

非工作期微电路的可靠性预计模型研究

莫郁薇

(电子工业部第五研究所 广州 510610)

摘要 通过分析影响非工作期微电路可靠性的主要因素,采用大量的现场和试验数据进行归一化-线性化-回归分析,研究各主要影响因素与微电路非工作期失效率的定量关系,进而建立可靠性预计模型。该模型预计的失效率与电子设备非工作现场失效率比较,初步验证结果良好。

EEACC: 2220, 0170N

1 引言

在和平时期,绝大部分武器装备处于贮存或工作准备状态。过去,在许多场合都忽视了电子产品非工作状态仍然存在一定的失效概率这一事实,错误地将之当作零来处理。由于事先没有开展定量的非工作期可靠性分析,一旦工作,往往一个元器件的失效就可能导致整个系统发生灾难性后果。因此,研究非工作期诸因素对电子产品可靠性的影响,实现非工作期可靠性预计,是全面研究产品寿命周期可靠性的重要环节。

2 非工作期微电路失效与各种影响因素分析

非工作状态指贮存和休眠状态,包括库存、运输、挂载携行、发射携行等状态。此时产品可能没有承受任何工作应力,也可能承受低于设计所规定的工作应力,如短时间测试。与工作状态相比,电应力对微电路非工作失效率的影响小很多,而温度、湿度、振动、冲击、盐雾、霉菌等环境应力的影响则起主要作用。

2.1 热应力引起的失效

非工作期微电路的结温或沟道温度比正常工作时低,温度变化速率也比工作时平缓得多。经过对大量现场数据的统计分析,温度对微电路非工作失效率的影响可用修正的阿伦尼乌斯模型来描述:

$$\pi_{NT} = K_1 + K_2 \exp\{A[1/(T + 273) - 1/298]\} \quad (1)$$

式中 K_1, K_2 为常数,与微电路工艺有关; A 与同类电路的典型热激活能有关。

当温度较低, π_{NT} 近似为常数 K_1 , π_{NT} 取决于微电路的工艺(双极、MOS 等)。 π_{NT} 在阿伦尼乌斯基础上增加 K_1 系数,更好地描述了库存、坑道贮存等条件下温度较低、温度变化较缓

莫郁薇 女, 1962 年生, 高级工程师, 主要从事电子设备可靠性预计和微电子器件可靠性研究
1996 年 5 月 13 日收到初稿, 1996 年 8 月 8 日收到修改稿

慢的情况。暴露在日照下的导弹系统表面温度高于75℃，每天温差可达50℃以上，飞机无人舱中最高温度可达60℃以上。在这种情况下， π_{NT} 中第二项（阿伦尼斯模型）较理想地反映了高温对非工作失效率的影响。

2.2 化学应力和机械应力引起的失效

长期不工作的微电子器件的可靠性问题主要是由环境或制造期间带进的化学污染物造成的。有些离子在干燥的封装内可长期无害地存在，而当封装内含有水汽，即使是一个分子层的水汽也会迅速起腐蚀反应。国产塑封器件在海南亚热带气候棚下贮存，Cl⁻含量达0.043mg/100cm³，样品有41.16%失效，几乎全部与腐蚀开路有关。

设备休眠或待命期间，来自环境的机械应力有时是相当强劲的。地面移动环境振动加速度达1.5~2.5g；冲击加速度达40g。飞机座舱振动频率达2000Hz，冲击加速度达30g。微电路材料有不同的线性膨胀系数，如硅片与铝引线的膨胀系数相差10倍，当温度变化时会产生机械应力。这些应力会影响芯片内引线键合强度，扩大外引线与外壳的微间隙，使环境中的水汽、盐雾等有害物质就会进入内腔而发生腐蚀，同时外引线也会发生腐蚀。机械应力一旦与化学应力、热应力共同作用就会严重破坏微电路的可靠性。在预计模型中，机械应力与化学应力的影响用环境系数 π_{NE} 和封装复杂度失效率 π_{NS} 来体现。

2.3 微电路结构和生产中质量控制水平对非工作可靠性的影响

微电路规模越大，图形尺寸越小，非工作期各种腐蚀反対对电路的危害更大。气密性更难达到要求。承受化学应力和机械应力的能力越差。据统计，非工作期与封装有关的失效占总失效的44%^[1]。统计结果表明：微电路的失效与芯片的线宽成反比，而芯片的复杂度又反比于线宽的平方^[2]。可以假设微电路非工作基本失效率 λ_{Nb} 是复杂度（门数、晶体管数、位数）的幂函数。

$$\lambda_{Nb} = A \times N_g^B \quad (2)$$

式中 A、B 是与工艺有关的常数； N_g 为数字电路的门数。

相似地，可假设封装复杂度失效率 π_{NS} 为：

$$\pi_{NS} = A' \times N_p^{B'} \quad (3)$$

式中 A'、B' 是与封装有关的常数； N_p 为电路的引出端数。

微电路固有可靠性还取决于设计、制造技术及质量控制水平。不同生产厂其工艺水平、检验严格程度千差万别，整机设计师不可能尽悉。但从总体而言，按生产执行标准来划分质量等级是附合实际的。象国军标、国标、部标都规定了微电路质量一致性检验甚至筛选试验的项目和条件，有些标准还规定了某些制造工艺的要求。

3 非工作期微电路可靠性预计模型的建立

3.1 选取变量

建立模型的变量要求是相互独立的，而且要有一定的显著性。例如：芯片面积和门数均反映了电路规模的大小，是相关变量。芯片面积一般只有微电路设计者知道而整机工程师难以掌握，而门数可以从逻辑图中得出，同时解决了功能一样芯片面积不同而导致不同预计结果的问题，因此以门数代表数字微电路的复杂度更易为整机工程师所接受。

理论上，引出端数有随门数增加的趋势，而国产中小规模数字电路的统计结果表明，门数与引出端数的相关系数只有0.2，不宜用门数代替引出端数来表征封装复杂度。

据理论分析及可靠性数据的统计结果，预计模型可用以下变量来描述：

- (1) 工艺(双极、MOS 等)；(2) 温度；(3) 复杂度(门数、晶体管数、位数)；(4) 电源通断循环率；(5) 引出端数；(6) 环境(除温度外其它应力)；(7) 质量等级(生产执行标准)；(8) 生产稳定性；(9) 封装形式(DIP、扁平、金属壳等)。

3.2 失效率预计模型及其系数

微电路失效可分为与芯片有关的内部结构失效和封装、键合有关的外部结构失效。

内部结构失效在工作时主要由电功耗使结温升高引起，在非工作期，温度和环境应力则起主要作用。非工作期环境应力引起的内部失效占 62%，而工作时只占 23%^[1]。因此非工作期内部失效与温度和其它环境应力、芯片复杂度、质量等级、生产稳定性有关。外部失效是外壳、封装工艺缺陷在环境应力作用下产生的，因而与封装形式、引出端数、电路复杂度、质量等级、生产稳定性有关。

非工作期短时间的电性能测试对微电路可靠性影响随测试频数的增加而更为明显。据美国罗姆航空发展中心的研究成果^[1]，微电路失效率与测试频数的关系以电源通断循环率系数 π_{cyc} 来表征。

$$\pi_{cyc} = 1 + A \times N_c \quad (4)$$

式中 A 为常数； N_c 每千小时电源通断次数。

微电路的失效可认为发生了内部结构或外部结构失效，或同时发生了二种失效，可用串联模型来描述其可靠性。把影响内部结构和外部结构可靠性的共同因素合并， λ_{NP} 可用下式来描述：

$$\lambda_{NP} = \lambda_b \pi_{NQ} \pi_{NE} (\pi_{NT} + \pi_{NS}) \pi_{cyc} \pi_{NL} \quad (5)$$

式中 λ_b 为非工作基本失效率，与工艺和复杂度有关； π_{NQ} 为质量系数； π_{NT} 为温度系数； π_{NE} 为环境系数； π_{NS} 为封装复杂度失效率； π_{NL} 为成熟系数； π_{cyc} 为电源通断循环系数。

采用解方程组的方法可以求出 λ_{NP} 模型中的各个系数，但由于国产微电路可靠性数据的离散性相当大，求出的系数千差万别。实际建模过程中需要用到某些经验公式或理论结果来作归一化处理，如求解温度系数 π_{NT} 时，用(2)式把不同门数的影响归一到同一门数；用(3)式把不同引出端数的影响归一到最常用的管腿数。归一化后参与求解 π_{NT} 的数据量增加了几十倍甚至上百倍，达到了统计分析的要求。这样就可用数学方法把模型线性化，用回归分析法求解。这种归一化-线性化-回归分析过程要反复多次，当 π_{NT} 得出初步结果后把(2)、(3)式视为未知函数求解。

以下采用表 1 给出的高温贮存数据求解 π_{NT} 。

表 1 TTL 数字微电路 λ_{NP} 与温度的关系

型号	元件小时数/ 10^6	失效数	门数	$\lambda_{Nb}/10^{-6}h^{-1}$	$\lambda_{NP}/10^{-6}h^{-1}$	$\lambda_{NP}/\lambda_{Nb}$	$T/^\circ C$	$[1/(T+273)-1/298]$
54175	2.29	0	26	4.73	0.4	0.0846	85	5.62×10^{-4}
54175	0.83	0	4	1.937	1.104	0.57	105	7.102×10^{-4}
T210	0.552	1	34	5.38	1.812	0.337	125	8.43×10^{-4}
B3	0.428	2	12	3.27	4.67	1.43	150	9.92×10^{-4}
SM36	4	14	1	1	3.5	3.5	175	11.236×10^{-4}
SG5437	0.23	0	4	1.937	4.17	2.15	125	8.43×10^{-4}
54192	0.46	0	62	7.16	2.09	0.3	125	8.43×10^{-4}
SG5474	0.2	0	12	3.27	4.58	1.4	150	9.92×10^{-4}

根据(1)式和(5)式可得：

$$\lambda_{NP}/(\lambda_{Nb}\pi_{NQ}\pi_{NE}\pi_{cyc}\pi_{NL}) = K_1 + K_2 \exp\{A[1/(T+273) - 1/298]\} + \pi_{NS} \quad (6)$$

考虑到表1数据的贮存温度 $\geq 85^{\circ}\text{C}$, π_{NT} 中指数项比常数项大得多, 样品均是部标品, 均在试验室环境下进行试验, 因而, 各组样品的 π_{NQ} 和 π_{NE} 是一样的. 简化(6)式并取对数得线性化方程:

$$\ln(\lambda_{NP}/\lambda_{Nb}) \approx A[1/(273+T) - 1/298] + B \quad (7)$$

对表1的数据进行DIXON离散性检验和 $\ln(\lambda_{NP}/\lambda_{Nb})$ 与 $[1/(273+T) - 1/298]$ 之间的线性相关检验, 得相关系数 ≥ 0.8 , 最后用最小二乘法求得 $A = -4915$. 考虑到现场和低温端的情况, 综合统计结果为 $A = -4813$, 激活能 $E_a = 0.41\text{eV}$.

通过对大量数据的统计分析, 求得非工作期微电路可靠性预计模型系数如下:

(1) 非工作期微电路基本失效率 λ_{Nb} :

数字电路和PLA、PAL电路: $\lambda_{Nb} = 0.004 \times N_g^{0.33}$ N_g ——门数;

模拟电路: $\lambda_{Nb} = 0.003 \times N_t^{0.45}$ N_t ——晶体管数;

存储器: $\lambda_{Nb} = 0.003 \times N_b^{0.35}$ N_b ——位数.

(2) 温度系数 π_{NT} (见表2).

表2 温度系数 π_{NT} 、 K_1 、 K_2 和 A 值

工艺和电路类型	A	K_1	K_2
双极型数字电路、PLA、PAL电路和存储器	4813	0.91	0.09
MOS型数字电路、PLA、PAL电路和存储器	7057	0.58	0.42
模拟电路	4748	0.50	0.50

(3) 质量等级与非工作质量系数 π_{NQ} :

符合GJB597-88《微电路总规范》的B级产品, $\pi_{NQ} = 0.2$;

符合GJB597-88的电子行业军用标准B₁级产品, $\pi_{NQ} = 0.3$;

符合GB4589.1-89《半导体器件, 分立器件和集成电路总规范》, 且认证合格的Ⅲ类产品以及符合QZJ840614~840615技术条件的产品, $\pi_{NQ} = 0.5$;

按GJB597-88的筛选要求进行筛选的GB4589.1-89的I类产品、符合GB4589.1-89的I类产品、符合“7905”七专技术条件的产品, $\pi_{NQ} = 0.8$;

符合GB4589.1-89的I类产品, $\pi_{NQ} = 1$;

低档产品或用有机材料封装的产品, $\pi_{NQ} = 6$.

(4) 非工作环境系数 π_{NE} (见表3):

表3 非工作环境系数 π_{NE}

环境	地面 良好	导弹发 射井	一般地 面移动	恶劣地 面移动	平稳地 面移动	剧烈地 面移动	背负	潜艇	舰船良 好舱内通舱内	舰船普 通舱外	战斗机 座舱	战斗机 无人舱	运输机 座舱	运输机 无人舱	宇宙 飞行	
密封	1	1.2	2.4	6	6.3	9	6.7	6.8	4.3	8.5	11	11.4	17	7	11	1.5
非密封	1	2	4	10	11	17	12	14	7.8	15	21	22	33	13	20	1.5

(5) 产品成熟系数 π_{NL} :

符合相应的标准或技术条件, 已稳定生产的成熟品, $\pi_{NL} = 1$;

生产不连续, 质量尚未稳定的半成熟品, $\pi_{NL} = 2$;

试制品、设计或工艺上有重大变更、长期中断生产或生产线变化, $\pi_{NL}=5$;

(6) 电源通断循环系数 π_{cyc} :

数字电路、PLA、PAL 电路和存储器: $\pi_{cyc}=1+0.02N_c$

模拟电路: $\pi_{cyc}=1+0.031N_c$ N_c ——每千小时循环次数

(7) 封装复杂度失效率 π_{NS} :

双列直插封装: $\pi_{NS}=0.02 \times N_p^{1.08}$

扁平封装: $\pi_{NS}=0.0021 \times N_p^{1.82}$

金属壳: $\pi_{NS}=0.0021 \times N_p^{2.01}$ N_p ——引出端数

4 预计准确性

为验证该模型的实用性和准确性, 开展了一系列的现场验证工作(见表 4), 三种设备分别储存或待命于地面固定、地面移动、战斗机无人舱环境. λ_{NP} (预计)/ λ_{NP} (现场)为 0.333 至 1.27, 对首次建模而言, 其准确性令人满意.

表 4 非工作期微电路的可靠性预计模型验证数据

设备	非工作环境	微电路型号	数量	元件小时数/ 10^6	失效数	现场 $\lambda_{NP}/10^{-6} h^{-1}$	预计 $\lambda_{NP}/10^{-6} h^{-1}$	$\frac{\lambda_{NP}(\text{预计})}{\lambda_{NP}(\text{现场})}$
三路载波电话终端	平稳地面移动	T063 T076	20	5.606	0	0.163	0.061	0.373
三路载波电话终端	一般地面移动	T063 T076	20	13.252	0	0.069	0.023	0.333
短波单边带电台	一般地面固定	T067 T060 T063	20 80	13.252 120	0 2	0.069 0.017	0.023 0.0081	0.333 0.49
飞机用发控盒	战斗机无人舱	8FC2 F007 F004 W105 W78L05	15	0.54	1	1.852	2.358	1.273

5 结论

微电路非工作期可靠性受电路工艺、复杂程度、温度和其它环境应力、封装形式、质量控制水平、生产稳定性、电源通断循环率等因素的影响. 建立预计模型的过程中采用了 10^9 元件小时的现场和试验数据, 并经过了检验、筛选等处理, 然后在理论分析的基础上通过多次回归分析得出模型的表达式和参数值. 与美国同类研究比较^[1], 预计模型增加了封装复杂度失效率, 因而更加合理完善. 现场验证表明预计效果良好.

参 考 文 献

[1] D. W. Coit and M. G. Priore, RADC-TR-85-91, AD-A158843, 1985, 5-1~5-78.

[2] P. D. T. O'Connor, IEEE Transactions on Reliability, 1983, 32(1): 9~13.

Nonoperating Periods Reliability Prediction Model for Microcircuits

Mo Yuwei

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

Received 13 May 1996, revised manuscript received 8 August 1996

Abstract The main factors effecting on microcircuit reliability during nonoperating periods, such as quality control standard, environment, complexity, package, temperature etc., are studied and analysed. A large amount of field and laboratory data is used in a statistics procedure to establish the reliability prediction model. The prediction failure rate is consistent as compared with the nonfield failure rate.

EEACC: 2220, 0170N