數位積體電子學

（習題解答）

朱志華
許清水 編譯

全華科技圖書公司印行

數位積體電子學

(習題解答)

朱志華
許清水　編譯

全華科技圖書公司印行

數位積體電子學
（習題解答）

朱志華
許清水　編譯

出版者　全華科技圖書股份有限公司
北市龍江路76巷20 2號
電話：581-1300・541-5342
581-1362・581-1347
郵撥帳號 1 0 0 8 3 6
發行者　陳　木　源
印刷者　燕南彩色印刷廠
定　價　新臺幣 **120** 元
再　版　中華民國72年7月

感謝您
全華

感謝您選購全華圖書！

希望本書能滿足您求知的慾望！

圖書之可貴在其量也在其質

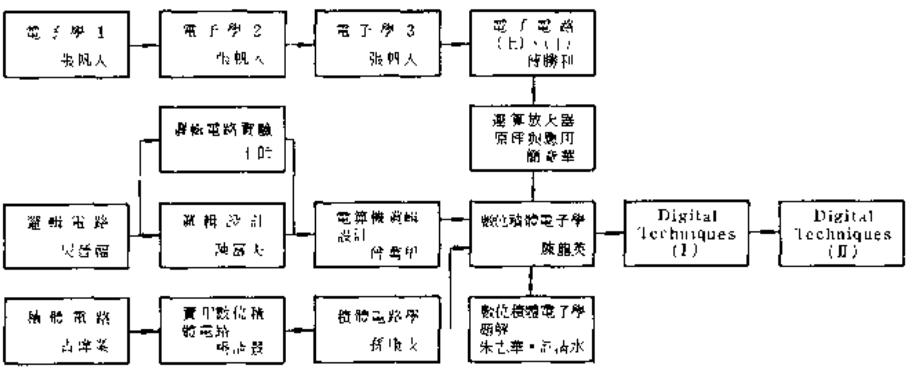
量指圖書內容充實、質指資料新穎夠水準，我們就是本著這個原則，竭心盡力地為國家科學文化努力，貢獻給您這一本全是精華的全華圖書。

編輯部序

「系統編輯」是我們的編輯方針，我們所提供給您的絕不只是一本書，而是關於這門學問由淺入深、循序漸進的最新知識。

現在，我們將這本「數位積體電子學題解」呈獻給您，使您能由本書而將「數位積體電子學」的精華完全消化、吸收。本書為作者經由潦草的原文題解精心翻譯出來。原書錯處，已經由作者一一修正。相信在您研讀過本書的400多個習題後，必然能對數位電路方面的一般練習會更加熟練，也更能應付需要技巧性的設計問題。

同時，為了使您能有系統且循序漸進研習有關數位積體電子系統叢書，我們將全華的一整套關於數位積體電子學系列叢書以流程圖方式列於後，只要您按照順序詳加閱讀，除可減少您摸索時間外，更可使您具備完整的數位電子方面的知識，希望您能善加利用。有關以下各書內容，如您需要更進一步資料時，歡迎來函連繫，我們將給您滿意的答覆。



目　錄

1 電子元件

1-1-1

實驗測得，跨在二極體兩端的電壓降為 $0.75V$ 時，流過二極體的電流為 1 mA。

(a) 若二極體的伏特—安培特性如(1.1-1)式所示，求 I 。

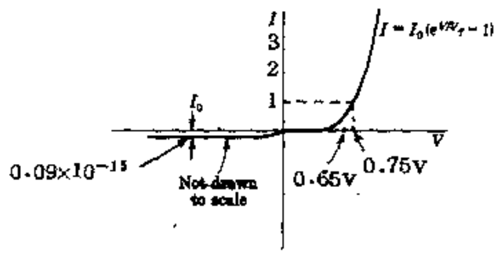
(b) 試繪出二極體的伏特—安培特性曲線。

【解】 (a) $I=I_0(e^{V/V_T}-1)$ $\quad\therefore I_0=I/(e^{V/V_T}-1)$

$V=0.75\text{ V}$ ，$V_T=25\text{mV}$，$I=1\text{mA}$

$\therefore\ I_0=0.09\times10^{-15}\text{ A}$

(b)



(b)

1-1-2

(a) 一個二極體在電路中工作時，其電流為 I_D，且所跨的電壓為V_D。若二極體的電流加倍時，試計算所增加的二極體電壓V_D。(設 $V_T=25\text{mA}$)

(b) 若(a)小題在較低電流工作時，二極體端電壓為 750mV ，試證當電流加倍時將使二極體電壓增加百分之二。

【解】 (a) $I_D = I_0 (e^{V_D/V_T} - 1)$, $I_{D_2} = 2 I_{D_1}$

$I_{D_2}/I_{D_1} = (e^{V_{D2}/V_T} - 1) / (e^{V_{D1}/V_T} - 1) \simeq e^{(V_{D2} - V_{D1})/V_T} = 2$

$V_T \ln 2 = V_{D_2} - V_{D_1} = \Delta V_D = 0.017\ \mathrm{V}$

(b) $\dfrac{\Delta V_D}{V_{D_1}} = \dfrac{0.017}{0.75} = 0.023$ ， 2.3%

1-1-3

(a) 設二極體 $D1$ 的 $I_0 = I_{01}$，二極體 $D2$ 的 $I_0 = I_{02}$。試證：當此兩個二極體流過相等的電流量時，兩者電壓差為：

$$V_1 - V_2 = V_T \ln (I_{02} / I_{01})$$

(b) 設 $I_{02} = 10 I_{01}$，且二極體工作在可被視為是截止的小電流區域時，其端電壓 $V_1 = 0.65\ \mathrm{V}$ ，若二極體 $D2$ 也工作在同樣的電流下，其 V_2 應為若干？

【解】 (a) 因為二極體 $D1$ 與 $D2$ 流過相同的電流

$$I_{01} e^{V_1/V_T} = I_{02} e^{V_2/V_T} \ , \ \frac{I_{02}}{I_{01}} = \frac{e^{V_1/V_T}}{e^{V_2/V_T}} = e^{(V_1 - V_2)/V_T}$$

$$\therefore \ln\left(\frac{I_{02}}{I_{01}}\right) = \ln\left[e^{(V_1 - V_2)/V_T} \right] = \frac{V_1 - V_2}{V_T}$$

$$\therefore V_1 - V_2 = V_T \ln\left(\frac{I_{02}}{I_{01}}\right)$$

(b) $V_{\sigma_1} = 0.65$ ， $I_{02} = 10 I_{01}$

$V_{\sigma_2} = 0.65 - 25 \times 10^{-3} \ln 10 = 0.5924$

1-2-1

設 I_0 隨 T 的變化量近似於下列關係

$$I_0 = K T^2 \epsilon^{-V_g/V_T}$$

式中，K 為比例常數， $V_g \approx 1.12$（矽）， $V_T = KT/e$ 。

(a) 先得出 $\ln I_0$ 的數學表示式，再將 $\ln I_0$ 對溫度 T 微分，證明

$$\frac{d}{dT}(\ln I_0) = \frac{2}{T} + \frac{V_g}{T V_T}$$

(b) 當$V \gg V_T$，試證（1.1-1）式可改寫爲

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{V}{V_T}$$

使得$\frac{1}{I} \cdot \frac{dI}{dT} = \frac{d}{dT}(\ln I_0) + \frac{1}{V_T}\frac{dV}{dT} - \frac{V}{TV_T}$

(c) 若電流不變，證明

$$\frac{dV}{dT} = \frac{V - V_g}{T} - \frac{2K}{e}$$

(d) 當$V = 0.65\,V$或$V = 0.75\,V$，$T = 300°K$時，分別計算出dV/dT的值。注意：解答不是$-2\,mV/C°$，答案視二極電壓V而定。

(e) (c)小題可利用改變變數$\mu = V/T$的方法解出。由(c)小題所得的結果，若$V(T_1)$及$V(T)$分別表在某固定電流下且溫度爲T_1及T_0時的二極體電壓，試證

$$\frac{V(T_1)}{T_1} - \frac{V(T_0)}{T_0} = V_g\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}\right) - \frac{2K_T}{e}\ln\frac{T_1}{T_0}$$

若$T_0 = 25°C$時，$V(T_0) = 0.75V$，試計算$T_1 = 125$及$-55°C$時的$V(T_1)$值。

【解】 (a) $\ln I_0 = \ln K + 2\ln T - V_g/V_T$

$$\frac{d}{dT}[\ln I_0] = \frac{2}{T} - V_g\frac{d}{dT}\left(\frac{e}{KT}\right) = \frac{2}{T} - V_g\left(-\frac{e}{KT^2}\right)$$

$$= \frac{2}{T} + \frac{V_g}{TV_T}$$

(b) 方程式1.1-1式→$I = I_0(e^{V/V_T} - 1)$，

若$V \gg V_T$，　$e^{V/V_T} \gg 1$

因此$I = I_0 e^{V/V_T}$，　$\therefore \ln I = \ln I_0 + V/V_T$

對上式微分：$\frac{d}{dT}(\ln I) = \frac{1}{I}\frac{dI}{dT} = \frac{d}{dT}(\ln I_0) +$

$$\frac{1}{V_T}\frac{dV}{dT}+V\frac{d}{dT}\ \frac{1}{V_T}$$

因爲，$\frac{d}{dT}\left(\frac{1}{V_T}\right)=-\frac{1}{T\,V_T}$，

$$\therefore\quad \frac{1}{I}\frac{dI}{dT}=\frac{d}{dT}\ (\ \ln\ I_0\ )+\frac{1}{V_T}\frac{dV}{dT}-\frac{V}{TV_T}$$

(c) 若電流不變，$\frac{dI}{dT}=0$，且$\frac{d}{dT}$ $(\ln\ I_0\ )=\frac{1}{I_0}\frac{d}{dT}(\ I_0\ )$

$$\therefore\quad 0=\frac{1}{I_0}\ \frac{dI_0}{dT}+\frac{1}{V_T}\ \frac{dV}{dT}-\frac{V}{T\,V_T}$$

$$\because\quad \frac{dI_0}{dT}=\frac{d}{dT}(\ KT^2e^{-V_g/V_T}\ )=2\frac{KT^2}{T}\cdot\ e^{(-V_ge/_{2KT})}$$

$$+(\ KT^2\ )\frac{V_g\,e}{2\,KT^2}\ e^{(-V_g/VT)}$$

$$=\frac{2\,KT^2}{T}(\ 1+\frac{V_g}{2\,V_T})\ e^{-V_g/VT}\ ,$$

$$\therefore\quad \frac{1}{I_0}\frac{dI_0}{dT}=\frac{2}{T}\left(1+\frac{V_g}{2\,V_T}\right)$$

因此 $\quad 0=\frac{2}{T}\left(\ 1+\frac{V_g}{2V_T}\right)+\frac{1}{V_T}\frac{dV}{dT}-\frac{V}{T\,V_T}$

$$\therefore\quad \frac{dV}{dT}=\frac{V}{T}-\frac{2\,V_T}{T}-\frac{V_g}{V_T}=\frac{V-V_g}{T}-\frac{2\,KI}{Te}=\frac{V-V_g}{T}-\frac{2K}{e}$$

(d) 當$V=0.65$ V時，

$$\frac{dV}{dT}=\frac{0.65-1.12}{300}-\frac{2\ (\ 1.38\ )\ 10^{-23}}{1.60\times 10^{-19}}$$

$$=1.738\ \mathrm{mV/C^\circ}$$

當$V=0.75$ V時，

$$\frac{dV}{dT}=-1.402\,\mathrm{mV}/\,\mathrm{C}^{\circ}$$

(e) $\dfrac{dV}{dT}=\dfrac{V-V_g}{T}\;\dfrac{2K}{e}$，令 $\mu=\dfrac{V}{T}$，$\therefore\ \dfrac{dV}{dT}=\mu+T\dfrac{d\mu}{dT}$

$$\mu+T\frac{d\mu}{dT}=\mu-\frac{V_g}{T}-\frac{2K}{e}$$

$$\left(\because V=\mu T\ ,\ dV=\mu dT+d\mu\qquad \frac{dV}{dT}=\frac{\mu dT}{dT}+\frac{Td\mu}{dT}\right.$$

$$\left.\frac{dV}{dT}=\mu+T\frac{d\mu}{dT}\right)\quad\therefore\quad d\mu=-\frac{V_g}{T^2}dT-\frac{2K}{eT}dT$$

將上式積分，

$$\mu=\frac{V_g}{T}-\frac{2K}{e}\ln T+C\rightarrow\frac{V}{T}=\frac{V_g}{T}-\frac{2K}{e}\ln T+C$$

當 $T=T_0$，$V=V(T_0)$

$$\therefore\quad\frac{V(T_0)}{T_0}=\frac{V_g}{T_0}-\frac{2K}{e}\ln T_0+C\ ,\rightarrow C=\frac{V(T_0)}{T_0}-\frac{V_g}{T_0}$$

$$+\frac{eV_r(T_0)}{T_0}\ln T_0$$

$$\text{因此}\quad\frac{V}{T}=\frac{V_g}{V_T}-\frac{2V_T(T_0)}{T_0}\ln T+\frac{V(T_0)}{T_0}-\frac{V_g}{T_0}+$$

$$\frac{2V_T(T_0)}{T_0}\ln T_0$$

當 $T=T_1$，$V=V(T_1)$

$$\therefore\quad\frac{V(T_1)}{T_1}=V_g\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_0}\right)+\frac{V(T_0)}{T_0}-\frac{2K}{e}\ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right)$$

當 $T_1=125^{\circ}\mathrm{C}$，$V(T_1)=0.63\,\mathrm{V}$

當 $T_1=-55^{\circ}C$，$V(T_1)=0.873\,\mathrm{V}$

1-2-2

有兩個相同特性的二極體 $D1$ 和 $D2$，如圖（P 1.2-2）所示並聯連接，並加上逆向電壓。若 $D1$ 工作在 25° C，$D2$ 工作在 125°C。試求各二極體電流。（假設溫度每昇高 10° C，I_0 便加倍）。

【解】 $I_{01} + I_{02} = 10^{-8}$ A

因爲每昇高 10°C，電流 I_0 加倍，且 $T_2 - T_1 = 100$，

$\therefore \quad I_{02} = 2^{10} I_{01}$， $\therefore \quad I_{01} = 10^{-8}/2^{10} = 9.76 \times 10^{-12}$ A

$I_{02} = 9.99 \times 10^{-9}$ A

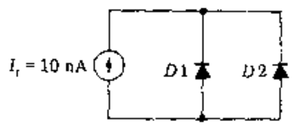


FIGURE P1.2-2

1-3-1

二極體 1 N 916，設其 $C_T = C_0/(1+V)^n$，試求 C_0 與 n，以使 C_T 與圖 1.3-1 的實驗值符合。

【解】 $C_T = C_0/(1+V)^n$， $1.5 = C_0/(1+0)^n = C_0$，

$$0.9 = \frac{1.5}{(1+20)^n}, \quad \therefore \quad n = 0.167$$

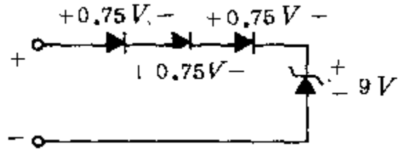
$$\therefore \quad C_T = \frac{1.5}{(1+V)^{0.167}}$$

1-4-1

有三個二極體與一個 9 V 齊納二極體串聯，以提供 9 + 3（0.75）= 11.25 V的參考電壓，其流過的電流爲 5 mA，試利用（1.4-2b）圖，證明此裝置的溫度靈敏度幾乎爲零。

【解】 $\Delta V_D = -2$ mA（1.2-1 式）

$$\text{利用 1.4-2}b\text{ 圖} \rightarrow 100 \times \frac{\Delta V_3/V_3}{\Delta T} = 0.065 \rightarrow (V_Z = 9\text{ V})$$



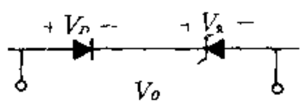
因此 $\Delta V_z = \dfrac{9 \times 0.065}{100} = 0.006$

電壓的總變化量 $\Delta V = \Delta V_z + 3\,\Delta V_D = 0.006 - 3\,(\,0.002\,) = 0$。

1-4-2

一個加有順向偏壓的二極體與一個齊納二極體串聯，當做參考電源，其工作電流為 5 mA。試利用（1.4-2 b）圖，計算出此齊納二極的齊納電壓，以達到溫度靈敏度等於零的效果。

【解】

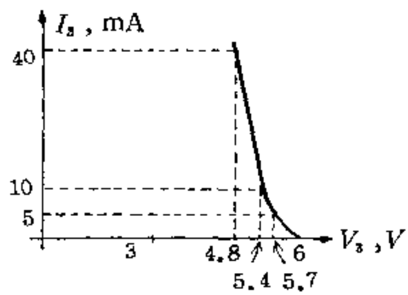


若無靈敏度則 $\Delta V_0 \,/\, \Delta T = 0$，$\Delta V_D = -K\Delta T = -0.025\Delta T$，$\Delta V_Z = 0.025\,\Delta T$，由 1.4-2 b 圖，當 $\Delta V_z = 0.025\,\Delta T$ 時，$V_Z = 6$ V，$\therefore V_Z = 6\,V$ 時，$\Delta V_o / \Delta T = 0$。

1-4-3

由（1.4-2 a）圖，繪出當溫度係數為零時，V_Z 對 I_Z 的函數圖形。

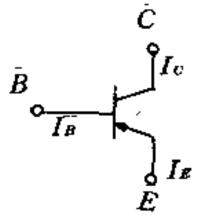
【解】



1.7-1

有一 PNP 型電晶體，當其工作電流（ I_B ，I_C，I_E ）工作在正常的電流流通方向時（ I_E 流入，I_C ，I_B 流出）假設其射極電流（I_E ）集極電流（I_C ），基極電流（I_B ）爲正。試定義 I_E，I_C，I_B 等符號。並利用這些符號作適當的變化，寫出依伯一莫耳（ Ebers — Moll ）方程式（1.7-3 ）和（ 1.7-4 ）式。

【解】



$$I_C = \alpha_N I_E - I_{C0}\left(e^{V_{CB}/V_T} - 1 \right)$$

$$I_E = \alpha_I I_C + I_{E0}\left(e^{V_{EB}/V_T} - 1 \right)$$

$$I_B = I_E - I_C$$

$$\therefore \quad I_C = \alpha_I \left\{ \alpha_N I_C + I_{E0}\left[e^{V_{EB}/V_T} - 1 \right] \right\} - I_{C0}\left[e^{V_{CB}/V_T} - 1 \right]$$

$$I_E = \alpha_N \left\{ \alpha_I I_E - I_{C0}\left[e^{V_{CB}/V_T} - 1 \right] \right\} + I_{E0}\left[e^{V_{EB}/V_T} - 1 \right]$$

$$\therefore \quad I_C = \frac{\alpha_N}{1-\alpha_N\alpha_I} I_{E0}\left[e^{V_{EB}/V_T} - 1 \right] - \frac{1}{1-\alpha_N\alpha_I} I_{C0} \left[e^{V_{CB}/V_T} - 1 \right]$$

$$I_E = \frac{1}{1-\alpha_N\alpha_I} I_{E0}\left[e^{V_{EB}/V_T} - 1 \right] - \frac{\alpha_N}{1-\alpha_I\alpha_N} I_{C0} \left[e^{V_{CB}/V_T} - 1 \right]$$

式中 $\alpha_I I_{C0} = \alpha_N I_{E0}$

1.7-2

一個 NPN 型電晶體的基極電流 I_B ，可以寫成下列兩項之和 $I_B = I_{B1}\left(\varepsilon^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) + I_{B2}\left(\varepsilon^{V_{BC}/V_T} - 1 \right)$ 試求 I_{B1}與 I_{B2} ，並利用(1.7-1 題的結果)，爲 PNP 型電晶體寫出類似上式的式子。

【解】　$I_B = I_{B_1}[e^{V_{BE}/V_T} - 1] + I_{B_2}[e^{V_{BC}/V_T} - 1]$，$I_B = I_E - I_C$

對NPN型電晶體而言：

$$I_B = I_E - I_C = \frac{I_{E0}}{1-\alpha_N\alpha_I}[e^{V_{BE}/V_T} - 1] - \frac{\alpha_I I_{C0}}{1-\alpha_N\alpha_I}$$

$$[e^{V_{BC}/V_T} - 1] - \{\frac{\alpha_N I_{E0}}{1-\alpha_N\alpha_I}(e^{V_{BC}/V_T} - 1)$$

$$\frac{I_{C0}}{1-\alpha_N\alpha_I}(e^{V_{BC}/V_T} - 1)\}$$

$$= \frac{1-\alpha_N}{1-\alpha_N\alpha_I} I_{E0}(e^{V_{BE}/V_T} - 1) + \frac{1-\alpha_I}{1-\alpha_I\alpha_N} I_{C0}$$

$$(e^{V_{BC}/V_T} - 1)$$

比較結果得 $I_{B_1} = \frac{1-\alpha_N}{1-\alpha_N\alpha_I} I_{E0}$，$I_{B_2} = \frac{1-\alpha_I}{1-\alpha_N\alpha_I} I_{C0}$

對PNP型電晶體而言：

$$I_{B_1} = \frac{1-\alpha_I}{1-\alpha_N\alpha_I} I_{E0}, \quad I_{B_2} = \frac{1-\alpha_N}{1-\alpha_N\alpha_I} I_{C0}$$

1.7-3

假設 $V_{BE} \gg V_T$，$V_{CE} \gg V_T$。當 $I_C = 0$ 時，利用（1.7-4）式，求 V_{CE}。

【解】　$V_{BE} \gg V_T \Rightarrow V_{BE}/V_T \gg 1$，$V_{CE} \gg V_T \Rightarrow V_{BC}/V_T \gg 1$

$e^{V_{BE}/V_T} - 1 \simeq e^{V_{BE}/V_T}$，$e^{V_{BC}/V_T} - 1 \simeq e^{V_{BC}/V_T}$

當 $I_C = 0$ 時，由（1.7-4）式

$$0 = \frac{\alpha_N}{1-\alpha_N\alpha_I} \cdot I_{E0}\, e^{V_{BC}/V_T} - \frac{1}{1-\alpha_N\alpha_I} I_{C0}\, e^{V_{BC}/V_T}$$

因此；$\frac{e^{V_{BE}/V_T}}{e^{V_{BC}/V_T}} = e^{(V_{BE}-V_{BC})/V_T} = e^{V_{CE}/V_T} = \frac{I_{C0}}{\alpha_N I_{E0}}$

$$\therefore \quad V_{CE} = V_T \ln\left(\frac{I_{C0}}{\alpha_N I_{E0}}\right)$$

1-7-4

某一電晶體 $V_{BE}=0.7\text{V}$，且 $V_{CE}=0.7\text{V}$，另一電晶體 $V_{BE}=0.7\text{V}$ 且 $V_{CE}=0.1\text{V}$。若 $\alpha_N=0.9$，$\alpha_I=0.1$ 試比較此二電晶體的基極電流。

【解】 當 $V_{CE}=0.7\text{V}$，$V_{BE}=0.7\text{V}\rightarrow V_{BC}=0\text{V}$，（ $V_{BC}=V_{BE}-V_{CE}$ ）

$$I_C=\frac{\alpha_N}{1-\alpha_N\alpha_I}I_{E0}\ e^{V_{BE}/V_T}$$

$$I_E=\frac{1}{1-\alpha_N\alpha_I}I_{E0}\ e^{V_{BE}/V_T}$$

$$I_B\,(V_{CE}=0.7\text{V})=I_E-I_C=\frac{1-\alpha_N}{1-\alpha_N\alpha_I}I_{E0}\ e^{V_{BE}/V_T}$$

當 $V_{CE}=0.1\text{V}$，$V_{BE}=0.7\text{V}\rightarrow V_{BC}=0.6\text{V}$

$$I_C=\frac{\alpha_N}{1-\alpha_N\alpha_I}I_{E0}\ e^{V_{BE}/V_T}-\frac{1}{1-\alpha_N\alpha_I}I_{C0}\ e^{V_{BC}/V_T}$$

$$I_E=\frac{1}{1-\alpha_N\alpha_I}I_{E0}\ e^{V_{BE}/V_T}-\frac{\alpha_I}{1-\alpha_N\alpha_I}I_{C0}\ e^{V_{BC}/V_T}$$

利用 $\alpha_N I_{E0}=\alpha_I I_{C0}$

$$I_B\,(V_{CE}=0.1\text{ V})=I_E-I_C$$

$$=\left[\frac{1-\alpha_N}{1-\alpha_N\alpha_I}\ e^{V_{BE}/V_T}+\frac{1-\alpha_I}{1-\alpha_N\alpha_I}\ \frac{\alpha_N}{\alpha_I}\ e^{V_{BC}/V_T}\right]I_{E0}$$

將 α_N，α_I，V_{BE}，V_{BC}，V_T 值代入；

$$\therefore\quad\frac{I_B\,(V_{CE}=0.7V)}{I_B\,(V_{CE}=0.1\text{V})}=0.4$$

1-8-1

(a) 設兩電晶體皆處於截止（cutoff）的邊緣，則 I_E 皆如（1.8-2）式所示。其中若第一個電晶體的 $\alpha_N=0.9$，$\alpha_I=0.1$，而第二個電晶體的 $\alpha_N=0.9$，$\alpha_I=0.01$。試比較這兩個電晶體的切入電壓（cut-in voltage）。

(b) 若集極開路，亦即 $I_C=0$，重作(a)小題。

【解】 (a) $I_E = \dfrac{I_{E0}}{1-\alpha_N\alpha_I}\left[\ e^{V_{BE}/V_T}-1\ \right]$

當 $\alpha_N = 0.9$，$\alpha_I = 0.1$ 時代入上式

$I_E = 1.099 \cdot I_{E0}\ e^{V_{BE}/V_T} = I_{E0}\left[\ e^{(V_{BE}+2.36\times10^{-3})/V_T}\right]$

$(\because 1.099 \doteqdot e^{2.36\times10^{-3}/V_T})$

$\therefore\quad V_\sigma = 0.65 - 0.00236 = 0.64764\text{ V}$

當 $\alpha_N = 0.9$，$\alpha_I = 0.01$

$I_E = 1.009\ I_{E0}\ (\ e^{V_{BE}/V_T}\ ) = I_{E0}\left[\ e^{(V_{BE}+2.26\times10^{-4})/V_T}\right]$

$(\because 1.009 \doteqdot e^{2.26\times10^{-4}/V_T}\ )$

$\therefore\quad V_{\sigma_2} = 0.65 - 2.26\times10^{-4} = 0.649774$

(b) $I_E = I_B = I_{E0}\left[\ e^{V_{BE}/V_T}-1\ \right]$

當 $I_C = 0$，電晶體形同二極體，其切入電壓與電晶體參數 α_I 和 α_N 無關，$V_\sigma = 0.65\text{V}$。

1-8-2

(a) 證明當 $I_E=0$ 或 $I_C=0$ 時，依伯—莫耳方程式可簡化爲二極體方程式。

(b) 試證等電壓的二極體，其二極體電流比等於 α_N/α_I。

【解】 (a) $I_C = \alpha_N I_E - I_{C0}\left[\ e^{V_{BC}/V_T}-1\ \right]$

$I_E = \alpha_I I_C + I_{E0}\ (\ e^{V_{BE}/V_T}-1\ )$

當 $I_C=0$，$I_E = I_{E0}\ (\ e^{V_{BE}/V_T}-1\ )$，形同一個二極體方程式，其 $V_D = V_{BE}$，$I_D = I_E = I_B$

當 $I_E=0$，$I_C = -I_{C0}\ (\ e^{V_{BE}/V_T}-1\ )$，形同一個二極體方程式，其 $V_D = V_{BC}$，$I_D = I_B = -I_C$

(b) $V_{BC} = V_{BE}$

$$\frac{I_B\ (\ I_E=0\ )}{I_B\ (\ I_C=0\ )} = \frac{I_{C0}\ (\ e^{V_{BC}/V_T}-1\ )}{I_{E0}\ (\ e^{V_{BE}/V_T}-1\ )} = \frac{I_{C0}}{I_{E0}} = \frac{\alpha_N}{\alpha_I}$$

（因爲 $\alpha_N I_{E0} = \alpha_I I_{C0}$）

1-10-1

證明（1.10-3）至（1.10-5）式和（1.10-9）式