

晶体管非工作期失效率预计

杨家骥

(中国电子产品可靠性与环境试验研究所 广州 510610)

翁寿松

(无锡市无线电元件四厂 无锡 214031)

摘要 本文根据晶体管非工作期可靠性统计数据建立了我国晶体管非工作期失效率预计模型,经验证,预计失效率与现场失效率相吻合。通过预计模型可预计晶体管在各类环境下的非工作期失效率,尤其给出了我国晶体管普通库房贮存失效率和贮存有效期。

EEACC: 2560R, 2560S, 0290B, 0170N

1 模型

失效率是表征半导体器件可靠性的重要指标之一。非工作期通常指贮存或休眠,尤其是军事电子装备上的晶体管处于非工作状态的时间往往比工作期长很多,因而,研究非工作期诸因素对晶体管可靠性的影响是全面研究电子设备或系统寿命周期可靠性的重要环节。关于“军用电子元器件和电子设备非工作可靠性预计”的研究课题已于1993年底通过电子部鉴定^[1]。

影响晶体管工作期可靠性的主要因素是电应力。但是,影响晶体管非工作期可靠性的主要因素不是电应力,而是环境应力,因为非工作状态下往往长期不施加电应力或仅施加低水准的电应力。经大量试验及失效分析,其环境应力包括:

1) **温度应力** 暴露在日照下的电子设备,测得其表面温度高于75℃,每天的温度循环幅度大于50℃。高温会加速晶体管退化的物理-化学反应,还会加速材料的老化,如离子迁移、杂质扩散、金属间化合物合成、绝缘材料中分子变化、蠕变、结晶变化及微观结构重新排列等。降低温度有利于晶体管失效率的降低,但是,过份降低温度会导致晶体管某些性能的退化,如 H_{FE} 下降等。低温还会引起材料的收缩和断裂。高低温的循环变化,比恒定高温或低温对可靠性的影响更大,如在晶体管材料、互连之间引起不同的膨胀与收缩,从而诱发不同的位移和形变。

2) **湿度应力** 非工作状态由于缺乏自热作用,非工作期高湿度比工作期高湿度更危险。在高温高湿或有温度周期性变化的适中湿度条件下,会逐渐增加密封不完善晶体管的内部湿度。一旦温度骤降,晶体管芯片表面就会凝结水珠,造成劣化反应,如对铝金属

会产生呈疏松状的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 白色絮状物, 即俗称长“白毛”。水汽还可能产生金属腐蚀坑、半导体表面反型、各类金属触须、键合退化、各种迁移过程、管脚易焊性变差甚至锈断。

3) 机械应力 非工作状态机械应力主要来自振动、冲击和热-机械互作用, 其中机械共振影响最大。机械应力会使晶体管结构失常、键合、连接部位失效等。热-机械互作用会使晶体管材料、互连之间引起不同膨胀, 诱发热扩散、机械形变和位移。

4) 化学应力 在晶体管中潜在着化学物性相互作用所产生的化学应力, 这些互作用包括固体冶金过程及其污染物的化学反应, 造成晶体管退化, 退化速度取决于温度及诸多的冶金因素, 如微裂纹、晶粒大小、位错密度和杂质等。化学反应主要来源于: (1) 结构中密度梯度, (2) 制造过程的残留化学药品, (3) 材料释放出来的气体, (4) 污染物, (5) 密封缺陷漏进的环境气体, (6) 材料中原电池电势, (7) 残留应力、振动、热冲击或循环引起的应力腐蚀和腐蚀疲劳效应。

5) 设备电源通-断循环 长期休眠的设备往往要进行周期性通电和检测, 如处于待命的导弹每周要通电检测 1—2 次。定期通电检测是提高设备战略可靠性的重要措施, 但也影响设备中电子元器件的性能与可靠性。

影响晶体管非工作期可靠性的主要因素除环境应力外, 还有晶体管固有质量、可靠性水平和晶体管复杂程度、特性。前者取决于晶体管设计、制造技术及生产、检验、筛选过程中的质量控制水准, 即取决于晶体管标准及技术条件, 它们成为划分晶体管质量等级的主要依据, 不同质量等级对晶体管非工作失效率的影响程度由质量系数 Π_{NQ} 表示。后者取决于晶体管型号规格及性能额定值。

根据我国晶体管非工作期失效率数据(数据量达 6.315×10^9 器件小时以上), 分析影响非工作期失效率的各种因素(变量), 按图 1 所示的程序^[2] 建立晶体管非工作期失效率与各种变量之间的统计关系-晶体管非工作期失效率预计模型。

所建立的晶体管非工作期失效率预计模型如下:

$$\lambda_{\text{NP}} = \lambda_{\text{Nb}} \Pi_{\text{NE}} \Pi_{\text{NQ}} \Pi_{\text{NT}} \Pi_{\text{NR}} \Pi_{\text{cyc}}$$

式中:

λ_{NP} 为晶体管非工作期失效率。

λ_{Nb} 为晶体管非工作期基本失效率, 它与晶体管种类有关, 由表 1 所示。

Π_{NE} 为环境系数, 由表 2 所示, 其中 G_{B} 为地面良好, G_{Ms} 为导弹发射井, G_{F1} 为一般地面固定, G_{F2} 为恶劣地面固定, G_{M1} 为平稳地面移动, G_{M2} 为剧烈地面移动, M_{P} 为背负, N_{SB} 为潜艇, N_{S1} 为舰船良好舱内, N_{S2} 为舰船普通舱内, N_{U} 为舰船舱外, A_1 为飞机座舱, A_{U} 为飞机无人舱, S_{F} 为宇宙飞行, M_{L} 为导弹发射。

Π_{NQ} 为质量系数, 由表 3 所示, 表 3 中省略 A_1 、 A_2 质量等级, 因目前国内尚未有这类质量等级的产品。

Π_{NT} 为温度系数, $\Pi_{\text{NT}} = \exp \left[-A_{\text{t}} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) + \left(\frac{T}{T_{\text{M}}} \right)^P \right]$, 其中 A_{t} 为失效激活

能参数, T 为环境温度(K), $T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273$, T_{M} 为额定温度(K), P 为形状参数, A_{t} 、 T_{M} 和 P 值由表 4 所示, Π_{NT} 由表 5 所示, 表 4 及以后表中的 FET 为硅场效应管。

Π_{NR} 为晶体管额定值系数, 双极型晶体管的 Π_{NR} 由表 6 所示.

Π_{cyc} 为设备电源通-断循环系数, $\Pi_{cyc} = 1 + 0.05N_c$, 其中 N_c 为设备电源通-断循环率(次/千小时).

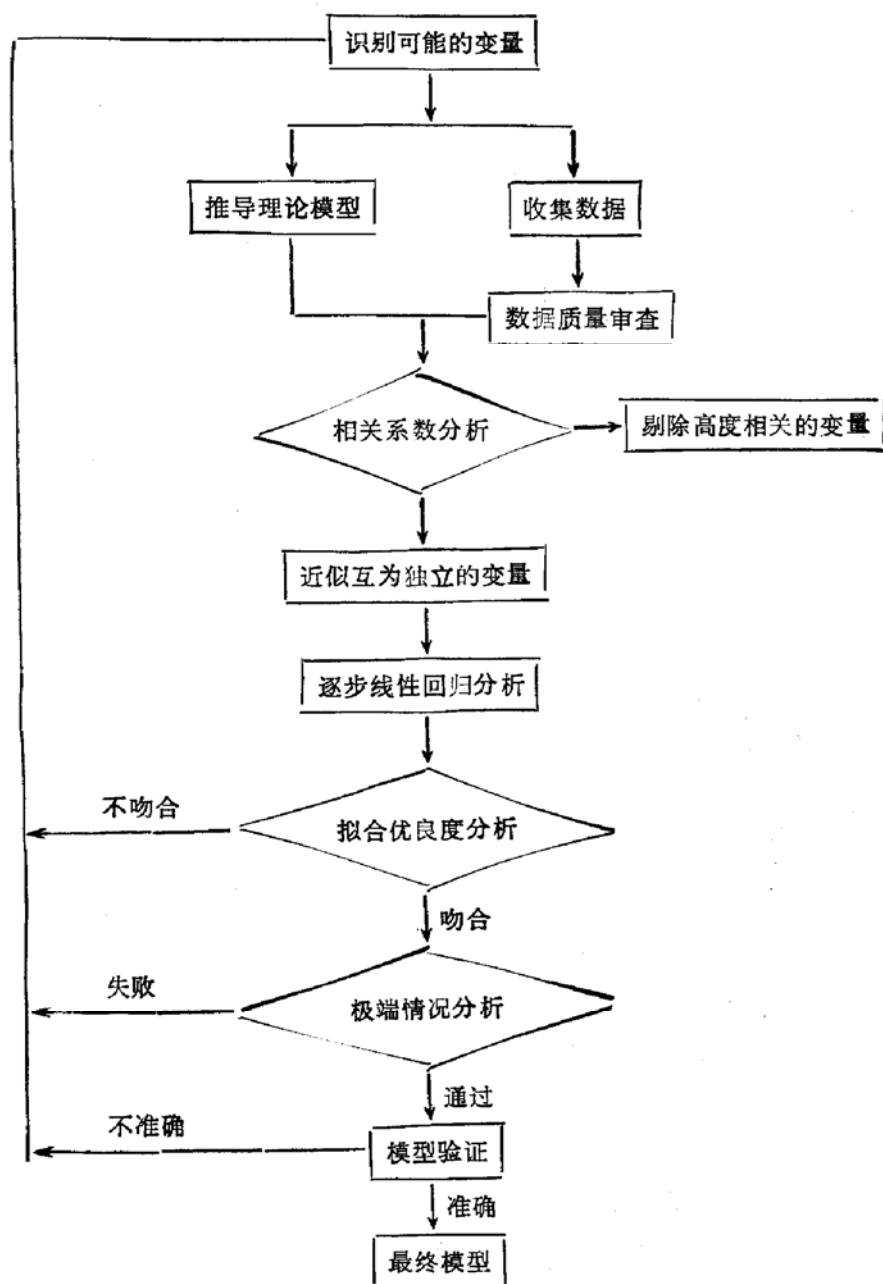


图 1 建立模型的流程图

表 1 晶体管非工作期基本效率 λ_{Nb}

分 类	$\lambda_{Nb}(10^{-6}/h)$	分 类	$\lambda_{Nb}(10^{-6}/h)$
Si NPN	0.010	GaAs FET	0.051
Si PNP	0.012	单结晶体管	0.048
Ge PNP	0.018	半导体闸流管	0.053
Ge NPN	0.022	微波晶体管	0.070
Si FET	0.015		

表 2 环境系数 Π_{NE}

环境类别	G_B	G_{MS}	G_{F1}	G_{F2}	G_{M1}	G_{M2}	M_P	N_{SB}
Π_{NE}	1	1.2	1.8	5.9	5.5	12	7.5	4.5
环境类别	N_{S1}	N_{S2}	N_U	A_1	A_U	S_P	M_L	
Π_{NE}	3	7	14	15	24	1	28	

表 3 晶体管质量等级与质量系数 Π_{NQ}

质量等级	质量要求说明	质量要求补充说明	Π_{NQ}
A	A ₃ 执行 GJB 33-85《半导体分立器件总规范》,并经军用电子元器件质量认证合格的 GP 级产品	按 QZJ 840611A “さま”技术条件组织生产的产品	0.20
	A ₄ 执行 GB 4936.1-85《半导体分立器件总规范》,并经中国电子元器件质量认证委员会认证合格的 II 类产品;执行 GB4936.1-85 III 类的产品	按 QZJ 840611 “さま”技术条件组织生产的产品	0.35
B	B ₁ 执行 GB 4936.1-85 的 II 类产品;按军用标准筛选要求进行筛选的 B ₂ 质量等级的产品	按“7905”さま质量控制技术协议组织生产的产品	0.60
	B ₂ 执行 GB 4936.1-85 的 I 类产品;执行 SJ1833-81 的产品	按 SJ 614-73《半导体三极管总技术条件》、SJ 1101-76《半导体闸流管(可控整流器)二类总技术条件》的产品	1.0
C	低档产品		4.0

表 4 晶体管的 A_t 、 T_M 和 P 值

分 类	参 数		
	A_t	T_M	P
Si NPN	3356	448	10.5
Si PNP	3541	448	14.2
Ge PNP	4403	373	20.8
Ge NPN	4482	373	19.0
FET	3423	448	13.8
单 结	4040	448	13.8
闸 流	4311	448	9.6
微 波	4700	423	20.0

表 5 晶体管的温度系数 Π_{NT}

$T(^{\circ}\text{C})$	硅		锗		FET	单 结	闸 流	微 波
	NPN	PNP	PNP	NPN				
0	0.36	0.34	0.26	0.25	0.35	0.29	0.27	0.24
10	0.55	0.53	0.46	0.45	0.54	0.49	0.47	0.43
20	0.83	0.82	0.78	0.78	0.82	0.80	0.79	0.76
25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
30	1.22	1.22	1.29	1.31	1.21	1.26	1.30	1.30
40	1.76	1.78	2.08	2.13	1.75	1.93	2.07	2.13
50	2.47	2.53	3.30	3.42	2.46	2.89	3.20	3.41
55	2.91	3.00	4.14	4.32	2.90	3.50	3.95	4.26
60	3.41	3.54	5.19	5.47	3.40	4.23	4.85	5.29
65	3.99	4.16	6.54	6.93	3.97	5.08	5.92	6.54
70	4.66	4.86	8.28	8.83	4.63	6.07	7.21	8.04
75	5.41	5.67	10.6	11.4	5.37	7.23	8.73	9.84
80	6.27	6.59	13.7	14.8	6.22	8.58	10.5	12.0
85	7.26	7.64	18.2	19.7	7.17	10.2	12.7	14.6
90	8.38	8.83	24.9	26.9	8.26	12.0	15.2	17.7
95	9.67	10.2			9.50	14.1	18.2	21.4
100	11.1	11.7			10.9	16.5	21.8	25.8

表 6 双极型晶体管额定值系数 Π_{NR}

额定功率 (W)	普通晶体管	$P < 1$	$1 \leq P \leq 5$	$5 < P \leq 20$	$20 < P \leq 50$	$50 < P$
	微波晶体管	$P < 0.1$	$0.1 \leq P \leq 0.5$	$0.5 < P \leq 2$	$2 < P \leq 5$	$5 < P$
Π_{NR}		1	1.5	2.0	2.5	3.5

2 验证

晶体管非工作期失效率预计模型已用于中国军用电子产品可靠性信息交换网数据中心编制的《电子设备及元器件非工作可靠性预计手册》^[3], 为了检验预计模型与现场实际的吻合程度, 该《手册》经有关单位试用与验证, 表 7 汇总迄今为止晶体管部分所有的验证数据(共 1275.3×10^6 器件小时, 失效数 54 个)。从表 7 可见, 预计失效率与现场失效率相当吻合。

表 7 晶体管非工作期预计失效率与现场失效率的比较

设 备	环境	类 别	器件小时数 (10^6)	失效数	预计失效率 ($10^{-6}/h$)	现场失效率 ($10^{-6}/h$)
3ZDL 三路载波 终端机	G_{F1}	Si NPN	36.8095	1	0.0143	0.0272
		Ge PNP	31.818	0	0.0308	<0.0288
3ZDL 三路载波 终端机	G_{M1}	Ge PNP	14.2963	0	0.118	<0.064
		Si NPN	16.5389	2	0.0545	0.121
CWT 短波单边 带电台	G_{F1}	Si NPN	258.0	2	0.0109	0.0078
		Si PNP	25.5	0	0.0178	<0.036
		FET	22.5	0	0.0192	<0.041
4 型水雷控制 系统	G_{F2}	Si NPN	136.887	17	0.0639	0.124
		单 结	18.069	9	0.374	0.498
2 型水雷控制 系统	G_{F1}	Ge PNP($<1W$)	35.928	1	0.0432	0.0278
		Ge PNP($1W < P < 5W$)	17.965	1	0.0647	0.0557
		单 结	53.605	2	0.109	0.0373
鱼雷控制系统	G_{F1}	单 结	12.35	2	0.109	0.162
		Si NPN	67.93	2	0.022	0.029
		闸 流	30.88	14	0.496	0.453
弹控系统	G_{MS}	Si NPN	221.37	1	0.0042	0.0045
		Si PNP	85.21	0	0.0051	<0.0108
		Ge PNP	189.08	0	0.0077	<0.0049

3 预计应用

我们可通过晶体管非工作期失效率预计模型,预计我国晶体管的贮存可靠性水平,并可预计我国晶体管在各种环境下的非工作期失效率.对于普通库房贮存相当于 G_{F1} 环境, $\Pi_{cyc} = 1$. 按电子部部标准生产的晶体管的质量等级为 B_2 , $\Pi_{NQ} = 1$, 它们在普通库房的贮存失效率及贮存有效期(可靠度 R 为 99.9%)由表 8 给出. 贮存失效率与失效判据有关,对于库房元器件的失效判据由元器件失效标准定;对于已装在设备上的元器件的失效

表 8 我国晶体管普通库房贮存失效率和贮存有效期

分 类	贮存失效率 ($10^{-6}/h$)	贮存有效期(年)	分 类	贮存失效率 ($10^{-6}/h$)	贮存有效期(年)
Si NPN	0.018	6.3	Si FET	0.027	4.2
Si PNP	0.022	5.2	GaAs FET	0.092	1.2
Ge PNP	0.032	3.6	单 结	0.086	1.3
Ge NPN	0.040	2.9	闸 流	0.095	1.2

判据由设备故障定义定。表 8 代表了目前我国晶体管贮存可靠性的一般水平,其贮存有效期与要求的可靠度、贮存环境及防护措施有关。

4 结论

建立在广泛的可靠性统计数据基础上的晶体管非工作期失效率预计模型,客观地反映了影响晶体管非工作期可靠性的内在因素和外在因素,因此,预计失效率与现场失效率吻合颇佳。根据晶体管非工作期失效率预计模型,可预计晶体管在各类环境下的非工作期失效率,并给出我国晶体管普通库房贮存失效率和贮存有效期。晶体管非工作期失效率预计模型的建立对我国电子设备、系统的非工作期可靠性预计;冷贮备、温贮备设计;贮存有效期;待用状态检测、维修周期的判定;电子设备使用期间需要的备件数及维修工作量等方面提供了科学依据,对降低电子设备寿命周期费用和提高电子设备战备完好性具有重大的军事价值和经济效益。

参 考 文 献

- [1] 杨家铿等,军用电子元器件和电子设备非工作可靠性预计研究,北京: 1993.12.
- [2] 杨家铿等,北京工业大学学报, 1992, 18(1): 35.
- [3] 中国军用电子产品可靠性信息交换网数据中心 «电子设备及元器件非工作可靠性预计手册»,华飞科技出版印刷公司,1993.

Nonoperating Failure Rate Prediction for Transistors

Yang Jiakeng

(China Electronic Product Reliability & Environmental Testing Research
Institute, Guangzhou 510610)

Weng Shousong

(Wuxi No. 4 Radio Component Factory, Wuxi 214031)

Abstract In this paper, a prediction model of the non-operating failure rate for home-made transistors is established on the basis of statistic data of non-operating reliability for transistors. The predicted failure rate is verified to be in agreement with the site failure rate. By using the prediction model, the non-operating failure rate for transistors under various circumstances, especially the failure rate and term of validity for home-made transistors stored in normal warehouses can be predicted.

EEACC: 2560R, 2560S, 0290B, 0170N