

双极型功率晶体管的温度分布和 直流安全工作区

曾庆明

(河北半导体研究所, 石家庄)

1984年12月7日收到

当晶体管的热点温度保持在 200°C 时, 晶体管的额定耗散功率随集电结电压增加而减小。本文试图由温度分布随集电结电压的变化来解释这现象。介绍一个计算热阻和温度分布的方法并给出详细的热扩展系数图表。将其和晶体管发射极电流方程相结合得到不同偏置下晶体管的热点温度。计算结果与红外显微镜实测结果相符。

一、引言

晶体管的直流安全工作区边界一般由三部分组成^[1]。即最大额定电流 I_{CM} , 最高电压 V_{CEO} 和峰值结温等于最高允许结温 (例如 200°C) 时的 $V_{CE} \sim I_C$ 曲线组成, 如图1所示。其中一、二两部份意义是明显的, 人们主要关心的是第三部份。这一部份曲线上的 $V_{CE}I_C$ 乘积一般都随 V_{CE} 提高而下降。人们通常用二次击穿来解释这现象^[2]。我们观察正常功率晶体管的红外扫描温度分布曲线, 一般都看到很规律的温度分布, 且随集电极电压升高, 同样功耗时红外热象仪上的热区逐渐向器件中心收缩, 四周温度逐步降低, 中心温度逐步升高, 因此这里试图从计算峰值结温随工作点变化来解释安全区的这一段曲线。

本文首先介绍一种计算温度分布的方法^[3]并给出一个较完整的计算图表, 由它得出已知耗散功率分布时的晶体管温度分布, 再结合双极晶体管电流方程, 计算出不同集电结电压, 但相同功耗情况下的峰值结温。最后举例将计算结果与实测结果作比较。

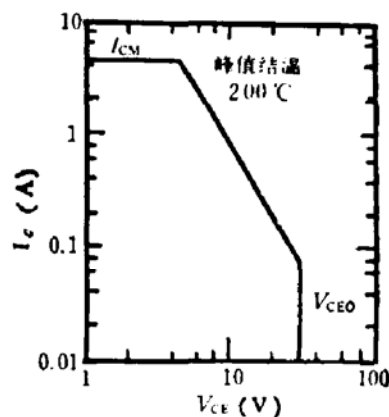


图1 典型的晶体管直流安全工作区

二、均匀发热区的温度分布

假设导热体为一厚 h 的平行平板, 在上表面 $a \times b$ 的发热区内均匀发热 (设 $a \geq b$), 在此区之外的上表面为绝热面, 下底为等温面, 由镜相法推得发热区中心与底面之间的温度差

$$\Delta T_{\infty} = P \frac{h}{ab\sigma_T} \phi_r \left(\frac{a}{h}, \frac{b}{h} \right), \quad (1)$$

式中 P 为发热区功率, σ_T 为热导率, ϕ_r 称矩形发热区热扩展系数

$$\begin{aligned} \phi_r = \phi_c \left(\frac{b}{2h} \right) + \int_{\frac{b}{2h}}^{\frac{a}{2h}} \frac{2 \arcsin \left(\frac{b}{2x} \right)}{\pi} \frac{d \left[\phi_c \left(\frac{x}{h} \right) \right]}{d \left(\frac{x}{h} \right)} d \left(\frac{x}{h} \right) \\ + \int_{\frac{a}{2h}}^{\sqrt{\left(\frac{a}{2h} \right)^2 + \left(\frac{b}{2h} \right)^2}} \frac{2}{\pi} \left[\arcsin \left(\frac{b}{2x} \right) - \arccos \left(\frac{a}{2x} \right) \right] \\ \times \frac{d \left[\phi_c \left(\frac{x}{h} \right) \right]}{d \left(\frac{x}{h} \right)} d \left(\frac{x}{h} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

此处 ϕ_c 称圆形发热区的热扩展系数, 它是圆形均匀发热区的半径 r 和厚度 h 的比值的函数。

$$\phi_c \left(\frac{r}{h} \right) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[\sqrt{\left(\frac{r}{h} \right)^2 + (2n)^2} - \sqrt{\left(\frac{r}{h} \right)^2 + (2n+2)^2} + 2 \right], \quad (3)$$

当 $\phi_r \left(\frac{a}{h}, \frac{b}{h} \right)$ 的其中一变量 $\frac{a}{h} \gg 1$ 时, 可简化为二维情况处理, 此时

$$\phi_r \left(\frac{a}{h}, \frac{b}{h} \right) \Big|_{\frac{a}{h} \rightarrow \infty} = \phi_{Ls} \left(\frac{b}{h} \right). \quad (4)$$

$\phi_{Ls} \left(\frac{b}{h} \right)$ 称长条形发热区热扩展系数。

$$\begin{aligned} \phi_{Ls} \left(\frac{b}{h} \right) = \frac{b}{\pi h} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ (-1)^n \left[\ln \sqrt{\frac{\left(\frac{b}{h} \right)^2 + [4(n+1)]^2}{\left(\frac{b}{h} \right)^2 + (4n)^2}} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{4nh}{b} \arctan \frac{b}{4nh} + \frac{4(n+1)h}{b} \arctan \frac{b}{4(n+1)h} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

附表 1、2 和 3 分别给出 $\phi_{Ls} \left(\frac{b}{h} \right)$ 、 $\phi_c \left(\frac{r}{h} \right)$ 和 $\phi_r \left(\frac{a}{h}, \frac{b}{h} \right)$ 的数值, 图 2 给出 $\phi_r \left(\frac{a}{h}, \frac{b}{h} \right)$ 的曲线。

对于上表面发热区内、外任一点的温度, 例如发热区内 M 的温度可用图 3 所示方法, 将整个发热区分为以 M 为中心的 4 个 $1/4$ 矩形发热区, M 点的温度与底面的温度差

$$\begin{aligned} \Delta T_{x_0 y_0} = \frac{Ph}{ab\sigma_T} \frac{1}{4} \left[\phi_r \left(\frac{b-2x_0}{h}, \frac{a-2y_0}{h} \right) \right. \\ \left. + \phi_r \left(\frac{b-2x_0}{h}, \frac{a+2y_0}{h} \right) + \phi_r \left(\frac{b+2x_0}{h}, \frac{a-2y_0}{h} \right) \right] \end{aligned}$$

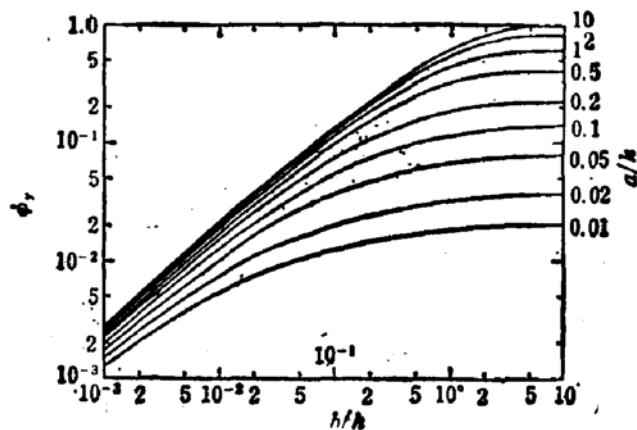


图2 矩形发热区的热扩展系数

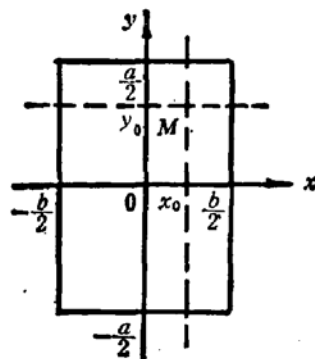


图3 求上表面任一点温度的方法

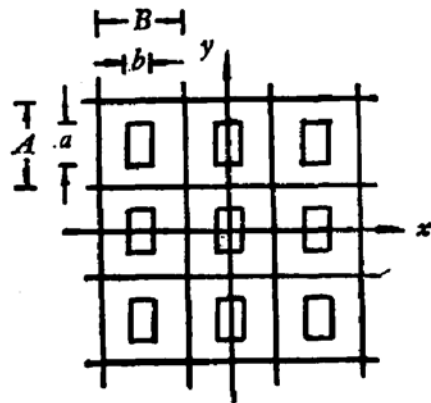


图4 侧壁为绝热面的无穷多镜相模型

$$+ \phi_r \left(\frac{b + 2x_0}{h}, \frac{a + 2y_0}{h} \right) \quad (6)$$

依此类似方法可得出整个上表面发热区内、外任一点的温度分布。多个发热区情况下, 整个温度分布为所有单发热区温度分布的叠加。

当实际芯片横向尺寸 $A \times B$ 与厚度 h 可以相比拟时, 需要考虑侧壁对晶体管温度分布的影响。假设四周侧壁为绝热面, 可用图4所示无穷多镜相模型来满足四周绝热的边界条件, 所有镜相发热区产生温差的叠加即为总温差。

三、双极晶体管峰值结温的计算

一般功率晶体管发射极-基极电极之间的电压降 V_{be} 与发射结电压 V_i 有如下关系:

$$V_{be} = V_i + I_e r_{bal} + \frac{I_c}{\beta} r'_{bb} \approx V_i + I_e r_{bal} \quad (7)$$

式中 r_{bal} 为发射极镇流电阻 (或寄生的串联电阻), r'_{bb} 为基极电阻。在基区少数浓度比多数浓度低得多的情况下, 可以用通常的电流公式[4]。

$$I_e = A_e \frac{q D_{nb} n_i^2}{W_b N_{ab}} \exp \left(\frac{q V_i}{K T} \right), \quad (8)$$

$$n_i^2 = 1.5 \times 10^{33} T^3 \exp(-1.2/KT). \quad (9)$$

式中 $W_b N_{ab}$ 为基区受主杂质总量, A_e 为发射结面积, D_{nb} 为基区电子扩散系数, n_i 为本征载流子浓度, 由(7)–(9)式得

$$e^{\frac{qV_{be}}{KT}} = \frac{I_c W_b N_{ab}}{A_e q D_{nb} 1.5 \times 10^{33} T^3} e^{\frac{1.2 + I_c r_{bal}}{KT}}, \quad (10)$$

$$I_c e^{\frac{qI_c r_{bal}}{KT}} = \frac{A_e q D_{nb} 1.5 \times 10^{33} T^3}{W_b N_{ab}} e^{\frac{q(V_{be} - 1.2)}{KT}}. \quad (11)$$

上一节我们已给出均匀发热器件温度分布和峰值结温的计算方法, 对一矩形发热区来说, 总是中心温度较高, 向四周逐渐降低. 由上面(10)、(11)式清楚看出, 在同一 V_{be} 电压下, 双极晶体管的发射极电流随温度增加而增大, 因此使得器件中心温度比均匀发热情况更高, 而四周温度则更低. 为计算方便, 首先假设器件结温等于其平均温度 $\bar{T}$ 的某一点, 其电流密度也等于其平均电流密度 j_{c0} . 将 $\bar{T}$ 、 j_{c0} 、 r_{bal} 、 D_{nb} 、 $W_b N_{ab}$ 值代入(10)式, 可得到 V_{be} 值. 利用此 V_{be} 值代入(11)式, 可得到 $\bar{T}$ 附近 $j_c \sim T$ 曲线, 这曲线在 $\bar{T}$ 附近近似为一线性关系

$$T - \bar{T} = k(j_c - j_{c0}). \quad (12)$$

此处常数 k 很大地依赖于 r_{bal} .

另一方面; 由于器件中心电流密度 j_{cp} 大于平均电流密度 j_{c0} , 中心结温与底座温度之差 ($T_p - T_c$) 也大于按发热区内均匀电流密度 j_{c0} 计算的中心结温与底座温度之差 ($T_{p0} - T_c$). 我们设定一些典型的电流分布, 计算出此时的 T_{p0} 和 T_p , 看出它们之间遵守又一个近似的关系式:

$$\frac{T_p - T_c}{T_{p0} - T_c} = \frac{1}{M} \frac{j_{cp}}{j_{c0}}. \quad (13)$$

常数 M 由器件几何形状决定. 将 T_p 和 j_{cp} 代入(12)式, 结合(13)式可得出峰值结温

$$T_p = \frac{T_{p0} - \frac{\bar{T}(T_{p0} - T_c)}{k M j_{c0}}}{1 - \frac{T_{p0} - T_c}{k M j_{c0}}}. \quad (14)$$

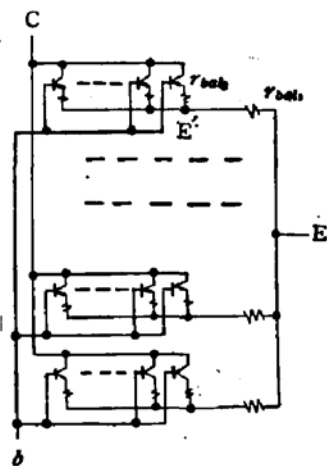


图5 计算峰值结温时的晶体管模型

等电位, 而各发射极金属条 E' 之间不等电位. 我们可利用上面(10)–(14)式的方法, 先考虑 r_{bal1} 的影响, 求出整个发热区中, 中心条的平均温度 T_p' 及平均电流密度 j_{cp}' , 然后考虑 r_{bal2} 的影响, 求出中心条上中心点的温度 T_p .

此外由于晶体管常采用多元胞结构, 即有几个分立的发热区, 并且发射极镇流电阻上

还要消耗一定功率,这些需对上面计算结果作些修正。

最后需要说明,晶体管在加有直流功率情况下,其发热区主要在发射极正下方及其附近的收集结区。对高频功率晶体管来说,由于各发射极条间距很小,可以不考虑发射极条宽及间距的影响,认为最外面有源区所包围的集电结区域为发热区。对于低频大功率晶体管,需要考虑发射区尺寸的影响。

四、计算与实测结果举例

考虑如图 6 所示几何图形的晶体管,它由对称的两单胞组成。芯片厚度 $124\mu\text{m}$, 芯片面积 $0.85 \times 0.85(\text{mm})^2$ 。设硅热导率为 $1.0\text{W}/\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$, 发射结面积 $4 \times 10^{-4}\text{cm}^2$; $W_b N_{ab} = 1.25 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$, $D_{nb} = 8\text{cm}^2/\text{s}$, $r_{bal1} = 0.6\Omega$, $r_{bal2} = 0.05\Omega$ (此值根据同片上制作的未加镇流电阻的器件得出), 晶体管发热区面积 $= 2 \times 486 \times 124(\mu\text{m})^2$, 镇流电阻离有源区 $18\mu\text{m}$, 电阻长 $16\mu\text{m}$, 晶体管芯片共晶熔焊在 BeO 载体上, BeO 热导率 $2.2\text{W}/\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$, 厚 $1\text{m}/\text{m}$, 热沉温度 65°C 。为了计算方便,设芯片各点均匀向 BeO 传热,得 BeO 热阻为 $2.5165^\circ\text{C}/\text{W}$, 加 6W 耗散功率时, BeO 与硅界面中心为 80.1°C , 又设此界面为等温面计算芯片结温。我们对同一器件,计算和测量了 $6\text{V}, 1\text{A}; 10\text{V}, 0.6\text{A}; 20\text{V}, 0.3\text{A}; 24\text{V}, 0.25\text{A}$ 四个工作点时的峰值结温。

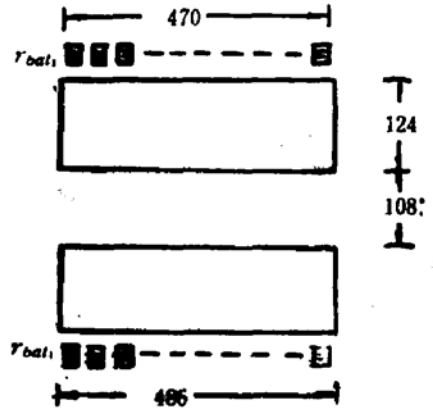


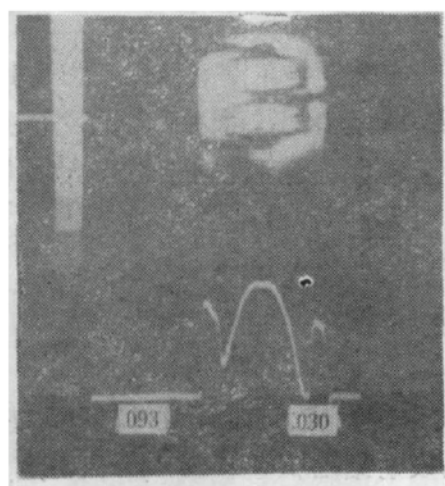
图 6 晶体管几何图形[单位 μm]

由于晶体管两单胞相距较远,我们先考虑其中一个单胞,计算出均匀发热时,发热区平均温度 $\bar{T}$ 和中心发射极条的平均温度 T'_{p0} ,代入 r_{bal1} , $W_b N_{ab}$, D_{nb} 等值,以及几何尺寸数值,求出(12)、(13)式中的常数 k' 和 M' 。由于双极晶体管的电流-温度特性,由(14)式得到中心条平均温度 T'_p 和平均电流密度 j'_{cp} 。然后根据此 T'_p , j'_{cp} 值,再代入 r_{bal2} 等值以及几何尺寸数值,求出(12)、(13)式中的常数 k 和 M ,也由(14)式得到中心条正中的温度 T''_p 。最后考虑到邻近单胞和镇流电阻 r_{bal2} 上功耗的影响,得到修正后的峰值结温 T_p 。详细结果列于表 1。

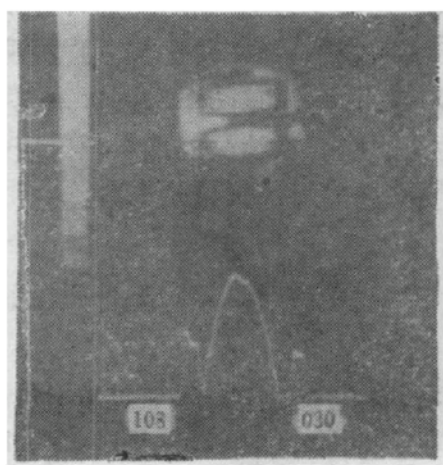
用 RM-50 红外扫描显微镜观测的实物照片给出图 7,器件表面辐射率为 0.43,换算得峰值结温数值也给出于表 1,可以看出二者是比较接近的。

我们还测量了另一个功率电平很相近的晶体管,它分为 6 个单胞,因此它有较大的 M' 及 M 值,但由于它 $r_{bal1}(\sim 0.1\Omega)$ 和 $r_{bal2}(\sim 0.01\Omega)$ 均较小,随 V_{CE} 升高,加 6W 耗散功率时峰值结温很快上升,其 $8\text{V}, 10\text{V}$ 和 20V 时的峰值结温分别为 151°C , 157.3°C 和 170.54°C 。

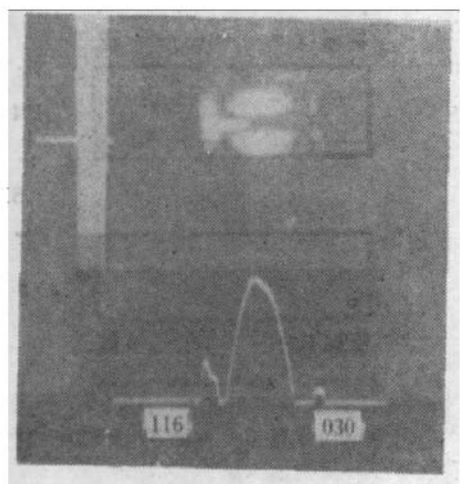
为了提高 V_{CE} 较高时器件的额定直流耗散功率,除减小器件热阻外,增加镇流电阻值,特别是增加 r_{bal2} 的数值是很有效的。采用刻发射极窗口的枝状或网状结构比泡发射极窗口的梳状或覆盖结构有较大的 r_{bal2} 值,采用纵向的多晶硅镇流电阻将是更好的方法^[1]。采用不均匀的 r_{bal1} 镇流电阻能使各发射极条间温度分布更趋于均匀^[2],对甲类线



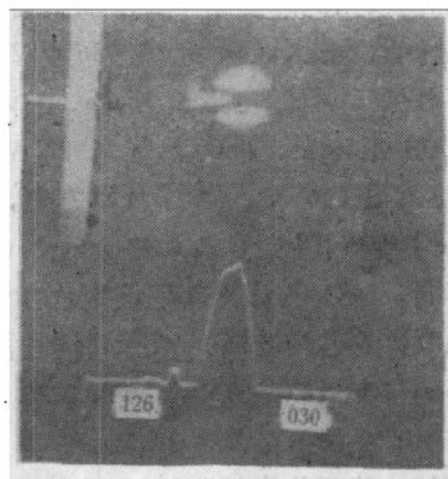
(a) 6V, 1A;



(b) 10V, 0.6A;



(c) 20V, 0.3A;



(d) 24V, 0.25A

图7 用 RM-50 红外扫描显微镜观测的照片

表1 不同直流工作点下的结温

参数 \ 工作点	6V1A	10V0.6A	20V0.3A	24V0.25A	附注
$\bar{T}_j, T_{po} [^{\circ}\text{C}]$	$\bar{T} = 110.56^{\circ}\text{C} \quad T_{po} = 114.08^{\circ}\text{C}$				$T_c = 80.1^{\circ}\text{C}$
$k'/A_s [^{\circ}\text{C}/\text{A}]$	438.037	439.833	456.677	465.122	$M' = 1.1$
$T_p [^{\circ}\text{C}]$	114.3698	114.5908	115.2209	115.5076	
$i_{sp} \cdot A_s [\text{A}]$	1.008695	0.609163	0.310204	0.260635	$M = 2.0$
$k/A_s [^{\circ}\text{C}/\text{A}]$	53.194	64.593	93.411	104.719	
$T_p' [^{\circ}\text{C}]$	120.312	122.115	127.266	129.716	
$T_p [^{\circ}\text{C}]$	119.56	123.21	129.14	131.67	
$T_p [^{\circ}\text{C}]$ 实测值	119.5	125.6	128.6	132.3	

性工作的器件更有好处,但也要注意 r_{bel2} 的影响可能更大。此外减小器件单元的尺寸,特别是减小每个发射极镇流电阻 r_{bel1} 所连接的发射极条长度。因而提高 M 值,也能有效提高高 V_{CE} 时的额定功耗。

五、结 束 语

基于常用边界条件和严格的数学推导得出的公式,计算出较详细的热扩展系数表格。利用这一表格可方便得出各种圆形、长条形、特别是矩形均匀发热区的热阻和温度分布,

附表 1 长条形发热区的热扩展系数

$\frac{b}{h}$	$\phi_{LS}(\frac{b}{h})$	$\frac{b}{h}$	$\phi_{LS}(\frac{b}{h})$	$\frac{b}{h}$	$\phi_{LS}(\frac{b}{h})$
0.001	0.0028146	0.12	0.154891	1.4	0.726598
0.002	0.0051880	0.15	0.182975	1.5	0.747733
0.005	0.0115117	0.20	0.225671	1.6	0.767165
0.010	0.0208171	0.25	0.264362	1.8	0.801515
0.015	0.0292897	0.30	0.299869	2.0	0.830677
0.020	0.0372215	0.35	0.332736	2.5	0.885972
0.025	0.0447512	0.40	0.363349	3.0	0.923097
0.030	0.0519605	0.45	0.392000	3.5	0.948101
0.035	0.0589032	0.50	0.418915	4.0	0.964965
0.040	0.0656179	0.60	0.468232	5.0	0.984029
0.045	0.0721331	0.70	0.512411	6.0	0.992719
0.050	0.0784711	0.80	0.552248	7.0	0.996680
0.06	0.0906836	0.90	0.588346	8.0	0.998486
0.07	0.102363	1.0	0.621178	9.0	0.999310
0.08	0.113588	1.1	0.651126	10.0	0.999685
0.09	0.124412	1.2	0.678508	12.0	0.999934
0.10	0.134883	1.3	0.703589	15.0	0.999994

附表 2 圆形发热区的热扩展系数

$\frac{r}{h}$	$\phi_c(\frac{r}{h})$	$\frac{r}{h}$	$\phi_c(\frac{r}{h})$	$\frac{r}{h}$	$\phi_c(\frac{r}{h})$
0.0005	0.000499913	0.09	0.0871946	1.4	0.807032
0.001	0.000999652	0.10	0.0965371	1.5	0.830768
0.002	0.00199861	0.12	0.115015	1.6	0.851761
0.0025	0.00249783	0.15	0.142216	1.8	0.886622
0.005	0.00499133	0.20	0.186182	2.0	0.913611
0.01	0.00996534	0.25	0.228448	2.5	0.956795
0.012	0.0119501	0.30	0.269034	3.0	0.978702
0.015	0.0149220	0.35	0.307961	3.5	0.989611
0.02	0.0198614	0.40	0.345254	4.0	0.994973
0.025	0.0247834	0.45	0.380944	4.5	0.997583
0.03	0.0296881	0.50	0.415060	5.0	0.9988439
0.035	0.0345755	0.60	0.478717	6.0	0.9997386
0.04	0.0394456	0.70	0.536529	7.0	0.9999416
0.045	0.0442983	0.80	0.588829	8.0	0.99998704
0.5	0.0491337	0.9	0.635970	9.0	0.99999714
0.06	0.0587527	1.0	0.678318	10.0	0.99999936
0.07	0.0683025	1.1	0.716240	12.0	0.99999985
0.08	0.0777831	1.2	0.750099		

附表3 矩形发热区的热扩展系数

$\phi_r(a/h, b/h)$	a/h	0.01	0.015	0.02	0.03	0.05	0.07	0.1	0.15	0.2	0.3
0.001		0.001272	0.001400	0.001491	0.001619	0.001780	0.001885	0.001995	0.002117	0.002203	0.002321
0.002		0.002103	0.002359	0.002540	0.002796	0.003117	0.003326	0.003547	0.003793	0.003965	0.004201
0.005		0.003824	0.004450	0.004899	0.005534	0.006333	0.006857	0.007407	0.008206	0.008456	0.009046
0.01		0.005601	0.006772	0.007638	0.008884	0.01047	0.01151	0.01261	0.01384	0.01470	0.01588
0.015		0.006772	0.008392	0.009627	0.01144	0.01379	0.01534	0.01699	0.01884	0.02012	0.02189
0.02		0.007638	0.009627	0.01118	0.01351	0.01659	0.01865	0.02082	0.02323	0.02500	0.02736
0.03		0.008884	0.01144	0.01351	0.01674	0.02115	0.02417	0.02741	0.03107	0.03364	0.03717
0.05		0.01047	0.01379	0.01659	0.02115	0.02778	0.03253	0.03775	0.04374	0.04799	0.05384
0.07		0.01151	0.01534	0.01865	0.02417	0.03253	0.03874	0.04573	0.05394	0.05980	0.06794
0.1		0.01261	0.01699	0.02082	0.02741	0.03775	0.04573	0.05503	0.06624	0.07436	0.08587
0.15		0.01384	0.01884	0.02328	0.03107	0.04374	0.05394	0.06624	0.08169	0.09329	0.1099
0.20		0.01470	0.02012	0.02500	0.03364	0.04799	0.05980	0.07436	0.09329	0.1078	0.1292
0.30		0.01588	0.02189	0.02736	0.03717	0.05384	0.06794	0.08587	0.1099	0.1292	0.1584
0.5		0.01729	0.02400	0.03017	0.04139	0.06086	0.07772	0.09975	0.1304	0.1560	0.1967
0.7		0.01814	0.02528	0.03187	0.04395	0.06512	0.08368	0.1082	0.1431	0.1726	0.2213
1.0		0.01896	0.02650	0.03350	0.04639	0.06918	0.08936	0.1163	0.1552	0.1887	0.2448
1.5		0.01973	0.02766	0.03505	0.04870	0.07304	0.09476	0.1240	0.1668	0.2040	0.2676
2.0		0.02015	0.02830	0.03588	0.04997	0.07516	0.09772	0.1283	0.1731	0.2125	0.2802
3.0		0.02056	0.02890	0.03670	0.05118	0.07717	0.1005	0.1323	0.1791	0.2205	0.2922
5.0		0.02077	0.02922	0.03713	0.05183	0.07825	0.1020	0.1344	0.1823	0.2248	0.2986
7.0		0.02081	0.02928	0.03720	0.05194	0.07843	0.1023	0.1348	0.1829	0.2255	0.2997
10.0		0.02082	0.02929	0.03722	0.05196	0.07846	0.1024	0.1349	0.1830	0.2257	0.2999
∞		0.02082	0.02929	0.03722	0.05196	0.07847	0.1024	0.1349	0.1830	0.2257	0.2999

$\phi_r(a/h, b/h)$	a/h	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0	7.0	10.0	∞
0.001		0.002462	0.002547	0.002629	0.002706	0.002748	0.002788	0.002810	0.002814	0.002814	0.002815
0.002		0.004483	0.004653	0.004816	0.004971	0.005055	0.005136	0.005179	0.005186	0.005188	0.005188
0.005		0.009749	0.01018	0.01059	0.01097	0.01118	0.01138	0.01149	0.01151	0.01151	0.01151
0.01		0.01729	0.01814	0.01896	0.01973	0.02015	0.02056	0.02077	0.02081	0.02082	0.02082
0.015		0.02400	0.02528	0.02650	0.02766	0.02830	0.02890	0.02922	0.02928	0.02929	0.02929
0.02		0.03017	0.03187	0.03350	0.03505	0.03589	0.03670	0.03713	0.03720	0.03722	0.03722
0.03		0.04139	0.04395	0.04639	0.04870	0.04997	0.05118	0.05183	0.05194	0.05196	0.05196
0.05		0.06086	0.06512	0.06918	0.07304	0.07516	0.07717	0.07825	0.07843	0.07846	0.07847
0.07		0.07772	0.08368	0.08936	0.09476	0.09772	0.1005	0.1020	0.1023	0.1024	0.1024
0.1		0.09975	0.1082	0.1163	0.1240	0.1283	0.1323	0.1344	0.1348	0.1349	0.1349
0.15		0.1304	0.1431	0.1552	0.1668	0.1713	0.1791	0.1823	0.1829	0.1830	0.1830
0.20		0.1560	0.1726	0.1887	0.2040	0.2125	0.2205	0.2248	0.2255	0.2257	0.2257
0.30		0.1967	0.2213	0.2448	0.2676	0.2802	0.2922	0.2986	0.2997	0.2999	0.2999
0.5		0.2532	0.2910	0.3287	0.3657	0.3862	0.4060	0.4167	0.4185	0.4189	0.4189
0.7		0.2910	0.3395	0.3893	0.4392	0.4674	0.4946	0.5094	0.5119	0.5124	0.5124
1.0		0.3287	0.3893	0.4538	0.5201	0.5585	0.5961	0.6168	0.6204	0.6211	0.6212
1.5		0.3657	0.4392	0.5201	0.6073	0.6594	0.7118	0.7414	0.7466	0.7477	0.7477
2.0		0.3862	0.4674	0.5585	0.6594	0.7216	0.7854	0.8226	0.8286	0.8306	0.8307
3.0		0.4060	0.4946	0.5961	0.7118	0.7854	0.8641	0.9122	0.9212	0.9230	0.9231
5.0		0.4167	0.5094	0.6168	0.7414	0.8226	0.9122	0.9699	0.9812	0.9838	0.9840
7.0		0.4185	0.5119	0.6204	0.7466	0.8286	0.9212	0.9812	0.9935	0.9964	0.9967
10.0		0.4189	0.5124	0.6211	0.7477	0.8306	0.9230	0.9838	0.9964	0.9994	0.9997
∞		0.4189	0.5124	0.6212	0.7477	0.8307	0.9231	0.9840	0.9967	0.9997	1.0000

还可得出多发热区器件的热阻和温度分布,非均匀发热区也可按多个均匀发热区来处理。这对于计算半导体器件、电路、封装的热特性和计算象体电阻之类的电参数将会带来些方便。

基于这里给出的温度分布计算方法和一般的晶体管电流公式,给出了一种峰值结温计算方法。由于在相同功耗时,较高偏置电压,因之较小的发射极电流使发射极镇流电阻镇流作用减弱,峰值结温升高。计算结果与实测结果基本相符。因此也就解释了双极晶体管按最高结温确定的直流安全工作区额定功率随 V_{CE} 提高而下降的特性,可能用来设计计算晶体管的直流安全工作区。

本文前一部分整理中,高尚通同志提出了宝贵意见,后一部分承李高庆、何岩、纪绍礼同志协助作了红外扫描热特性测试,被测样品由十三所201组提供,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] C. B. Lenthanser, RCA RF/Microwave Device, p437 (1975).
- [2] 宋南章、徐义刚,晶体管原理, p222 (1980).
- [3] 曾庆明,半导体情报, No. 4, 21 (1982).
- [4] Richard Allison, IEEE Trans., MTT-27, 415 (1979).
- [5] 高光瀚,半导体技术, No. 4, 1 (1978).

Temperature Distribution and Safe Operating Area for Bipolar Transistors

Zeng Qingming

(Hebei Semiconductor Research Institute)

Abstract

This paper attempts to interpret the character from the temperature distribution changes with collector junction voltage. A method is introduced for computing thermal resistance and temperature distribution, thus giving a detailed graph for thermal spreading coefficients. And together with the transistor current equations, the hot spots temperature of a transistor under different bias is obtained. The results computed are in agreement with those measured by infrared microscope.