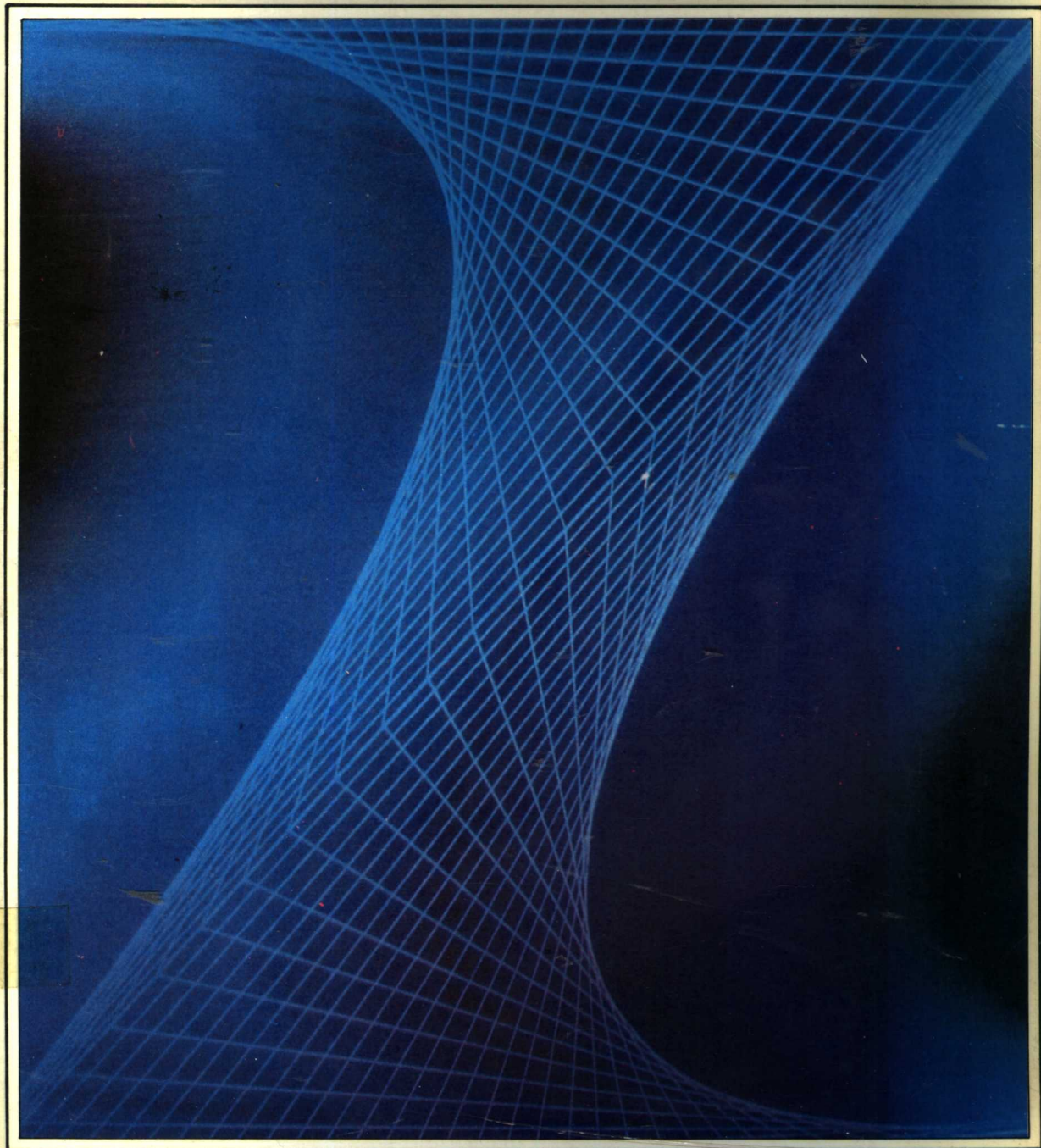

工業電子學

黃聰亮 編著



工業電子學

黃聰亮 編著

儒林圖書公司 印行

版權所有
翻印必究

工業電子學

編著者：黃智明(黃聰亮)

發行人：楊 鏡 秋

出版者：儒林圖書有限公司

地 址：台北市重慶南路一段 111 號

電 話：3118971-3 3144000

郵政劃撥：0106792-1 號

吉豐印刷廠有限公司承印

板橋市三民路二段正隆巷 46 弄 7 號

行政院新聞局局版台業字第 1492 號

中華民國七十五年九月初版

定價新台幣 300 元正

目 錄

第一章 功率半導體元件	1
1-1 功率二極體	1
功率電晶體與電晶體開關	18
閘流體	26
TRIAC	47
其他閘流體工作原理說明	54
習題	72
習題詳解	78
第二章 感測元件	93
2-1 光電轉變元件	93
2-2 熱電耦，熱敏電阻	108
2-3 磁性元件	120
2-4 應變計	125
2-5 磁性察覺器	133
2-6 壓力感測器（察覺器）	140
2-7 超音波感測器	150
習題	159

第三章 相位控制電路	161
3-1 三相整流器簡介	161
3-2 單相交流相位控制電路	175
3-3 三相交流相位控制電路	193
習題	206
習題詳解	208
第四章 閘流體觸發控制電路	213
4-1 UJT弛張振盪電路	213
4-2 UJT的特性	217
4-3 UJT弛張振盪器的設計	222
4-4 UJT弛張振盪器的設計	226
4-5 用於激發閘流體的UJT振盪電路設計	234
4-6 各種UJT激發脈波產生電路	237
4-7 UJT開一關控制電路	243
4-8 PUT脈波產生電路	245
4-9 PUT脈波產生器的設計	248
4-10 DIAC弛張振盪電路	251
4-11 蕭克雷二極體弛張振盪電路	252
4-12 其他脈波產生電路	255
第五章 運算放大器	259
5-1 運算放大器特性	259
5-2 反向放大器及非反向放大器	265
5-3 加法器、積分器及微分器	270
5-4 差動放大器	271
5-5 微分器、積分器、比例積分器	274
5-6 截波器	279

5-7	電壓比較器及史密特電路器	279
5-8	定電壓與定電流電源	290
	習題	295
	習題詳解	298
第六章	數位積體電路	305
6-1	二進位數字系統	305
6-2	數位邏輯	307
6-3	基本RS正反器	309
6-4	邏輯函數的執行	406
	習題	413
	習題詳解	415
第七章	數位順序控制	417
7-1	緒論	417
7-2	繼電器階梯圖	418
7-3	順序系統的設計	420
7-4	固態邏輯在順序系統中的應用	427
7-5	程式的控制器	434
7-6	摘要	442
	習題	443
	習題詳解	446
第八章	電動機電子控制	451
8-1	交直流馬達速率控制	451
8-2	小馬力交流馬達的控制	462
8-3	可調速的直流馬達控制	467
8-4	數位馬達之控制	474
	習題	494

習題詳解	496
第九章 大電流直流電源與交流穩壓電路	499
9-1 大電流直流電源	499
9-2 交流電源穩壓應用	506
習題	525
習題詳解	529
第十章 多諧振盪器電路與定時電路	535
10-1 多諧振盪器	535
10-2 定時器電路	544
第十一章 直流斬波器	551
11-1 DC 斬波器類型	552
11-2 A 類型斬波器	554
附錄 A e^{-x} 的值	597
附錄 B 半導體元件特性資料	599

第一章

功率半導體元件

1-1 功率二極體

最簡單的半導體裝置就是二極體 (diode)，它是一種二端裝置，分別為陽極與陰極，以應用的觀點視之，二極體有下列幾種：1. 整流二極體；2. 齊納二極體；3. 閘流二極體；4. 交流矽控體 (DIAC)；5. 蕭克利二極體 (shockley diodes)；6. 透納二極體；7. 可變電容二極體；8. 光動二極體 (photodiode)；9. 發光二極體 (Light-Emitting Diode)。

1. 整流二極體：整流二極體的特性曲線如圖 1-1 所示，當陽極電壓比陰極高時，電流就由陽極流入陰極，通常陽極比陰極不必高於 1 伏特即能通電，但是當陽極比陰極低至 50 伏特時，電流還不會流通，直到崩潰電壓才有大電流通。

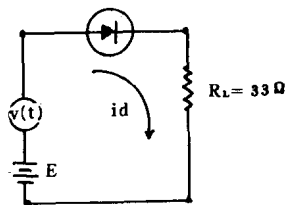


圖 1-1

2 工業電子學

首先考慮圖 1-2 之電路，圖中有一個整流二極體控制着由直流電源 E 和交流電壓源 $V(t)$ 而流入負載電阻 R_L 之電流，首先必需定出所要的靜態點，亦即 Q 點，我們在二極體的特性曲線上（可由製造廠商提供）畫出 33Ω 之負載線，如圖 1-3 所示，所用的電池電勢 E 為 0.73 伏，再來，就是要看

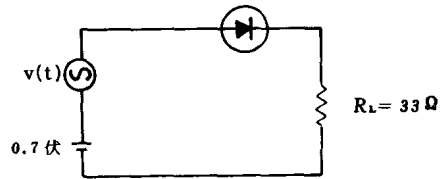
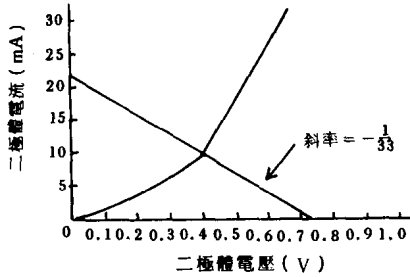


圖 1-3

電路的交流工作情形，其交流電壓 $V(t)$ 係與直流電壓源（近乎線性地）相疊，工作點則在 Q 點附近以 $V(t)$ 的相同頻率來回擺動，要得到 5 mA 輸出所需的輸入峯值電壓可由圖 1-4 看出，其值為 0.25 伏。

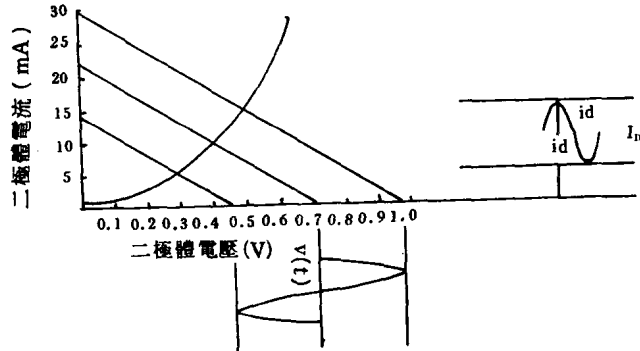


圖 1-4 所示電路之交流分析

通常交流電源可以用數學式表示為 $V(t) = 0.25 \sin \omega t$ ，以後凡是直流值（或靜態值）都用大寫字母及大寫下標表示，譬如 I_D ，凡是交流值都是用小寫字母及小寫下標來表示，譬如 i_d ；凡是代表直流與時變值之和都用大寫字母及小寫下標表示，譬如 I_d ，則圖 1-2 之電流即可表示為

$$I_d = I_D + i_d \dots\dots\dots (1-1)$$

而圖 1-3 之負載線則可表為

$$I_{DQ} = -\frac{\bar{V}_{DQ}}{R_L} + \frac{E}{R_L} \dots\dots\dots (1-2)$$

圖 1-5 (a) 所示的二極體電路，是用來將交流電變為直流電之半波整流器，當變壓器 1T 的次級電壓使二極體 1D 的陽極電壓為正時，二極體才讓電流流過電阻器，所以負載電阻只接收到半波的電流脈波，如圖 1-5 (b) 所示。

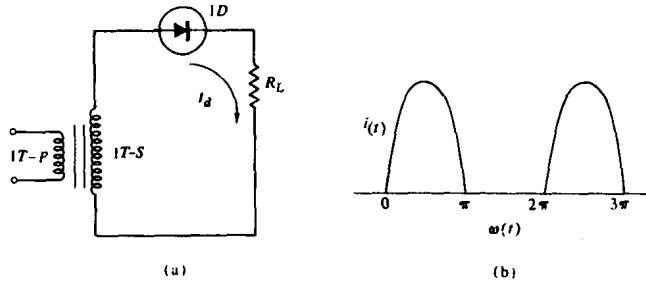


圖 1-5 (a) 半波整流電路 (b) 負載電流波形

半波整流電路中電阻性負載的幾個常用電流及電壓參數：

平均電流：平均電流值可由下式求得

$$I_{av} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_{max} \sin \omega t \, d\omega t = \frac{I_{max}}{\pi} \dots\dots\dots (1-3)$$

因 $\frac{1}{\pi} = 0.318$, $I_{av} = 0.318 I_{max}$

平均電壓 = 平均電壓值可由下式求得

$$\bar{V}_{av} = I_{av} \cdot R = 0.318 I_{max} R \dots\dots\dots (1-4)$$

因 $I_{max} R = \bar{V}_{max}$

$$\bar{V}_{av} = 0.318 \bar{V}_{max}$$

直流安培計與伏特計所量得的均為平均電壓與電流均方根電流：均方根電流又稱“有效電流”，可由下式求得：

$$I_{r.m.s.} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_{m.a.x.}^2 \sin^2 \omega t \, d(\omega t)} = \frac{I_{m.a.x.}}{2} \dots\dots\dots (1-5)$$

均方根電壓：均方根電壓可由下式求得

$$\bar{V}_{r.m.s.} = I_{r.m.s.} R = 0.5 I_{m.a.x.} R \dots\dots\dots (1-6)$$

$$\text{因 } \bar{V}_{m.a.x.} = I_{m.a.x.} R \quad \text{故 } \bar{V}_{r.m.s.} = 0.5 V_{m.a.x.}$$

安流安培計與伏特計所量得的為有效值電流與電壓消耗功率：負載的平均功率可由下式求得

$$P_{av.} = \bar{V}_{r.m.s.} \times I_{r.m.s.} \dots\dots\dots (1-7)$$

反向峰壓 (PIV)：因當變壓器 1T 的次級電壓使二極體 1D 的陽極電壓為負時，二極體阻止電流，使它不能流過電阻，所以二極體所能忍受的額定反向峰壓 (PIV) 至少要大於變壓器之次級端電壓的最大值才行，即

$$PIV > \bar{V}_{m.a.x.} \dots\dots\dots (1-8)$$

例 1-1 在圖 1-5 的電路中，變壓器之次級端的端電壓為 $170 \sin \omega t$ ， $R_L = 40 \Omega$ ，同時導電期間 $\bar{V}_D = 0$ ，求二極體的平均電流額定值，以及 PIV 額定值。

解：由 $170 \sin \omega t$ 可求得最大電壓， $\bar{V}_{m.a.x.} = 170$ 伏，又二極體的平均電流和負載的平均電流完全一樣。

$$I_{m.a.x.} = \bar{V}_{m.a.x.} / R = 170 / 40 = 4.25 A$$

$$I_{av.} = 0.318 I_{m.a.x.} = 0.318 \times 4.25 = 1.35 A$$

$$PIV = 170 \text{ 伏}$$

圖 1-5 之整流電路加以修改後可以得到一全波整流電路，圖 1-6 所示即是

採用中央抽頭變壓器之全波整流電路，其設計規格可為

$$\bar{V}_{ac} = 600 \sin \omega t$$

$$I_{max} = 200 \text{ A}$$

$$T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

此處的 T_A 是整流器周圍的溫度，設計時必須使用 1D 和 2D 兩個二極體以及散熱片，以便使二極體冷卻。

圖 1-7 所示為整流器輸入及輸出電壓波形

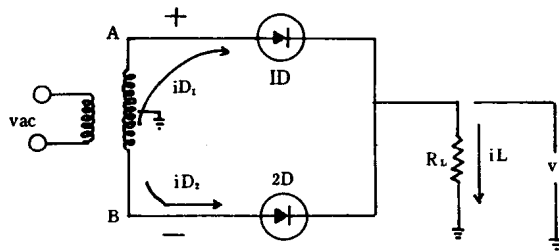


圖 1-6 二極體全波整流器

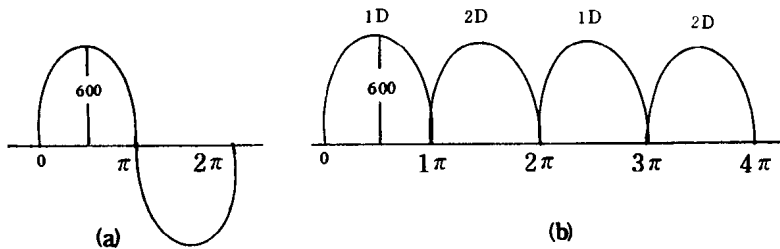


圖 1-7 (a)整流器之輸入電壓 (b)整流器之輸出電壓

當圖 1-6 的 A 點對地的電壓是正時，1D 二極體為順向偏壓，而 2D 二極體則是反向偏壓，負載電流只能如圖 1-7 所示，僅通過 1D 二極體，當 B 點為正時，2D 為順偏，1D 為反偏，負載電流僅流過 2D。這兩個二極體就這樣隨着外加電壓的極性而交互導電。在圖 1-8 二極體的特性曲線上，畫

出了其中一個二極體的負載線，由此簡單的負載線分析，可以看出二個設計的條件：

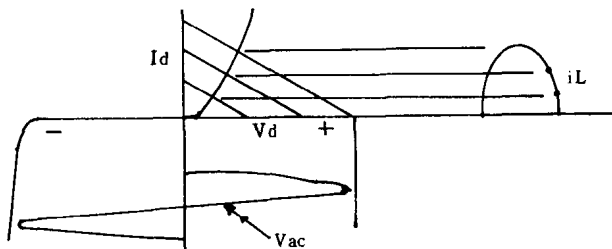


圖 1-8 二極體全波整流器之圖解分析

1. 二極體的反向峰壓必須大於交流電壓的峰值。
2. 二極體要能通過峰值為 200 A 之半波整流電流而不損壞。

DELCO 公司的 DRS-250 二極體能滿足上面二個條件，此二極體之資料如圖 1-9 所示，當流過最大電流 200 A 時，依照圖 1-9 (d)，可看出二極體兩端的壓降為 0.8 伏， \bar{V}_P 乘以 I_P 得 $200 \times 0.8 = 160 \bar{W}$ ，現在必須對這些功率如何由接合面散掉，以免過熱而燒毀加以研究，圖 1-10 所示為二極體之接合面的功率所產生的熱量經由散熱片流開的情形，當熱量流動時，就像沿着電流路徑有電壓降一樣，它也有溫度降，圖 1-11 為電與熱的模擬線路圖，其方程式如下：

$$\bar{V} = IR$$

$$T_J - T_A = P \cdot \theta_T = P [\theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA}] \dots\dots\dots (1-9)$$

式中的 P = 消耗之功率， θ_T = 熱阻。

θ_{JC} ， θ_{CS} ， θ_{SA} 三個熱阻成份分別代表由接合面至外殼，由外殼至散熱片，由散熱片至空氣的熱流阻力，通常製造廠商的規格表會標明接合面的最大容許溫度和 θ_{JC} [參考圖 1-9 (c)]。一般而言，電路的運作條件決定耗費的功率，而該電路工作之環境則決定了該元件周圍的溫度。

符號 參數	DR S- 250	251	252	253	254	單位
V_{RM} 峯值逆向電壓 (A.C.)	800	1000	1200	1400	1600	伏特
V_{tr} 暫態逆向電壓 (A.C.) $\leq 5ms$	1050	1300	1600	2000	2400	伏特
$V_{F(av)}$ 平均順向電壓降 (A.C.) at 250 Amps avg. at $T_c = 110^\circ C$	typ.	0.48	.....	.....	.....	伏特
	max.	0.55	.....	.....	.....	伏特
I_o 平均順向電流 (A.C.) at $T_c = 110^\circ C$	.....	250	.....	.....	.....	安培
i_{surge} ½週的衝擊電流 Peak at $T_c = 110^\circ C$	.....	4500	.....	.....	.....	安培
I_{RM} 峯值逆向電流 (A.C.) at rated PRV at T_j = $25^\circ C$	max	2	.....	.....	.....	毫安
at rated PRV at T_j = $175^\circ C$	max	10	.....	.....	.....	毫安

(b)

T_s 儲存溫度 (T_6 to T_7)	.....	- 50 to + 200	.....	$^\circ C$
T_j 接面工作溫度 (T_1 to T_5)	.....	- 40 to + 175	.....	$^\circ C$
θ_{jc} 接面至外殼之熱阻	.....	0.22	.....	$^\circ C / Watt$

(c)

8 工業電子學

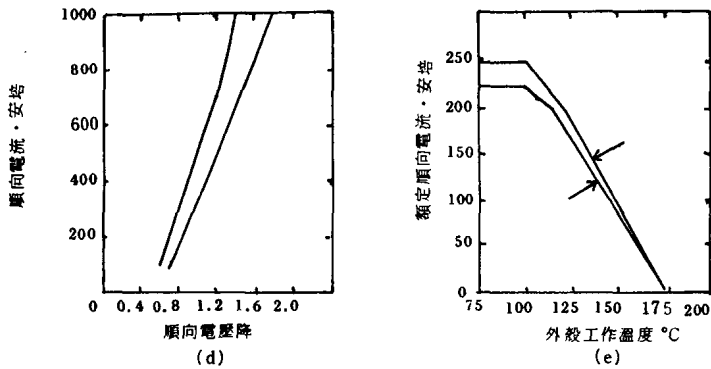


圖1-9 半導體：(a)尺寸及連接，(b)電額定及其特性，(c)熱額定及其特性
(d)順向特性曲線，(e)減低額定電流之曲線

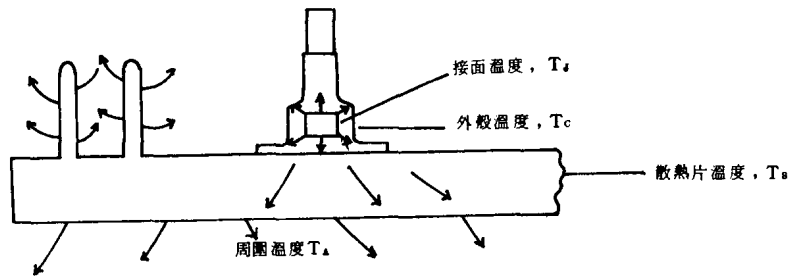
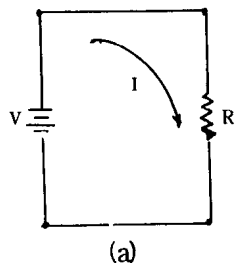


圖 1-10 在二極體及散熱片中之熱流

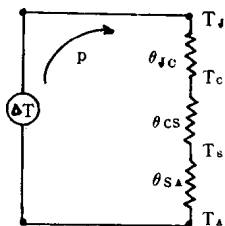
$$\text{因 } \theta_{cs} + \theta_{sa} = \frac{T_j - T_a}{P} - \theta_{jc} \quad \text{式中}$$

右邊所有參數值都是固定的，所以設計師的工作就是要控制 θ_{cs} 及 Q_{sa} 來避免二極體接合面的溫度超過最大額定值。外殼至散熱片的熱阻視二接觸面連的結構情形而定，其表面要很平，不能有隆起、粗邊、以及多污斑的情形出現，在外殼與散熱片間，不能上漆、上鍍，或經陽極處理，二接觸面應加壓，以使熱阻減至最小，一般所得的典型值時是 0.2 至 $0.7 \text{ } ^\circ\text{C} / \overline{W}$ ，所使用的絕緣墊（置於外殼與散熱座之間，通常是採用雲母片）會使 Q_{cs} 增大 5 倍以上。一般來說，散熱座是做成黑色的鋁頂結構，另外加很多翼片，也有經其他特殊處理，以使得到最大的冷卻效應。圖 1-12 所示為商用的散熱

片花樣，其熱阻及表面積都不一樣。在最克難的情形下，鋁片也可以當作散熱片材料來使用。圖 1-13 內方形鋁片的近似熱阻為 $Q_{SA} = 3.6A - 0.472$ ，這裡的 A 是表面積的大小（以吋²為單位），圖 1-13 這圖的數據是利用實驗，就各種不同的散熱片形狀將 Q_{SA} 對鋁板面積所測量出來的。



(a)



(b)

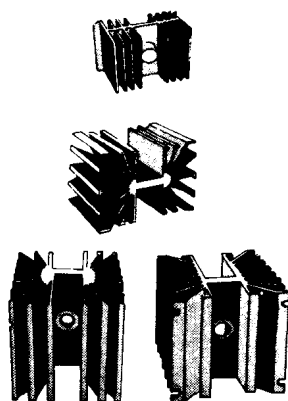


圖 1-13

圖 1-12 (a)電與(b)熱之串聯電路

製造商有時會額外提供像 1-9 (e) 圖之資料，只要二極體之外殼溫度低於 100 °C，二極體就能通過最大電流。

當外殼溫度高於 100 °C 時，就得降低二極體的電流，以免損壞 PN 接合面，在圖 1-6 之整流電路中，若接面溫度 T_J 與周圍溫度 T_A 及 Q_{JC} 分別為

$$T_J = 175^\circ \quad T_A = 25^\circ \quad Q_{JC} = 0.22$$

則
$$Q_{CS} + Q_{SA} = \frac{175 - 25}{P_J} - 0.22$$

又
$$P_J = I_F \times V_F \times 1.1 = 200 \times 0.48 \times 1.1 = 53 \text{ W}$$

其中 1.1 為波形因數

故
$$Q_{CS} + Q_{SA} = \frac{175 - 25}{53} - 0.22 = 2.42 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

如果我們假設 Q_{cs} 值為 $0.3^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，那麼 Q_{sA} 就必須等於 $2.12^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。因為有二個二極體，所以如果熱阻減半，或散熱片的面積加倍的話。這兩個二極體可以裝在同一塊散熱片上。由圖 1-13 所示，帶有翼片的平散熱片，或是面積約 250 吋² 之黑鋁已經很夠了。

2. 齊納二極體 (Zener Diode)：齊納二極體是一種專門工作於逆向崩潰電壓區域的二極體，其主要功用是作電壓穩定器或比較電壓的參考元件。齊納二極體亦稱為破壞二極體或基準二極體。

一般整流電路中的二極體均利用順向特性，而電路中的逆向工作電壓亦須設計於遠離二極體的崩潰電壓；且齊納二極體係工作於崩潰區域，而不是順向區域。齊納二極體的電路符號如圖 1-14 所示，圖中(a)為 E E E 標準符號，(b)及(c)為一般工業用的符號。

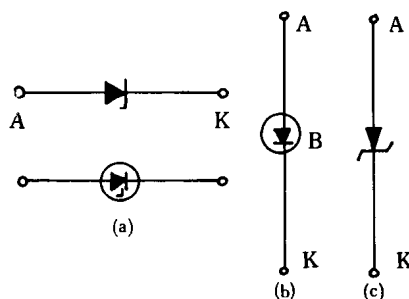


圖 1-14 齊納二極體符號

齊納二極體的伏特—安培特性曲線如圖 5 所示，其順向特性與普通二極體一樣，而它的逆向特性自曲線原點至“膝點”部份的電流是由半導體少數電流載體所造成的逆向偏壓電流 (I_P)，其值遠較普通二極體為小；一般規格表中所指的 I_P 係指齊納二極體的逆向工作電壓在 $0.8 V_Z$ (齊納電壓) 時的漏電流值。

當齊納二極體的逆向工作電壓 V_R 增加至膝點電壓時，齊納二極體將發生崩潰而使內阻急速下降，產生大量電流，於是，很小的逆向電壓變化就能使電流很快的增加。使用時須外加一電阻將電流限制於最大允許值 I_{ZM} 內，以免燒燬二極體。 I_{ZM} 之值則視齊納二極體本身的擴散功率而定。嚴格地說，崩潰有累增破壞及齊納破壞兩種。

通常齊納二極體的齊納電壓 (V_Z) 係指電流在 I_{ZT} 時二極體兩端的電壓