

# 基于序进应力加速实验评价失效率的新方法

郭春生<sup>†</sup> 李秀宇 朱春节 马卫东 吕长志 李志国

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

**摘要:** 基于序进应力加速寿命实验的研究, 提出了一种快速确定半导体器件失效率及寿命分布的新方法. 该方法将序进应力加速实验应用于失效率评价中, 在计算失效激活能并外推寿命的基础上, 快速确定微电子器件的寿命分布及相应的失效率. 以样品 3DG130 为例, 在 160~310°C 范围内进行了序进应力加速寿命实验, 然后根据模型计算得到了器件的寿命、分布和失效率. 结果与文献吻合很好, 验证了方法的可行性.

**关键词:** 寿命实验; 失效率; 寿命分布

EEACC: 2560J; 0170N

中图分类号: TN32 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2007)S0-0448-04

## 1 引言

随着科学技术和工艺水平的不断发展, 半导体器件的可靠性和寿命不断提高. 如何在较短时间内, 对这些高可靠水平的器件进行评价, 及时提供相关的可靠性信息, 成为急需解决的问题. 针对电子元器件的可靠性评价, 各个国家制定了不同的标准进行寿命和失效率预计. 美国按照 MIL-STD-883E 标准对寿命评价或按标准 MIL-STD-217F 对失效率进行预计; 我国参照美国标准, 根据自己的国情制定了相应的标准 GJB 548A-96 和 GJB/Z 299B. 这些标准普遍存在的问题是实验周期长, 所需样品数量多, 成本高<sup>[1]</sup>. 针对这一问题, 本文基于序进应力加速寿命实验的研究, 把序进应力加速实验应用到失效率评价中, 并建立了相应的理论模型. 从而缩短了实验时间, 快速得到器件的失效激活能、寿命分布及失效率等可靠性参数, 以评价器件的可靠性水平. 并以硅 npn 三极管 3DG130 为例, 进行温度序进应力加速寿命实验, 然后根据模型对实验结果进行处理、分析, 求得其激活能、寿命分布和失效率.

## 2 理论与模型建立

半导体器件参数的退化是由于器件表面、体内及金属化系统的物理和化学变化引起的, 当这种退化积累到一定程度时器件即发生失效, 退化经历的时间即产品的寿命. 温度可以改变物理、化学反应速率, 故温度常用作寿命实验中的加速应力.

反应速率与温度的关系常用 Arrhenius 模型来模拟<sup>[2,3]</sup>, 考虑到器件参数的退化还与施加的电流应力和电压应力有关, 参照文献[2~4]中关于电流电压应力对器件寿命影响的研究, 建立模型为:

$$dM/dt = A_j^n V^m \exp(-Q/kT) \quad (1)$$

式中  $M$  为器件的失效敏感参数;  $t$  为实验时间;  $dM/dt$  为参数的退化速率;  $A$  为常数;  $j$  为电流密度;  $V$  为电压;  $n$  为电流密度幂指数因子;  $m$  为电压幂指数因子;  $Q$  为激活能;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为实验中器件的结温(K).

序进应力加速寿命实验中, 由于对器件施加的应力随时间变化而变化, (1)式左边参数的退化速率也随时间变化而变化, 对两个不同实验时间段进行积分, 可得到对应的两个退化量  $\Delta M_1, \Delta M_2$ .

对(1)式积分得:

$$\Delta M_1 = A_j^n V^m \int_{t_1}^{t_2} \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dt \quad (2)$$

$$\Delta M_2 = A_j^n V^m \int_{t_3}^{t_4} \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dt \quad (3)$$

当对样品施加恒定电应力时, 对(2), (3)式相比, 可得到激活能  $Q$  的计算公式:

$$\frac{\Delta M_1}{\Delta M_2} = \frac{A_j^n V^m \int_{t_1}^{t_2} \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dt}{A_j^n V^m \int_{t_3}^{t_4} \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dt}{\int_{t_3}^{t_4} \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dt} \quad (4)$$

(4)式中, 只有激活能  $Q$  一个未知数, 利用计算机辅助计算, 对(4)式进行求解, 可以得到激活能  $Q$ .

根据 Nelson 提出的积累损伤模型: 器件的剩余

<sup>†</sup> 通信作者. Email: guocs@emails.bjut.edu.cn

2006-12-29 收到

寿命仅仅与器件当时的损伤情况和将要对其施加的应力条件有关,而与其损伤是如何积累的无关.加速条件下和正常工作条件下,器件的失效判据是相同的,即达到失效时器件的损伤累积量是相等的,所不同的仅仅是加速系数不同,即参数的退化速率不同.因此:

$$\Delta M = \Delta M_0 \quad (5)$$

式中  $\Delta M$  为实验条件下在  $T_1 \sim T_2$  温度范围内的敏感参数的退化量; $\Delta M_0$  为工作条件  $T_0$  下的敏感参数的退化量.其中:

$$\Delta M = \int_0^t A_j^n V^m \exp(-Q/kT) dt = \frac{1}{\beta} \int_{T_1}^{T_2} A_j^n V^m \exp(-Q/kT) dT \quad (6)$$

$$\Delta M_0 = \int_0^t A_j^n V^m \exp(-Q/kT_0) dt = A_j^n V^m \exp(-Q/kT_0) t \quad (7)$$

将(6)、(7)式代入(5)式并整理可得外推常温下的工作寿命的公式:

$$t = \frac{\int_{T_1}^{T_2} \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dT}{\beta \exp\left(-\frac{Q}{kT_0}\right)} \quad (8)$$

得到各个样品的寿命后,利用数学软件 SPSS 确定器件的寿命分布,根据本次实验数据,可以确定寿命分布符合对数正态分布,因此以对数正态分布为例,介绍失效率计算方法.它的失效密度为:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad t > 0 \quad (9)$$

其中  $\mu$  与  $\sigma$  是两个待求的参数,  $-\infty < \mu < \infty, \sigma > 0$ ,失效率为:

$$\lambda(t) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right)}{1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)} \quad (10)$$

其中  $\Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)$  可以查标准正态分布表求得.根据对数正态分布中两个参数  $\mu$  与  $\sigma$  的简单线性无偏估计(GLUE):

$$\hat{\mu} = \sum_{j=1}^r D'(n, r, j) x_{(j)} = \sum_{j=1}^r D'(n, r, j) \ln t_j \quad (11)$$

$$\hat{\sigma} = \sum_{j=1}^r C'(n, r, j) x_{(j)} = \sum_{j=1}^r C'(n, r, j) \ln t_j \quad (12)$$

可求得两个参数  $\mu$  与  $\sigma$ .其中,  $n$  为实验样品总数,  $r$  为失效样品数,  $t_j$  为第  $j$  个样品失效时的时间.上述公式中  $C'(n, r, j)$  和  $D'(n, r, j)$  可以通过查表求得.

### 3 实验

基于本模型,以硅 npn 晶体管 3DG130 为例,抽取 24 支样品,进行了 160~310℃(结温)范围内序进应力寿命实验.电应力条件为  $V_{CE} = 27V, I_C = 26.5mA$ (功率为 700mW);温度应力条件为初始温度  $T_0$  设为 433K(160℃),升温速率  $\beta = 1K/6h$ .

实验过程中采用线下室温测试.测试参数、失效判据及条件如表 1 所示.

表 1 测试参数、失效判据及测试条件  
Table 1 Measure parameters, failure criteria and measure conditions

参数/单位	失效判据	测试条件
$h_{FE}$	$\Delta h_{FE} \geq 20\%$	$V_{CE} = 10V$ $I_C = 50mA$
$V_{CES}/V$	$\geq 0.3$	$I_B = 10mA$
$V_{BES}/V$	$\geq 1.1$	$I_C = 100mA$
$I_{CBO}/\mu A$	$\geq 0.5$	$V_{CB} = 10V$
$I_{CEO}/\mu A$	$\geq 1$	$V_{CE} = 10V$
$I_{EBO}/\mu A$	$\geq 0.5$	$V_{BE} = 1.5V$

### 4 结果与分析

实验结果中,各样管参数退化趋势比较一致,只有  $h_{FE}, V_{BES}$  和  $V_{CES}$  有较明显的退化,而漏电流和击穿电压基本不变,所以只列出  $h_{FE}, V_{BES}$  和  $V_{CES}$  退化规律,以 8# 样品为例,如图 1~3 所示.

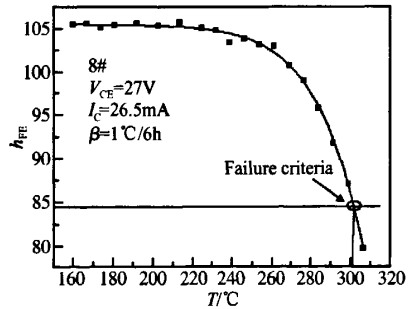


图 1  $h_{FE}$  参数退化曲线  
Fig.1 Degradation curve of parameter  $h_{FE}$

参数  $h_{FE}$  在 302℃ 达到失效判据,  $V_{BES}$  在 292℃ 左右达到失效判据,  $V_{CES}$  在 283℃ 达到失效判据,从各参数的退化趋势可以看出  $V_{CES}$  最先达到失效,是器件的失效敏感参数,其他样品均是  $V_{CES}$  最先失效,因此以  $V_{CES}$  来计算器件的寿命.

在工作条件下样品结温约为 66℃,因此可外推得到 66℃ 时寿命.经过计算得到激活能与寿命如表

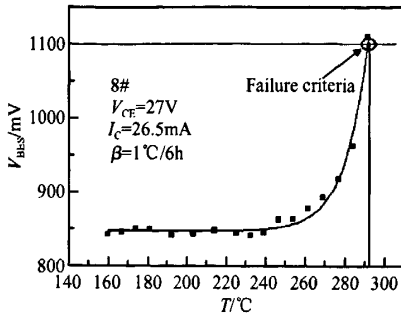


图 2  $V_{BES}$  参数退化曲线  
Fig. 2 Degradation curve of parameter  $V_{BES}$

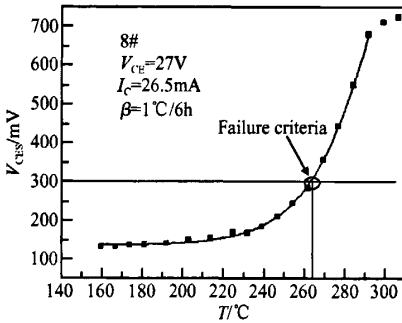


图 3  $V_{CES}$  参数退化曲线  
Fig. 3 Degradation curve of parameter  $V_{CES}$

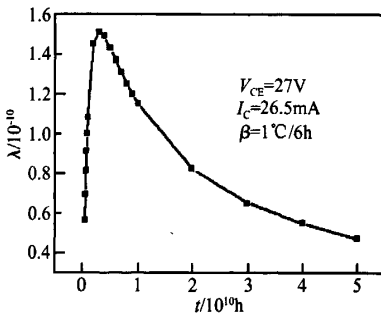


图 4 失效率曲线  
Fig. 4 Curve of failure rate

2 所示. 激活能分布范围是 1.02~1.33eV, 平均激活能是 1.18eV; 66°C 下寿命分布在  $4.45 \times 10^8 \sim 3.65 \times 10^{10}$  h 之间, 平均寿命是  $5.48 \times 10^9$  h. 在广州电子五所编著的电子元器件加速寿命实验数据表中, 采用 2.2 倍, 2.7 倍, 3.2 倍功率老化的实验结果为: 失效模式是  $h_{FE}$  漂移和  $V_{CES}$  下降, 平均寿命为  $5.64 \times 10^9$  h, 与本实验得到的失效参数和平均寿命  $5.48 \times 10^9$  h (66°C) 结果相符.

表 2 激活能计算与寿命外推结果

Table 2 Calculations of activation energy and extrapolation of lifetime

编号	激活能/eV	寿命(66°C)/h	编号	激活能/eV	寿命(66°C)/h
1	1.09	$6.5 \times 10^8$	13	1.31	$3.65 \times 10^{10}$
2	1.17	$1.15 \times 10^9$	14	1.17	$2.76 \times 10^9$
3	1.10	$1.67 \times 10^9$	15	1.30	$5.26 \times 10^9$
4	1.03	$8.06 \times 10^8$	16	1.14	$1.65 \times 10^9$
5	1.07	$1.57 \times 10^9$	17	1.07	$9.87 \times 10^8$
6	1.21	$3.18 \times 10^9$	18	1.13	$2.41 \times 10^9$
7	1.25	$5.53 \times 10^9$	19	1.22	$2.41 \times 10^9$
8	1.30	$8.52 \times 10^9$	20	1.33	$5.22 \times 10^9$
9	1.29	$9.27 \times 10^9$	21	1.02	$4.45 \times 10^8$
10	1.18	$4.98 \times 10^9$	22	1.22	$7.15 \times 10^9$
11	1.16	$4.68 \times 10^9$	23	1.24	$1.28 \times 10^{10}$
12	1.30	$1.02 \times 10^{10}$	24	1.09	$1.7 \times 10^9$

用 SPSS 软件对寿命分布进行对数、对数正态、Weibull 拟合, 发现对数正态拟和较好, 因此本次实验寿命分布按照对数正态分布来计算. 取  $r = 22, n = 24$ , 按照本文前面所述方法来计算失效率, 如图 4 所示. 在  $10^{10}$  h 范围内, 失效率基本在  $10^{-10}$  数量级. 在本方法中, 得到器件的寿命和  $10^{-10}$  数量级失效率需要大约 800h,  $2.02 \times 10^4$  器件小时数, 而按 GB1772-79 电子元器件失效率实验方法, 需要做  $9.16 \times 10^9$  器件小时数的实验. 并且本方法通过优化升温速率, 还可以进一步缩短实验时间. 因此, 本方法可以降低成本, 提高效率.

### 5 失效分析

改进后新样品的失效敏感参数  $V_{CES}$  变大, 说明 CE 两极之间电阻变大. 首先, 分别测量了 EB 结和 BC 结的正向特性, 发现实验前后 EB 结的电阻从 1.45Ω 增大到 4.16Ω, 如图 5 所示, 而 BC 结的电阻基本没有发生改变. 因此, 是 E 区电阻的增大导致了  $V_{BES}$  变大.

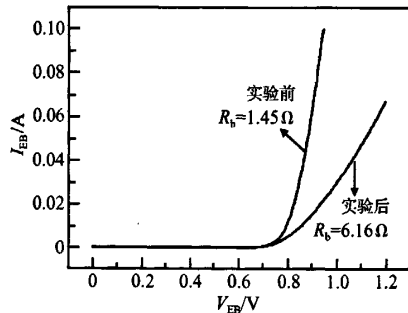


图 5 实验前后 EB 结正向特性曲线  
Fig. 5 Curves of  $I_{EB}$  versus  $V_{EB}$

解剖样品,对其做扫描电镜(SEM)实验,发现:发射区铝条出现了小丘、晶须,见图6,证明发射区铝条发生了电迁徙,造成发射区欧姆接触电阻增大,导致 $V_{CES}$ , $V_{BES}$ 的增大.而基区电流小,接触孔和基区面积较大,因此电流密度比发射区小,未出现铝金属化的电迁徙现象.据生产厂介绍,为了减小漏电流和提高频率特性,新管芯面积与原管型相比减小了一半,这就导致在同样功率条件下,发射区电流密度增加一倍,热效应加剧,从而发生电迁徙失效.

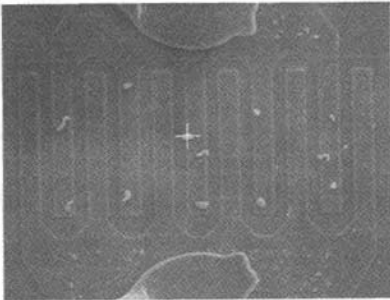


图6 实验后管芯表面SEM图(发射区铝金属化条上由于电迁徙出现小丘和晶须)

Fig. 6 SEM image of chip after experiment

通过上面分析,可知 $V_{CES}$ 增大主要是由于电迁徙导致EB结金属化电阻增大引起的.

## 6 结论

本文将序进应力加速寿命实验应用于失效率评价中,提出了一种基于序进应力加速寿命实验的快速评价半导体器件失效率及寿命分布的方法,建立了理论模型.并以样品3DG130为例,对其进行了160~310℃范围内的序进应力加速寿命实验,发现 $V_{CES}$ 参数退化最快,首先达到失效判据,因此 $V_{CES}$ 为失效敏感参数.计算得到器件激活能、寿命、寿命分布和失效率等可靠性参数,寿命符合对数正态分布.结果与文献中的数据能够很好吻合,说明本方法是合理可行的.

与常规失效率实验相比,本方法可以减少实验样品数、缩短实验时间,从而降低成本、提高效率.

## 参考文献

- [1] Shyur H J, Elsayed E A, Luxhoj J T. A general model for accelerated life testing with time-dependent covariates. *Naval Research Logistics*, 1999, 46(3): 303
- [2] Redhead P A. Thermal desorption of gases. *Vacuum*, 1962, 12(7): 203
- [3] Pasco R W, Schwarz J A. Temperature-ramp resistance analysis to characterize electromigration. *Solid-State Electron*, 1983, 26(5): 445
- [4] Guo Chunsheng, Xie Xuesong, Ma Weidong, et al. A method of failure mechanism identification in accelerated testing. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(3): 560

## A Novel Method to Determine the Failure Rate Using Process-Stress Accelerated Test

Guo Chunsheng<sup>†</sup>, Li Xiuyu, Zhu Chunjie, Ma Weidong, Lü Changzhi, and Li Zhiguo

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** A method is presented that enables rapid determination of failure rate and lifetime distribution for semiconductor devices based on the study of process-stress accelerated life test. Process-stress accelerated test is applied to determine the failure rate in the method, and the lifetime distribution and failure rate can be determined based on evaluation of the lifetime. To demonstrate the application of the method, it has been applied to a kind of mature products, 3DG130. A process-stress accelerated test was constructed in the temperature range of 160~310℃. Then the related reliable parameters, such as lifetime and failure rate were figured out utilizing the model. Experimental results are in agreement with that in the literature, proving that the method is effective.

**Key words:** life testing; failure rate; lifetime distribution

EEACC: 2560J; 0170N

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0448-04

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: guocs@emails.bjut.edu.cn

Received 29 December 2006