



高等学校电子信息类规划教材

微电子器件 · 可靠性

研究生系列教材

■ 史保华
贾新章 编著
张德胜



西安电子科技大学出版社

[http:// www.xduph. com](http://www.xduph.com)

研究生系列教材

西安电子科技大学
研究生教材建设基金资助

前 言

本教材系按原电子工业部制订的《1996年~2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由微电子技术专业教学指导委员会编审、推荐出版。本教材由西安电子科技大学微电子研究所史保华教授任主编，主审为西安交通大学电信学院邵志标教授，责任编辑为朱秉升教授。

本教材的参考学时数为45学时。全书共9章，其主要内容为：概述；可靠性数学基础，可靠性的定量表征，常用概率分布，可靠性框图及数学模型；半导体体内及各界面间可能发生的各种失效的物理过程，如热载流子效应，栅氧击穿，电迁移，静电损伤，CMOS电路的闩锁及水汽等的危害；失效模式，失效物理模型，失效分析程序和方法，特别是对常用的微分析技术的原理和特点作了必要的介绍；随后介绍了可靠性设计和内建可靠性；工艺监测与监控；抽样检验；各种可靠性试验及试验结果的统计处理等；其中特别反映了最新的技术进展，如计算机辅助可靠性，统计过程控制技术(SPC)及PPM质量管理；最后介绍微电路的使用可靠性，可靠性管理及质量认证等内容。

使用本教材时学生应具备一定的概率论与数理统计基础。本书内容只涉及硅器件，讲授中着重说明了有关的物理概念，涉及的数学知识只是作为一种工具使用。

本教材由史保华编写第1~4章，贾新章编写第5~6章，张德胜编写第7~9章。此教材是在本校硕士研究生三届教学实践讲义的基础上进行了修改、补充和完善后形成的。

由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1999年1月20日

主要外文符号注释表

(同一参数表示不同意义时用分号分开)

A	面积; 电迁移中与线宽有关的一个常数; 随机试验中表示成功或正品
$\bar{A}$	随机试验中表示失败或次品
a	在描述栅氧化层击穿时间分布时的一个模型参数, 表示氧化层中陷阱的俘获截面
C_p	工序能力指数
$D(\xi)$	随机变量 ξ 的方差
D	表示由样本所得的经验分布与总体分布间的偏差, 是一个随机变量; 不合格品总数
d_c	随机变量 D 的某个临界值
$\overline{D_n}$	Si/SiO ₂ 界面间的界面态密度 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$)
E	电场强度 (MV/cm)
$E(\xi)$	随机变量 ξ 的数学期望
E_{ox}	氧化层电场强度 (MV/cm)
E_a	激活能 (eV)
F	描述金属互连线中发生电迁移时金属离子所受到的力; 高电场下流经氧化层的电子流量; 作用应力
f	频率
$F(t)$	失效概率 (分布)
$f(t)$	失效概率密度 (分布)
F_s	金属互连线中发生电迁移时金属离子所受到的摩擦力
F_q	金属互连线中发生电迁移时金属离子所受到的电场力
F_v	空位流量
I	电流
i	电流; 作下标用时表示第 i 个单元或部件
I_d	MOS 器件的漏源电流
I_{sub}	衬底电流
I_{cp}	电荷泵电流
J	电流密度
j	电流密度
k	Boltzmann 常数 $8.62 \times 10^{-5} (\text{eV/K})$; 导热率
l	长度
L	MOS 器件中的沟道长度; 接收概率
m	威布尔分布中的形状参数; 电迁移公式中的一个常数 (1~3)

N	样品总数; 面电荷密度的电荷数
n	试验次数; 样本数; 浓度
$N(t)$	到时刻 t 仍在正常工作的样品数
$n(t)$	到时刻 t 失效的样品总数
n_i	本征载流子浓度 (cm^{-3})
p	随机试验中失败(或取得次品)的概率
$P(\xi)$	随机变量 ξ 的概率
P_0	可接受质量水平
P_1	极限水平
Q	面电荷密度 (C/cm^2); 热量
q	随机试验中成功(或取得正品)的概率; 电子电荷
Q_{BD}	MOS 电容发生击穿时注入氧化层中的总电荷面密度 (C/cm^2)
Q_{crit}	电路产生软误差所需的最小电荷量(临界电荷)
Q_{f}	固定氧化层电荷面密度 (C/cm^2)
Q_{it}	界面陷阱电荷面密度 (C/cm^2)
Q_{m}	可动电荷面密度 (C/cm^2)
Q_{ox}	氧化层陷阱电荷面密度 (C/cm^2)
Q_{p}	研究 Fowler-Nordheim 隧穿注入时, 陷入氧化层中的空穴密度 (C/cm^2)
Q_{SD}	表面耗尽层电荷密度
R	电阻
$R(t)$	可靠度
R_{c}	接触电阻
R_{T}	热阻
$R(T)$	温度 T 时的反应速率
S	器件热稳定因子; 标准差; 降额系数; 灵敏度
s	作下标用时表示系统
S_{N}	相对灵敏度
T	温度; 可靠性试验的总试验时间
t	时间
t_0	威布尔分布中的尺度参数
t_{BD}	电应力下 MOS 电容发生电击穿所经历的时间
T_{c}	器件外壳温度
T_{j}	器件结温
T_{k}	可靠性试验中出现第 k 次故障时的总试验时间
T_{p}	脉冲周期
t_{f}	脉冲的下降时间
t_{r}	可靠寿命; 脉冲的上升时间
t_{TTF}	失效时间
t_{MTF}	中位寿命
t_{MTBF}	平均无故障工作时间

t_{MTTF}	平均寿命
U	电压
U_{B}	偏置电压
U_{FB}	平带电压
U_{T}	MOS 器件的阈值电压
V_{th}	载流子热速度 (cm/s)
W	宽度
X_{eff}	考虑缺陷后 MOS 器件中栅氧化层的等效厚度
x_i	样本值
X_{ox}	MOS 器件中栅氧化层厚度
α	显著性水平; 电离碰撞空穴产生系数; 材料线热膨胀系数; 生产方风险
β	使用方风险; 材料二阶线热膨胀系数
γ	威布尔分布中的位置参数
η	威布尔分布中的可靠寿命
δ	金属互连线中空洞的体积
ϵ	介电常数; 比辐射率
ϵ_0	真空介电常数
ϵ_s	半导体材料的介电常数
θ	平均寿命
λ	瞬时失效率; 电子(或辐射)波长
μ	均值
μ_{eff}	MOS 器件中沟道内载流子有效迁移率
ξ	随机变量
ρ	MOS 器件(电容)氧化层中的陷阱密度; 材料电阻率
ρ_c	接触电阻率
σ	正态分布中的标准差; 载流子俘获截面 (cm ²); Stefan-Boltzmann 常数
σ_n	电子俘获截面 (cm ²)
σ_p	空穴俘获截面 (cm ²)
τ	施加应力时间; 寿命; 热(或放电)时间常数; 温度加速因子
τ_0	在电应力下研究 MOS 电容击穿时间分布的一个常数
τ_d	二次击穿延迟时间
$\Phi(x)$	标准正态分布函数
$\varphi(x)$	标准正态分布密度函数
φ_{F}	半导体衬底的费米势
φ_i	电离碰撞离化能
φ_{it}	产生界面陷阱所需能量 (eV)
φ_{ms}	金属-半导体接触电位差

目 录

第 1 章 概述	1	3.2.1 热载流子效应对器件性能的影响	29
1.1 可靠性工作的意义与内容	1	3.2.2 电荷泵(CP)技术 ^[7,8,9]	30
1.2 质量、可靠性、经济性之间的关系	2	3.2.3 退化量的表征	32
1.3 可靠性工作的内容	3	3.2.4 影响因素	33
1.3.1 基础	3	3.2.5 改进措施	33
1.3.2 技术	3	3.3 栅氧击穿	34
1.3.3 管理	3	3.3.1 击穿情况	34
1.3.4 教育交流	4	3.3.2 击穿机理	35
1.4 本教材的对象、内容与重点	4	3.3.3 击穿的数学模型与模拟 ^[11,12]	36
第 2 章 可靠性的数学基础	5	3.3.4 薄栅氧化层与高场有关的物理/统计模型 ^[13~16]	36
2.1 可靠性的定量表征 ^[1,2,4]	5	3.3.5 改进措施	38
2.2 常用的概率分布 ^[1,3,4]	9	3.4 电迁移 ^[1]	38
2.2.1 二项分布 $b(n, p)$	9	3.4.1 电迁移原理	38
2.2.2 泊松分布	10	3.4.2 影响因素	40
2.2.3 指数分布	10	3.4.3 失效模式	41
2.2.4 正态分布	11	3.4.4 抗电迁移措施	41
2.2.5 对数正态分布	12	3.4.5 铝膜的再构	42
2.2.6 威布尔分布	13	3.4.6 应力迁移 ^[3]	42
2.3 可靠性框图和数学模型 ^[4,5]	15	3.5 与铝有关的界面效应 ^[1]	42
2.3.1 基本概念及其意义	15	3.5.1 铝与二氧化硅	42
2.3.2 串联系统	17	3.5.2 铝与硅	43
2.3.3 并联系统	18	3.5.3 金与铝	45
2.3.4 混联系统	22	3.6 热电效应	45
2.3.5 冷贮备系统	23	3.6.1 热阻	45
2.4 分布的检验 ^[3]	24	3.6.2 热应力	46
思考题与习题	25	3.6.3 热稳定因子 ^[1]	46
参考文献	25	3.6.4 二次击穿 ^[4]	48
第 3 章 失效物理	26	3.7 CMOS 电路的闩锁效应 ^[4]	49
3.1 氧化层中的电荷 ^[1,2,6]	26	3.7.1 物理过程	49
3.1.1 电荷的性质与来源	26	3.7.2 检测方法	50
3.1.2 对可靠性的影响	27	3.7.3 抑制闩锁效应的方法	51
3.1.3 降低氧化层电荷的措施	28	3.8 静电放电损伤 ^[3,4,6]	52
3.2 热载流子效应 ^[3,6]	29	3.8.1 静电的来源	52

3.8.2 损伤机理与部位	52	4.5.3 电子探针 X 射线显微分析	76
3.8.3 静电损伤模式	53	4.6 电子能谱及质谱 ^[5,7]	76
3.8.4 静电损伤模型及静电损伤 灵敏度	53	4.6.1 俄歇电子能谱	76
3.8.5 防护措施	53	4.6.2 X 射线光电子能谱	78
3.9 辐射损伤 ^[4]	54	4.6.3 二次离子质谱	79
3.9.1 辐射来源	54	4.6.4 管内残气分析 ^[1]	81
3.9.2 辐照效应	55	4.7 红外分析 ^[5]	81
3.9.3 核电磁脉冲损伤	56	4.7.1 物体的辐射与红外光	81
3.9.4 抗核加固	56	4.7.2 红外热分析	82
3.10 软误差 ^[3,5,6]	56	4.7.3 红外光谱分析	82
3.10.1 产生机理	56	4.8 破坏性物理分析 ^[6]	83
3.10.2 临界电荷	57	4.9 失效分析实例	84
3.10.3 改进措施	58	4.9.1 漏电流过大	84
3.11 水汽的危害	58	4.9.2 管内水汽 ^[10]	84
3.11.1 水汽的来源与作用	59	4.9.3 钝化层过薄(航天工业总公司半导 体器件失效分析中心提供)	85
3.11.2 铝布线的腐蚀	59	4.9.4 氧化层缺陷(航天工业总公司半导 体器件失效分析中心提供)	85
3.11.3 外引线的锈蚀	59	思考题与习题	87
3.11.4 电特性退化	60	参考文献	87
3.11.5 改进措施	60		
思考题与习题	60		
参考文献	61		
第 4 章 失效分析	63	第 5 章 可靠性设计	88
4.1 失效模式与失效机理 ^[1]	63	5.1 可靠性设计的基本概念	88
4.1.1 失效分析的目的和意义	63	5.1.1 微电路可靠性设计的必要性	88
4.1.2 失效模式与模式分布	63	5.1.2 微电路可靠性设计的基本含义	89
4.1.3 主要失效机理	64	5.1.3 微电路可靠性设计技术的分类	89
4.2 失效模型	64	5.1.4 微电路可靠性设计的特点	89
4.2.1 应力-强度模型	65	5.2 针对主要失效模式的工艺技术 和器件结构设计(例)	91
4.2.2 Arrhenius 模型	65	5.3 常规可靠性设计技术	92
4.2.3 Eyring 模型	66	5.3.1 降额设计	92
4.2.4 最弱环模型	67	5.3.2 冗余设计	93
4.2.5 累积损伤模型	67	5.3.3 灵敏度分析	95
4.3 失效分析的内容与程序 ^[1,2,8]	67	5.3.4 最坏情况分析	96
4.3.1 开封前	68	5.4 可靠性模拟	97
4.3.2 开封	68	5.4.1 基本概念	97
4.3.3 开封后	69	5.4.2 电迁移模拟技术路线	98
4.3.4 总结	69	5.4.3 用于可靠性模拟的电迁移模型	99
4.4 微分析技术的物理基础 ^[5]	69	5.4.4 电迁移可靠性模型参数提取	101
4.5 电子显微镜 ^[3,5,7]	71	5.4.5 微电路版图信息的提取	104
4.5.1 透射电镜	71	5.4.6 电迁移模拟分析	104
4.5.2 扫描电镜	73	5.4.7 设计规则指导意见	105
		5.5 内建可靠性	106

5.5.1 内建可靠性的提出背景	106	思考题与习题	147
5.5.2 内建可靠性技术的特点	107	参考文献	147
5.5.3 微电路可靠性的表征	109		
思考题与习题	109	第 7 章 可靠性试验	149
参考文献	110	7.1 可靠性试验的分类及内涵 ^[1,6,9]	149
第 6 章 工艺可靠性	111	7.1.1 可靠性试验的分类	149
6.1 “工艺可靠性技术”概述	111	7.1.2 可靠性增长试验和失效分析 试验	150
6.1.1 “工艺可靠性”的基本概念	111	7.1.3 老炼试验和筛选试验	150
6.1.2 “工艺可靠性”的技术思路	112	7.1.4 模拟试验和现场试验	150
6.1.3 未来的“工艺可靠性”技术	115	7.1.5 例行试验、质量一致性检验和 可靠性验收试验	150
6.2 工艺参数监测技术	115	7.1.6 可靠性鉴定试验、可靠性定级 试验和可靠性维持试验	151
6.2.1 概述	115	7.2 环境试验、机械试验和电磁试验 的主要内容与目的 ^[9]	151
6.2.2 方块电阻测试中的微电子测 试图技术	117	7.2.1 环境试验	151
6.2.3 测量金属-半导体接触电阻和 接触电阻率的微电子测试图	121	7.2.2 机械试验	154
6.2.4 光刻套刻误差测试结构	125	7.2.3 静电放电敏感度试验	156
6.3 PPM 技术	126	7.3 抽样理论 ^[6,8]	157
6.3.1 PPM 的概念	126	7.3.1 概述	157
6.3.2 PPM 应用之一——IC 原材料质 量水平的表征	126	7.3.2 计数抽样试验/检验方案原理	157
6.3.3 PPM 应用之二——电子元器件 出厂平均质量水平的评定	127	7.3.3 计数抽样方案的制定	159
6.3.4 PPM 应用之三——工艺质量 水平的表征	128	7.4 试验数据的处理方法 ^[2~6]	161
6.4 工序能力分析和 6σ 设计	129	7.4.1 最佳线性无偏估计	161
6.4.1 工序能力的定量表征	129	7.4.2 极大似然估计	163
6.4.2 6σ 设计	131	7.4.3 图估计方法	163
6.5 SPC 技术	132	7.5 试验方案的制定方法	165
6.5.1 概述	132	7.5.1 项目的选择	165
6.5.2 SPC 技术流程	134	7.5.2 试验条件	166
6.5.3 关键过程节点和关键工艺 参数	135	7.5.3 试验顺序	166
6.5.4 用于工艺受控状态定量分析 的常规控制图技术	135	7.5.4 试验判据	166
6.5.5 适用于微电路生产的控制 图技术	140	7.5.5 抽样	166
6.6 工艺控制技术	142	思考题与习题	167
6.6.1 概述	143	参考文献	167
6.6.2 逐批反馈控制	143	第 8 章 使用可靠性	168
6.6.3 实时反馈控制	145	8.1 器件的合理选用 ^[1,2,4]	168
6.6.4 前馈控制	146	8.1.1 关于器件的质量等级	168
		8.1.2 关于合格产品清单和优选 元器件清单	169
		8.1.3 器件的选择	169
		8.2 微电路的额定值和降额使用 ^[6]	169

8.2.1 微电路的额定值	169	8.6.3 粘接(焊接)	176
8.2.2 降额使用	169	8.6.4 清洗	176
8.3 浪涌引起的使用失效	170	思考题与习题	177
8.3.1 浪涌的产生	170	参考文献	177
8.3.2 减小或消除电浪涌的措施	172		
8.4 防止元器件使用中的静电损伤 ^[3]	172	第9章 可靠性管理	178
8.4.1 防静电环境	172	9.1 组织与人员管理 ^[1~4]	178
8.4.2 工作人员的防静电措施	173	9.1.1 组织管理	178
8.4.3 包装、运送和存放过程中的 防静电措施	173	9.1.2 人员管理	178
8.5 防护元器件	173	9.2 材料及外协加工件管理	179
8.5.1 瞬变电压抑制二极管	173	9.2.1 材料的采购	179
8.5.2 压敏电阻	174	9.2.2 外协加工件管理	179
8.5.3 铁氧体磁珠	174	9.3 仪器设备管理	180
8.5.4 正温系数热敏电阻和负温系数 热敏电阻	175	9.4 设计、工艺及工艺控制管理	180
8.6 电子元件的可靠性安装	176	9.5 文件、记录与信息管理	181
8.6.1 引线整形	176	9.6 试验评价与失效分析管理	182
8.6.2 安装结构	176	思考题与习题	182
		参考文献	182

第 1 章 概 述

1.1 可靠性工作的意义与内容

在人们的日常生产和技术活动中,经常会涉及到产品的可靠性问题。按照一般的理解,产品的可靠性是指产品在使用过程中会不会出现问题或发生故障,从而引起各种损失或危害,这种说法不够严格。按照国家标准的定义,可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。这里规定的条件所指内容很广,可以是产品的各种外部气候环境,也可以是产品承受的一定的热、电工作应力。进一步详细叙述时,可能会涉及其标准条件、最坏条件等。规定时间一般指所保证的时间,有时也表示次数、循环数或距离等。至于功能则随产品种类而异,重要的是要明确定出其功能故障的判断标准。但从这里可知,可靠性是与工作时间有关的。

随着技术的进步,半导体器件从分立走向集成,从 SSI 发展到 ULSI。现在已可将近 1 亿个器件集成在一块芯片上,由于器件尺寸不断缩小使器件数量不断增加,改进了电路功能,使电路日趋复杂,而可靠性问题也日益显得重要。IC 的应用已渗入到国民经济各部门,相应的 IC 的可靠性也日益显得迫切与重要。现在一块电路的失效,不仅能影响到人民的生命财产安全,有时还会涉及到国家的政治声誉。例如 1957 年美国先锋号卫星因一个价值 2 美元的器件失效,造成价值数百万美元的卫星原地坠毁。国内外有许多这样的由可靠性引起事故的严重事例。因此,在微电路发展的同时,其可靠性也逐步为人们所认识,并得到密切关注与重视。从事科学技术工作的人员,就应提高认识,重视可靠性工作,采取各种措施,提高所开发的产品的可靠性,防止事故的发生。

可靠性工作涉及的面很广。一方面,它包括产品的开发研究、设计、制造、包装、贮存、运输和使用维修等各个环节;另一方面,从电路结构到材料、设备、仪器、工具、加工制造、工艺控制、质量管理等方面,都与其有关系。从学科上讲,它涉及失效物理、数理统计、数学模型、化学反应、机械应力、环境工程、实验方法、生产管理等方面,有基础理论,也有实用技术与经验。其战线长、内容多、范围广,涉及到产品的方方面面。它不仅带有科学研究,工程应用的性质,还必须统筹安排,科学管理。要由研制开发、生产及使用方的工程技术人员、工人、管理干部和产品有关的原材料、元器件、仪器设备供应商共同协作,方

能完成。可靠性工作不仅是一门边缘学科，而且也是一个庞大的系统工程，所以一般叫“可靠性工程”。产品愈复杂重要，涉及面愈广，有关可靠性问题也愈多。

1.2 质量、可靠性、经济性之间的关系

产品的质量包括外部特征、技术指标、可靠性、经济性和安全性几部分。外部特征有产品的商标名称、造型结构、尺寸重量、工作环境、电压功耗等。技术指标是质量的一个最明显的项目，如工作带宽、放大倍数等。具体指标随产品种类而异。狭义的质量仅指其性能指标。

可靠性是指产品的寿命特点、使用维修情况、完成任务的能力大小，是产品质量的重要指标之一。所以可靠性问题也是质量问题。

产品的技术性能与产品的可靠性都是通过产品的设计所赋给的，并且是通过制造过程中的全面质量管理来保证的，它们之间有着极为密切的关系。没有产品的技术指标，产品的可靠性就无从谈起。如果产品不可靠，就容易出故障，尽管其技术性能很先进，却得不到发挥，也满足不了使用要求，就会失去其使用价值；如果引发事故，造成危害，就更不好了。所以说产品的基本技术性能与其可靠性之间是不可分割的。

但产品的可靠性与其技术性能指标又有所不同，产品的技术性能指标是产品制成后交付使用前即出厂（是时间 $t=0$ ）时的情况，出厂时生产者所关心的是废品率。可靠性是指产品在使用过程中的情况，是时间的函数。使用者关心的是瞬时失效率。此外，产品的技术性能可通过具体的仪器设备检测出来；而产品的可靠性是“测”不出来的，它是通过大量分析试验，在调查研究等基础上，对有关的可靠性数据进行统计评估得到的。它说明的是某一批产品，而不能说是某一个产品的可靠性水平。

产品的可靠性是一与许多因素有关的综合性质量指标。产品的可靠性一般包括：

（1）固有可靠性 是针对构成产品的原材料性能及制成后在工作过程中所受应力情况，在设计阶段所赋予的，在制造过程中加以保证的。一般常说可靠性是设计制造出来的即指此意。

（2）使用可靠性 指产品在实际使用中表现出的可靠性。产品的使用是否正确，是否存在有过应力情况，都会影响使用可靠性。若使用不当就会降低产品的可靠性甚至引起失效，所以在使用中要遵守有关规定。

（3）维修性 对可修复产品如整机等有意义，一般电子元器件无此要求。

质量的经济性不仅指产品的生产费用，还应考虑产品的全寿命周期费用。全寿命周期是指产品从开发、研制、设计，到用户使用后报废所经历的时间。所以全寿命周期费用除产品价格外还应考虑使用时的维修费用。微电子器件是作为电子元器件使用在整机或系统中的，如果器件出现故障，整机需要维修。在整机的不同阶段（制造安装、调试、现场使用）更换一个器件所需费用相差很大，有时甚至极其昂贵或不可能（如航天器或海底电缆增音器），这时选用高可靠性的微电子器件就显得很重要。器件可靠性的提高，涉及了设计、生产、设备、测试、管理等许多环节，生产成本上升，而使用维修费用下降。产品的总费用与可靠性之间有一定的关系。任何产品，其可靠性也不是越高越好，应从总的经济效果来看，

有时还涉及到产品所完成的任务、功能以及军事、政治等因素，应全面衡量，综合考虑。

产品的安全性是指在使用及运输过程中，不会引起使用者的生命伤害及财产损失。1995 年报纸上曾报道的热水器伤人事件，就是某些热水器不满足安全性要求造成的。

1.3 可靠性工作的内容

可靠性工作的主要内容包括基础、技术、管理、教育交流四个方面。

1.3.1 基础

(1) 理论 涉及数理统计、可靠性数学模型、可靠性实验理论基础、失效物理、人机工程等。

(2) 设备 包括各种环境试验设备、可靠性试验设备、检测分析用仪器设备等。

1.3.2 技术

1. 产品可靠性

(1) 可靠性设计 产品的设计阶段，除要考虑满足其热、电能等要求外，还要考虑满足其可靠性指标要求，为此而采取一些技术，如降额及冗余设计技术等。

应该指出，按照传统方法，待产品制成后，经过测试、分析发现了可靠性的问题，再来解决，这样周期太长，不适应 ULSI 发展的需要。必须对此加以变革，转向在设计阶段就考虑其可靠性问题，对其进行可靠性设计(包括可靠性模拟和工艺可靠性设计等)。

(2) 制造可靠性 保证在设计时所赋予产品的固有可靠性在制造加工中不被降低，为此采取一系列措施，如加强人员培训，持证上岗；要对购入原材料或元件进行检验，符合要求后才可使用。加强设备维修及管理，对重点工序进行实时监测监控，不合格时中止生产以减小损失，并寻找原因加以解决。保证室内清洁度，控制尘埃，防止静电等。

(3) 可靠性试验 包括例行试验，各种环境试验，寿命试验以及失效率鉴定试验等。

(4) 可靠性管理 对产品要有可靠性保证计划，实行统计工艺控制技术，以保证产品的可靠性。老产品要有可靠性增长计划，不断提高其可靠性水平。要进行可靠性认证，贯彻国(军)标等。要重视可靠性信息的收集，整理与反馈。

(5) 失效分析 制定失效分析的步骤与方法，生产中出现了废品，要及时进行分析，寻找失效原因，采取措施加以改进、解决。

2. 使用可靠性

编写与宣传使用手册，帮助使用方遵守正确使用方法与步骤，防止人为因素及电、热过应力的出现而损伤产品。

1.3.3 管理

(1) 国家级 国家级管理体系的建立与运作，制定规划、政策，下达任务，协调各方面工作，进行基础的调查研究。制订与执行可靠性认证制度，制订可靠性标准(基础标准，可靠性试验标准，可靠性设计标准，可靠性管理标准等)。组建可靠性数据交换网，收集与管

理数据,实现数据共享。对可靠性工作的宣传教育,进行技术协作与国际交流。

(2) 企业级 企业级管理体系的建立,制订企业可靠性管理纲要,进行可靠性监督与评审,人员培训,技术推广与交流,可靠性信息收集、管理与反馈等。

1.3.4 教育交流

一般由学会或行业协会组织,包括编写各种可靠性教材,举办各类培训班,召开专题研讨会,组织学术、情报、资料的交流等。

1.4 本教材的对象、内容与重点

本教材是一本讨论微电子方面的可靠性问题的教科书。关于可靠性问题在前面已有比较详细的介绍,而微电子器件按照一般的理解,主要涉及以硅材料为基础的器件,其中包括分立器件及集成电路两大类。对于像 GaAs 等化合物半导体器件、微波器件、光电器件及以薄厚膜电路为基础的二次集成器件,这里暂不包括。所以本书限于讨论硅器件的有关可靠性问题。讲授内容从数学基础开始,逐步介绍失效物理、可靠性设计、工艺可靠性、可靠性试验、失效分析、可靠性认证及全面质量管理等,并适当介绍当前国际上可靠性领域中的新进展,如内建可靠性,计算机辅助可靠性等,讲述的重点是器件的可靠性设计,制造可靠性,可靠性试验及失效物理。对一个器件,如何来评价其可靠性?当出了问题,如何进行分析,找出原因,提出改进措施,从而提高产品可靠性。在这种能力培养方面,希望本书对读者也能有所帮助。

第 2 章 可靠性的数学基础

本章主要介绍可靠性的定量表征,常用概率分布及可靠性框图三部分内容,定量地描述了产品可靠性的基础。为了分析实测可靠性数据是否符合某种统计分布,这里也简要介绍了统计检验法。

2.1 可靠性的定量表征^[1, 2, 4]

按前面对产品可靠性这一术语的定义,它是指某产品在规定的条件下,在规定的时间内完成规定功能的概率。产品的规定功能不仅是它的主要质量指标,也是衡量产品可靠与否的一个标准。但规定功能能否顺利完成,与产品所处条件(温度、湿度、室内、室外、风沙、盐雾等)有关。条件不苛刻,容易完成任务,即可靠性好;也与使用时间有关,产品的性能是随时间变化的,使用了 1 小时与使用了 1 年性能变化程度不同,时间短,性能变差的可能性不会太大,可靠性就好。所以可靠性用了三个规定来描述,但仍然是定性的,要准确地描述产品可靠性,要定量化表征,就要用到可靠性数学特征(函数)的描述。

产品(器件)失去规定的功能称为失效,产品在失效前的工作(贮存)时间称为寿命(贮存寿命)。产品的寿命是一个随机变量,由概率论知道,随机变量的取值不能事先知道,但它有两个特征:即它的取值有一定范围及取某个特定值有一定的概率。随机变量及对随机变量的处理都是在概率论与数理统计领域中讨论的问题,所以,可靠性工程中数学表征与处理都要在概率论与数理统计的基础上进行。

有关产品可靠性的数学描述,主要有可靠度、失效概率、失效概率密度、瞬时失效率、平均寿命、可靠寿命六项(用统计概率的近似法)。

1. 可靠度 $R(t)$

可靠度是指产品在规定的条件下,在规定的时间内,完成规定功能的概率。概率是用数量来表示的,所以是定量化的描述。因它与时间有关,常记作 $R(t)$,也称为可靠度(函数),用数学方式表示为

$$R(t) = P\{\xi > t\} \quad (2.1)$$

也可近似表示为

$$R(t) \approx \frac{N - n(t)}{N} = \frac{N(t)}{N} \quad (2.1a)$$

式中 ξ 为随机变量, 这里指产品寿命, N 为进行试验的产品总数, $n(t)$ 为试验到 t 时刻失效的总个数, $N(t)$ 为工作到 t 时刻仍在正常工作的产品数, 当 N 足够大时, 可用等式右边 $N(t)/N$ 表示。 $R(t)$ 描述了产品在 $(0, t]$ 时间段内完好的概率。

2. 失效概率 $F(t)$

失效概率也叫累积失效概率或不可靠度(性), 是指产品在规定的条件下在时间 t 以前失效的概率, 也就是寿命这一随机变量 $(\xi \leq t)$ 的分布函数, 记为 $F(t)$, 由概率论知:

$$F(t) = P\{\xi \leq t\} \quad (2.2)$$

在实际数据处理中, 失效概率 $F(t)$ 的近似值为

$$F(t) \approx \frac{n(t)}{N} \quad (2.2a)$$

由式(2.1)与(2.2)相加得

$$R(t) + F(t) = \frac{N - n(t)}{N} + \frac{n(t)}{N} = 1 \quad (2.3)$$

$R(t)$ 与 $F(t)$ 是对立事件, 其概率之和应为 1。

3. 失效概率密度 $f(t)$

失效密度(失效概率密度)是指产品在 t 时刻的单位时间内, 发生失效的概率, 它用来描述在 $0 \sim +\infty$ 的整个时间轴上的分布情况, 说明器件在各时刻失效的可能性, 是寿命这一随机变量的密度函数 $f(t)$, 是累积失效概率 $F(t)$ 的微商(时间变化率)。如 $F(t)$ 连续, 则

$$f(t) = F'(t) \quad (2.4)$$

即

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx \quad (2.5)$$

式(2.4)可近似表示为

$$\begin{aligned} f(t) &\approx \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \\ &= \frac{\left[\frac{n(t + \Delta t)}{N} - \frac{n(t)}{N} \right]}{\Delta t} \\ &= \frac{\Delta n(t)}{N \Delta t} \end{aligned} \quad (2.4a)$$

式中 $\Delta n(t)$ 表示 $(t, t + \Delta t)$ 时间间隔内失效的器件数。

器件的寿命服从何种分布, 就是说其 $f(t)$ 和 $F(t)$ 是何种函数。由式(2.3)及(2.1)可得

$$R(t) = P\{\xi > t\} = 1 - P\{\xi \leq t\} = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx \quad (2.6)$$

显然 $R(0) = 1$, 而 $R(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$, 即产品开始处于完好状态, 而最终都要失效。

4. 瞬时失效率(失效率) $\lambda(t)$

失效率是指在时刻 t 尚未失效的器件在单位时间内失效的概率, 它用来描写在各个时刻仍在正常工作的器件失效的可能性, 常记作 $\lambda(t)$ 。在时刻 t 完好的产品, 在 $[t, t + \Delta t]$ 时间内失效的概率为

$$P\{t < \xi \leq t + \Delta t | \xi > t\}$$

在单位时间内失效的概率为

$$\lambda(t, \Delta t) = \frac{P\{t < \xi \leq t + \Delta t | \xi > t\}}{\Delta t} \quad (2.7)$$

因为事件 $t < \xi$ 被包含在事件 $t < \xi \leq t + \Delta t$ 之中, 若事件 $t < \xi \leq t + \Delta t$ 发生, 则必导致 $t < \xi$ 事件的发生, 所以有

$$(t < \xi \leq t + \Delta t) = (t < \xi \leq t + \Delta t) \cap (t < \xi)$$

按概率乘法公式

$$P\{t < \xi \leq t + \Delta t | \xi > t\} = \frac{P\{(t < \xi \leq t + \Delta t) \cap (t < \xi)\}}{P\{\xi > t\}} = \frac{P\{t < \xi \leq t + \Delta t\}}{P\{\xi > t\}}$$

所以有

$$\begin{aligned} \lambda(t, \Delta t) &= \frac{P\{t < \xi \leq t + \Delta t\}}{\Delta t \cdot P\{\xi > t\}} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t \cdot P\{\xi > t\}} \\ \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \lambda(t, \Delta t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \end{aligned} \quad (2.7a)$$

也即

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{F'(t)}{1 - F(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} \quad (2.7b)$$

又由

$$\lambda(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)}$$

得

$$\lambda(t)dt = -\frac{1}{R(t)}dR(t)$$

两端取积分, 有

$$\begin{aligned} \int_0^t -\frac{1}{R(t)}dR(t) &= \int_0^t \lambda(t)dt \\ R(t) &= e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$\lambda(t)$ 是一个比较常用的特征函数, 它的单位用 $1/h$, 也常用 $\%/(1\ 000\ h)$ 或 $10^{-6}/h$, 后者称为菲特 (Fit), 也即 100 万个器件工作 1 000 h 后只出现一个失效, 即为 1 Fit。根据我国国家标准“电子元器件失效率试验方法”中的规定, 其失效率分为亚五级 (Y), 五级 (W) ……十级 (S), 相应的最大失效率分别为 $3 \times 10^{-6}/h$, $1 \times 10^{-5}/h \cdots 1 \times 10^{-10}/h$ 。

根据长期以来对元器件的试验及使用中得到的大量数据进行统计, 发现一般元器件的失效率和时间关系有如图 2.1 中的曲线所示, 通常称为浴盆曲线, 它明显地可分为三个区域。

第 I 区为早期失效阶段, 这一阶段失效率较高, 但失效率随时间增加而下降。器件的失效主要是由一种或几种具有一定普遍性的原因所造成, 对不同品种、不同工艺的器件, 这一阶段的延续时间和失效比例是不同的。严格工艺操作和对原材料、半成品和成品的检验, 可减少这阶段的失效。进行合理的筛选可以尽可能在正式交付使用前把早期失效器件筛选掉, 可使出厂前器件的失效率达到或接近偶然失效期的较低水平 (固有可靠性)。

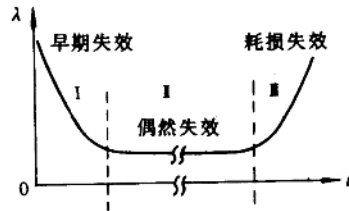


图 2.1 一般电子元器件的失效率与时间的关系