

# 电子元器件加速寿命试验方法的比较介绍

## 1 引言

加速寿命试验分为恒定应力、步进应力和序进应力加速寿命试验。将一定数量的样品分成几组，对每组施加一个高于额定值的固定不变的应力，在达到规定失效数或规定失效时间后停止，称为恒定应力加速寿命试验（以下简称恒加试验）；应力随时间分段增强的试验称步进应力加速寿命试验（以下简称步加试验）；应力随时间连续增强的试验称为序进应力加速寿命试验（以下简称序加试验）。序加试验可以看作步进应力的阶梯取很小的极限情况。加速寿命试验常用的模型有阿伦尼斯（Arrhenius）模型、爱伦（Eyring）模型以及以电应力为加速变量的加速模型。实际中 Arrhenius 模型应用最为广泛，本文主要介绍基于这种模型的试验。Arrhenius 模型反映电子元器件的寿命与温度之间的关系，这种关系本质上为化学变化的过程。方程表达式为

$$\frac{dM}{dt} = Ae^{-E/(kT)} \quad (1)$$

式中： $\frac{dM}{dt}$  为化学反应速率；E 为激活能量（eV）；k 为波尔兹曼常数  $0.8617 \times 10^{-4}$  eV/K；A 为常数；T 为绝对温度（K）。式(1)可化为

$$\lg t = a + b \left( \frac{1}{T} \right) \quad (2)$$

$$b = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \lg \frac{t_1(F_0)}{t_2(F_0)}, (T_2 > T_1)$$

式中：

式中：F<sub>0</sub> 为累计失效概率；t(F<sub>0</sub>) 为产品达到某一累计失效概率 F(t) 所用的时间。算出 b 后，则

$$E = bk / \lg e = 2.303bk$$

$$a = \lg t_2(F_0) - \frac{b}{T_2}$$

式(2)是以 Arrhenius 方程为基础的反映器件寿命与绝对温度 T 之间的关系式，是以温度 T 为加速变量的加速方程，它是元器件可靠性预测的基础。

## 2 试验方法

### 2.1 恒定应力加速寿命试验

目前应用最广的加速寿命试验是恒加试验。恒定应力加速寿命试验方法已被 IEC 标准采用[1]。其中 3.10 加速试验程序包括对样品周期测试的要求、热加速电耐久性测试的试验程序等，可操作性较强。恒加方法造成的失效因素较为单一，准确度较高。国外已经对不同材料的异质结双极晶体管（HBT）、CRT 阴极

射线管、栅式高电子迁移率晶体管开关（PHEMT switch）、多层陶瓷芯片电容等电子元器件做了相关研究。Y. C. Chou 等人对 GaAs 和 InP PHEMT 单片微波集成电路（MMIC）放大器进行了恒加试验 [2]。下面仅对 GaAs PHEMT 进行介绍，InP PHEMT 同前。对于 GaAs PHEMT MMIC 共抽取试验样品 84 只，分为三组，每组 28 只，环境温度分别为  $T_1=255\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $T_2=270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $T_3=285\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，所有参数均在室温下测量。失效判据为 44GHz 时， $|\Delta S_{21}|>1.0\text{ dB}$ 。三个组的试验结果如表 1 所示，试验数据服从对数正态分布。表中累计失效百分比、中位寿命、对数标准差（ $\sigma$ ）均由试验数据求得。其中累计失效百分比=每组失效数/（每组样品总数+1）；中位寿命为失效率为 50%时的寿命，可在对数正态概率纸上画寿命-累计失效百分比图得出： $\sigma \approx \lg t(0.84) - \lg t(0.5)$ 。由表 1 根据恒定应力加速寿命试验结果使用 Origin 软件可画出图 1。图中直线是根据已知的三个数据点用最小 2 乘法拟合而成，表示成  $y=a+bx$ 。经计算  $y=-12.414+8.8355x$ ，

表 1 0.1  $\mu\text{m}$  GaAs PHEMT MMIC 三温度点寿命测试参数

环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	沟道温度/ $^{\circ}\text{C}$	样品数	试验时间/h	累计失效百分比/%	中位寿命 50%/h	对数标准差( $\sigma$ )
255	300	28	1056	65	923	0.35
270	315	28	864	82	496	0.54
285	330	28	192	72	157	0.56

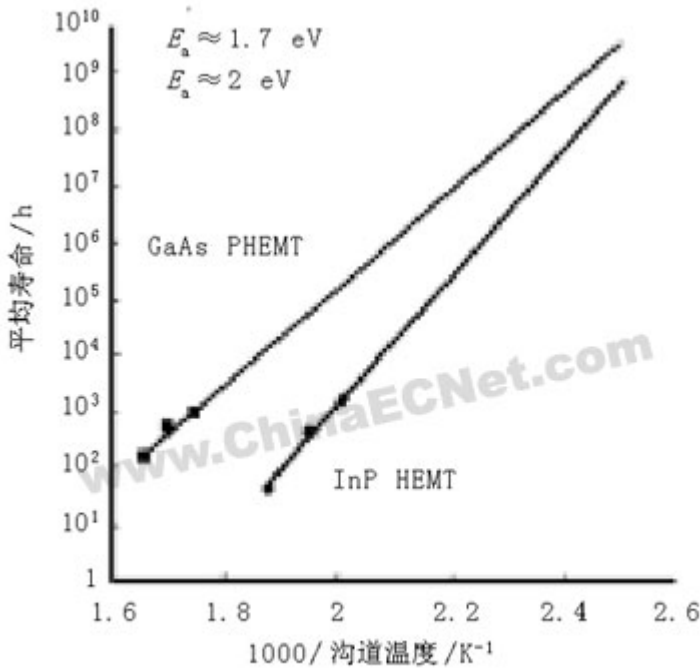


图 1 0.1  $\mu\text{m}$  InP PHEMT MMIC 和 0.1  $\mu\text{m}$  GaAs MMIC 的 Arrhenius 图

代入沟道温度  $T_0 = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，求其对应的  $x_0$ ， $x_0=1000/(273+125)=2.512562$   $\text{MTTF}=\lg^{-1}y(x_0)=6.1 \times 10^9\text{ h}$  拟合后直线的斜率  $b$  为  $8.8355 \times 10^{-3}$ ，则激活能  $E_a=2.303bk \approx 1.7\text{ eV}$  因此，沟道温度为  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  时，估计 GaAs 的 MTT 大于  $1 \times 10^8\text{ h}$ ，激活能为  $1.7\text{ eV}$ 。

**2.2 步进应力加速寿命试验**

步加试验时，先对样品施加一接近正常值的应力，到达规定时间或失效数后，再将应力提高一级，重复刚才的试验，一般至少做三个应力级。步进应力测试条件见表 2。

表2 步进应力测试条件

应力台阶	#1	#2	#3	#4	#5	#6
环境温度/℃	150	175	200	225	250	270
沟道温度/℃	180	206	232	258	284	305
应力间隔/h	40	70	70	70	70	70
受试器件数	20	19	17	17	17	16

Frank Gao 和 Peter Ersland 对 SAGFET 进行了步加试验[3]。温度从 150~270 ℃划为六级，每 70 h 升高 25 ℃；沟道温度约比环境温度高 30 ℃。总试验时间约 400 h。根据 Arrhenius 模型[4]

$$\Delta P / P = \Delta_0 \exp(E_a / kT) \tag{3}$$

式(3)可化为

$$\ln \frac{\Delta P}{P} = \ln \Delta_0 + \frac{E_a}{kT} \tag{4}$$

将式(4)看作  $y=a+bx$ ，式中： $y = \ln \frac{\Delta P}{P}$ ； $a = \ln \Delta_0$ ； $b = \frac{E_a}{k}$ ； $x = \frac{1}{T}$ ，则根据试验数据做温度

的倒数——某参数改变量（本试验选取  $I_{dss}$ ， $R_{on}$  等），即  $\frac{1}{T} - \frac{\ln \Delta P}{P}$  关系。拟合后，斜率  $b$  可直接读出，乘以  $k$  可得激活能。本文估算出  $E_a=1.4$  eV，再由  $MTTF(T_0) = MTTF(T_1) \times \exp[E_a(T_1 - T_0) / kT_1T_0]$  由试验得到某一高温时器件的  $MTTF(T_1)$ ，进而可得到样品在 125 ℃时的寿命大于 107 h。这个结果和常应力测试结果相吻合。

2.3 序进应力加速寿命试验

序加试验的加速效率是最高的，但是由于其统计分析非常复杂且试验设备较昂贵，限制了其应用。这方面的报道也较少。北京工业大学李志国教授报道了微电子器件多失效机理可靠性寿命外推模型[5]，他的学生李杰等人报道了快速确定微电子器件失效激活能及寿命试验的新方法 [6]。试验中对器件施加按一定速率  $\beta$  上升的斜坡温度，保持电流密度  $j$  和电压  $V$  不变。做  $\ln(T - 2\Delta P/P_0)$  与  $1/T$  曲线，找出曲线的线性段，并经线性拟合得到一直线，设直线的斜率为  $S$ ，则器件的失效激活能  $E=-kS$ 。得出激活能  $E$  后，就可以外推某一使用条件下的元器件寿命

$$\tau = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) dt}{\exp\left(\frac{-E}{kT_{j0}}\right)} \tag{5}$$

李志国老师和他的学生采用上面方法对 pnp 3CG120C 双极型晶体管做了序加试验。初始温度  $T$  为 443 K，升温速率  $\beta = 1 \text{ K/8 h}$ ， $t$  时刻的结温为  $T = T_0 + \beta t + \Delta T$ 。电应力： $V_{CE} = -27 \text{ V}$ ， $I_C = 18.5 \text{ mA}$ ；测试条件： $V_{CE} = -10 \text{ V}$ ， $I_C = 30 \text{ mA}$ ，室温下测量；失效判据： $h_{FE}$  的漂移量  $\Delta h_{FE}/h_{FE} \geq \pm 20\%$ 。372 #样品的试验数据如图 2 所示。

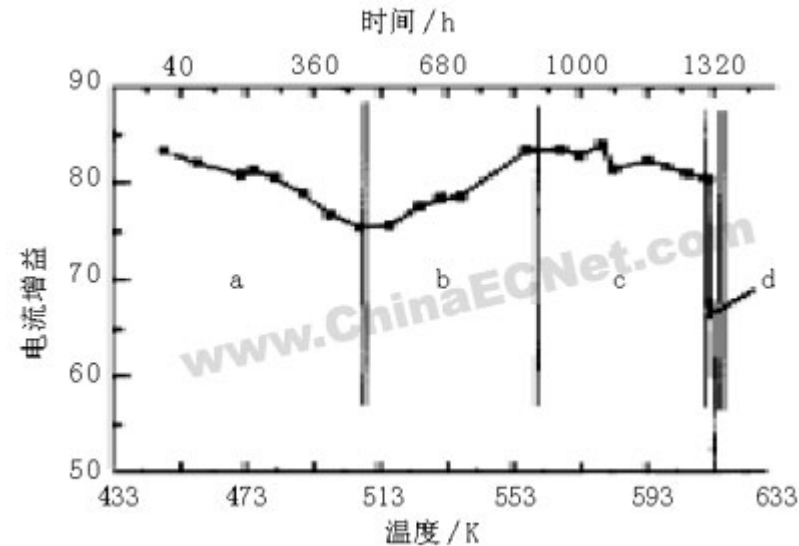


图2 372# 样品  $h_{FE}$  的试验值与温度和时间关系

鉴于图 2 中曲线段 a 最接近使用温度，能最好地反映正常工作条件下的失效机理，所以选择 a 段数据用 Excel 软件做出  $\ln(T - 2\Delta h_{FE}/h_{FE})$  与  $1/T$  曲线，并做线性拟合得到一直线，其斜率为  $S$ ，则器件的失效激活能  $E = -kS = 0.7 \text{ eV}$ 。由图 2 a 段外推出样品的  $h_{FE}$  退化 20% 所需的试验时间如图 3 所示。根据 GJB/Z299C-200x 表 5.1.1-5c 可计算出，样品正常使用时的结温为  $60^\circ\text{C}$  左右。

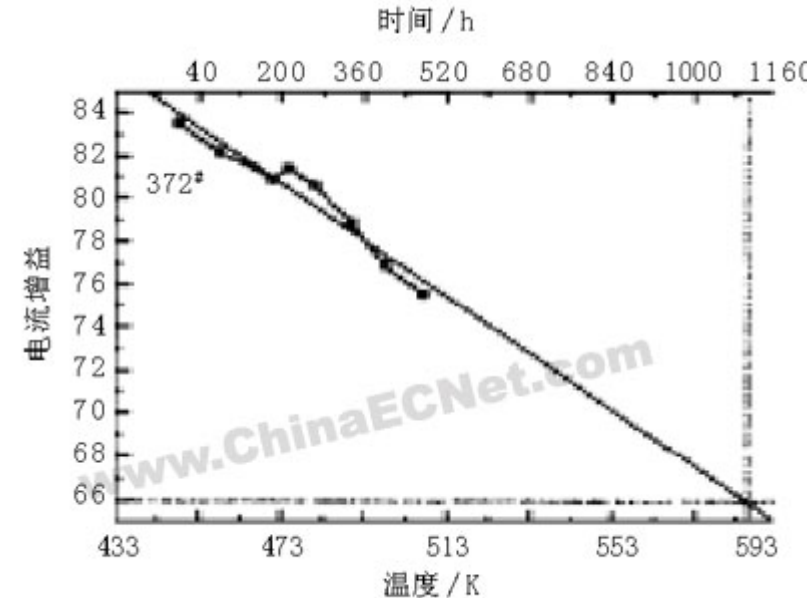


图3 372# 样品寿命外推结果

式(5)经数学处理可变为

$$\tau = \frac{\frac{1}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) dT}{\exp\left(\frac{-E}{kT_{j0}}\right)} = \frac{\frac{1}{\beta} T^2 \exp\left(\frac{-E}{kT}\right)}{\exp\left(\frac{-E}{kT_{j0}}\right)}$$

代入  $T=585 \text{ K}$ , 求得  $\tau_{372\#}=1.2 \times 10^7 \text{ h}$ , 这个结果与经验数据  $1.92 \times 10^7 \text{ h}$  是可以比拟的。

### 3 试验方法的比较

#### 3.1 加速寿命试验的实施

恒加试验一般需要约 1000 h, 总共要取上百个样品, 要求应力水平数不少于 3 个。每个应力下的样品数不少于 10 个, 特殊产品不少于 5 只。每一应力下的样品数可相等或不等, 高应力可以多安排一些样品。步加试验只需 1 组样品, 最好至少安排 4 个等级的应力, 每级应力的失效数不少于 3 个, 这样才能保证数据分析的合理性。另外, James A. McLinn 提出了在步加试验中具体操作的一些有价值的建议 [7]。例如试验应力的起始点选在元器件正常工作的上限附近, 应力最高点的选择应参考之前的试验经验或是已知的元器件失效模式来设定, 将应力起始点到最高点之间分成 3~6 段; 试验前需确定应力步长的最小和最大值。序加试验的样品数尚无明确的规定。步加、序加试验只需几百小时, 取几十个样品甚至更少且只需一组样品就可以完成试验。目前应用最广的是恒加试验, 但其试验时间相对较长, 样品数相对多一些。相比之下, 步加、序加试验在这方面要占优势。当样品很昂贵、数量有限或只有一个加热装置时, 步加、序加试验无疑是最好的选择。

#### 3.2 加速寿命试验的应用

恒加试验已经成熟地应用于包括航空、机械、电子等多个领域。步加试验往往作为恒定应力加速寿命试验的预备试验, 用于确定器件承受应力的极大值。如金玲[8] 在 GaAs 红外发光二极管加速寿命试验中, 用步加试验确定器件所能承受的最高温度, 而后再进行恒加试验, 避免了在恒加试验中出现正常使用时不会出现的失效机理。步加试验也可应用于缩短试验时间。已经有将恒加试验结合步加试验以缩短试验时间的做法[9]。序加试验的优点是时间短, 但其精度不高, 而且实施序加试验需要有提供符合要求应力以及实时记录样品失效的设备。例如冷时铭等人在固体钽电容加速寿命试验中采用自行研制的 JJ-1 渐近电压发生器控制直流稳压电源提供序进电压, 电容测量和漏电流测量分别采用 HP 公司的 4274A 和 414 型漏电流测量仪, 失效时间用可靠性数据采集系统记录。又如, 北京工业大学李志国教授等人在做高频小功率晶体管序加试验中也搭建了一套完整的试验系统, 系统由控温仪、热电偶、样品加热平台组成温度应力控制系统; 由偏置电源、万用表、加载电路板组成电应力偏置系统; 测试采用 Agilent 4155C 半导体参数测试仪和 QT16 晶体管特性图示仪完成。

### 4 结语

当今, 电子产品的更新速度越来越快, 而既快速又准确的加速寿命测试方法是研究人员热切期望。相信这一愿望定会早日实现。