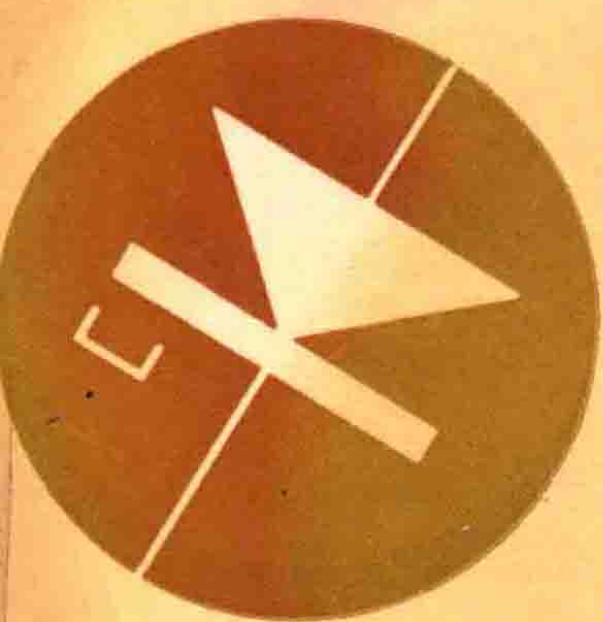




管極二納然 與 管極二道隧

ZENER DIODE
AND
TUNNEL DIODE



齊 華 編 著

香港萬里書店出版

然納二極管與隧道二極管
Zener Diode and Tunnel Diode

齊 華編著

香 港 萬 里 書 店 出 版

半導體普及叢書

然納二極管與隧道二極管

蔣 華編著

出版者：香港萬里書店

香港北角英皇道486號三樓

(P. O. BOX 15635, HONG KONG)

電話：5-712411 & 5-712412

承印者：劭華文化服務社

九龍觀塘偉業街一一六號二樓

定 價：港 幣 四 元

版權所有 * 不准翻印

(一九七四年二月版)

出版者的話

在近代的電子工業裏，半導體家族出了許多喧赫一時的“名將”，除了鍺質矽質晶體管較爲人所熟知之外，還有光電管（Photo-cell）、隧道二極管（Tunnel Diode）、霍爾產生器（Hall Generator）、磁敏電阻（Magnetoresistor）、壓敏電阻（Varistor）、熱敏電阻（Thermistor）、熱電耦（Thermo Couple）、熱電變換體、溫差致冷器、場效應晶體管（FET）、矽受控整流器（SCR）、單觸面晶體管（U.J.T）、集成電路（IC）……等等。這些新面世的半導體，在無線電領域中，各顯神通，以輕巧的體積，代替了龐然大物。由於它們的固有特性，有些“以一頂兩”，有些填補了電子器件的空白點，促進了電子科學向前發展。

許多半導體電子器件目前正以新的姿態出現在人們的面前，由於缺少了這一類中文專著，它們的特性、用途，甚至它們的名字，也不大爲人所了解，這對於無線電技術的推廣實在是一大障礙，這套“半導體普及叢書”就是爲了滿足這方面的需要而出版的。

爲了普及的緣故，書中盡量簡化數式計算，力求以顯

淺通俗的文句說明原理和應用，希望能使讀者融滙貫通。

古今中外都不例外，某些科學成就，並非單靠幾個專家偶然的靈感所能達致的，而是靠無數人的經驗積累和創造，因此，普及科學佔着非常重要的地位。這套叢書的出版如果能夠在普及和推廣半導體知識方面盡一分棉力的話，則是我們最大的願望。

目 次

出版者的話	1
第 1 章 然納二極管	1
1—1 伏—安特性	1
1—2 功率和溫度方面的考慮	4
1—3 脈沖功率耗散	8
1—4 然納二極管的電容及其影響	10
1—5 溫度係數的補償	13
1—6 阻抗的補償	15
1—7 然納二極管與充氣穩壓管的比較	17
思考題	18
第 2 章 然納二極管的應用	20
2—1 浪湧保護	20
2—2 放大器中的耦合和偏置	25
2—3 基準元件	28
2—4 串聯和並聯運用	35
2—5 然納二極管電路	36
思考題	40
第 3 章 隧道二極管	43

3—1	隧道效應·····	45
3—2	隧道二極管結·····	45
3—3	額定值和特性·····	51
3—4	等效電路和增益·····	52
3—5	穩定性準則·····	55
3—6	頻率限制·····	59
3—7	隧道二極管放大器·····	60
3—8	隧道二極管視頻放大器·····	61
3—9	隧道二極管調諧放大器·····	64
3—10	隧道二極管振盪器·····	68
3—11	隧道二極管用作開關·····	72
3—12	隧道二極管多諧振盪器·····	74
3—13	混合電路·····	82
	思考題·····	84

第1章 然納二極管

然納二極管 (Zener diode) 是一種直到臨界反向擊穿電壓以前都具有很高電阻的半導體器件。在這一臨界擊穿點上，反向電阻降低到一個很小的數值。在這個低電阻的區域中，電流增加，而電壓則實際上保持恒定。然納二極管是根據擊穿電壓分檔的。因為這種特性，然納二極管主要被作為穩壓器或電壓基準元件使用。

1—1 伏—安 特 性

在整流器的典型應用中，差不多只使用二極管的前向特性，因為通過適當地選擇電路元件，反向特性遠遠地被限制在擊穿電壓以內。而應用然納二極管時，工作區域是擊穿區域中，前向工作區域並不包括在內。擊穿的發生是因為加在耗盡區域上的高電場所引起的。像空氣的擊穿電場為 20KV/cm 一樣，半導體的擊穿電場為 200KV/cm 或者更大些。

嚴格地說來，存在着兩種類型的擊穿，就是雪崩擊穿和然納擊穿。在雪崩擊穿中，隨着反向電場的增加，少數載

流子的速度就增加。在這個過程中，發生與晶格原子的碰撞，並且具有足夠的能量以產生更多的載流子(空穴-電子對)。這些載流子依次獲得足夠的能量以產生新的空穴-電子對。在擊穿電壓上，電壓稍有一點兒增加，碰撞的雪崩就能產生很大的電流。這一類擊穿發生於結的一側是重摻雜的那種二極管中，並且擊穿電壓反比於結的輕摻雜側的雜質濃度。當結的兩邊都是重摻雜時，耗盡區域是很狹窄的。結果碰撞較少，且所獲得的能量不足以通過碰撞產生新的載流子。而在特別高的電場 ($1,000\text{KV/cm}$) 時，價帶中束縛鬆弛的電子就起了導電作用。這就是所謂的然納擊穿。據信擊穿過程中同時存在着這兩種機理，而當反向電壓大於 6V 時，雪崩擊穿特別佔優勢。

不管引起擊穿的機理如何，得到的反向電流特性是大體相同的，都如圖 1-1 所示。然納二極管的工作區域，是從功率耗散所限定的最大電流 I_{zm} 直到靠近曲線膝點的最

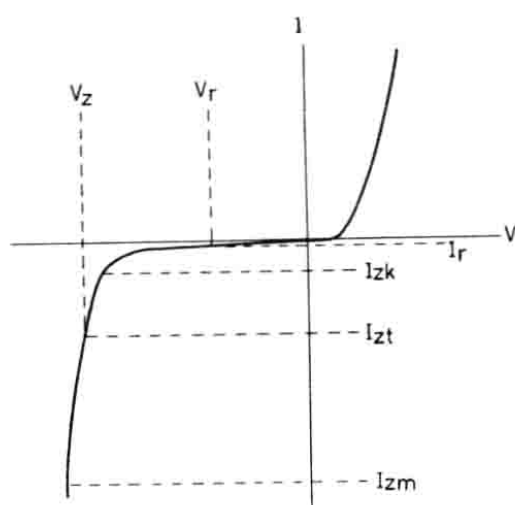


圖 1-1 典型的伏-安特性

小電流 I_{zk} 之間的任何地方都可以。顯然，因為曲線的斜率不是常數，阻抗就不是常數。

圖 1-2 示出了然納二極管的阻抗作為電流的函數的典型情況。通常製造者給出了在曲線兩個不同點上然納二極管的阻抗。一個是在最小電流 I_{zk} 時測得的最大阻抗 Z_{zk} ，另一個是在標稱的然納電壓 V_z 上，用中等範圍的測試電流 I_{zt} 測得的較低阻抗 Z_{zt} 。阻抗是通過在 I_{zk} 或 I_{zt} 上疊加一個頻率為 60Hz、大小（均方根值）等於直流然納電流（ I_{zk} 或 I_{zt} ）的百分之十的電流而測得的。

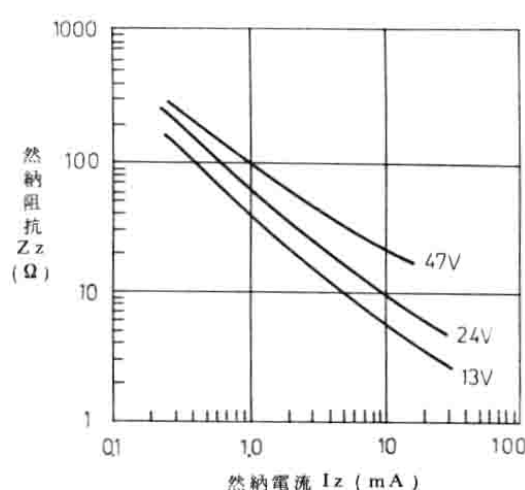


圖 1-2 典型的然納阻抗對然納電流的關係

一個較不重要的特性是在某一被規定的反向電壓 V_r 下流過的反向漏洩電流 I_r 。顯然，這個電壓是小於然納電壓的。

爲了清楚起見，前面敘述中所提到的符號開列如下：

I_{zm} = 最大的直流然納電流

I_{zk} = 靠近擊穿膝點的然納電流

I_{zt} = 然納二極管的測試電流

I_r = 反向漏洩電流

V_r = 反向漏洩電流為 I_r 時所加的反向偏壓

Z_{zk} = 靠近擊穿膝點 (I_{zk}) 的然納阻抗

Z_{zt} = 在測試電流 (I_{zt}) 時的然納阻抗

四分之三瓦的各種然納二極管的特性在表 1-1 中加以比較。

1—2 功率和溫度方面的考慮

因為半導體對溫度的變化很敏感，因此必須注意在然納二極管中耗散的平均功率不能超過它的額定值。平均功率耗散是

$$P_z = I_z V_z$$

這裏 I_z 和 V_z 分別為平均電流和電壓。在任何情況下，製造者都注明了在規定的功率極限下然納擊穿電壓的範圍。舉例來說，400mW 的然納二極管可以有從 6.8V 到 200V 分檔的各種然納電壓。顯然，應由具體的應用來確定所需的然納二極管。對於包含有高於正常溫度的應用來說，就要使用圖 1-3 所示的功率耗散減額曲綫。如果對 1 W(瓦)的器件應用這根曲綫的話，則若在 50°C 溫度下工作，二極管的功率耗散能力就要減至 0.82W。

對於大功率器件來說，更要注意不能超過最大的容許結溫 T_j ，這就是說，結的功率耗散能力存在一種限制。但

表 1—1 (3/4)W 的 然 納 二 極 管 的 電 氣 特 性*

型 號	Motorola 公司的 型 號	標稱的然納 電壓, 即在 I_{zt} 時的 V_z (V)	測試電流 I_{zt} (mA)	最大的然納阻抗(Ω)		最大的直流 然納電流 I_{zmax} (mA)	$I_r=5\mu A$ 時的最大 反向電壓		典型的然 納電壓溫 度係數 %/°C
				在 I_{zt} 時 的 Z_{zt}	在 $I_{zk}=0.25$ mA 時的 Z_{zk}		$V_r, 5\%$	$V_r, 10\%$	
1N3680	MZ623-6	11	11.5	9.5	700	55	8.4	8.0	0.060
1N3681	MZ623-7	12	10.5	11.5	700	53	9.1	8.6	0.065
1N3682	MZ623-8	13	9.5	13.0	700	50	9.9	9.4	0.065
1N3683	MZ623-9	14	9.0	14.5	700	45	10.6	10.1	0.070
	MZ623-10	15	8.5	16.0	700	42	11.4	10.8	0.070
1N3684	MZ623-11	16	7.8	17.0	700	40	12.2	11.5	0.070
	MZ623-12	17	7.2	19.0	700	38	13.0	12.2	0.075
1N3685	MZ623-13	18	7.0	21.0	750	35	13.7	13.0	0.075
	MZ623-14	19	6.5	23.0	750	33	14.4	13.7	0.075
1N3686	MZ623-15	20	6.2	25.0	750	32	15.2	14.4	0.075
1N3687	MZ623-16	22	5.6	29.0	750	29	16.7	15.8	0.080
1N3688	MZ623-17	24	5.2	33.0	750	26	18.2	17.3	0.080
	MZ623-18	25	5.0	36.0	750	24	19.0	18.0	0.080
1N3689	MZ623-19	27	4.6	41.0	750	23	20.6	19.4	0.085
1N3690	MZ623-20	30	4.2	49.0	1000	21	22.8	21.6	0.085
1N3691	MZ623-21	33	3.8	58.0	1000	20	25.1	23.8	0.085
1N3692	MZ623-22	36	3.4	70.0	1000	18	27.4	25.9	0.085
1N3693	MZ623-23	39	3.2	80.0	1000	15	29.7	28.1	0.090
1N3694	MZ623-24	43	3.0	93.0	1500	14	32.7	31.0	0.090
1N3695	MZ623-25	45	2.8	99.0	1500	13.5	34.2	32.4	0.090
	MZ623-26	47	2.7	105.0	1500	13	35.8	33.8	0.090
1N3696	MZ623-27	51	2.5	123.0	1500	12.2	38.8	36.7	0.090

* 環境溫度為 25°C; 全部器件都是在 $I_F=200mA$ 時 $V_F=1.5V$ 。

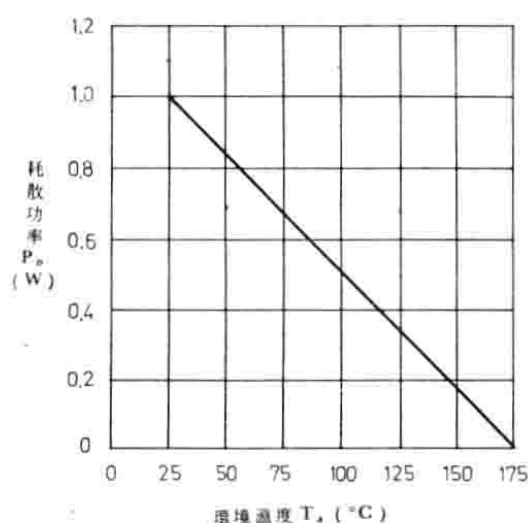


圖 1-3 減額曲綫

是，然納結有與二極管進行熱接觸的一些元件幫助散熱。這些元件就是散熱片、二極管的管殼，和管殼與散熱片之間的絕緣墊圈。每一元件都有熱阻，當它們像串聯電阻那樣相加起來，就等於結到環境的熱阻 θ_{JA} 。在數學上就是：

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA}$$

這裏 θ_{JA} = 總的熱阻（結到環境）

θ_{JC} = 然納結的熱阻（結到管殼）

θ_{CS} = 絕緣體的熱阻（管殼到散熱片）

θ_{SA} = 散熱片的熱阻（散熱片到環境）

熱阻是一個熱的係數，它與耗散1W時兩點之間的溫度差有關。其單位是 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。熱阻的典型數值是 $\theta_{JC} = 2.4^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 對於雲母墊圈來說， $\theta_{CS} = 0.8^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ；對於莫托羅拉 (Motorola) 公司的 MS-10 型散熱片來說， $\theta_{SA} = 2.75^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。溫度與熱阻的關係是：

$$T_j = P_z (\theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA}) + T_A \quad (1-3)$$

或者 $T_j = P_z \theta_{JA} + T_A \quad (1-4)$

這裏 T_A = 環境溫度。

用螺栓固定的二極管，結溫主要是由散熱片的熱阻來控制的。影響熱阻的因素有散熱片的材料、厚度、面積、形狀、顏色和空氣流等。如果要選擇散熱片的話，就必須從方程式 (1-3) 求出 θ_{SA} 。作為一個例子，考慮如下的問題。

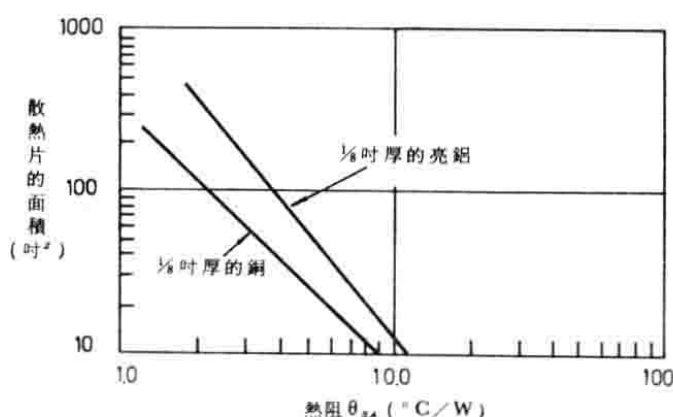


圖 1-4 散熱片面積與熱阻的關係。器件安裝在正方形散熱片的中心。在靜止空氣中，散熱片保持在垂直狀態。散熱片的面積等於其一個側面面積之兩倍。

例 1 在然納二極管的某一種應用中， $T_{jmax} = 175^\circ\text{C}$ ，

$T_A = 70^\circ\text{C}$ ， $\theta_{CS} = 0.8^\circ\text{C/W}$ ， $\theta_{JC} = 2.4^\circ\text{C/W}$ ， $P_z = 10\text{W}$ 。使用圖 1-4，求解：(a) θ_{SA} ；(b) 所需要的鋁散熱片的面積。

〔解〕：(a) 應用方程式 (1-3)

$$\begin{aligned}\theta_{SA} &= \frac{T_{jmax} - T_A}{P_z} \theta_{CS} - \theta_{JC} \\ &= \frac{175 - 70}{10} - 0.8 - 2.4 \\ &= 7.3^\circ\text{C/W}.\end{aligned}$$

(b) 從圖 1-4 可知，對於 $\theta_{SA} = 7.3$ 的情況，散熱片的面積等於 15 吋²。

例 1 中的散熱片是根據說明書所給出的可以製造或買得到的最小尺寸散熱片。爲了更正確的運用，在可預見的最壞條件下可以使用溫差熱電偶來監控然納二極管底座的溫度。因爲熱的和電氣方面的原因，適當地安裝散熱片也是重要的。首先，散熱片上安裝二極管的孔應比二極管的螺栓稍大一些。其次，必須除去孔中的毛刺，以使電氣短路的可能性減至最小。如果還使用絕緣滑潤劑，則必須注意保持滑潤劑離開二極管的螺栓。最後，加到二極管的螺母上的力矩必須合適（如製造者所介紹的）。裝得太緊會損壞絕緣體，而裝得太鬆則會影響熱阻 θ_{CS} 。

1-3 脈冲功率耗散

然納二極管的每一種應用，並不都要求穩態用法。在有些情況下，有一系列的脈冲加到二極管上，在某一段時間，二極管處於擊穿區域，而在另一段時間它不導電。如

同許多電氣設備或系統那樣，然納二極管具有把它的功率耗散擴展到穩態值以上的能力。這裏的問題是要確定不超過二極管的最大容許結溫的脈冲功率能有多大。顯然，這種擴展的程度是然納二極管的導通時間 t_1 對脈冲周期 t 之比的函數。這個比就稱為佔空因數 (t_1/t)。它也是然納二極管管殼和散熱片的熱耗散能力的函數。用類似於電學上的關係來說明這一點，就是

$$\lambda_{JC} = \theta_{JC} C_{JC} \quad (1-6)$$

這裏 λ_{JC} = 熱的時間常數 (結到管殼)

θ_{JC} = 熱阻 (結到管殼)

C_{JC} = 熱容 (結到管殼)

λ_{JC} 是結溫上升到其最終值的 63% 所需的時間 (單位為秒)。

同樣地，也有：

$$\lambda_{CA} = \theta_{CA} C_{CA}$$

這裏 C_{CA} 是散熱片的熱容 (管殼到環境)。

如果把一個矩形脈冲加到一個 RC 電路上，電容器上的電壓就會指數地上升。同樣，在相同的脈冲作用下，然納二極管的溫度跟着就會指數地上升。在數學上就是：

$$\Delta T(1 - e^{-t/\lambda_{JC}}) = P_p \theta_{JC}(1 - e^{-t_1/\lambda_{JC}}) \quad (1-7)$$

$$\text{或者} \quad T_{j\max} - T_c = P_p \theta_{JC} \left[\frac{1 - e^{-t_1/\lambda_{JC}}}{1 - e^{-t/\lambda_{JC}}} \right] \quad (1-8)$$

$$\text{或者} \quad P_p = \frac{T_{j\max} - T_c}{\theta_{JC}} C_{pJC} \quad (1-9)$$

這裏 P_p = 容許的峰值功率

C_{pJC} = 方程(1-8)中括弧內的倒數

如果使用散熱片的話，方程(1-9)就變成

$$P_p = \frac{T_{j\max} - T_A}{(\theta_{JC}/C_{pJC}) + (\theta_{CA}/C_{pCA})} \quad (1-10)$$

C_{pCA} 是散熱片係數，當脈冲寬度 t_1 比散熱片的熱時間常數 λ_{CA} 短得多的時候，它近似等於 t/t_1 。

上面的討論最好用下面的例子來說明。

例 2 下列由製造者提供的數據是對於安裝了散熱

片的情況給出的。50 瓦的然納二極管： $T_{j\max} = 175^\circ\text{C}$ ， $\theta_{CA} = 3.0^\circ\text{C/W}$ ， $\lambda_{CA} = 500\text{ms}$ ， $\theta_{JC} = 2.0^\circ\text{C/W}$ ， $\lambda_{JC} = 50\text{ms}$ 。工作時的環境溫度是 50°C ，如果以 15ms 的週期加上持續時間為 2ms 的矩形脈冲系列，求最大可容許功率。

[解]：因為 $t_1 \leq \lambda_{CA}$ ，

$$C_{pCA} = \frac{t}{t_1} = \frac{15}{2} = 7.5$$

$$C_{pJC} = \left[\frac{1 - e^{-t/\lambda_{JC}}}{1 - e^{-t_1/\lambda_{JC}}} \right] = \left[\frac{1 - e^{-15/50}}{1 - e^{-2/50}} \right] = 6.5$$

$$P_p = \frac{175 - 50}{(2.0/6.5) + (3/7.5)} = 176\text{W}$$

如果所耗散的穩態功率 P_{ss} 與矩形脈冲系列相符的話，峰值脈冲功率就被減少。方程 (1-10) 就變成

$$P_p = \frac{T_{j\max} - T_A - \theta_{JA} P_{ss}}{(\theta_{JC}/C_{pJC}) + (\theta_{SA}/C_{pCA})} \quad (1-11)$$

1—4 然納二極管的電容及其影響

在 P-N 結被反向偏置時，可動載流子(空穴和電子)