

# 热应力对半导体分立器件失效率的影响

莫郁薇 (电子部五所, 广州, 510610)

**摘 要** 本文通过对大量现场和试验可靠性数据的统计分析, 论证了采用阿伦尼斯模型描述热应力对半导体分立器件失效率影响的适用性, 获得了热激活能典型值和变化范围; 比较和分析了激活能试验值与现场值的区别。本文在九百多个测试结果的基础上, 获得常用封装国产分立器件的热阻典型值及离散性, 分析了脉冲状态下分立器件热性能特点。这些成果有助于解决可靠性预计中温度系数模型建立和参数确定的难题, 同时为整机的降额、冷却设计和分立器件研制厂改进产品设计、生产工艺提供了参考依据。

## 1 温度系数模型

国产分立器件现场使用失效率中, 约有50%与电、热应力有关。这部分失效包括参数漂移、短、断路等。美国军用器件的失效统计显示, 电、热应力引起的失效(现场使用)占70%左右<sup>[1]</sup>。因而, 电、热应力是引起半导体器件失效的最主要因素。

温度应力对半导体分立器件失效的加速作用主要体现在以下几个方面:

- (1) 加速硅-铝接触退化;
- (2) 加速不同金属接触面的性能劣化;
- (3) 加速封装材料中有机物的老化, 绝缘性能和防护性能的劣化, 加速了对器件有害物质的释放(如水汽、Na<sup>+</sup>离子及重金属物质, 从而导致器件内部污染和腐蚀;
- (4) 清洁处理不善而残留腐蚀剂在高温下发生加速腐蚀反应;
- (5) 粘接焊料在高温下加速氧化, 从而加速器件芯片烧结劣化、热阻增大。

美国 MIL-HDBK-217F《电子设备可靠性预计手册》采用了阿伦尼斯模型来描述热应力对半导体分立器件可靠性的影响。众多文献亦采用该模型来探讨产品性能退化累

积到一定程度而发生的失效。这种失效是由产品内部的微观结构发生某种物理、化学变化而引起的。

据 MIL-HDBK-217F, 温度系数  $\pi_T$  的表达式如下:

$$\pi_T = A \cdot \exp \left\{ -E_a / K \left[ 1 / (T_j + 273) - 1 / 298 \right] \right\} \quad (1)$$

式中: A—调整系数

$E_a$ —温度激活能

$T_j$ —工作(试验)结温

$\pi_T$  表达式中引入了参考温度 25℃ (298K°)。25℃是大多数分立器件电应力降额起点。 $T_j$  大于 25℃,  $\pi_T$  大于 1, 温度应力开始影响器件的可靠性。

温度系数  $\pi_T$  的确定取决于二个关键参数, 一是激活能  $E_a$ , 另一个是结温  $T_j$ 。本文以大量的现场试验数据和热阻测试结果, 分别探讨半导体分立器件激活能和热阻的典型值及变化情况。

## 2 半导体分立器件的热激活能

为保证可靠性预计的准确性, 采用现场数据来确定激活能是最理想的, 因为这些数据反映了实际使用的情况。但是, 目前所收

集到的分立器件现场数据中最高工作环境温度  
为 70℃ (机载无人舱), 最低工作环境温度  
为 25℃ (计算机房), 温度变化范围仅 45℃,  
不足以全面反映器件整个工作温度范围的情  
况。另外, 工作环境、质量等级、失效判据、  
不同的设备设计装配水平对现场失效数据有  
复杂的影响。相反, 试验室数据温度范围宽,  
 $T_A$  从 25℃ 至 200℃, 甚至更高, 失效判据一  
致, 质量等级明确, 没有设备制造水平和现  
场应用等复杂因素的干扰。因而, 寿命试验  
和加速寿命试验数据对热激活能的确定是十  
分必要的补充。试验数据的选用应遵循以下  
原则, 即: 温度超过设计极限 ( $T_{MAX}$ ) 的数  
据在确定激活能时不予采用。

以下是硅整流二极管热激活能的确定方  
法及步骤。

据 MIL-HDBK-217F 和 GJB/Z299,  
工作失效率  $\lambda_p$  可表示为

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_s \pi_c \pi_Q \pi_E \quad (2)$$

式中:  $\lambda_b$ —基本失效率

$\pi_T$ —温度系数

$\pi_s$ —电压应力系数

$\pi_c$ —连接结构系数

$\pi_Q$ —质量系数

$\pi_E$ —环境系数

第一步: 模型线性化

从 (2) 式得:

$$\pi_T = \lambda_p / (\lambda_b \pi_s \pi_c \pi_Q \pi_E)$$

将 (1) 式代入  $\pi_T$  并取对数得:

$$L_n \pi_T = -E_a/k [1/(T_j+273) - 1/298]$$

$$\ln Y = L_n [\lambda_p / (\pi_s \pi_c \pi_Q \pi_E)]$$

$$x = -[1/(T_j+273) - 1/298]$$

$$A = E_a/K$$

$$B = L_n \lambda_b$$

则  $\pi_T$  的线性化方程为:

$$Y = AX + B$$

对于同一类分立器件,  $\lambda_b$  为常数, 因而  
B 也是常数。

第二步: 用最小二乘法求回归方程的系数 A  
(数据见表 1)

$$A = \delta_{xy}^2 / \delta_x^2 = (\overline{XY} - \bar{X} \cdot \bar{Y}) / [\overline{X^2} - (\bar{X})^2] = 6256$$

即: 热激活能  $E_a = 0.538$  eV

表 1 硅整流二极管现场使用可靠性数据

型号 规格	质量等级 $\pi_Q$	环境 $\pi_E$	$T_j$	负荷 率 s	元件小时 (10 <sup>6</sup> /hr)	失效 数	失效率 (10 <sup>-6</sup> /hr)	Y	X
2CZ	A4 0.2	AU 20	79	0.3	35.677	111	3.11	-0.251	$5.15 \times 10^{-4}$
2CZP	B2 1.0	GF <sub>1</sub> 1.7	61	0.2	1.4	1	0.714	-0.867	$3.62 \times 10^{-4}$
2CZ	B1 0.4	GF <sub>1</sub> 1.7	62	0.4	138.86	121	0.896	0.276	$3.71 \times 10^{-4}$
2CE	B1 0.4	GF <sub>1</sub> 1.7	57	0.4	11.06	2	0.28	-0.887	$3.85 \times 10^{-4}$
2CE	B1 0.4	GF <sub>1</sub> 1.7	51	0.3	1544.36	278	0.18	-1.329	$2.69 \times 10^{-4}$
2CE	B1 0.4	GF <sub>1</sub> 1.7	50	0.5	7.504	0	0.122	-1.718	$2.60 \times 10^{-4}$
2CP	B2 1.0	GB 1.0	39	0.3	9.125	1	0.11	-2.207	$1.51 \times 10^{-4}$

注: 各  $\pi$  系数取值参照 GJB/Z299A-91

## 第三步: 回归曲线的方差分析

表2 回归曲线方差分析表

来源	S	F	V	F
X	3.012	1	3.012	11.69
e	1.288	5	0.2576	
T	4.3	6		

$F'_5(0.05) = 6.61$   $F'_5(0.01) = 16.26$   
 $F > F'_5(0.05)$  因而, 可判断 Y 与 X 存在显著的线性关系, 采用阿伦尼斯模型来描述温度应力对器件失效率的影响是成功的。

与表3中的试验结果比较看出, 温度升高, 激活能有增大的趋势, 壳温在  $169^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$  时, 激活能值为  $0.73_{\text{ev}} \sim 1.03_{\text{ev}}$ 。由于试验温度已超出了硅整流二极管最高允许结温。因而, 该类器件的热激活能以现场数据统计结果为主要依据。

重复上述步骤, 可获得各类器件现场使用和试验的热激活能如表3所示。国产器件现场激活能与试验激活能比较, 现场激活能小于试验的激活能结论有以下四方面原因:

(1) 现场使用电力低, 负荷率在  $0.2 \sim 0.6$  之间, 寿命试验和加速寿命试验的电应力较高, 负荷率在  $0.6 \sim 1.2$  之间;

(2) 现场使用时结温在最高允许值之下, 而试验时往往采用温度加速的方法, 结温接近或高于最大允许值;

(3) 现场使用多为间断工作状态, 而试验室是连续工作状态, 器件材料疲劳更严重;

(4) 失效判据不同, 现场使用中元器件的失效以是否引起设备故障为准, 试验室则按照产品说明书或某些标准文件的规定。通常, 试验室判据更为严格。

另外, 有文献指出<sup>[2]</sup>, 半导体分立器件的退化过程是多种失效机理组合在一起, 并随施加应力、时间而变化的过程。在额定结温附近失效率随温度急剧上升, 说明主导失效机理明显更迭, 激活能发生变化。MIL-HDBK-217E 和我国编制的预计手册 GJB/Z299 均采用一种阿伦尼斯修正模型来描述这种情况。

随着半导体工艺的成熟, 质量控制工作的开展, 特别是产品可靠性设计的改进, 使器件承受电、热应力的能力越来越高, 主导失效机理发生更迭的温度更接近最高允许结温, 而且更迭的速度会更缓慢。现场使用时, 器件处于降额应用状态, 工作温度离主导失效机理发生更迭的温度较远, 因而, 91年12月发布的 MIL-HDBK-217F 的温度系数  $\pi_T$  直接采用阿伦尼斯模型, 删除了以往的修正项。

表3 半导体分立器件热激活能

器件类型	试验(现场)温度( $^{\circ}\text{C}$ )	试验 $E_a$ (ev)	现场 $E_a$ (ev)
硅 NPN 晶体管	45—175 (J, 现场)		0.09
硅 PNP 晶体管	173—259 (C, 试验)	0.99 0.61	0.108
	45—205 (J, 现场)		
	95—150 (C, 试验)		
锗 PNP 晶体管	45—150 (J, 现场)		0.18

硅整流二极管 硅开关二极管	39—79 (J, 现场)	0.73—1.03	0.538
	169—200 (C, 试验)		
	55—90 (J, 现场)		0.14
硅稳压二极管	55—90 (J, 现场)	0.46	0.09
	125—175 (C, 试验)		
硅检波二极管 锗开关管	70—140 (C, 试验)	0.63	
	125—175 (C, 试验)	0.61	
体效应二极管	80—150 (C, 试验)	0.515	
半导体闸流管	120—200 (C, 试验)	1.12	
	140—200 (C, 试验)	0.80	
GaAsFETS	25—225 (C, 直流试验)	1.92	
	160—175 (C, 直流试验)	1.29	
	25—250 (TC, 直流试验)	1.11	
	25—250 (TC, 直流试验)	1.8	

注：温度栏括号内 C 指壳温；J 指结温；TC 指沟道温度

### 3 半导体分立器件的热阻

确定温度系数的另一个关键参数是结温。结温可表示为：

$$T_j = \theta_{jc} \cdot P_d + T_c \quad (3)$$

式中， $\theta_{jc}$ —结至壳之间的热阻；

$P_d$ —耗散功率； $T_c$ —壳温

通常，整机设计师对器件的功耗有明确要求，壳温  $T_c$  可方便测出。因而，结温的确定有赖于器件的热阻值的获得。

#### 3.1 热阻典型值及离散性

根据国内四十多个厂家近九百个样品的电学法稳态热阻测试结果，获得了常用封装分立器件的热阻典型值及标准偏差。这些样品包括 3DG、3DD、3AD 等十一个类别。测

试时采用结温重合法。即：在未加功耗时，将样品处于某一温度下并达到热平衡，该温度接近于产品的电最高允许结温，测量 PN 结正向压降  $V_{BE}$  ( $I_F = 1\text{mA}$ )。待样品冷却至室温后加功耗使  $V_{BE}$  与第一次测量值一致，认为此时结温达到  $T_1$ ，测量此时样品的壳温  $T_c$ ，根据结与壳的温差和所施加的功耗  $P$  计算热阻  $\theta_{jc}$ 。

$$\theta_{jc} = (T_j - T_c) / P \quad (^\circ\text{C}/\text{W}) \quad (4)$$

物理分析可知，分立器件的热阻与外壳的材料、外壳结构、芯片面积、芯片厚度、背面金属化、粘接工艺都有密切关系。整机设计者在进行可靠性预计时不可能完全掌握上述多种因素而最大允许功耗在各种手册、目录上较易找到。通常，器件的最大允许功耗  $P_{cm}$  越大，芯片面积也越大。 $P_{cm} < 1\text{W}$  时，多采用 B-1, B-2, B-3 等小型管壳。 $P_{cm} \geq 1\text{W}$  时，多采用 F-1, G-1, G-2 等较大

型管壳,而且普遍采用背面金属化工艺。为可靠性预计方便起见,表4和表5给出各种

外壳在不同  $P_{cm}$  标称值范围内的热阻典型值及离散性。

表4 半导体分立器件热阻统计表(中小功率)

$P_{cm}$ (W)	外型: B-1, B-2			外型: B-3		
	$\bar{\theta}_r$	$\sigma/\bar{\theta}_r$	n	$\bar{\theta}_r$	$\sigma/\bar{\theta}_r$	n
$P_{cm} < 0.2$	317	0.187	75	18*		
$0.2 \leq P_{cm} < 0.3$	276	0.112	65	157	0.026	10
$0.3 \leq P_{cm} < 0.4$	259	0.103	50	146	0.177	10
$0.4 \leq P_{cm} < 0.6$	254*			145	0.163	70
$0.6 \leq P_{cm} < 0.8$				132	0.096	135
$0.8 \leq P_{cm} < 1.0$				142	0.170	20

$\bar{\theta}_r$ —热阻平均值,  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ;

$\sigma$ —标准离差;

n—测试样品数;

\*—外推值。

表5 半导体分立器件热阻统计表(大功率管)

$P_{cm}$ (W)	外型: B-1			外型 F-2			外型: G-1, G-2			外型: G-3, G-4		
	$\bar{\theta}_r$	$\sigma/\bar{\theta}_r$	n	$\bar{\theta}_r$	$\sigma/\bar{\theta}_r$	n	$\bar{\theta}_r$	$\sigma/\bar{\theta}_r$	n	$\bar{\theta}_r$	$\sigma/\bar{\theta}_r$	n
$1.0 \leq P_{cm} < 10$	5.33	0.111	20									
$10 \leq P_{cm} < 20$	5.75	0.011	15	2.6*			5.74	0.010	15	3.4		
$20 \leq P_{cm} < 30$	2.34	0.098	10	2.33	0.090	10	2.34	0.098	10	3.08	0.250	5
$30 \leq P_{cm} < 50$	1.7*			1.75	0.166	8				2.16	0.209	4
$50 \leq P_{cm} < 75$				1.66	0.425	65				2.28	0.340	25
$75 \leq P_{cm} < 150$				0.59	0.082	15				0.59	0.080	15
$150 \leq P_{cm} < 200$										0.64	0.049	10

不同研制厂生产的器件,由于生产工艺、质量控制水平以及管芯设计上的差异即使外壳一样,  $P_{cm}$  标称值一样,热阻值仍有一定的离散性。如  $P_{cm}$  为 0.5w 的管子, A 厂与 B 厂的热阻平均值相差  $90^{\circ}\text{C}/\text{W}$ , 结温的差别为  $45^{\circ}\text{C}$ 。可见,我国分立器件的热阻一致性较差,而美国三个生产厂用“热”标准芯

片封装于同种金属圆形外壳,热阻平均值最大差别为  $11^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。<sup>[3]</sup>

即使是同一生产厂的同批次产品也存在着一定的热阻离散性。5 个样品为一测试组的标准离差与热阻平均值之比最大为 0.314, 10 个样品为一测试组的  $\sigma/\bar{\theta}_r$  最大值为 0.348。美国对 10 个样品为一组的金属圆

壳“热”标准芯片样品进行热阻测试,  $\sigma/\theta_K$  为 0.024<sup>[4]</sup>。

从表 4、表 5 可知, 不同外壳分立器件热阻典型值变化范围是 0.59~317 (°C/W), 美国军用器件热阻典型值 ( $\theta_K$ ) 变化范围是 0.5~320 (°C/W)<sup>[7]</sup>。国产分立器件热阻平均水平与美国产品相当, 但离散性大 2 倍以上。可见, 提高工艺控制能力和质量一致性是改善国产器件热性能、减少工程应用失效的主要途径。

### 3.2 脉冲工作状态热阻分析

很多半导体器件是在脉冲功率下工作的, 特别是微波器件, 工作频率在 1GHz 以上, 这时芯片的温度场与时间有关。

试验证明, 占空比一定, 脉宽越大, 每周加热时间越长, 结温上升越高。同时每周散热时间变长, 温度变化幅度变大。占空比一定时, 脉宽的变化不影响平均功率。据某国产器件的实测结果<sup>[8]</sup>, 占空比为 10%, 脉宽从 10us 上升至 100us, 平均结温上升 5°C (见图 1)。

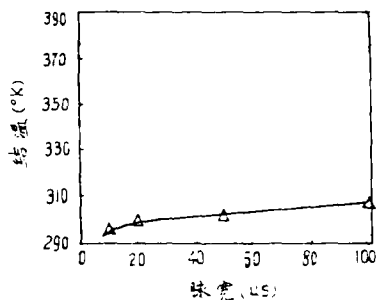


图 1 占空比为 10%, 结温与脉宽关系的实测结果

脉宽一定, 每周期加热时间相同, 每周温度上升幅度一样。占空比越大, 散热时间越短, 稳定平均结温越高。图 2 给出在脉宽一定情况下, 结温随占空比急剧上升的实

测曲线和模拟曲线<sup>[5]</sup>。

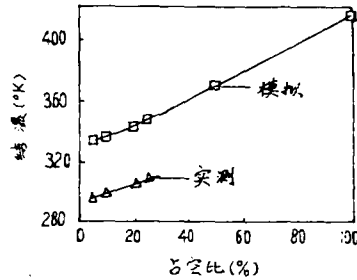


图 2 脉宽为 20us, 结温与占空比关系的实测曲线与模拟曲线

通常地, 脉宽相同时, 占空比越大, 脉冲状态热阻越大, 当占空比为 1 时, 与稳态热阻一致。占空比一定, 脉宽越大, 脉冲状态热阻越大, 大多数器件在脉宽为 1s 时, 已达到或接近稳态热阻, 如图 3 所示<sup>[6]</sup>。

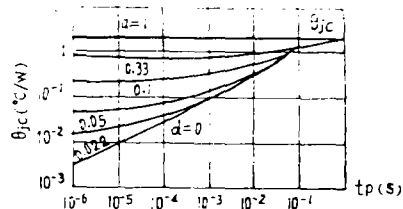


图 3 脉冲状态热阻与脉宽  $t_p$ 、占空比  $d$  的关系曲线

材料的热扩散率是温度变化传播快慢的表征, 是影响器件脉冲状态, 特别是微波脉冲状态热阻的主要参数。Si 的热扩散率是 GaAs 的 2.6 倍。在 GaAs 器件中, 一旦有热集中就容易形成热斑, 所以不宜采用 GaAs 制造双极型大功率管。根据计算结果<sup>[6]</sup>, 在同样结构尺寸下, GaAs 器件的稳态热阻是 Si 器件的 2.77 倍, 脉宽为 100us 时, 脉冲状态热是 Si 器件的 1.4 倍。因而, GaAs 器件在脉冲状态下运用更能显示出固有优越性。

## 鸣 谢

本文有关的研究工作得到电子部四所钱襄高工、电子部五所杨家铨教授高工和彭成信高工的大力支持和帮助,在此深表谢意。

## 参考文献

[1] AD-A158843, RADC-TR-85-91, U.S.A, 1985

[2] 杨家铨等,“晶体管基本失效率预计公式的建立”,北京工业大学学报, VOL 18, 1992

[3] 莫郁薇,“集成电路封装热阻分析”,可靠性与环境试验, 1994年第4期

[4] AD-B108417, RADC-TR-86-9, U.S.A, 1986

[5] 何庆国、王长河、蔡树军“脉冲工作状态下微波功率管瞬态特性研究”,半导体情报, 1992年第6期

[6] 高光渤、李学信,《半导体器件可靠性物理》,科学出版社, 1987

[7] AD-A200529, RADC-TR-88-97, U.S.A, 1988

(曾纪科 编发)

---

## 欢迎订阅《家电检修技术》杂志(月刊)

该杂志'94年创刊,它是家电维修人员,电子爱好者的良师益友,以介绍黑白、彩电、洗衣机、收录机、音响、录摄像机、家用电脑、冰箱、空调、小家电、电子仪器的保养、使用、检修为主,并设元器件与代换,摩机与制作,问与答,检修速法,实用资料和图纸等。内容实用、新颖。

本杂志为16开本,48页(外加插页图)月定价3元,各地邮局(所)均可订阅,订阅代号12-150,如邮局订阅不便,可向我社办邮寄,全年12期36元,免收邮费。

另供《家电检修技术》'94年1-12期合订本23元/册;'95年合订本上、下册:共39.2元(含40万字附录);'96年合订本(上册含20万字附录)19.6元/册;《家电检修技术》增刊汇集家电维修技术之精华29.6元/册;《用万用表速测集成电路数据大全》39元/册;《中外黑白彩色电视机故障修理经验1266例》24元/册。

以上书均免邮费;款汇:吉林长春市浙江路11号乙203家电维修技术发行科 邮编:130051

---

### 可靠性英语缩写词选编(1)

本刊编辑部(广州,510610)

为便于读者阅读参考,我们根据T.P.Omdahl先生编写的《Reliability, Availability and Maintainability (RAM) Dictionary》及国内外标准、图书、字典等资料,编译这些缩写词。由于水平有限,不当之处,请批评斧正,甚为感谢。——编者 (下转第42面)