

# 电子器件劣化的物理特性分析\*

林建斌 林来金

(华侨大学电气技术系, 泉州 362011)

**摘要** 从理化角度讨论电子器件产生劣化与故障的原因和后果, 提出防止或减少电子器件劣化的设施, 促使电子器件按规范要求正常运行, 有效地发挥其固有功能并延长使用寿命。

**关键词** 电子器件, 半导体器件, 隧道效应

**分类号** TN 601

供电系统或仪器仪表, 无论它们多庞大、多复杂, 归根结底都是由各种最基本的单元即各种电子元件, 按规范设计的电子线路所要求的指标组装成整机的。电子元件诸如电阻、电容、电感元件、晶体二极管、晶体三极管、铁电元件、铁磁元件, 以及大规模集成块等等。这些电子元件的性能参数指标及功能各具特色。但是, 它们也有共同点——都应满足器件总体设计指标规范的要求而正常运行, 能耐一定外部环境条件变异的冲击。例如, 当发生温度、湿度或外电压等超规范指标的变异时, 器件仍能保证正常运行。

为防止或减少劣化或故障损坏, 并为安全、稳定、可靠地正常运行, 必须延长器件设备的正常使用寿命。为此, 往往采取诸如精心选材、精心设计、精制工艺等措施, 同时, 做好外围封装以防杂质和有害气体侵入等优化处理。但是不管仪器设备多精致、多优良, 随着器件材料内在的分子运动、各种物理和化学效应的影响、环境条件的变异和时间的推移, 总会产生这种那种的特性向低落方向发展。在正常规范中运行的仪器设备的使用寿命存在一定的极限, 但若使用、维护得当则可延长使用寿命; 反之, 将导致其加速变异或老化而缩短使用寿命。这一点说明了电子器件产生劣化的基本规律<sup>[1]</sup>。

## 1 电子器件劣化的基本特征

所谓劣化是指电子器件在正常规范使用或长期放置在自然环境中, 其性能趋于单方向、不可逆的低落蠕变的特征, 正如人的寿命一样产生渐变性的老化现象, 称之为劣化。劣化的标准以寿命来衡量, 它包括特征性(正常规范)寿命和破坏性(超规范)寿命这两种形式。但归纳起来不外是有内因和外因的共同作用, 促使电子器件产生种种劣化的现象。这两种因素往往是互相制约、互相渗透的, 其中重复发生的现象也不少, 如图1所示。由图可见, 电子器件劣化的情况能早期察觉和检查的, 可采取一定的措施加以预防和控制; 但在漫长的使用岁月里才能察觉和

\* 本文 1997-03-13 收到

检测的变异,则需要使用一定精度的仪器设备和高科技的检测设施.同时,通过较复杂、繁琐的多因素综合检测手段,间接地以模拟或推理的形式进行判断.消除存在劣化的隐患,并提醒器件使用者按规范的要求,关注器件劣化的趋势.

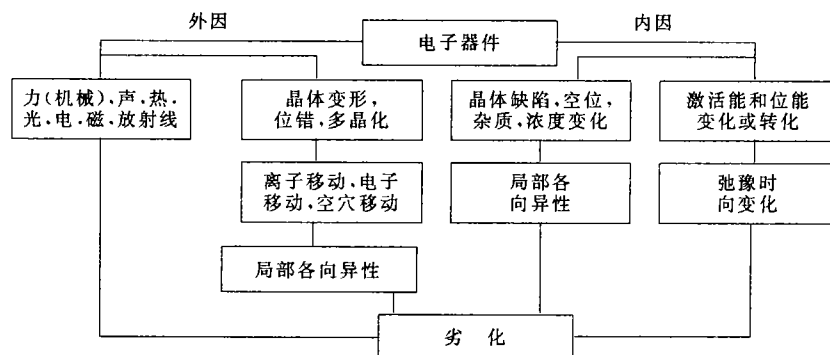


图1 电子器件劣化示意图

## 2 电子器件劣化的表现形式

电子器件产生劣化现象,既复杂又多变,因此往往暴发种种意想不到的故障.通常出现的故障可归结为突发性(硬性)、扰乱性和潜伏性等三种类型.

### 2.1 突发性故障

指那些瞬间发生的仪器仪表设备的关闭,或妨碍其使用而产生的严重故障.这种故障,可从某一开关或断路的无源元件到一个集成电路中的一个元件,受到超规范的冲击而损坏.这种明显的故障往往导致一系列仪器设备(大部分)的损坏或烧毁.

### 2.2 扰乱性故障

指那些带有断续性的,需要采取维修设施,但有时也可自恢复工作的轻微故障.这种故障不存在永久性损坏,然而其后果也是灾难性的.例如,1987年 Atlas Gentaor 发射运载火箭在升空 48 s 后爆炸了,其原因是导航的控制微处理器丢失了部分存储内容,致使火箭偏离航线,飞行指导员不得不被迫引爆了火箭及其上的负载.

### 2.3 潜伏性故障

通常指正在运行中的损伤.这些注定要损坏的元件,是与那些不足以导致元件立即损坏的初始过压或超规范运行相联系的.但是,它要在数月或数年渐变劣化过程才会变得明显.假设此类故障发生在微电子器件领域,即发生在 MOS 集成或大规模集成电路中,由于它潜伏于 MOS 门内,氧化物某单元的短路是断断续续的.因此,需用扫描电子显微镜等高精尖的仪表仪器设备,才能检查、处理这种隐患<sup>[3]</sup>.

为了达到防患于未然,以免造成损失,必须在仪器设备的运行中避免或消除不应有的故障.首先,在器件设计、定型和工艺生产上尽量反复考核试验,严格控制或消除产生劣化的不利因素,制定最佳的工艺规范,以达优质稳产的要求.其次,在器件使用上既要发挥其固有特性的优势,又要严格遵守规范,控制最优化的运行条件,防止或减少不应有的劣化现象,安全、可靠地使用器件,延长其使用寿命.

### 3 电子器件的优化设施

为使电子器件安全、稳定和可靠地维持正常的使用寿命,防止或减少劣化,除对器件精心设计、定型等试制实验外,投产前尚需进行详细、精确和全面的例行实验.实验的条件要严格、苛刻,要配备高精度检测的仪表仪器——扫描电子显微镜、光谱仪、X 光衍射仪、可编程电子计算机、金相显微镜、微电子综合测试仪、真空高温炉,以及外围防射线屏蔽装置和调温调湿等现代净化或超净化实验设施.对电子器件进行综合性的实验,诸如开创式破坏性地对器件原材料的组分进行化学分解、分离和合成分析其纯度和杂质含量,并做好参数记录.对研制出来的各批试品,实际在线地检测其各种状态的参数,但这种检测手段必须是无创式不破坏性的、多项目和综合性的.经多方面筛选,最后确定稳定性和可靠性最佳的工艺规范参数,并与部颁等有关规范指标相比较.在全面权衡利弊后,制定详细的实验报告,提出该器件是否具有开发和推广应用的价值.同时,提出该器件原设计方案和工艺条件等不足之处及改进途径等建设性意见.这些实验工作是相当细致的,它是考核电子器件是否达到优质稳产的必经之道,也为电子器件办理注册、领取许可证和制定器件使用说明书提供依据.具体实验项目及参数记录格式如附表所示,其中  $t$  为温度,  $c$  为湿度,  $E$  为电压,  $a$  为加速度,  $f$  为振动频率,  $H$  为硬度.

附表 电子器件例行实验表

项目	$N_{n \cdot m}$	信号输入				信号输出			
		幅度	宽度	上升沿	下降沿	幅度	宽度	上升沿	下降沿
$t$	$\bar{t}_{1 \cdot m}$	$\bar{V}_{1 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{1 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{1 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{1 \cdot m}$	$\bar{U}_{1 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{1 \cdot m}$	$\bar{k}_{1 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{1 \cdot m}$
	$\bar{t}_{2 \cdot m}$	$\bar{V}_{2 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{2 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{2 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{2 \cdot m}$	$\bar{U}_{2 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{2 \cdot m}$	$\bar{k}_{2 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{2 \cdot m}$
	$\bar{t}_{3 \cdot m}$	$\bar{V}_{3 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{3 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{3 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{3 \cdot m}$	$\bar{U}_{3 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{3 \cdot m}$	$\bar{k}_{3 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{3 \cdot m}$
$C$	$\bar{C}_{1 \cdot m}$	$\bar{V}_{4 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{4 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{4 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{4 \cdot m}$	$\bar{U}_{4 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{4 \cdot m}$	$\bar{k}_{4 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{4 \cdot m}$
	$\bar{C}_{2 \cdot m}$	$\bar{V}_{5 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{5 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{5 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{5 \cdot m}$	$\bar{U}_{5 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{5 \cdot m}$	$\bar{k}_{5 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{5 \cdot m}$
	$\bar{C}_{3 \cdot m}$	$\bar{V}_{6 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{6 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{6 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{6 \cdot m}$	$\bar{U}_{6 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{6 \cdot m}$	$\bar{k}_{6 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{6 \cdot m}$
$a$	$\bar{a}_{1 \cdot m}$	$\bar{V}_{7 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{7 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{7 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{7 \cdot m}$	$\bar{U}_{7 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{7 \cdot m}$	$\bar{k}_{7 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{7 \cdot m}$
	$\bar{a}_{2 \cdot m}$	$\bar{V}_{8 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{8 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{8 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{8 \cdot m}$	$\bar{U}_{8 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{8 \cdot m}$	$\bar{k}_{8 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{8 \cdot m}$
	$\bar{a}_{3 \cdot m}$	$\bar{V}_{9 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{9 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{9 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{9 \cdot m}$	$\bar{U}_{9 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{9 \cdot m}$	$\bar{k}_{9 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{9 \cdot m}$
$E$	$\bar{E}_{1 \cdot m}$	$\bar{V}_{10 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{10 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{10 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{10 \cdot m}$	$\bar{U}_{10 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{10 \cdot m}$	$\bar{k}_{10 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{10 \cdot m}$
	$\bar{E}_{2 \cdot m}$	$\bar{V}_{11 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{11 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{11 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{11 \cdot m}$	$\bar{U}_{11 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{11 \cdot m}$	$\bar{k}_{11 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{11 \cdot m}$
	$\bar{E}_{3 \cdot m}$	$\bar{V}_{12 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{12 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{12 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{12 \cdot m}$	$\bar{U}_{12 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{12 \cdot m}$	$\bar{k}_{12 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{12 \cdot m}$
$f$	$\bar{f}_{1 \cdot m}$	$\bar{V}_{13 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{13 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{13 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{13 \cdot m}$	$\bar{U}_{13 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{13 \cdot m}$	$\bar{k}_{13 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{13 \cdot m}$
	$\bar{f}_{2 \cdot m}$	$\bar{V}_{14 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{14 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{14 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{14 \cdot m}$	$\bar{U}_{14 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{14 \cdot m}$	$\bar{k}_{14 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{14 \cdot m}$
	$\bar{f}_{3 \cdot m}$	$\bar{V}_{15 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{15 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{15 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{15 \cdot m}$	$\bar{U}_{15 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{15 \cdot m}$	$\bar{k}_{15 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{15 \cdot m}$
$H$	$\bar{H}_{1 \cdot m}$	$\bar{V}_{16 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{16 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{16 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{16 \cdot m}$	$\bar{U}_{16 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{16 \cdot m}$	$\bar{k}_{16 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{16 \cdot m}$
	$\bar{H}_{2 \cdot m}$	$\bar{V}_{17 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{17 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{17 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{17 \cdot m}$	$\bar{U}_{17 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{17 \cdot m}$	$\bar{k}_{17 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{17 \cdot m}$
	$\bar{H}_{3 \cdot m}$	$\bar{V}_{18 \cdot m}$	$\bar{\tau}_{18 \cdot m}$	$\bar{\Delta}_{18 \cdot m}$	$\bar{\delta}_{18 \cdot m}$	$\bar{U}_{18 \cdot m}$	$\bar{\lambda}_{18 \cdot m}$	$\bar{k}_{18 \cdot m}$	$\bar{\theta}_{18 \cdot m}$

- (1) 附表中各参数如  $N_{n \cdot m}$  的下标,其  $n$  代表实验条件,  $m$  代表实验次数;  $t_{1 \cdot m}$  为温度最高临界状态实验  $m$  次平均值,  $t_{2 \cdot m}$  为温度最佳状态实验  $m$  次平均值,  $t_{3 \cdot m}$  为最低临界状态实验  $m$  次平均值. 其余各参数类推.
- (2) 实验记录的各参数,再取其平均值作为该器件性能检测的规范值. 例如,温度单项规

范值为  $\bar{t} = \frac{(\bar{t}_{1 \cdot m} + \bar{t}_{2 \cdot m} + \bar{t}_{3 \cdot m})}{3}$ , 因此又有

$$\begin{aligned} \text{信号输入} \left\{ \begin{aligned} \bar{V} &= \frac{(\bar{V}_{1 \cdot m} + \bar{V}_{2 \cdot m} + \bar{V}_{3 \cdot m})}{3}, \\ \bar{\tau} &= \frac{(\bar{\tau}_{1 \cdot m} + \bar{\tau}_{2 \cdot m} + \bar{\tau}_{3 \cdot m})}{3}, \\ \bar{\Delta} &= \frac{(\bar{\Delta}_{1 \cdot m} + \bar{\Delta}_{2 \cdot m} + \bar{\Delta}_{3 \cdot m})}{3}, \\ \bar{\delta} &= \frac{(\bar{\delta}_{1 \cdot m} + \bar{\delta}_{2 \cdot m} + \bar{\delta}_{3 \cdot m})}{3}, \end{aligned} \right. \quad \text{信号输出} \left\{ \begin{aligned} \bar{U} &= \frac{(\bar{U}_{1 \cdot m} + \bar{U}_{2 \cdot m} + \bar{U}_{3 \cdot m})}{3}, \\ \bar{\lambda} &= \frac{(\bar{\lambda}_{1 \cdot m} + \bar{\lambda}_{2 \cdot m} + \bar{\lambda}_{3 \cdot m})}{3}, \\ \bar{k} &= \frac{(\bar{k}_{1 \cdot m} + \bar{k}_{2 \cdot m} + \bar{k}_{3 \cdot m})}{3}, \\ \bar{\theta} &= \frac{(\bar{\theta}_{1 \cdot m} + \bar{\theta}_{2 \cdot m} + \bar{\theta}_{3 \cdot m})}{3}, \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

其它各项所记录的参数可按同样的计算方法确定其运行的规范值. 上述各规范值是按各单项变异所对应的理想处理值, 实际上仪器仪表在运行中无时无刻都经受两项或更多项环境条件的共同作用, 因此需要在此基础上通过多次反复实验再作适当的修正.

(3) 老化实验是考核电子器件是否安全、可靠并使其性能达到稳定的最直接的手段. 它通常是在超规范条件下进行的, 且应选取其超临界极端的最坏环境条件. 例如, 分别在超高湿、超高温和超高压条件的长时间或共同作用下, 检测随时变化的参数, 以考核电子器件的正常运行与否. 最后, 筛选出参数最佳的环境条件, 并预测电子器件在正常规范中进行的使用寿命.

有关元件在投产前进行质量考核的例行实验, 可参照仪器仪表整机实验的模式, 同样按制定附表所示的形式进行. 但是, 须将原来代表各种不同元件实验次数, 改为代表同一品种元件的个数, 类似附表进行批量的各项实验. 这里, 需模拟整机试验的检测仪表来记录试验参数. 这种例行实验, 除考核各项规范指标外, 还要统计元件参数的分布状况, 评估元件生产的合格率. 筛选上、中、下三种类型的元件, 进行开创式的微观织构实验. 利用扫描电子显微镜、X 光衍射仪、光谱分析仪、金相显微镜和可编程电子计算机等高精度设备手段进行检测. 检测电子器件内在微观织构的成分、纯度、杂质含量、单晶、多晶、非晶等分布的均匀度、晶粒大小、位错、缺陷和空位等微观织构的状态, 并与宏观检测的电子性能相比较. 通过复杂的综合换算, 分析判断有关材料的配方配比、工艺可行性等详细实验报告. 总之, 经过对器件性能的全面考核实验, 制定最优化的运行规范, 这是保证器件安全、可靠、合理的使用及延长寿命, 防止或减少劣化的积极举措.

## 4 电子器件的特性分析

从电子器件微观织构的角度, 研究其内部原子、分子团构成单晶、多晶、非晶(或单畴体)等多种状态. 因此, 致其晶粒与晶粒之间的界面层(或畴与畴之间的界面层)内存在载流子分布不均匀, 具有一定的梯度等多种形式的微观状态. 它们在宏观上所反应的等效电路的固有特性, 如图 2 所示. 图中  $R_s$  表示晶粒的表面电阻, 一般较小;  $R_p$  表示晶界层的电阻(或体电阻);  $C_p$  表示晶界层的电容;  $R_L$  表示外部负载电阻. 这表明载流子无时无刻处于互相抗衡的运动中, 即运动是绝对的, 平衡是相对的. 由于器件对环境温湿度响应最灵敏, 比如选取

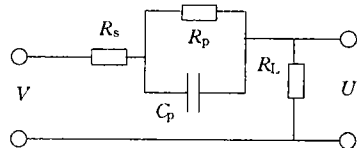


图2 电子器件微观织构的等效电路

$t_{\text{高临}}$ ,  $t_{\text{最佳}}$ ,  $t_{\text{低临}}$  三个不同的测温点, 因此反应器件内部载流子运动的有序性也有三种不同的状态. 通过外部仪表检测的宏观参数也有三个不同的对应值, 如图 3 所示.

从图中反应出器件表征输入输出的波形失真度, 随外界环境状态而变异, 可归结为内部微观载流子输运效率的变异. 这是因为器件内部各晶界层或畴界层内载流子分布不均匀, 导致局部复合与再生时要消耗能量; 参与导电的载流子必须克服势垒做功, 或由于场效应要克服内电场做功, 隧道效应使参与输运的载流子也要消耗能量. 在器件与外界供电系统接触的界面同样也存在不同高度的势垒, 载流子通过时也要消耗一定的能量(界面欧姆接触电阻). 因此, 输出信号波形的失真, 恰是器件内部必须消耗各种能量的结果. 纠正波形失真可采取两种优化设施. 首先, 从器件本身内在织构和载流子分布不均匀等方面, 选取新材料. 有针对性地调整配方配比, 并采用新工艺措施, 促使载流分布趋向均匀化和减小梯度等优化质量来补偿失真度. 其次, 从仪器整机线路的总体设计上, 考虑增加多级放大、削波和整流等手段进行外部宏观整形以补偿波形的失真度; 或者从器件内部和外部设施的协调更正, 优化器件的失真度<sup>[2]</sup>达到安全、可靠运行, 防止或减少劣化.

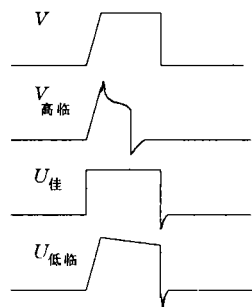


图3 电子器件信号输入输出波形对应图

## 参 考 文 献

- 1 福克贝利 L M 著. 电子系统故障查找手册. 张 伦等译. 北京: 科学出版社, 1990. 157~179
- 2 黄正中. 电路畴域分析. 北京: 人民教育出版社, 1981. 1~46
- 3 中国计量科学研究院无线电处, 国防科工委第二计量测试研究中心, 电子工业部计量测试研究中心站编. 无线电基本参量. 北京: 中国计量出版社, 1987. 146~197

## Degradation of Electronic Device as Shown by the Analysis of Its Physical Character

Lin Jianbin      Lin Laijin

(Dept. of Electric Technique, Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** The causality of the degradation of electronic device is discussed from the angle of physical characteristic analysis. Countering various faults arising from degradation and their serious consequences, the authors put forward some facilities to prevent and reduce them. By these facilities, the electronic device will operate normally in accordance with the standard and it will exercise its inherent function even more effectively and its length of life will be prolonged.

**Keywords** electronic device, semiconductor device, degradation