

電晶體特性

一、目的：

描繪電晶體的特性曲線，藉此熟悉電晶體的特性。

二、原理：

(一)電晶體：

前面說過把正型半導體和負型半導體做成正負接合面就形成一個有整流作用的二極體。(圖 1 (a))。現在若再接上另一塊半導體就變成有兩個正負接面的三極體，也就是平常所稱的電晶體了。

兩塊正型半導體和一塊負型半導體形成的電晶體稱為 p-n-p 型電晶體(圖 1 (b))，兩塊負型半導體和一塊正型半導體形成的電晶體稱為 n-p-n 型電晶體(圖 1 (c))。電晶體有很多種製造方式，但絕不是把三塊半導體接在一起做成的，上面的說法只是取其觀念上較易接受而已。

三塊半導體中，中間的一塊稱為「基極」(Base，以 B 表示)兩旁兩塊中發射載子的稱為「射極」(Emitter，以 E 表示)，收集載子的稱為「集極」(Collector，以 C 表示)。在正常工作狀況下，p-n-p 型電晶體發射和收集的載子主要是正型的電洞，n-p-n 型則是負型的電子。

圖 2 是電晶體的符號，中間為基極，兩邊為射極和集極，其中有箭頭的為射極，無箭頭的為集極。箭頭的方向指示電流的方向，p-n-p 型電晶體射極發射的是電洞，電洞流方向和電流方向相同，故箭頭方向為進入電晶體。n-p-n 型電晶體射極發射的是電子，電子流的方向和電流方向相反，故箭頭的方向為離開電晶體。

若用電表去量電阻，電晶體相當於兩個二極體「頭碰頭」或「背靠背」串聯起來(參看圖 3)。EB 之間是一個二極體，BC 之間也是一個二極體。從導通的方向可以決定三個接腳中何者接正型何者接負型，因此很容易分辨出 p-n-p 和 n-p-n 電晶體。CE 之間兩個方向的電阻都很大，從這點，很容易找出 C 和 E 極，剩下的一個就是 B 極。不過還無法確定何者為 E，何者為 C，此點待以後說明。

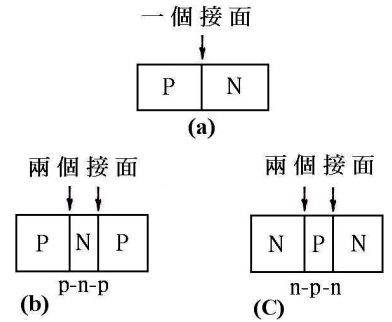


圖 1 (a)二極體 (b)p-n-p 型電晶體 (c)n-p-n 型電晶體。

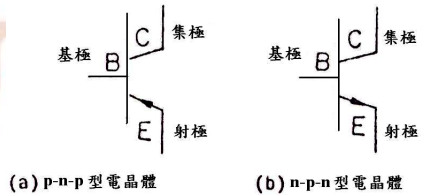


圖 2

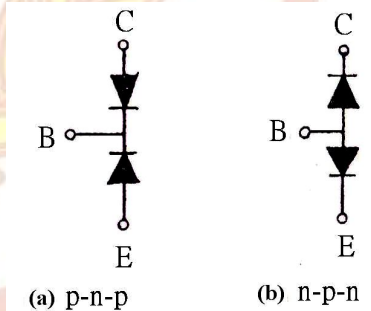


圖 3

圖 4 表示三種外型的電晶體，接腳有一定位置，但其它外型的電晶體接腳的位置頗不一定，要慎防弄錯。

(二)電晶體的放大作用：

為了方便起見，我們以 n-p-n 型電晶體為例。先看未加偏壓時的情形。三塊半導體的電子電洞會越過界面而互相中和，直到空乏區的電場大到足以阻止電荷的流通。此時三塊半導體之間達到平衡，它們的化學勢相同，因此 B 極的位能較高，成為 E 極的電子的位能障礙(參看圖 5)。

E 極和 B 極之間相當於一個二極體，由前面的實驗知道，只要在其間加一個很小的順向偏壓就有很多電子，其能量足以克服這個位能障礙而進入 B 極。通常 B 極做成極薄的一層，電子在裡面的時間很短，因此，跟電洞中和掉的比例很少。它們絕大多數被 B 極和 C 極界面及附近的電場吸引進入 C 極。B 極和 C 極間的偏壓通常跟電流大小的關係很小，除非被順向偏壓，以致降低收集的效率。在圖 6 中，我們把電子流畫出來，更容易看出上面所說的現象。由 E 極射出的電子流進入 B 極後，只有小部分為電洞所中和，大部分安全到達 C 極。在 B 極被電洞中和掉的電子流增加了 B 極的負電荷，因此有等量的電子流從 B 極流出。

我們以 I_E 表流入 E 極的電子流，以 I_C 表流出 C 極的電子流以 I_B 表流出 B 極的電子流。在正常工作狀況下， I_E 、 I_C 和 I_B 之間大約維持一個比值，當然這個比值每個電晶體不同，而且和溫度、電流、電壓都有關係。如果 $I_C \doteq \alpha I_E$ (α 是極接近 1 的值)，則 $I_B \doteq (1 - \alpha) I_E$ ，因此 $I_C \doteq \alpha I_B / (1 - \alpha)$ 。我們定義 $\beta \doteq \alpha / (1 - \alpha)$ ，則 $I_C \doteq \beta I_B$ 。通常 α 的值約在 0.95 ~ 0.99 之間，因此 β 在 20、100 之間。因為 α 微小的變化就會造成 β 很大的變化，縱使同一編號的電晶體，其 β 值也不會一致。

因為 $I_C \doteq \beta I_B$ ，而 β 在 20~100 之間，可見我們只要控制小電流 I_B 就可以轉而控制數十倍的大電流 I_C ，只要使 I_B 做微小的變化就可以使 I_C 做數十倍的變化，因此電晶體可以有電流放大作用。

前面說過 E 極和 B 極相當於一個二極體，只要加

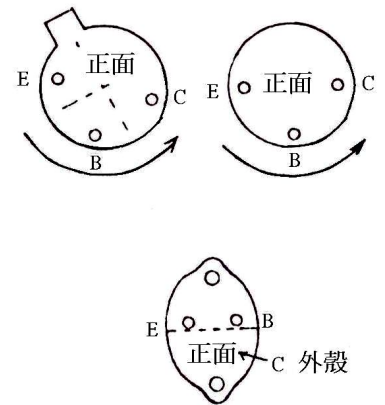


圖 4

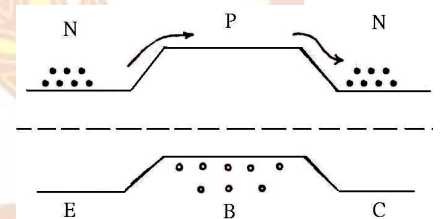


圖 5

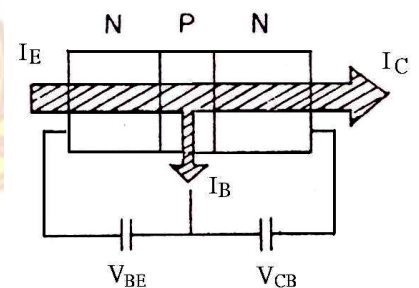


圖 6

一個小的偏壓 V_{BE} ，就可以造成一個很大的電流 I_E 。也就是，只要使 V_{BE} 做微小的變化，就可以使 I_E 做很大的變化。E 極電流 I_E 絕大部分安全抵達 C 極，從 C 極流出。我們可以在 C 極串聯一個電阻使 I_C 流過而造成電壓。既然 C 極和 B 極之間的電壓 V_{CE} ，對電流 I_C 影響極小，我們可以用相當大的電阻得到很大的電壓而不影響 C 極電流 I_C 。可見，我們只要使 V_{BE} 做微小的變化就可以造成電阻上電壓很大的變化。因此，電晶體可以有電壓放大作用。

既然電晶體可以放大電壓和電流，它當然可以放大功率。圖 7 是一個簡單的電晶體放大器，小寫的電壓 v_i 和 v_o 代表變動的量，也就是交流成份，不包括穩定的直流偏壓。小寫的電流為 i_b ， i_c 也是如此。現在，我們來大約估計這個放大器的放大率。

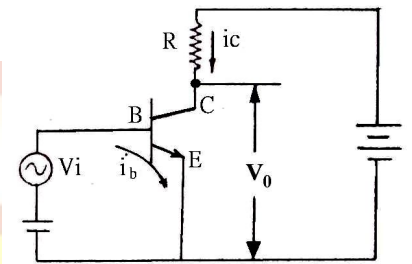


圖 7

$$\text{電流放大率： } A_i \equiv \frac{i_c}{i_b} \doteq \beta (20 \sim 100)$$

$$\text{電壓放大率： } A_v \equiv \frac{v_o}{v_i}$$

必須先估計 B 極和 E 極之間的等效電阻。二極體的電阻為

$$\gamma \doteq \frac{26\eta \text{ mV}}{I}$$

現在， $I = I_E \doteq \beta I_B$ ，由於從 B 極看進去電流只約 $1/\beta$ ，故電阻為 β 倍，因此 B 極和 E 極之間的等效電阻為

$$\gamma_i \doteq \beta \gamma = \frac{26\eta \text{ mV}}{I_B}$$

因此電壓放大率

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} \doteq \frac{i_c R}{i_b \gamma_i} \doteq \frac{\beta R}{\gamma_i}$$

功率放大率

$$A_p = A_i A_v = \frac{\beta^2 R}{\gamma_i}$$

如果 $\beta \doteq 50$ ， $\gamma_i \doteq 5\text{k}\Omega$ ， $R = 10\text{k}\Omega$ ，則

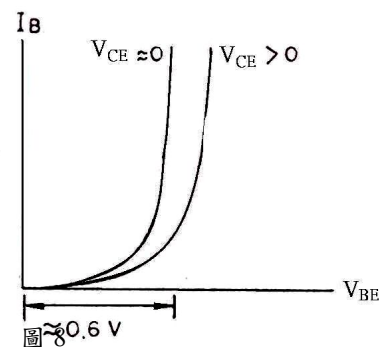
$$A_i \doteq 50； A_v \doteq 100； A_p \doteq 5,000$$

當然，實際運用的電路因為各種考慮，很少到達這樣大的放大率。

(三)輸入特性曲線：

在前面簡單的放大器電路中，我們把要放大的信號從 B 極和 E 極之間輸入，把放大後的信號從 C 極和 E 極之間取出。因此 I_B-V_{BE} 關係曲線稱為輸入特性曲線， I_C-V_{CE} 關係曲線稱為輸出特性曲線。

電晶體 B 極和 E 極之間相當於一個二極體，因此 I_B, V_{BE} 的關係曲線類似二極體特性曲線。在 $V_{BE} > 0$ 時，因射極的電流 I_E 絕大部份到達 C 極，只有一個極小比例從 B 極流出，而這個比例和 V_{CE} 關係不大，因此這條曲線和 V_{CE} 的關係不大，當 $V_{CE} \approx 0$ 時，C 極和 E 極被順向偏壓，收集載子效率不良，有較大的比例從 B 極流出，故 I_B 較大。



(四)輸出特性曲線：

前面說過， I_C 主要由 I_B 決定， V_{CE} 的影響很小，因此 I_C-V_{CE} 曲線是相當水平的。在正常工作狀況， I_C 和 I_B 有大約固定的比值，因此形成如圖 9 的一系列等距離平行線。但當 $V_{CE} \approx 0.2V$ 時，因為 C 極和 B 極之間順向偏壓，C 極收集載子的效率降低，故 I_C 減少。這個區域稱為「飽和區」。

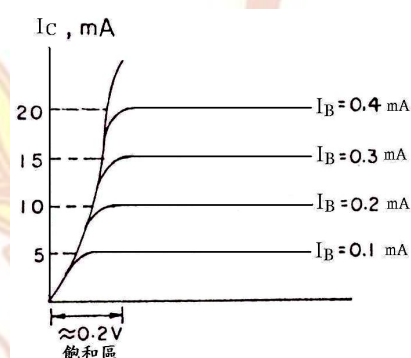


圖 9

(五)電晶體的測量：

1. 電晶體 E, B, C 三極的辨別：

前面已經講過如何辨別 p-n-p 型電晶體和 n-p-n 型電晶體，以及如何找出 B 極，但未說明如何辨別 E 極和 C 極。

電晶體可以倒過來使用，即 E 極和 C 極對調，但如此一來 β 值會大為降低，而且能忍受的電壓 (V_{CE}) 亦大為降低。由這點可以分辨 C 極和 E 極。

如圖 10 的例子，測 n-p-n 電晶體 CE 之間的電阻，將“+”接線接 C 極，“-”接線接 E 極。因無 I_B 電流， I_C 電流極小，故電阻很大。若以沾濕的手指頭搭在 C 極和 B 極上，則有電流流過手指而進入 B 極，形成 I_B 電流。因此， I_C 電流增加，電阻下降。由電阻的大小可以知道 β 的大小。如果 E 極和 C 極對調 β 值會降低，電阻會升高。測 p-n-p 電晶體時“+”接 E 極，“-”接 C 極。

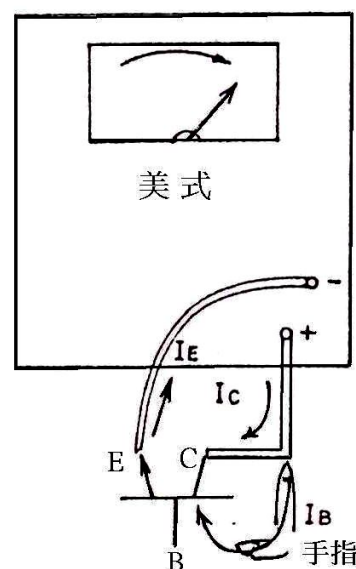


圖 10

2. 電晶體 β 值的測量：

實驗室中有幾個日式電表，有測電晶體 β 值的專用接線，如圖 11 所示。黑長線接 E 極，紅線接 C 極，黑短線接 B 極。黑短線經一個串聯電阻供給 I_B 電流，免去用手指的麻煩。由電阻值的大小可以知道 β 值的大小，表上有 β 值刻度可直接讀取。測過 β 值後不要忘了取下接 B 極的黑短線，如此一來 I_B 降為零， I_C 應接近零，這個微小電流稱為「漏電流」。矽質電晶體的滿電流為 nA 的數量級，鍺質電晶體的漏電流 μA 的數量級。如果漏電流大，表示品質不良或用壞了。

測 p-n-p 型電晶體時，要把黑長線移到“-”插孔，把紅線及黑短線移到“+”插孔。

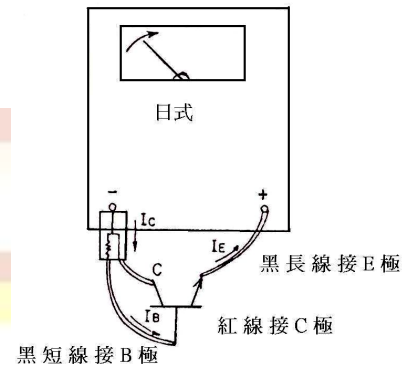


圖 11

3. 曲線描繪器：

電晶體曲線描繪器用來描繪電晶體的輸出特性曲線，當然也可以描繪輸入特性曲線。普通二極體和「場效電晶體」的特性曲線也可以用它來描繪。

我們用的簡單曲線描繪器，要把 V_{CE} 電壓和 I_C 經取樣電阻產生的電壓送入示波器，以 X-Y 操作方式顯示出來。一般的曲線描繪器則和示波器連成一體，操作較方便，但造價極高。電路的簡圖如圖 12 所示。

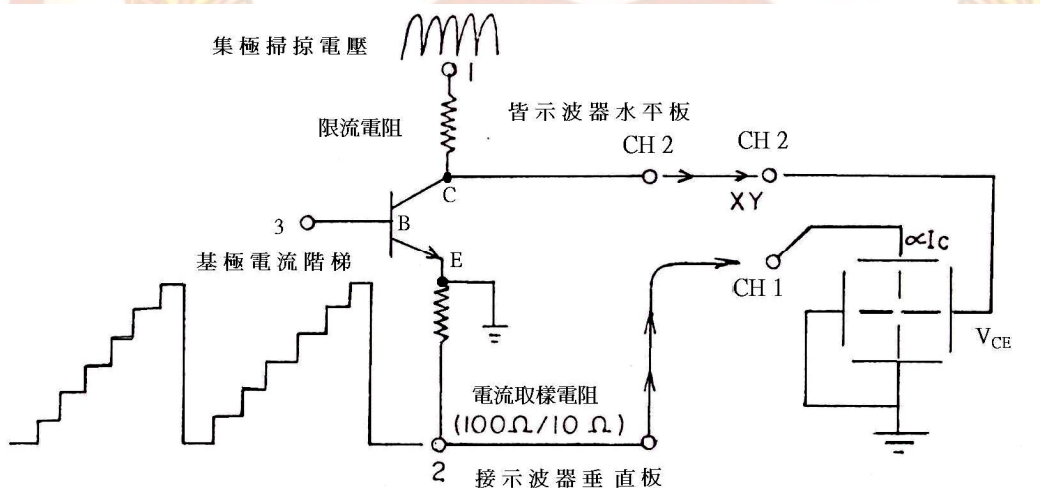


圖 12

集極掃掠電壓是由 60Hz 電源全波整流而成，故 V_{CE} 的頻率為 120Hz，電流由 1 點流入由 2 點流返。基極電流階梯由 3 點流入，由地線流返。基極電流階梯和集極掃掠電壓同步。譬如說： V_{CE} 第一次掃掠時， I_B 為零； V_{CE} 第二次掃掠時， I_B 突升為 0.1 mA； V_{CE} 第三次掃掠時， I_B 突升為 0.2 mA； V_{CE} 第八次掃掠時， I_B 突升為 0.7 mA； V_{CE} 第九次掃掠時， I_B 又回到零。如此週而復始的掃掠，每一次掃掠，得到一條 I_C - V_{CE} 關係曲線，基極電流階梯有八級，故共可得到 7~8 條 I_C - V_{CE} 關係曲線。集極掃掠電壓可以選擇，基極電流階梯的大小也可以選擇，但要注意 V_{CE} I_C 正比於電晶體產生的熱量，需時時注意電晶體是否過熱。

集極串聯了一個限流電阻，小電晶體時為 $1k\Omega$ ，大電晶體時為 100Ω ，以防 I_C 電流太大。 I_C 電流由它流過取樣電阻的電壓來測量，小電晶體時用 100Ω 之，大電晶體時用 10Ω 。取樣電阻的電壓輸入示波器 CH1 然後接到垂直偏向板，因此垂直方向正比於 I_C ，其每格代表電流可由每格的電壓除以取樣電阻得到。 V_{CE} 則輸到 CH2 然後接到水平偏向板。若 V_{CE} 電壓太高，圖形無法容納在示波器的屏內，可以調節 H-Length，如此只有 V_{CE} 的一部分輸入示波器。但要記住，加在電晶體的電壓並不因此改變。

若所測的電晶體為 p-n-p 型，集極掃掠電壓和基極電流梯階的方向必須相反，這可由 "POLARITY" 開關選擇。若所測的電晶體為「場效電晶體」它需要的集極掃掠電壓和一般電晶體相同，但基極電流梯階要改成「開極電壓梯階」，而且極性相反，這可由 "TRANS-FET" 開關選擇。

三、儀器：

示波器、電源供給器，信號產生器、波型產生器、三用電表、數字型三用電表。

四、步驟：

本實驗使用 100Ω 、 $1k\Omega$ 、 $10k\Omega$ 三個電阻，必須事先分辨清楚，不可用錯。

本實驗使用的電晶體 MJE340 是 n-p-n 型，其接腳的位置如圖 13。

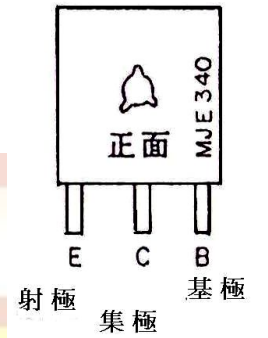


圖 13

(一) 以示波器觀測輸入特性曲線：

1. 接電路如圖 14。波形產生器串連 1N4007 二極體和 $1k\Omega$ ，然後接到電晶體的 B 極和 E 極。波形產生器的電壓改變時， V_{BE} 和 I_B 也隨著改變。 V_{BE} 輸入 CH2，然後接到水平偏向板。 I_B 經 $1k\Omega$ 產生的電壓經 CH1 接到垂直偏向板。故水平方向代表 V_{BE} ，垂直方向代表 I_B 。(每格代表的電流值等於每格代表的電壓值除以 $1k\Omega$)。 V_{CE} 電壓則由直流電源維持。
2. V_{CE} 定為 2V，描下示波器上的曲線，標出每格代表的電流，電壓值。
3. V_{CE} 降為 0V，同 2 描下其曲線，有何改變？

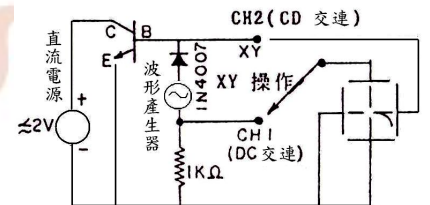


圖 14

(二) 以電表測量輸入特性曲線：

1. 接電路如圖 15， I_B 由直流電源經串聯的供應 $10k\Omega$ 。 I_B 的大小由 DMM 測量， V_{BE} 的大小可以由示波器測量。 V_{CE} 則由直流電源維持。
2. V_{CE} 定為 4V，改變 I_B 電源的電壓，使 I_B 改變。測出 I_B 為 0.2 mA、0.4 mA、0.6 mA、0.8 mA、1 mA 時對應的 V_{BE} 值。畫出 I_B - V_{BE} 關係曲線圖。
3. V_{CE} 降為 0V 及 2V，同步驟 2，畫出 I_B - V_{BE} 關係曲線圖。

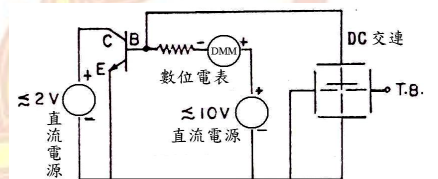


圖 15

(三) 以示波器觀測電晶體的輸出特性曲線：

1. 接電路如圖 16。 I_B 由直流電源經串聯的 $10k\Omega$ 電阻供應，其大小由 DMM 量出。波形產生器經串聯的二極體 1N4007 和 100Ω 接到 C 極和 E 極，當波形產生器的電壓改變時， V_{CE} 和 I_C 也隨著改變。 V_{CE} 輸入 CH2，然後接到水平偏向板， I_C 經 100Ω 電阻產生的電壓輸入 CH1，然後接到垂直偏向板。故示波器水平方向代表 V_{CE} ，垂直方向代表 I_C (每格代表的電流值可以由每格代表的

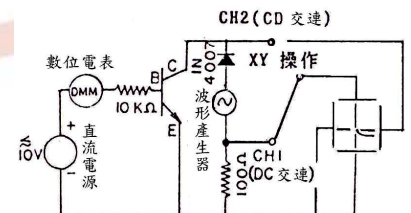


圖 16

電壓值除以 100Ω 得到)。

2. 調 I_B 的電源使 I_B 為 0.1 mA ，描下示波器上的曲線，並標出每格的電壓，電流值。

3. 調 I_B 的電源使 I_B 為 0.2 mA ， 0.3 mA ，重覆步驟 2，分別描下其 I_C - V_{CE} 關係曲線。

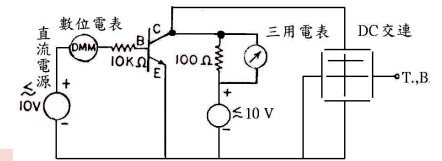


圖 18

(四)以電表描繪電晶體的輸出特性曲線：

1. 接電路如圖 17。 I_C 由直流電源經串聯的 100Ω 電阻供應。 I_C 經 100Ω 產生的電壓，可以用三用表量出，量出的電壓除以 100Ω 就是 I_C 值。 V_{CE} 可以由示波器上量出。
2. 調節 I_B 的電源，使 I_B 為 0.1 mA 。調節 I_C 的電源，使 V_{CE} 變化。量出 V_{CE} 為 0.2 V 、 0.4 V 、 0.6 V 、 1 V 、 2 V 、 5 V 時對應的 I_C 電流。畫出 I_C - V_{CE} 關係曲線圖。
3. 調節 I_B 的電源，使 I_B 為 0.2 mA 、 0.3 mA 重覆 2，分別畫出其 I_C - V_{CE} 關係曲線圖。

五、問題：

以電表量電晶體的電阻時，它相當於兩個「頭對頭」或「背靠背」的二極體串聯，但是兩個串聯的二極體絕對不具電晶體的特性，為什麼？

六、參考資料：

1. J. Millman & A. Grabel : Microelectronics, 2nd ed., (McGraw—Hill Book company), §3-1 ~ §3-5, p79 ~ p.100。
2. A. S. Sedra & K, C. Smith : Microelectronic Circuits, 2nd ed., (HRW Inc.), § 8-5, p.411 ~ p.414。