

# 加速试验中失效机理一致性的判别方法\*

郭春生<sup>†</sup> 谢雪松 马卫东 程尧海 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:** 通过对电子器件加速试验失效模型——Arrhenius 模型的研究,发现加速试验过程中,失效机理不发生改变时,电子器件失效敏感参数的退化速率与施加应力的负倒数遵从指数关系,从而提出了一种加速试验失效机理一致性的判定方法.对样品 3DG130 进行了 150~310 的序进应力加速试验,快速得到了失效机理一致的应力范围,验证了该方法的可行性.

**关键词:** 加速试验; 失效机理; 一致性

EEACC: 2560J; 0170N

中图分类号: TN32

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)03-0560-04

## 1 引言

加速试验是指在保证不改变产品失效机理的前提下,通过强化试验条件,使受试产品加速失效,以便在较短时间内获得必要信息,来评估产品在正常条件下的可靠性或寿命指标.通过加速试验,可迅速查明产品的失效原因,快速评定产品的可靠性指标.因此加速试验可以应用于许多方面,如寿命试验、可靠性增长试验、环境应力筛选、失效模式检验、耐久性检验等.

加速试验的方案是在假定试验器件在不同应力下具有相同失效机理的前提下制定出来的.然而,由于在加速条件下器件潜在的失效机理可能被激发出来,成为主要失效机理,使加速条件下失效机理发生改变,从而导致由加速试验获得的器件寿命不能代表器件的真实寿命.并且,由于判定失效机理一致性的应力范围比较复杂、困难,加速试验经常是在不知道失效机理,不保证被试验所加速的失效机理与正常使用条件下的失效机理相同的情况下进行<sup>[1]</sup>.在常规的加速试验方法及标准中,也由于不易判定失效机理一致性的应力范围,没有对失效机理一致性的鉴别进行要求,如 MIL-STD-883 的可靠性试验, MIL-STD-810 的耐久试验, MIL-STD-189 的可靠性增长试验, MIL-STD-2164 的环境应力筛选,都不要求作失效机理的鉴别.这就导致了试验过程中失效机理可能发生改变,从而得到错误的可靠性数据,使试验无效.

本文通过对序进应力加速试验的研究,针对以温度为主要失效原因的电子器件的温度应力模型 Arrhenius 模型,提出了一种加速试验失效机理一致性的判定方法,利用本方法可以快速、准确地得到失效机理发生改变的应力点,从而获取加速寿命中失效机理保持一致的应力范围.

## 2 理论

电子器件的失效过程是物理或化学反应过程,而温度可以改变物理、化学反应速度,因此提高温度应力可以加速电子器件多种失效过程,如二次慢俘获、腐蚀、表面电荷扩散、相互扩散、电迁徙、应力迁徙、蠕变等退化过程.所以在电子器件加速试验中,温度经常被作为加速应力.电子器件的失效敏感退化速率与温度的关系通常用 Arrhenius 模型来模拟.本文主要针对 Arrhenius 模型进行研究.

反应速率与温度的关系用 Arrhenius 模型来模拟<sup>[2,3]</sup>,即:

$$\frac{dM}{dt} = A \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (1)$$

式中  $M$  为温度敏感参数;  $t$  为试验时间;  $dM/dt$  为参数的反应速率;  $A$  为常数;  $Q$  为激活能;  $k$  为波尔兹曼常数;  $T$  为试验温度.

考虑到电子器件参数的退化还与施加的电流应力和电压应力有关,因此建立模型为<sup>[4-6]</sup>:

$$\frac{dM}{dt} = A_j^n V^m \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (2)$$

\* 国防科工委基础研究资助项目(批准号: Z032005A001)

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

2005-08-13 收到, 2005-10-15 定稿

式中  $M$  为电子器件的失效敏感参数;  $t$  为试验时间;  $dM/dt$  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;  $Q$  为失效激活能;  $k$  为波尔兹曼常数;  $T$  为试验中器件的结温。

同一失效机理对应的失效激活能是相同的,而理想的加速寿命试验只是加速器件的退化速率,而不改变其失效机理. 因此,如果加速过程中试验样品的失效机理不发生改变,那么其对应的失效激活能  $Q$  在此温度范围内也将是恒定的. 当在试验中对样品施加恒定工作状态电流电压应力时,影响器件敏感参数退化速率的将只有温度. 从 (2) 式中可以得到,当失效机理不发生改变,即激活能  $Q$  及施加电流电压恒定时,敏感参数退化速率  $dM/dt$  与温度的负倒数  $-1/T$  成指数关系. 对 (2) 式两边取对数,就可以得到  $\ln(dM/dt)$  和  $-1/T$  的线性关系,如 (3) 式所示:

$$\ln\left(\frac{dM}{dt}\right) = \ln(Aj^n V^m) - \frac{Q}{kT} \quad (3)$$

因此,对加速试验施加恒定电应力和序进温度应力时,只需在试验过程中测定敏感参数的退化量  $dM$ ,求得退化速率  $dM/dt$  是否与温度的负倒数  $-1/T$  符合指数关系,即  $\ln(dM/dt)$  是否与温度的负倒数  $-1/T$  有线性关系,就可确定激活能  $Q$  是否发生改变,从而判断失效机理是否发生改变. 当测得  $\ln(dM/dt)$  与温度的负倒数  $-1/T$  符合线性关系时,说明在加速过程中失效激活能是恒定的,即失效机理没有发生改变,加速寿命试验是合理的;反之,失效机理在加速试验过程中发生改变. 找出  $\ln(dM/dt)$  和  $-1/T$  关系曲线的拐点,就可以确定失效机理发生改变的应力范围,从而得到器件失效机理保持一致的应力范围和失效机理发生改变的应力点.

### 3 试验

对国内某厂生产的 3CG130 进行序进应力加速试验,试验条件如表 1 所示,在室温 25℃ 线下测量参数,测试参数及条件见表 2.

表 1 序进应力加速寿命试验的条件

Table 1 Experiment condition in progress-stress accelerated test

温度应力		温度应力	
温度范围/°C	升温速率/(°C·h <sup>-1</sup> )	$I_C$ /mA	$V_{CE}$ /V
150~310	0.125	25	25

表 2 序进应力加速寿命试验的测试参数及条件

Table 2 Test parameters and test conditions of progress-stress accelerated test

测试参数		测试条件
增益	$h_{FE}$	$V_{CE} = 10V, I_C = 50mA$
击穿电压	$BV_{CBO}/V$	$I_C = 100mA$
	$BV_{CEO}/V$	$I_C = 100mA$
	$BV_{IBO}/V$	$I_B = 100mA$
漏电流	$I_{CBO}/\mu A$	$V_{CB} = 10V$
	$I_{CEO}/\mu A$	$V_{CE} = 10V$
	$I_{IBO}/\mu A$	$V_{IB} = 1.5V$

### 4 结果与分析

试验的样本量为三支,在  $T = 150 \sim 310$ ℃ 温度范围内,试验样品 54<sup>#</sup>, 55<sup>#</sup>, 56<sup>#</sup> 表现出相同的退化规律:样品的击穿电压、漏电流在试验过程中变化不大,只有增益  $h_{FE}$  表现出一致的退化趋势. 首先,在 150~300℃ 内,  $h_{FE}$  缓慢退化,随着应力的增加,  $h_{FE}$  退化速率逐渐加速;在 300℃ 后快速退化,直至失效. 故选取增益  $h_{FE}$  作为失效敏感参数,失效判据为变化量超过初始值的 25%,测试数据见图 1.

试验中,失效敏感参数增益  $h_{FE}$  的退化曲线如图 1 所示. 分析图 1 的数据可以得到,在 150~240℃ 之间,样品的直流增益  $h_{FE}$  表现出波动减小的退化规律,但退化非常缓慢;在 240~300℃ 之间,样品的直流增益  $h_{FE}$  退化加快,在此范围内 54<sup>#</sup> 样品的  $h_{FE}$  由 107 退化到 90,退化量为 15% 左右,55<sup>#</sup> 样品的  $h_{FE}$  由 100 退化到 83,退化量为 17% 左右,56<sup>#</sup> 样品的  $h_{FE}$  由 105 减小到 92,退化量为 12% 左右;在 300℃ 之后,  $h_{FE}$  迅速减小,超过失效判据 25%. 分析表明:参数  $h_{FE}$  退化的原因主要是由于 SiO<sub>2</sub> 层中正离子的移动引起的,而在整个试验过程中失效机理是否发生改变,是否有新的失效机理被激发出来,都是不确定的.

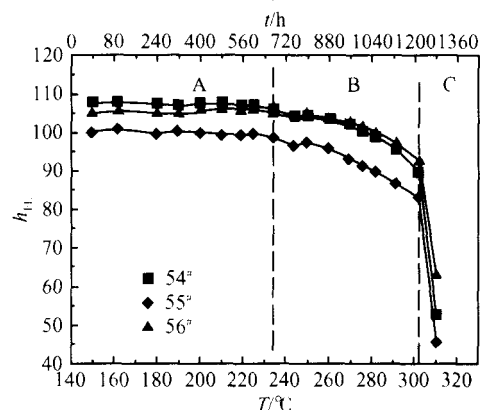


图 1 序进应力下,3DG130 的失效敏感参数  $h_{FE}$  的退化曲线  
Fig. 1 Degradation curves of failure sensitive parameter  $h_{FE}$  of 3DG130 under progress stress

为验证试验过程中失效机理的一致性,对失效敏感参数增益  $h_{FE}$  与温度应力在序进加速试验中的关系进行了计算. 以 54# 为例: 首先随试验进行测得敏感参数  $h_{FE}$  的退化量  $h_{FE}$ , 计算出其退化速率; 然后进行转换, 求得  $\ln(dh_{FE}/dt)$  值; 最后验证样品  $\ln(dh_{FE}/dt)$  与  $-1/T$  的关系, 得到样品 54# 的  $\ln(dh_{FE}/dt)$  与  $-1/T$  的关系图, 如图 2 所示.

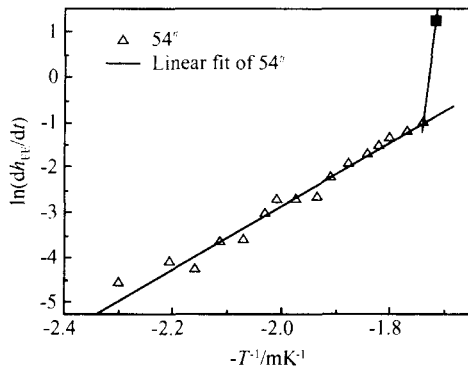


图 2 样品 54# 的  $\ln(dh_{FE}/dt)$  与  $-1/T$  对应关系

Fig. 2 Curve of  $\ln(dh_{FE}/dt)$  versus  $-1/T$  for sample 54#

由图 2 可以看出, 样品 54# 的  $\ln(dh_{FE}/dt)$  与  $-1/T$  在  $150 \sim 300$  ( $-2.3 \sim -1.75 \text{ K}^{-1}$ ) 的温度范围内符合线性关系, 由公式 (3) 说明在  $150 \sim 300$  的温度范围内样品 54# 的失效激活能没有发生改变, 即在此温度范围内样品的失效机理是保持一致的. 而在  $300$  ( $-1.75 \text{ K}^{-1}$ ) 处出现拐点, 说明样品 54# 的失效机理在  $300$  左右发生改变. 分析表明: 在  $150 \sim 300$  内样品的失效机理为基区  $\text{SiO}_2$  中正离子的移动引起的; 而  $300$  后, 由于温度升高引起结的不可逆的损伤, 导致样品失效.

同理计算得到其他样品的  $\ln(dh_{FE}/dt)$  与  $-1/T$  关系图, 如图 3 所示.

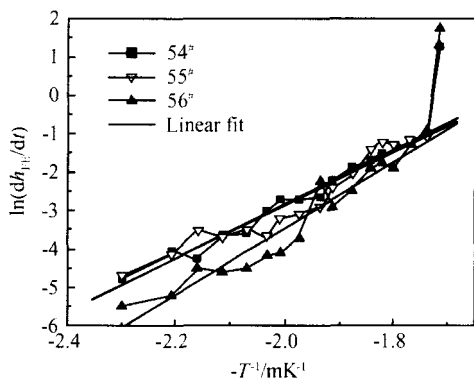


图 3 三只样品的  $\ln(dh_{FE}/dt)$  与  $-1/T$  对应关系

Fig. 3 Curves of  $\ln(dh_{FE}/dt)$  versus  $-1/T$  for three samples

由图可以看出: 三个样品的退化趋势一致, 均是在  $300$  左右失效机理发生改变, 直至失效.

这样就可以得到样品 3DG130 失效机理一致的温度范围, 由模型推导得到在此范围内计算激活能及寿命的公式. 将公式 (2) 在不同温度范围内两边积分再相比可得公式 (4):

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\int_0^{t_1} A_j^n V^m \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dt}{\int_0^t A_j^n V^m \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dt} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dT}{\int_0^t \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dt} \quad (4)$$

式中  $M_1$  为试验条件下在  $T_1 \sim T_2$  温度范围内的退化量;  $M_2$  为工作条件下的退化量;  $t_1$  为试验时间;  $t$  为外推工作条件下的寿命;  $\dot{T}$  为试验中的升温速率. 当  $M_1 = M_2$  等于失效判据时, 由 (4) 式可外推寿命公式:

$$t = \frac{\int_{T_1}^{T_2} \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dT}{\exp\left(-\frac{Q}{kT_0}\right)} \quad (5)$$

利用公式 (4), (5) 在保证失效机理一致的范围计算得到激活能并外推寿命, 避免了由于失效机理可能在加速试验过程中发生改变而导致的错误数据, 从而得到更为准确外推样品的寿命, 如表 3 所示.

表 3 样品的激活能及寿命

Table 3 Activation and lifetime of the samples

样品编号	54#	55#	56#
激活能 $Q$	0.55	0.56	0.64
外推 60 寿命/h	$7.39 \times 10^6$	$8.37 \times 10^6$	$3.04 \times 10^7$

## 5 结论

(1) 通过对电子器件加速试验失效模型——Arrhenius 模型的研究, 发现当加速试验过程中, 失效机理不发生改变时, 电子器件失效敏感参数的退化速率与施加应力的负倒数遵从指数关系, 从而提出了一种加速试验失效机理一致性的判定方法.

(2) 对硅 npn 三极管 3DG130 进行了额定功率下,  $150 \sim 310$  范围内的序进应力加速试验, 快速提取试验器件敏感参数  $h_{FE}$  的退化速率与施加温度应力的关系, 得到失效机理一致的应力范围, 验证了该方法的可行性.

(3) 利用模型计算得到了保证失效机理一致范围内的激活能并外推了寿命. 这样就把失效机理一致性判别与计算样品激活能、寿命结合在一起, 节约了时间, 提高了效率, 并保证了失效机理的一致性, 排除了加速过程中失效机理的改变而带来的误差, 从而保证了外推寿命的准确性.

## 参考文献

- [ 1 ] Hu J M, Barker D, Dasgupta A, et al. Role of failure-mechanism identification in accelerated testing. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE, 1992: 181
- [ 2 ] Redhead P A. Thermal desorption of gases. Vacuum, 1962, 12:203
- [ 3 ] Pasco R W, Schwarz J A. Temperature-ramp resistance analysis to characterize electromigration. Solid-State Electron, 1983, 26(5):445
- [ 4 ] Li Zhiguo, Song Zengchao, Cheng Yaohai. A study on GaAs FET's failure mechanism and experimental technology of rapid evaluation of reliability. Proceedings of IEEE Reliability Physics International Symposium, 2003:576
- [ 5 ] Li Zhiguo, Song Zengchao, Sun Dapeng. A study on GaAs FET's failure mechanism and experimental technology of rapid evaluation of reliability. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(8):856 (in Chinese) [李志国, 宋增超, 孙大鹏. GaAs FET 失效机理及快速评价实验技术的研究. 半导体学报, 2003, 24(8):856]
- [ 6 ] Zhang Wanrong, Li Zhiguo, Mu Fuchen. A rapid evaluation method for degradation activation energy of n-GaAs ohmic contacts with and without TiN diffusion barrier layers. Proceedings of 8th IPFA, Singapore, 2001:134

## A Failure-Mechanism Identification Method in Accelerated Testing<sup>\*</sup>

Guo Chunsheng<sup>†</sup>, Xie Xuesong, Ma Weidong, Cheng Yaohai, and Li Zhiguo

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

**Abstract:** Through the study of a failure mechanism model—the Arrhenius model—of electronic devices in accelerated testing, it is found that the relation between the rate of degradation of failure sensitive parameters and the negative reciprocal of operating stress follows an exponential rule in accelerated testing. Based on the relationship, a failure-mechanism identification method in accelerated testing is presented. Then a progress-stress accelerated test is constructed in the temperature range of 150~310 °C, and the consistent failure-mechanism range proves that the method is feasible.

**Key words:** accelerated testing; failure mechanism; identification

**EEACC:** 2560J; 0170N

**Article ID:** 0253-4177(2006)03-0560-04

<sup>\*</sup> Project supported by the Foundation of the National Defence Science & Technology Committee for Basic Research (No. Z032005A001)

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

Received 13 August 2005, revised manuscript received 15 October 2005