

快速确定微电子器件失效激活能及寿命试验的新方法

李 杰 郭春生 莫郁薇 谢雪松 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: 提出了一种新的微电子器件快速评价方法-温度斜坡法,建立了确定失效激活能的新模型和寿命外推新模型,使用此模型可计算出单支器件的失效激活能并外推其寿命.同时,该方法的试验温度范围较宽,可以触发不同温度范围的多种退化模式,实现对不同退化机理的研究.

关键词: 温度斜坡; 激活能; 多退化机理

PACC: 3520G; 8170

中图分类号: TN32

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)08-1662-05

1 引言

随着微电子器件设计方法和工艺技术的不断发展,各种器件的可靠性和寿命不断增加.我国半导体分立器件和 CMOS 集成电路的失效率已由 80 年代的 10^{-6} 器件小时和 10^{-5} 器件小时减小到目前的 10^{-8} 器件小时和 10^{-7} 器件小时^[1,2]. 缩短可靠性寿命试验时间,降低试验成本,是可靠性工程和新产品研发中急需解决的问题之一.同时,人们正在努力提高半导体器件的工作温度,已有文献报道 Si 基和 GaAs 基半导体器件最高工作温度可以分别达到 400^[3] 和 500^[4]. 所以,研究器件的高温特性和高温下的退化特性,对合理地拓宽器件温度适应范围有重要的现实意义.

各国都制定了可靠性寿命评价和试验的相关标准.但实际情况是这些试验周期长,样品数量多,成本高.目前,国内外普遍采用恒定应力加速寿命试验,即多样品、多温度点得到相关系数后外推正常温度下的寿命和失效率的方法同样存在着效率低、周期长的缺点.关键在于,常规方法无法对同一样品在不同温度下尤其是高温下的不同退化机理进行研究.可见常规方法面临着巨大的挑战^[5].

本文提出了一种适用于微电子器件寿命的快速

评价的方法-温度斜坡法,并建立了模型.通过确立器件敏感参数退化率与应力水平之间的关系(取代常规方法中所需要的建立寿命特征与应力水平之间的关系),由单支样品的试验数据,就能够得出其失效激活能,并外推该样品正常工作条件下的寿命,从而降低了成本.采用温度应力和电压、电流应力的多应力加速试验方式,加快器件内部的物理化学反应,在一定程度上缩短了试验时间.同时,该试验方法可以触发多种退化模式,从而实现对不同退化机理的研究.

2 理论及模型^[5,6]

微电子器件的退化是由器件内部物理和化学变化引起的,当这种变化积累到一定程度时即发生失效,退化经历的时间即产品的寿命^[7].

在加速寿命试验中,微电子器件的退化与温度的关系可以用 Arrhenius 模型来描述;与电应力(电压、电流等)的关系,可以用逆幂率模型描述;多应力时可以用广义 Arrhenius 模型描述^[8]. 根据上述几种模型,在同时考虑温度、电压及电流三种应力情况下,我们建立了如下形式的模型:

$$\frac{dM}{dt} = A \exp(j^n) \exp(V^m) \exp(-Q/T) \quad (1)$$

李 杰 男,1976 年出生,硕士研究生,主要从事微电子器件可靠性研究.

2004-11-23 收到,2005-03-03 定稿

式中 A, m, n 为常数, dM/dt 为器件特征参数随时间的变化率, j 为电流密度, V 为电压, Q 为激活能, k 为玻尔兹曼常数 ($8.36 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$), T 为绝对温度. (1) 式两边同时除以器件特征参数初始值 M_0 , 可得

$$\frac{dM}{M_0} = A \exp(j^n) \exp(V^m) \exp(-Q/T) dt \quad (2)$$

试验方案中, 温度应力采用序进应力法, 即对器件施加按一定速率上升的温度应力, 则 t 时刻结温为

$$T = T_0 + t + T \quad (3)$$

式中 T_0 为初始试验温度, T 是器件施加电应力后, 由焦耳热产生的自升温. 由(3)式可得, $dT = dt$, 即 $dt = dT$. 带入(2)式中, 得到

$$\frac{dM}{M_0} = A \exp(j^n) \exp(V^m) \exp(-Q/T) dT \quad (4)$$

从而将参数随时间的变化率转化为随温度的变化率, j 和 V 保持为常数, 对(4)式两边积分, 可得

$$\frac{1}{M_0} \int_{M_0}^M dM = \frac{A \exp(j^n + V^m)}{T_0} \int_{T_0}^T \exp(-\frac{Q}{T}) dT$$

一般情况下, $Q/kT \gg 1$, 所以

$$\int_{T_0}^T \exp(-\frac{Q}{T}) dT = \frac{1}{Q} [T^2 \exp(-\frac{Q}{T}) - T_0^2 \exp(-\frac{Q}{T_0})] \quad (5)$$

在具体的试验过程中, 温度的变化范围通常会大于 100 K, 所以 $T^2 \exp(-Q/kT) \gg T_0^2 \exp(-Q/kT_0)^{[9]}$. 例如: 设 $T = 300$, $T_0 = 200$, $Q = 1.0 \text{ eV}$, 则 $T^2 \exp(-Q/kT) / T_0^2 \exp(-Q/kT_0) = 123$. 由此, (5) 式积分的结果可以简化为:

$$\frac{M}{M_0} = \frac{A \exp(j^n + V^m)}{Q} T^2 \exp(-\frac{Q}{T})$$

上式两边同取对数, 得:

$$\ln(\frac{M}{T^2 M_0}) = \ln C + (-\frac{Q}{T}) \quad (6)$$

其中 $C = \frac{A \exp(j^n + V^m)}{Q}$

从(6)式看出, 通过描绘 $\ln(\frac{M}{T^2 M_0})$ 与 $1/T$ 的对应关系点, 可拟合出一条直线, 计算出该直线的斜率 S , 再由 $S = -\frac{Q}{T}$, 得到

$$Q = -S \quad (7)$$

即得出了激活能 Q . 若器件在试验过程中, 出现一个以上的退化机理, 则会出现斜率不同的线性段, 就可以得到不同退化机理的激活能和加速退化时间.

设在试验过程中, 由 t_1 时刻到 t_2 时刻, 器件的

特征参数退化到失效判据所引起的器件退化能量积累为^[10]:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} j^n V^m \exp(-\frac{Q}{T}) dt \quad (8)$$

在得出激活能 Q 后, 就可以外推某一使用条件下的器件寿命:

$$= \frac{E}{j_0^n V_0^m \exp(-\frac{Q}{T_{j_0}})} \quad (9)$$

其中, T_{j_0} 为该器件的使用条件下结温. 若试验条件与工作条件的电应力相同, 即 $j = j_0, V = V_0$, 则(9)式可简化为:

$$= \frac{\int_{t_1}^{t_2} \exp(-\frac{Q}{T}) dt}{\exp(-\frac{Q}{T_{j_0}})} \quad (10)$$

3 试验系统

基于温度斜坡法模型, 我们建立了一套试验系统, 见图 1.

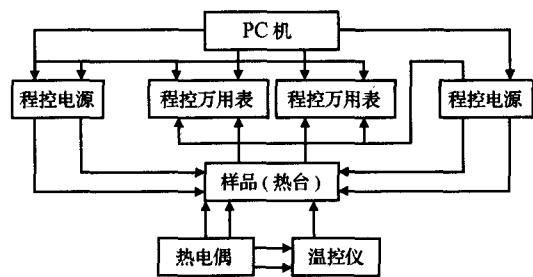


图 1 试验系统图

Fig. 1 Testing system block diagram

通过程控温控仪, 对热台加热并控制升温速率, 完成对样品施加的温度应力; 通过程控电源对样品施加电应力. 在试验过程中, 程控万用表将样品的电应力状态反馈给 PC 机, 用 HPVEE 编写的程序根据反馈的信息控制电源的输出, 以保持样品电应力的恒定.

4 试验结果及分析

4.1 试验一

4.1.1 试验条件及数据

试验样品采用硅 PNP3CG120C 双极型晶体管. 温度应力: 初始温度 T 设为 443 K, 升温速率 =

1 K/8hr; 电应力: $V_{CE} = -27V, I_C = 18.5mA$ (功率为 500mW); 选择直流放大系数 h_{FE} 为失效敏感参数; 测试条件: $V_{CE} = -10V, I_C = 30mA$, 室温; 失效判据: h_{FE} 的漂移量 $h_{FE}/h_{FE} \pm 20\%$. 试验中, 372# 样品的试验数据见图 2.

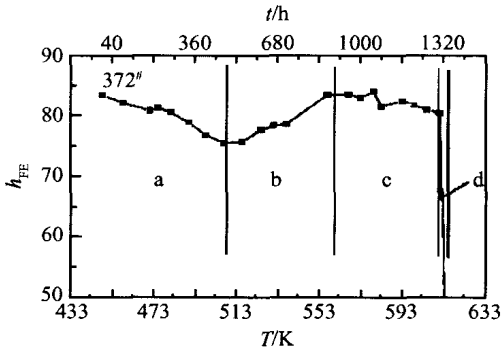


图 2 372# 样品 h_{FE} 的试验值与温度和时间的关系

Fig. 2 Temperature and time properties of h_{FE} for 372# sample

4.1.2 数据处理及结果分析

(1) 从 443 K 到 510 K 左右, h_{FE} 缓慢退化到初始值的 91%. 这一过程的温度应力条件与正常使用下的条件最接近, 且退化模式单一. 因此, 从退化机理的角度出发, 其主要机理与正常使用条件下所触发的主要机理基本一致. 使用温度斜坡模型, 可以计算出该机理的激活能 $Q_1 = 0.7eV$. 由该阶段的数据外推可以得到器件的 h_{FE} 退化至 20% (66) 所需要的试验时间, 见图 3 (以 372# 样品为例说明). 根据 GJB/Z299C-200x 表 5.1.1-5c, 经计算, 本样品正常使用时的结温为 60 左右, 可以推算出器件在 $V_{CE} = -27V, I_C = 18.5mA$ (功率为 500mW) 条件下的正常使用寿命为: $372# = 1.2 \times 10^7 h$.

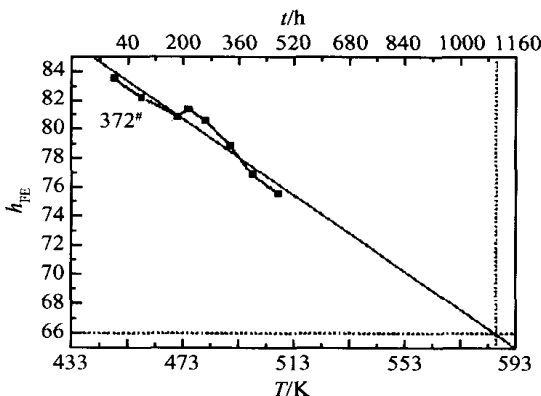


图 3 372# 样品寿命外推结果

Fig. 3 Extrapolated lifetime for 372# sample

(2) 样品在整个试验过程中表现出不同的退化模式, 图 1 中曲线可以分为斜率不同的 a, b, c, d 四部分, 由上一节 (7) 式可知, 每个阶段对应一种主要退化机理. 使用温度斜坡模型可以计算出每种机理的失效激活能 (考虑到第四段为结损坏的过程, 所以在计算激活能时, 没有采用其数据)

$$Q_1 = 0.7eV; Q_2 = -1.2eV; Q_3 = 2.2eV.$$

4.2 试验二

为了获取更多的数据, 我们又取了两支同类型的样品, 编号分别为 373#, 374#, 在相同的条件下进行了试验, 试验数据见图 4. 由图可见, 373#, 374# 样品表现出与 372# 样品一致的退化模式. 利用第一段的数据, 也计算出了这两支样品的正常使用寿命:

$$373 = 3.8 \times 10^7 h$$

$$374 = 1.3 \times 10^7 h$$

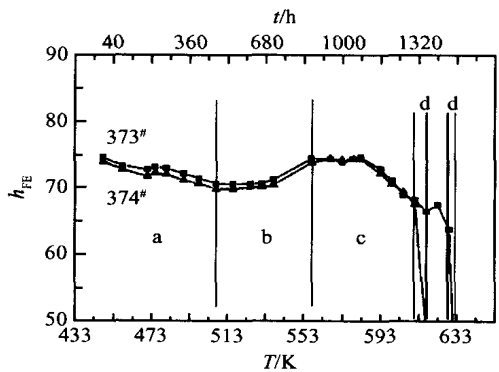


图 4 373#, 374# 样品 h_{FE} 的试验值与温度和时间的关系

Fig. 4 Temperature and time properties of h_{FE} for 373# and 374# samples

同样, 使用温度斜坡模型, 可以计算出每段所对应退化机理的激活能:

$$373# : Q_1 = 0.6eV; Q_2 = -1.3eV; Q_3 = 2.4eV.$$

$$374# : Q_1 = 0.6eV; Q_2 = -1.3eV; Q_3 = 2.3eV.$$

4.3 试验三

在加速寿命试验中最接近使用温度的温度段应该反映出正常工作条件下的失效机理, 所以应选择第一段 (a 段) 的失效激活能外推器件正常工作条件下的寿命. 由于本试验选择的升温速率过快, 在加速寿命试验达到第二段的温度时 (b 段), 器件的失

效并未达到失效判据值,可对第一段采用外推法来求解器件达到失效判据时的寿命.为了验证外推的合理性,我们选取第一段曲线在拐点之前的某一温度,进行恒定应力试验.具体试验条件如下:恒定温度 $T=503\text{K}$,电应力与前两组试验相同,试验结果见图 5.

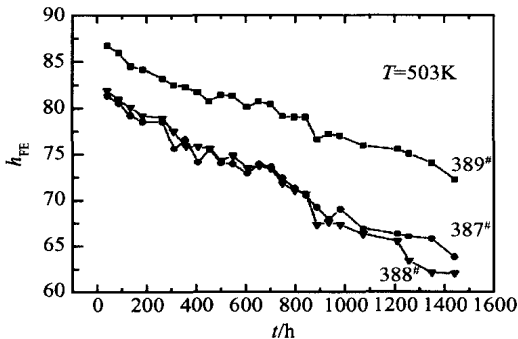


图 5 恒定温度应力下样品 h_{FE} 的测试值与时间的关系

Fig.5 Time properties of h_{FE} under a invariable temperature stress

可以看出,器件保持单一退化模式直至达到失效判据,说明采用第一段退化机理的失效激活能外推器件正常工作条件下的寿命是合理的.

5 结论

(1)使用基于温度斜坡模型的试验及数据处理方法,计算出的三支样品的激活能 Q 及寿命等数据比较一致.得出了 3CG120C 双极晶体管的寿命为 $1.2 \sim 3.8 \times 10^7\text{h}$,而双极型晶体管在地面良好条件下(实验室条件)使用寿命的经验数据为 $1.92 \times 10^7\text{h}$ ^[11],二者具有可比性,说明新方法能够较准确地进行器件寿命的评价.

(2)温度斜坡法模型通过单样品的数据就可以计算出失效激活能 Q ,外推出正常工作条件下的寿命.与常规加速寿命试验相比较^[11],减少了样品数量,降低了成本.当然,要减小误差,需采取多试验样品 Q 和失效分布参数的统计方法,精确计算有代表性的 Q 和.

(3)温度斜坡法通过设置适当的热电应力,可以大大缩短试验时间(本试验时间为 1500h 左右,若仅考虑外推寿命试验的时间只需要约 500h,远短于常规试验所需要的 4~6 个月的时间^[11]),提高了效

率、缩短了研制生产周期.

(4)常规试验方法需要进行摸底试验,找出某一失效机理的应力范围,并在此应力范围内进行试验^[11],很难进行不同温度范围多失效机理的研究.温度斜坡法则可在较宽的温度范围内进行加速寿命试验,进行不同温度段多失效机理的研究,并可计算出不同温度段的失效激活能.

致谢 感谢中国航天科技集团朱明让和梁瑞海研究员对本课题的支持.感谢济南半导体所提供了试验样品.感谢中国电子科技集团电子第十三研究所徐立生高工对本工作提出了有益的意见.

参考文献

- [1] The Data Centre of National Information Net. The analysis for the reliability of the electronics products. Reliability and quality information, 2000:16 (in Chinese) [电子产品目前可靠性水平分析. 国家网信息中心资料, 可靠性与质量信息, 2000:16]
- [2] The Data Centre of the Reliability Data Change Net for China Electronics Products. The database of failure rate of electronics devices, 1983:2 (in Chinese) [电子元器件失效率数据集(一). 中国电子产品可靠性数据交换网数据中心, 1983:2]
- [3] Colinge J P. Fully-depleted SOI CMOS for analog applications. IEEE Electron Device Lett, 1998, 5(45):1010
- [4] Schmid P. High temperature performance of GaAs-based HFET structure containing L T-AlGaAs and L T-GaAs. IEEE Electron Device Lett, 1998, 7(19):225
- [5] Li Zhiguo, Song Zengchao, Sun Dapeng, et al. GaAs MES-FET's reliability and new method of rapid evaluation. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(8):856 (in Chinese) [李志国, 宋增超, 孙大鹏, 等. GaAs MESFET 可靠性及快速评价新方法的研究. 半导体学报, 2003, 24(8):856]
- [6] Li Zhiguo. A study on GaAs FET's failure mechanism and experimental technology of rapid evaluation of reliability. Annual Proceedings Reliability Physics Symposium, 2003:576
- [7] Gao Guangbo, Li Xuexin. Semiconductor devices reliability physics. Beijing: Science Press, 1987 (in Chinese) [高光勃, 李学信. 半导体器件可靠性物理. 北京: 科学出版社, 1987]
- [8] Vietl R. Statistical method in accelerated life testing. Göttingen: Vandenhoeck Ruprecht, 1988
- [9] Redhead P A. Thermal desorption of gases. Vacuum, 1962, 12:203
- [10] Nelson W B. Accelerated life testing-step-stress models and data analysis. IEEE Trans Reliability, 1980, 29:2
- [11] Test methods and procedure for microelectronics, life/reliability tests [国军标 GB548A-96, 方法 1016 寿命/可靠性试验]

A New Method of Rapidly Confirming Activation Energy and Extrapolating Life of Electronic Device

Li Jie , Guo Chunsheng , Mo Yuwei , Xie Xuesong , Cheng Yaohai , and Li Zhiguo

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

Abstract : A new method ,temperature ramp method for rapid evaluation of reliability of microelectronic devices ,is proposed and a new model is set up. Using the new model ,the microelectronic device 's activation energy can be worked and its life can be extrapolated. The range of temperatures used in experiments is so wide that different degradation modes can take place ,and the problem of multi-degradation mechanisms can be studied.

Key words : temperature ramp ; activation energy ; multi-degradation mechanisms

PACC : 3520G; 8170

Article ID : 0253-4177(2005)08-1662-05