

## 序进应力在线加速退化模型研究

郭春生<sup>†</sup> 万宁 马卫东 熊聪 张光沉 冯士维

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

(2011年2月7日收到; 2011年6月14日收到修改稿)

针对线下参数退化模型由于温度冲击而引入误差的问题, 基于在线序进应力加速退化实验, 建立了在线参数退化模型, 提高了以参数变化为计算基础的参数退化模型的准确性. 并以 3CG120 型高频晶体管为例, 在 150—230 °C 范围内进行了在线序进应力加速实验. 利用建立的在线参数退化模型, 得到 3CG120 型高频晶体管的寿命误差为 6.5%, 比线下参数退化模型的误差 (23.2%) 要小.

**关键词:** 序进应力加速实验, 参数退化, 在线测量

**PACS:** 85.90.+h, 06.20.DK, 85.30.Pq

## 1. 引言

目前电子器件可靠性评价的标准主要有美国国家军用微电路测试标准及方法 (MIL-STD-883-1016)、美国国家军用电子设备可靠性预测手册 (MIL-HDBK-217F)、我国的国家军用标准微电子器件试验方法及程序 (GJB-548A-1016) 以及国家标准电子元器件失效率试验方法 (GB-1772-79) 等. 这些评价标准及方法以失效时间作为统计分析对象, 评价过程中需要样品退化至失效, 才能得到失效时间. 对于半导体器件, 评价其可靠性有的甚至需要几千小时<sup>[1-3]</sup>. 并且在这些评价标准及方法中, 产品只有正常和失效两种状态, 既不重视产品退化过程中的微观变化, 也没有利用失效前的相关信息<sup>[4]</sup>, 测量过程中并不区分失效机理的不同, 因此评价结果的准确性并不理想.

为了缩短评价时间, 提高寿命评价的准确性, 参数退化模型开始应用到产品的可靠性评价中<sup>[2,5]</sup>. 参数退化模型主要是从产品性能参数的变化着手, 通过对表征产品性能的参数进行连续测量, 取得参数的动态退化规律, 利用退化数据进行分析, 建立外推模型, 对产品可靠性做出评定. 如 Huang<sup>[2]</sup> 在 5000 h 实验基础上建立了半导体激光器的退化模型, 利用参数退化数据进行可靠性分析, 以解决传统评价方法效率低的问题.

参数退化模型及外推模型是基于退化数据建立的, 因此退化数据的精确性对模型的准确与否十分关键. 现行的参数退化模型主要基于线下测量, 即在加速应力条件下 (高温、大电流等) 实验, 在正常条件下 (室温、工作电流等) 测量, 这就使得线下参数退化模型中由于受到温度冲击 (或电流等冲击) 而产生误差. 针对现行加速实验参数退化模型中由于测量而引起的误差问题, 基于在线序进应力加速退化实验, 本文建立了在线参数退化模型. 并以样品 3CG120 型高频晶体管为例, 在 150—230 °C 范围内进行了升温速率分别为 1, 2, 5 °C/h 的序进应力加速实验, 验证了在线参数退化模型的准确性.

## 2. 理论及模型

在本文所采用的方法中, 对样品施加随时间变化的温度应力和恒定不变的电应力进行实验. 在实验过程中在线测量器件参数的动态退化数据, 消除由于温度冲击而引入的误差, 从而准确地提取样品的失效敏感参数的退化量与温度的关系, 建立在线参数退化模型. 然后利用模型计算得到器件的激活能、寿命等可靠性参数.

## 2.1. 应力的加载

为了快速得到样品失效敏感参数的温度特性

<sup>†</sup> E-mail: guoes@bjut.edu.cn

和退化特性,在实验过程中,采用序进温度应力,即对实验样品施加升温速率为  $\beta$  的温度应力. 在  $t$  时刻电子器件的结温  $T_j$  可表示为

$$T_j = T_{j_0} + \beta t + \Delta T, \quad (1)$$

式中  $T_{j_0}$  为样品的初始结温,  $\Delta T$  为焦耳热产生的温升.

### 2.2. 在线参数变化量的构成

本次实验样品为济南半导体研究所提供的 3CG120 型高频晶体管,由文献[6]知,其失效敏感参数为电流增益  $h_{FE}$ . 在实验的退化过程中,  $h_{FE}$  是随温度  $T$  和时间  $t$  变化的函数,即  $h_{FE} = h[t, T(t)]$ . 实验采用在线测量,即在实验条件下进行测量. 在线测量中测得的器件参数的变化量包括以下两部分:由器件的温度特性引起的电流增益  $h_{FE}$  的变化量  $\Delta h[T(t)]$ ,由温度应力和实验时间引起的电流增益变化量——器件参数的真实退化量  $\Delta h[t, T(t)]$ . 因此,实验过程中电流增益  $h_{FE}$  的总变化量  $\Delta h$  可表示为

$$\Delta h = \Delta h[T(t)] + \Delta h[t, T(t)]. \quad (2)$$

为了简便,下面用  $\Delta h_i$  来代表  $\Delta h[t, T(t)]$ . 退化模型中用  $\Delta h_i$  来计算器件的激活能、寿命等可靠性参数.

根据厂家标准,器件的失效判据为  $h_{FE}$  的退化比率超过 20%,  $\Delta h_{FE}$  为  $h_{FE}$  退化量,即  $|\Delta h_{FE}/h_{FE}| \geq 20\%$ . 考虑到温度特性引起的参数变化,在线测量条件下的失效判据为电流增益在高温下的真实退化量  $\Delta h_i$  与高温下电流增益值  $h[T(t)]$  之比达到 20%,即

$$\frac{\Delta h_i}{h[T(t)]} = \frac{\Delta h - \Delta h[T(t)]}{h[T(t)]} \geq 20\%. \quad (3)$$

实验过程中器件参数的变化量包括  $\Delta h[T(t)]$  和  $\Delta h_i$  两部分. 因此,为了得到器件在线条件下的真实退化量  $\Delta h_i$ ,在每组实验前均要测量样品的温度特性曲线. 通过 Agilent VEE 程序控制 Agilent 3457 型电流表,测量电流增益参数随温度变化的温度特性  $\Delta h[T(t)]$  作为正式实验的基准值. 然后,在实验中在线控制 Agilent 3457 型电流表,测量实验条件下电流增益参数的总退化量  $\Delta h$ ,以求得  $\Delta h_i$ .

### 2.3. 模型的建立

反应速率与温度的关系常用 Arrhenius 模型来模拟<sup>[6-8]</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,对照文献[6]中关于电流应

力和电压应力对器件寿命影响的研究,建立的模型为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta h_i}{h[T(t)]} &= \frac{\Delta h - \Delta h[T(t)]}{h[T(t)]} \\ &= A j^n V^m \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T_j}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $\frac{\Delta h_i}{h[T(t)]}$  为器件电流增益的退化速率,  $A$  为常数,  $j$  为电流密度,  $V$  为电压,  $E_a$  为激活能,  $k_B$  为玻尔兹曼常数.

在序进应力加速寿命实验中,由于对器件施加的应力随时间的变化而改变, (4) 式中参数的退化速率也随时间的变化而改变. 对退化过程中的两个不同时间段进行积分,可得到对应的两个退化比率  $\frac{\Delta h_1 - \Delta h[T(t)]_1}{h[T(t)]_1}$ ,  $\frac{\Delta h_2 - \Delta h[T(t)]_2}{h[T(t)]_2}$ . 对 (4) 式积分后得

$$\frac{\Delta h_1 - \Delta h[T(t)]_1}{h[T(t)]_1} = A j^n V^m \int_{t_1}^{t_2} \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T_j}\right) dt, \quad (5)$$

$$\frac{\Delta h_2 - \Delta h[T(t)]_2}{h[T(t)]_2} = A j^n V^m \int_{t_3}^{t_4} \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T_j}\right) dt. \quad (6)$$

当对样品施加恒定电应力时,将测得不同时间段的退化比率  $\frac{\Delta h_1 - \Delta h[T(t)]_1}{h[T(t)]_1}$ ,  $\frac{\Delta h_2 - \Delta h[T(t)]_2}{h[T(t)]_2}$  相比,即可得到激活能  $E_a$  的计算公式

$$\begin{aligned} \frac{\Delta h_1 - \Delta h[T(t)]_1}{h[T(t)]_1} &= \frac{A j^n V^m \int_{t_1}^{t_2} \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T_j}\right) dt}{A j^n V^m \int_{t_3}^{t_4} \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T_j}\right) dt} \\ &= \frac{\int_{t_1}^{t_2} \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T_j}\right) dt}{\int_{t_3}^{t_4} \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T_j}\right) dt}. \end{aligned} \quad (7)$$

得到器件的激活能后,根据 Arrhenius 模型和累积损伤模型,利用下列公式外推可得器件在常温下的工作寿命:

$$\tau = \frac{\int_0^t \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T_j}\right) dt}{\exp\left(-\frac{E_a}{k_B T_{j_0}}\right)}. \quad (8)$$

当敏感参数的退化比率  $\frac{\Delta h - \Delta h[T(t)]}{h[T(t)]}$  达到失效判据时, (8) 式中的  $\tau$  即为工作条件  $T_0$  下实验样品

的寿命.

### 3. 实 验

以 3CG120 型高频晶体管作为实验样品,对本文提出的方法进行说明.实验采用自动化实验和测量系统,以计算机作为控制端,以国际通用接口 IEEE-488 总线为数据通信基础,用 HP-VEE 程序控制实验,实现电应力和序进温度应力的准确加载以及实验结果的实时测量及保存.在 150—230 °C 范围内,进行了升温速率  $\beta$  分别为 1, 2, 5 °C/h 的三组序进应力加速寿命实验.实验中取 5 只 3CG120 型高频晶体管作为样品,并分别命名为样品 1、样品 2、样品 3、样品 4 和样品 5.电应力条件如下:集电极与发射极之间电压  $V_{CE} = -27$  V,集电极电流  $I_C = 18.5$  mA(功率为 500 mW);初始温度  $T_0$  设为 150 °C.

由于电流电压因素的影响,实验样品的结温比环境温度高.实验前,首先在 120—320 °C 的温度范围内对结温进行测量,测得其平均结温升为 33 °C.本文中提到的温度均为调整后的结温.

实验前,先将样品置于 300 °C 条件下退火 10 h,稳定器件参数.然后,测量敏感参数  $h_{FE}$  在 150—230 °C 范围内的温度特性.最后,在 150—230 °C 范围内进行序进应力加速寿命实验.每组实验前均需测量敏感参数的温度特性,作为每组实验的基准值,以求得  $\Delta h_i$ .退化测试程序中设定每隔 1 s 测试一个数据点,因此,当  $\beta = 1$  °C/h 时,每小时测得 3600 个数据点.为了计算简便,在  $\beta = 1$  °C/h 条件下对每 360 个数据点取平均值,即每 0.1 °C 得到一个平均数据,在 150—230 °C 的范围内,每组实验得到 800 个平均数据.

### 4. 结果及分析

以样品 4 为例,得到敏感参数  $h_{FE}$  的退化比率  $\Delta h_i/h [T(t)]$  在不同升温速率下的退化规律如图 1 所示.

从图 1 可以看出,随着升温速率的提高,敏感参数  $h_{FE}$  的退化比率呈减小趋势.并且随温度上升,在同一升温速率下敏感参数  $h_{FE}$  的退化比率随之增加.

以升温速率  $\beta = 2$  °C/h 的退化曲线为例,利用指数增长(EG)退化外推模型,外推样品达到失效判

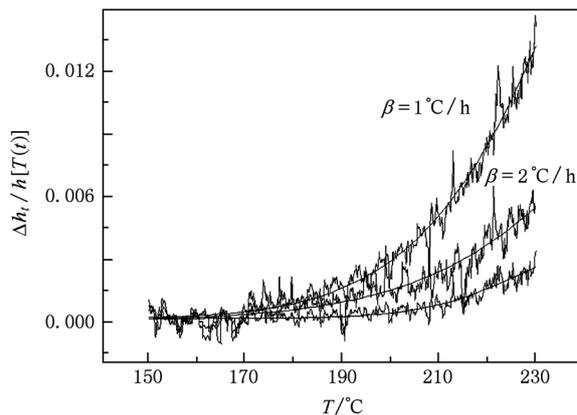


图 1 样品 4 在不同升温速率下,敏感参数  $h_{FE}$  的退化比率  $\Delta h_i/h [T(t)]$  的退化规律  $I_C = 18.5$  mA,  $V_{CE} = 27$  V

据时的温度和时间,所得结果如图 2 所示.利用 EG 退化外推模型,还可以得到器件不同升温速率下敏感参数退化达到失效判据时的温度.

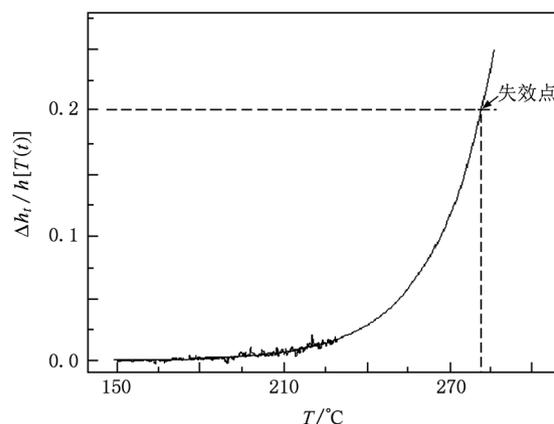


图 2 利用 EG 退化外推模型得到样品达到失效判据时的温度  $I_C = 18.5$  mA,  $V_{CE} = 27$  V,  $\beta = 2$  °C/h

根据失效激活能的提取模型<sup>[9]</sup>,利用敏感参数  $h_{FE}$  在不同温度段的退化量计算得到相应的激活能  $E_a$ .图 3 所示为样品 4 在升温速率  $\beta$  为 1 °C/h 时的激活能.从图 3 可以看出,在 150—170 °C, 170—190 °C, 190—210 °C 和 210—230 °C 的温度范围内激活能分别为 0.94, 0.95, 0.95 和 0.94 eV,整体激活能为 0.95 eV.不同温度段的激活能基本相等,表明在实验过程中失效机理未发生改变.并且,实验的初始温度 150 °C 比较接近实际工作温度,因此用这组数据外推正常工作时的寿命是合理的.

利用相同方法计算不同升温速率下的激活能.然后利用得到的激活能及外推达到失效判据时的

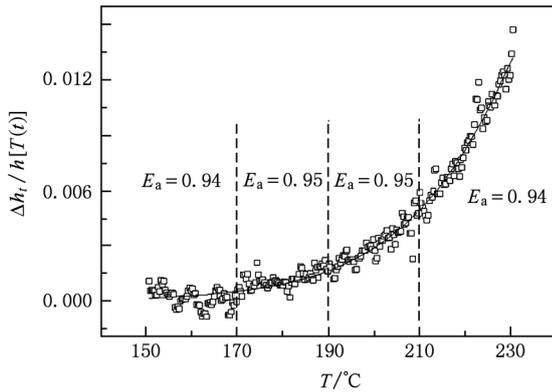


图3 样品4在不同温度范围内的激活能  $E_a$   $I_C = 18.5 \text{ mA}$ ,  $V_{CE} = 27 \text{ V}$ ,  $\beta = 1 \text{ } ^\circ\text{C/h}$

温度,得到结温为  $60 \text{ } ^\circ\text{C}$  时样品的工作寿命  $\tau_{60 \text{ } ^\circ\text{C}}$  以及结温为  $230 \text{ } ^\circ\text{C}$  时样品的工作寿命  $\tau_{230 \text{ } ^\circ\text{C}}$ ,结果如表1所列.

表1 不同样品的激活能与寿命

	$E_a/\text{eV}$	$\tau_{60 \text{ } ^\circ\text{C}}/10^8 \text{ h}$	$\tau_{230 \text{ } ^\circ\text{C}}/10^3 \text{ h}$
样品1	0.94	1.34	1.13
样品2	0.91	3.57	1.36
样品3	0.93	7.03	1.97
样品4	0.95	2.35	1.45
样品5	0.96	4.30	1.75
中值寿命		3.57	1.45

为了验证外推得到器件工作寿命的准确性,还与上述5只样品同一批次的另外10只样品进行了相同电应力条件下温度为  $230 \text{ } ^\circ\text{C}$  时恒定温度应力加速实验,图4所示为其中一只样品敏感参数  $h_{FE}$  的退化曲线.

从图4可以看出: $h_{FE}$ 按照单一的规律持续退化达到失效判据,并没有出现其他的失效机理.同时,由序进应力加速实验可以判断出  $150\text{--}230 \text{ } ^\circ\text{C}$  范围内样品的失效机理一致.因此,利用  $150\text{--}230 \text{ } ^\circ\text{C}$  范围内的激活能外推失效温度,计算器件在正常工作条件下的寿命是合理的.

通过  $230 \text{ } ^\circ\text{C}$  的恒定温度应力实验,可以得到样品在  $230 \text{ } ^\circ\text{C}$  的中值寿命为  $1.55 \times 10^3 \text{ h}$ . 同样,通过不同升温速率的序进应力加速实验,利用在线参数退化模型外推得到在  $230 \text{ } ^\circ\text{C}$  应力水平下样品的中值寿命为  $1.45 \times 10^3 \text{ h}$ . 两组数据比较接近,说明本文方法外推得到的器件工作寿命比较准确.而利用线下参数退化模型对另外24只样品进行实验,外推得

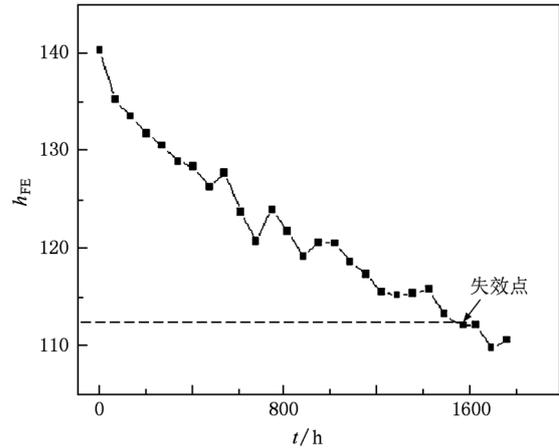


图4  $T = 230 \text{ } ^\circ\text{C}$  时,恒定温度应力加速实验得到样品敏感参数  $h_{FE}$  的退化曲线  $I_C = 18.5 \text{ mA}$ ,  $V_{CE} = 27 \text{ V}$

到器件在  $230 \text{ } ^\circ\text{C}$  温度下的中值寿命为  $1.19 \times 10^3 \text{ h}$ .

由以上所述可以看出,相比于  $230 \text{ } ^\circ\text{C}$  恒温实验结果,在线参数退化模型误差为  $6.5\%$ ,比线下参数退化模型误差 ( $23.2\%$ ) 要小.分析认为,线下参数退化实验由于在测量过程中引入了温度冲击误差,从而对器件参数起到了再次加速的作用,但是线下参数退化模型的计算中并没有考虑这一部分.因此,用线下参数退化模型计算得到的器件寿命比实际寿命要短,误差达到  $23.2\%$ .

本文利用序进应力加速器件退化进而外推寿命的方法,得到器件的寿命和激活能等可靠性参数需几十小时到几百小时,而恒定应力加速寿命实验方法则需几千小时.因而利用本文的方法可降低实验成本,提高实验效率.

## 5. 结 论

针对现行器件参数加速退化模型引入温度冲击误差的问题,建立了在线参数退化模型.在线参数退化模型消除了线下测量带来的温度冲击误差,提高了测量精度.并以3CG120型高频晶体管为例,在  $150\text{--}230 \text{ } ^\circ\text{C}$  范围内进行了在线序进应力加速实验.

通过序进应力加速实验,利用在线参数退化模型外推得到样品在  $230 \text{ } ^\circ\text{C}$  温度下的中值寿命为  $1.45 \times 10^3 \text{ h}$ . 利用线下参数退化模型进行实验外推得到样品在  $230 \text{ } ^\circ\text{C}$  温度下的中值寿命为  $1.19 \times 10^3 \text{ h}$ . 通过  $230 \text{ } ^\circ\text{C}$  的恒定温度应力实验,得到样品在  $230 \text{ } ^\circ\text{C}$  温度下的中值寿命为  $1.55 \times 10^3 \text{ h}$ . 相比于

230 °C 温度下的恒温实验结果, 在线参数退化模型外推 3CG120 型高频晶体管工作寿命的误差为 6.5%, 比线下参数退化模型的误差 (23.2%) 要小。利用本文提出的在线参数退化模型进行上述实验,

可降低实验成本, 提高实验效率。

感谢李志国教授、吕长志研究员对本文工作的指导和帮助。

- [1] Grillot P N, Krames M R, Zhao H, Teoh S H 2006 *IEEE Trans. Dev. Mater. Rel.* **6** 564
- [2] Huang J S 2005 *IEEE Trans. Dev. Mater. Rel.* **5** 150
- [3] Meneghini M, Trevisanello L R, Zehnder U 2007 *IEEE Trans. Electron Dev.* **54** 3245
- [4] Zhao J Y, Liu F, Sun Q, Zhou J L 2005 *Acta Electron. Sin.* **33** 378 (in Chinese) [赵建印、刘芳、孙权、周经伦 2005 电子学报 **33** 378]
- [5] Huang J S 2006 *IEEE Trans. Dev. Mater. Rel.* **6** 46
- [6] Pasco R W, Schwarz J A 1983 *Solid-State Electron.* **26** 445
- [7] Li Z G, Song Z C, Sun D P 2003 *Chin. J. Semicond.* **24** 856 (in Chinese) [李志国、宋增超、孙大鹏 2003 半导体学报 **24** 856]
- [8] Luan S Z, Liu H X, Jia R X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2524 (in Chinese) [栾苏珍、刘红侠、贾仁需 2008 物理学报 **57** 2524]
- [9] Guo C S, Shan N N, Feng S W, Ma W D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2350 (in Chinese) [郭春生、单尼娜、冯士维、马卫东 2010 物理学报 **59** 2350]

## Online degradation model based on process-stress accelerated test

Guo Chun-Sheng<sup>†</sup> Wan Ning Ma Wei-Dong Xiong Cong Zhang Guang-Chen Feng Shi-Wei

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 7 February 2011; revised manuscript received 14 June 2011)

### Abstract

An online degradation model is presented, in which is avoided the error in parameter degradation accelerated test, which is caused by temperature shock during parameter measurement. Through the measurement with avoiding the error parameter, the parameter degradation model can be more accurate. To demonstrate the application of the method, a kind of mature product, 3CG120, is tested in a temperature range of 150—230 °C under online process-stress. Then the error of lifetime is obtained by utilizing the online model to be about 6.5%, much less than that of the old model (23.2%).

**Keywords:** process-stress accelerated test, parameter degradation, online measurement

**PACS:** 85.90.+h, 06.20.DK, 85.30.Pq

<sup>†</sup> E-mail: guocs@bjut.edu.cn