

晶體管電路設計叢書

DESIGN OF PULSE CIRCUIT

脈冲電路設計

鍾偉華編譯・香港萬里書店出版

脈冲電路設計

鍾偉華編譯

香港萬里書店出版

脈冲電路設計

鍾偉華編譯

出版者：香港萬里書店

香港北角英皇道488號二樓

(P. O. BOX 15635, HONG KONG)

電話：5-712411 及 5-712412

承印者：忠誠印務

香港保德街七號

定價：港幣四元四角

版權所有 * 不准翻印

(一九七三年十月版)

出版說明

本書主要根據日本池原典利所著的“晶體管電路設計”一書譯出。我們把原書分爲數冊，作爲一套叢書出版。

“晶體管電路設計叢書”分別介紹晶體管音頻放大、高頻放大、直流放大、振盪、變頻、檢波、調制、穩壓電源、電視、脈沖以及使用特殊半導體器件等基本電路的設計和計算方法，並有設計實例。適合有關技術人員及無線電愛好者參考。

本書電路參數的計算，大部分沒有採用繁雜的數學推導，而運用了圖解和實驗數據，直接給出了計算關係式，並通過實際電路設計舉例加以說明。因此，內容比較淺顯易懂。

在翻譯過程中，我們刪除了原書一些繁瑣部分，對一些技術上的錯誤，也作了修改和更正。

在附錄中，選編了書中所用的晶體管參數特性表，及晶體管、二極管的符號和縮寫字，以便利讀者參閱。

1964/9

目 次

出版說明

1. 晶體管的脈冲響應	1
用作開關的晶體管	1
飽和型、非飽和型開關	3
開關速度	6
過激勵常數	10
開關時的損耗	11
2. 脈冲放大電路	15
飽和型脈冲放大電路	15
電流轉換型脈冲放大電路	21
非飽和型脈冲放大電路	24
3. 自激多諧振盪器電路	33
4. 單穩態多諧振盪器電路	42
5. 雙穩態多諧振盪器電路	50
雙穩態多諧振盪器電路	50
施密特觸發電路	56
6. 觸發電路	58
7. 波形變換電路	62
密勒積分電路	62
自舉電路	64

8. 門電路	67
「與」門電路	67
「或」門電路	70
9. 門電路與脈冲放大電路的組合電路	73
10. 計數電路、寄存器、移位寄存器	82
計數電路	82
寄存器、移位寄存器	86
11. 參考電路	89
正觸發和負觸發電路	89
二進制計數器電路	90
SCR 高壓脈冲產生器	91
發射極耦合多諧振盪器	91
密勒積分電路	92
複合式環形計數器	93
自激多諧振盪電路	93
飽和式反相器電路	94
200 KHz 多諧振盪器	95
單穩態多諧振盪電路	96
防雜音單穩態多諧振盪器	96
SCR 的觸發電路	97
使用 IC 之弛張振盪器	98
PUT 超低頻方波振盪電路	98
GTO 之斬波器	99
GTO 多諧振盪電路	100
使用 PUT 之脈冲週期鑒別電路	100
附錄一：晶體管，二極管的符號和縮寫字	103
附錄二：書中所用晶體管參數特性表	109

1. 晶體管的脈冲響應

在電子學迅速發展的同時，晶體管的應用範圍也擴大了，目前不僅用於通信，而且廣泛地應用在工業測量、自動控制等方面。與電子管相比較，晶體管接通時的電阻顯著下降，斷開時的電阻極大，對於相同信號電平而言消耗功率小等等。由於具有這些作為開關元件的理想特性，所以就迅速地用於主要使用這些特性的計算機、控制裝置等設備中。

本章首先說明作為電路主要元件的晶體管的固有脈冲響應，然後說明脈冲的放大、產生、整形、變換、比較等基本電路的設計，並進一步涉及到利用上述基本電路的邏輯電路的組成方法。

雖然脈冲電路可分為綫性電路和非綫性電路兩種，但由於綫性電路與普通的正弦波之類的寬帶放大電路在本質上沒有差異，因此本書用的脈冲電路主要是非綫性電路。

用作開關的晶體管

開關是指電路具有在「斷」時呈現高電阻，「通」時呈現低電阻的性質，晶體管的這種作用，稱為晶體管的開關運用。

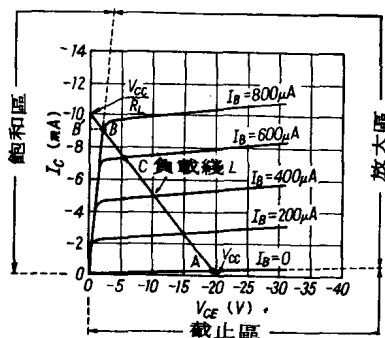


圖 1 晶體管的 V_{CE} - I_C 特性

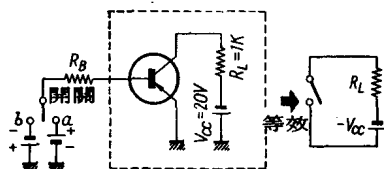


圖 2 晶體管開關電路

圖 1 是晶體管發射極接地時的集電極電壓-電流特性，按圖 2 所示的集電極電源電壓和集電極的負載電阻，可作負載綫 L 。

現在如果把圖 2 的開關倒向 a 邊，晶體管的基極-發射極之間加上了反向偏壓，則無正向基極電流，所以集電極上只有集電極-發射極間的洩漏電流 I_{CEX} 流過。此時工作點在圖 1 中的 A 點上。但是嚴格地說，由於基極加反偏壓，實際工作點將小於 A 點的值。

接着若把開關倒向 b 邊，基極-發射極間就加上正向偏壓，集電極有電流流過。如果基極電流 $I_B > \frac{I_C}{h_{FE}}$ ，則集電極電流與 I_B 的大小無關，近似由外電路 V_{CC} 和 R_L 決定，即

$$I_C (ON) \approx \frac{V_{CC}}{R_L} \quad (1)$$

這時，工作點由 A 移到 B。BB' 間的電壓叫集電極飽和電壓，該電壓值越小，從集電極得到的輸出電壓變化就越大，這是所希望的特性。若 $I_B < I_C/h_{FE}$ ，則工作點只是從 A 移到 C，這種工作狀態可用於非飽和型的開關電路中。作為例子，設在 A 點上 $V_{CE} = 20V$ ， $I_C = 5\mu A$ ；在 B 點上 $V_{CE} = 0.1V$ ， $I_C = 10mA$ ，比較 A 點和 B 點上的電壓電流關係。在 A 點上 $R_{(OFF)} = 20V/5\mu A = 4M\Omega$ ，在 B 點上 $R_{(ON)} = 0.1V/10mA = 10\Omega$ ，其比值為 $4M\Omega/10\Omega = 4 \times 10^5$ ，顯然充分起到了開關作用。

圖 1A 點以下的範圍叫作截止區，在此區間集電極-發射極呈現為高阻抗。AB 之間叫做放大區，就是普通晶體管工作的範圍。B 點左側叫做飽和區，在此區間集電極-發射極呈現為低阻抗晶體管的開關工作，是用遠比 I_C 小的電流 I_B 就可使集電極電流 I_C 實現通和斷。而且晶體管開關，由於沒有機械磨損，比機械開關壽命長，在單位時間內開關次數極多等特點。

飽和型、非飽和型開關

作為飽和型開關，如圖 3 所示，是指晶體管在斷開

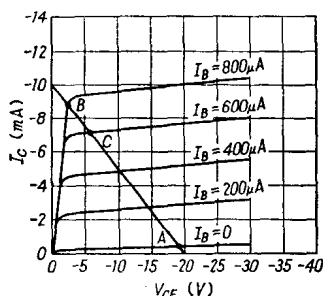


圖 3 飽和、非飽和工作的差別

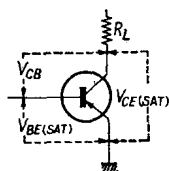


圖 4 飽和時各部分的電壓

時，工作點處在截止區 A 點，導通時，工作點處在飽和區 B 點的一種開關。

在圖 4 的電路中，晶體管基極加反向偏壓，斷開時 I_{CO} 為

$$I_{CO} = I_{CBO} \times \frac{1 - \alpha_1}{1 - \alpha_N \alpha_1} \quad (2)$$

導通時的集電極電壓 V_{CE} 為

$$V_{CE} = \frac{kT}{q} \ln \frac{\alpha_1 \left(1 - \frac{I_C}{I_B} \frac{1 - \alpha_N}{\alpha_1} \right)}{1 + \frac{I_C}{I_B} (1 - \alpha_N)} \quad (3)$$

式中 α_N ——基極接地的電流放大係數；

α_1 ——更換發射極和集電極後基極接地的電流放大係數；

k ——波耳茲曼常數

T ——絕對溫度 $^{\circ}K$

q ——電子電荷量

假設：晶體管具有 $\alpha_N = 0.98$ ， $I_C = 10\text{mA}$ ， $\alpha_1 = 0.85$ ， $I_B = 1\text{mA}$ ， $kT/q = 0.026\text{V}$ ($T = 300^\circ\text{K}$)， $I_{CBO} = 10\mu\text{A}$ 的特性，則

$$I_{CO} = 10 \times 10^{-6} \times \frac{1 - 0.85}{1 - 0.98 \times 0.85} = 8.8\mu\text{A}$$

$$V_{CE} = 0.026 \times \ln \frac{0.85 \left(1 - \frac{10 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} \times \frac{1 - 0.98}{0.98} \right)}{1 + \frac{10 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} (1 - 0.85)} = 0.035\text{V}$$

實際上由於集電極體電阻產生的電壓降，故 V_{CE} 稍大於這一數值。因此，對於台面型或生長結型之類的集電極體電阻大的晶體管而言，上式是不適用的。

在飽和區內，發射結和集電結均為正向偏壓，集電極-發射極間呈現出非常低的電阻。由於集電結加了正向偏壓，就意味着集電極電流已經不受基極電流的控制，並將使作為半導體特有現象的少數載流子的存儲效應變得顯著。

飽和型開關的特點如下：

1. 導通狀態的功率損耗小；
2. 可以取得較大的集電極輸出電壓；
3. 電路組成簡單；
4. 因受存儲時間 t_s 的影響，開關速度慢。

晶體管斷時，工作點在截止區 A 點；導通時，工作點在放大區，C 點的一種開關，稱為非飽和型開關。

該種開關的特點如下：

1. 由於不會引起飽和現象，所以開關速度快；
2. 導通狀態的功率損耗大；
3. 不能取得較大的集電極輸出電壓；
4. 電路組成複雜。

開關速度

在晶體管脈冲電路的輸入端加上完整的矩形電壓，輸出端就得到帶有某一延遲時間的波形，如圖 5 所示。圖中 t_d 、 t_r 、 t_s 、 t_f 統稱為開關時間。

其中 t_r 和 t_f 主要是由於 α 截止頻率引起的， t_s 是由少數載流子存儲效應引起的，後者在電子管中看不到，是晶體管所具有的一種特殊現象。

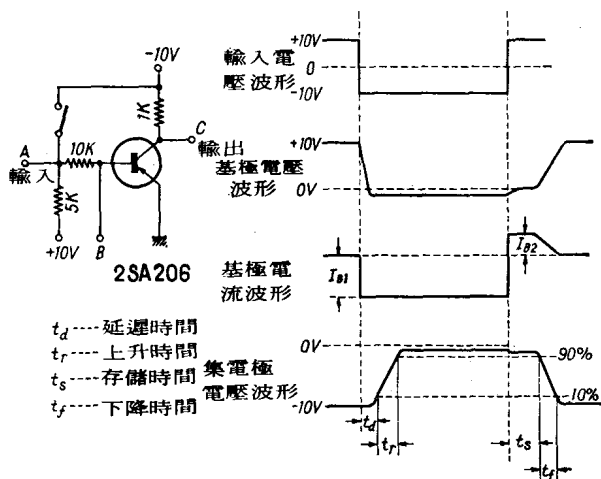


圖 5 晶體管的脈冲影响

現在比較一下晶體管截止、放大、飽和各區中，基極內少數載流子的密度，如圖 6 所示。在截止區內，集電結和發射結均加反向偏壓，所以基極區內的少數載流子密度是非常小的，在放大區內，發射結加正向偏壓，集電結加反向偏壓，因此載流子密度在靠發射極一側高，在靠集電極一側幾乎為零；在飽和區內，發射結和集電結都是正向偏壓，所以基極內的少數載流子密度非常大。這時如果迅速去掉輸入電流，使晶體管截止，但因存儲在基極內的少數載流子並不瞬時消失，或者通過外部電路流出或者通過複合以至消失，需要相當的時間，這段延遲便是存儲時間 t_{so} 。

圖 6 基極內的少數載流子密度

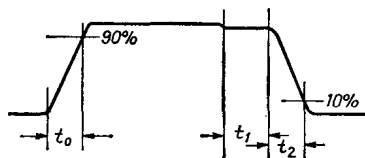
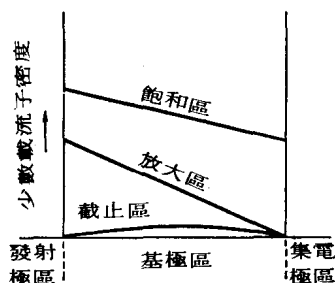


圖 7 式 (1.4) ~ (1.6) 中波形部分的定義

顯然，要想得到高的開關速度，必須設法減小 t_0 。

合金結型晶體管在發射極接地時的開關時間由下式給出（見圖 7）。

$$t_0 = \frac{1}{(1 - \alpha_N) \omega_N} \ln \frac{h_{FEN} I_{B1}}{h_{FEN} I_{B1} - 0.9 I_C} \text{ (sec)} \quad (4)$$

$$t_1 = \frac{\omega_N + \omega_1}{\omega_N \omega_1 (1 - \alpha_N \alpha_1)} \ln \frac{(I_{B1} - I_{B2}) h_{FEN}}{I_C - h_{FEN} I_{B2}} \text{ (sec)} \quad (5)$$

$$t_2 = \frac{1}{(1 - \alpha_N) \omega_N} \ln \frac{I_C - h_{FEN} I_{B2}}{0.1 I_C - h_{FEN} I_{B2}} \text{ (sec)} \quad (6)$$

設 $\frac{R_L}{r_c} \ll 1 - \alpha_N, \omega_N \cdot C_C \cdot R_L \ll 1,$

式中 α_N ——基極接地時電流放大係數；

α_1 ——更換發射極和集電極後基極接地的電流放大係數；

I_{B1} ——正向基極電流；

I_{B2} ——反向基極電流（瞬態流過的基極反向電流）；

ω_N —— $\omega_N = 2\pi f \alpha_N$ ($f \alpha_N$: α 截止頻率)；

ω_1 —— $\omega_1 = 2\pi f \alpha_1$ ($f \alpha_1$: 更換發射極和集電極時的 α 截止頻率)；

h_{FEN} ——發射極接地時電流放大係數；

R_L ——集電極負載電阻；

r_c ——集電極飽和電阻；

C_C ——基極接地時集電極電容。

由式 (4)、(5)、(6) 可知，要縮短上升時間 t_0 最好增加 I_{B1} ，要縮短 t_1 就要減小 I_{B1} 並增大 I_{B2} ，要減少 t_2 最好增加 I_{B2} 。其結果是，爲了減少全部開關時間，同

時把 I_{B1} 和 I_{B2} 選大一些則是有利的。但對電路來講，爲得到所需的電流增益， I_{B1} 和 I_{B2} 有必要選一適當的值。

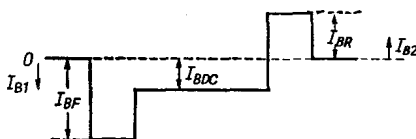
例如：設 $\alpha_N = 0.98$ ， $\alpha_1 = 0.71$ ， $I_{B1} = 2\text{mA}$ ， $I_{B2} = 2\text{mA}$ ， $I_C = 10\text{mA}$ ， $f\alpha_N = 2\text{MHz}$ ， $f\alpha_1 = 0.27\text{MHz}$ ， $h_{FEN} = 50$ ，計算 t_0 、 t_1 、 t_2 ，則

$$t_0 = \frac{1}{2\pi \times 2 \times 10^6 (1 - 0.98)} \ln \frac{50 \times 2}{50 \times 2 - 0.9 \times 10} \\ = 0.37 \times 10^{-6} (\text{sec}) = 0.37 \mu\text{s}$$

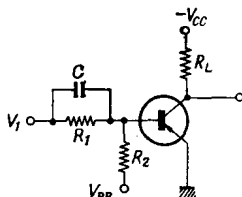
$$t_1 = \frac{2\pi (2 \times 10^6 + 0.27 \times 10^6)}{2^2 \pi^2 2 \times 10^6 \times 0.27 \times 10^6 (1 - 0.98 \times 0.71)} \\ \ln \frac{[2 - (-2)]50}{10 - 50(-2)} = 0.14 \times 10^{-6} (\text{sec}) = 0.14 \mu\text{s}$$

$$t_2 = \frac{1}{2\pi \times 2 \times 10^6 (1 - 0.98)} \ln \frac{10 - 50(-2)}{0.1 \times 10 - 50(-2)} \\ = 0.36 \times 10^{-6} (\text{sec}) = 0.36 \mu\text{s}$$

由式看到， I_{B1} 越大，上升時間 t_0 越小，也越有利。但是，存儲時間 t_1 則相反， I_{B1} 越小它也越小，因而在通、斷的瞬態時間過激勵，在導通的準正常狀態下，把基極電流限定爲飽和所需的最低需要量，是最有利的。所以最好用圖 8(a) 所示的基極電流波形來激勵。在圖 8(b) 所示電路中，用並聯在基極電路電阻 R_1 上的加速電容器 C ，在某種程度上可以達到此目的（對加速電容器 C 的敘述詳見“脈沖放大電路”一節）。



(a) 得到快速開關時間的理想基極電流波形



(b) 爲使(a)波形流過而用一個加速電容器

圖 8 爲得到快速開關時間所需的輸入電流波形和電路

過激勵常數

在飽和型開關中，使 I_C 流過集電極所需的基極最小電流 $I_{B(\min)}$ 由下式給出：

$$I_{B(\min)} = \frac{I_C}{h_{FE}} \quad (7)$$

實際上爲使上升時間更短，開關動作更準確，一般基極電流 I_{B1} 要比 $I_{B(\min)}$ 大。過激勵常數 N 可由下式求得：

$$N = \frac{h_{FE} I_{B1}}{I_C} \quad (8)$$

換句話說， N 也就是假定集電極不飽和時集電極電流 (如圖 9 虛綫所示) 和實際集電極電流之比。

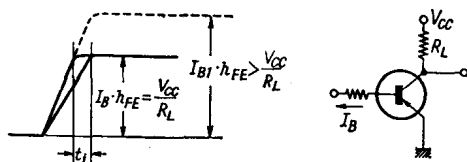


圖 9 過激勵對 t_r 的改善

圖 9 表明，用電流 I_{B1} 進行過激勵比用電流 I_B 進行激勵從上升時間而言能改善 t_i ，這樣可得到速度更快的脈沖響應。將 N 代入 (4) 式中可得

$$t_0 = \frac{1}{(1 - \alpha_N) \omega_N} \ln \frac{N}{N - 0.9} \quad (9)$$

現將在無過激勵的場合，即 $N = 1$ 與在有過激勵的場合 $N = 2$ ，作一比較，求出其改善度：

$$\text{改善度} = \frac{t_0(N=2)}{t_0(N=1)} = \frac{\ln \frac{2}{2-0.9}}{\ln \frac{1}{1-0.9}} = 0.26$$

由該例可知，就上升時間而言，有過激勵時的上升時間是無過激勵時上升時間的 26%。

然而，如果 N 值過大，就將引起電流增益的減小，因此 N 值必須選擇適當。

開關時的損耗

在飽和型開關電路中，晶體管工作點大多在圖 10 的 A 點和 B 點，只要工作點不超過最大容許損耗，在適當的