已經相當廣泛地被使用著,與(丁)可以容易獲得它們。

用這些程式為例並未限制了本書的適用性。事實上,所將敘述的參數可輕易地轉成其他程式所用的模式,如那些基於伊柏斯-摩爾模式 (Ebers-Moll model) (用於直流與大信號,非線性的場合),或混合  $\pi$  型模式<sup>(5)</sup> (用於小信號,線性的場合),或使用者所自定的。在本書末 (附錄 6) 列出了 SLIC, SINC, 與 SPICE 等的模式參數表可資相互參考之用。

## 輸入參數與模式參數

為了完全地描述一個電晶體的模式起見,一個程式需有三種資料:基本常數,工作點條件 (Operating conditions), 與模式參數。其中只有最後一種是由使用者加入的。

**基本物理常數**, 諸如波茲曼常數 (Boltzmann's constant 以  $k$  表示) 與電子電荷 (以  $q$  表示), 一般都在程式中定好的。**工作點條**

---

\*這些程式只要付些微的處理費用就可從匹得遜教授 (Professor D.O. Pederson, Electronic Research Laboratory, University of California at Berkeley, California, 94720, U.S.A.) 處購得。這三個程式 (SLIC, SINC, 與 SPICE) 是對 CDC 6000 系列的計算機以 FORTRAN IV 寫成的。至於這些程式對其他計算機的版本亦可從其他機構處尋得。

件是用來說明模式方程式是在什麼狀況之下使用。例如在節點分析程式 (Nodal analysis program) 裏，工作點條件就是電晶體的偏壓，像基射極電壓  $V_{BE}$  與基集極電壓  $V_{BC}$  是。可是這些偏壓值是由計算機在重覆運算求解時定出的。那就是說，程式本身先假設一組偏壓值聯解相關的方程式，再定出新的一組更好的數值，如此重覆直至收斂到一適當的解為止。這全在計算機內部完成的。在本書中，它不但假定其工作點之條件包含偏壓  $V_{BE}$  和  $V_{BC}$ ，它還規定在作分析時的溫度  $T$ 。通常  $T$  的數值可由使用者輸入以便計算。

第三種所需的資訊是對電路上每一個不同元件的全部**模式參數**。

這些模式參數的意義與如何測定是本書的內容。 $\beta_F (= \frac{I_C}{I_B}$  在正常的活動區內) 和  $\tau_F$  (在正常的活動區內之穿過時間的總值) 為模式參數的二個例子。所有模式參數數值都應由使用者以程式所預定的方式供給。但有些程式很有彈性而讓某些模式參數可間接指定。例如， $\tau_F$  是常由測量增益為 1 頻帶寬 (Unity gain bandwidth)  $f_T$  而求得。故在程式 SLIC 與 SINC 中，使用者可選擇供給在某偏壓下之  $\tau_F$  值或  $f_T$  值。以後將會說明如  $f_T$  值被指定，則其程式會自動地求  $\tau_F$  值，並算及接面電容 (Junction capacitance)，基極寬度調制 (Basewidth modulation) 和集極電阻等的影響。但要注意的是此時  $\tau_F$  是模式參數而  $f_T$  則是輸入參數了。所以**模式參數**與程式的**輸入參數** (Input parameter) 必需有所區別。圖 1-1 顯示這兩個參數的區別。模式參數是按

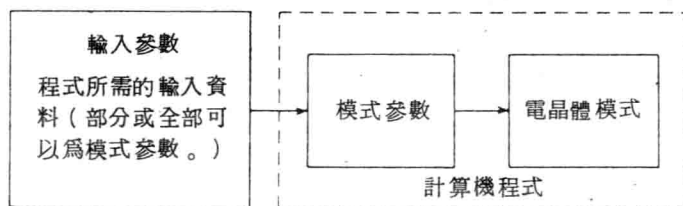


圖 1-1 輸入參數與模式參數之間的區別

照已定工作點條件下描述元件的模式方程式 (Model equation) 中所使用的那些參數。而輸入參數是那些爲其程式指明模式參數所需要的資料。輸入參數的部分或全部可能爲模式參數端視其程式而定。

雖然，模式參數與輸入參數之間的正式區別起初好像有點多餘似的，但事實上它是很重要的。它表明了事物的先後性。如前例所述， $\tau_F$  是個模式參數。但如  $\tau_F$  可以直接測得（不經由  $f_T$ ），則根本無需測  $f_T$  了。 $f_T$  之所以需要測定，只因爲它可以求得  $\tau_F$  值。

## 由元件物理特性決定的模式

一般來說，由元件物理特性爲基礎所得之模式容許有較少的輸入與模式參數而更能徹底理解。例如，某些程式需要輸入一整表的數值來說明  $\beta_F$  與集極電流間的關係。但本書以物理特性所求得的模式只要四個模式參數就能表明  $\beta_F$  與  $I_C$  間的全部關係。並且，在求得這四個參數的過程中，也能清楚地了解  $\beta_F$  隨  $I_C$  變化的種種原因。爲了這些理由，本書中模式的發展著重於元件物理性的了解。

## 模式記號

非線性的諸模式是伊柏斯 - 摩爾模式爲基礎。而最原始的伊柏斯 - 摩爾模式<sup>(4)</sup>已被許多人修正而包含了儲如電荷儲存 (Charge storage),  $\beta$  與電流的變化，基極寬度調制等效應。其結果對所謂的“改良型伊柏斯 - 摩爾模式”有許多解釋。在此處所使用的諸改良型有三個複雜的層階。模式用的記號（首先由匹得遜<sup>(6)</sup>提出）如下：

EM<sub>1</sub> 是原始的伊柏斯 - 摩爾模式<sup>(4)</sup>，它是一種非線性直流模式。

EM<sub>2</sub> 是次一層階者。以 EM<sub>1</sub> 作爲基礎，再加上電荷儲存效應及歐米電阻 (Ohmic resistance) 等非線性之第一級模式 (Firstorder model)。

EM<sub>3</sub> 是第三層階者。它包含第二級現象 (Second - order effect) 諸如基極寬度調制， $\beta$  與  $\tau_F$  隨電流的變化，集基極

分佈接面電容與溫度關係的更好表示法。

GP 是用於 SPICE 程式<sup>(3)</sup>內之岡蒙 - 朋模式 (Gummel-poon model)。它與岡蒙與朋<sup>(7)</sup>所提出之電荷控制模式不同，主要是在所需要的模式參數與沒有基極推離模擬 (Base push-out modeling)。至於從  $EM_3$  與 GP 模式所模擬的種種效應上看，它們在基本上是相同的。

還沒有一個計算機程式用這種術語來指定模式，這裏用它們只是爲了方便。例如，某一程式或可容許使用者從  $EM_1$  用一些參數，從  $EM_2$  用一些，再從  $EM_3$  用一些。在所有的柏克雷程式中，如使用者沒有指明某些參數數值時，程式都有一個欠缺值 (Default value) 替代。如不指明任何參數值時，程式就以  $EM_1$  模式來計算。例如電容參數沒有指明，則因爲  $EM_1$  模式只是個直流模式，所以它們的欠缺值都是零。

## 模式的選用?

選用可達成任務之最簡單的模式。因這樣可省下模擬的複雜性與計算機的時間，並且結果也較容易了解。例如，一個電晶體如爲電流饋入的話，則外界基極電阻就不重要而不必費力去決定它的值。

現摘要不同模式的用處如下：

$EM_1$  模式：這個模式對第一級直流分析非常有用。

$EM_2$  模式：對大多數的應用（特別在數位電路上） $EM_2$  模式在準確，容易模擬，速度，與可瞭解的結果之間代表一個好的模式<sup>(8)</sup>；它也是最常被使用的。

$EM_3$  與 GP 模式：當需要額外的準確時才應用這些模式來求。

# 第二部份

## 模式的理論推導

### 2-1 前 言

本部分對雙極接面電晶體模式提供一個有系統而理論的推導，其結構如下：

2-2節  $EM_1$  模式

2-3節  $EM_2$  模式

2-4節  $EM_3$  模式

2-5節 G P 模式

2-6節 各模式的限制

在模式的推導中，其重點是放在了解要作模式的效應，並解釋所需的參數。關於測定這些參數的技術則在第三部分內敘述。

### 2-2 $EM_1$ 模式

$EM_1$  模式在基本上就是伊柏斯-摩爾在1954年所提出的那個簡單而非線性的模式<sup>(4)</sup>。它是一個直流模式 (DC model)，其中在元件內沒有電荷儲存的特性。伊柏斯-摩爾模式在所有的工作區內都管用，即：飽和區 (Saturation)，反向區 (Inverse)，正常區 (Normal)，與截止區 (Off)。這四個區是按照接面上的偏壓值的正負而定出的，如圖 2-1所示。本節中  $EM_1$  模式的模式參數為  $\beta_F$ ,  $\beta_R$ ,  $I_S$ ,  $T_{nom}$ ，與  $E_g$ 。它們都將在下面予以說明。

事實上，全部直流與大信號非線性模式都是以  $EM_1$  模式為基本的。但目前却有二個為大家所喜愛的  $EM_1$  模式型態，即注入型 (Injec-

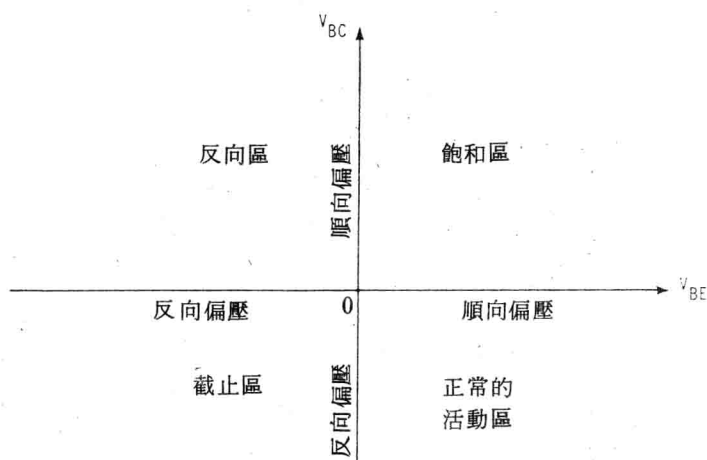
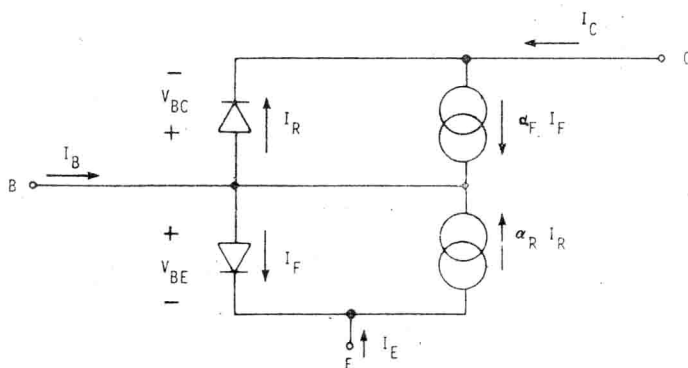


圖 2-1 雙極電晶體的四個工作區

tion version) 與傳渡型 (Transport version)。這二個型態以 npn 電晶體 (nnp Transistor) 繪於圖 2-2，它們在數學式上是同樣的。似乎顯不出來為什麼要費時或費力去說明這二個型態之間有什麼不同，亦看不出來為什麼其中一個要比另一個有用的原因。這些原因

圖 2-2a.  $EM_1$  模式之注入型