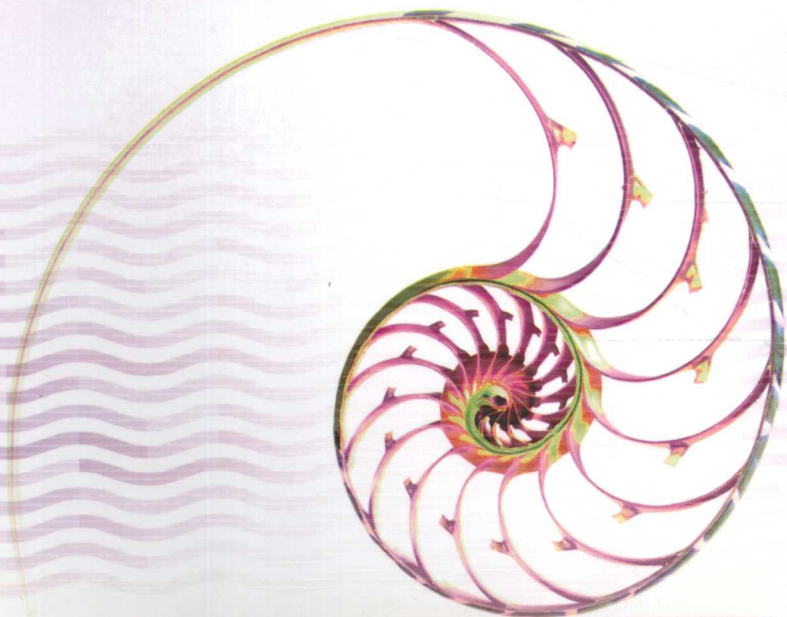


可靠性技术丛书

工业和信息化部电子第五研究所 组编



可靠性物理

◎ 恩云飞 谢少锋 何小琦 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

可靠性技术丛书

可靠性物理

工业和信息化部电子第五研究所 组编
恩云飞 谢少锋 何小琦 编著
编写组成员：方文啸 来萍 宋芳芳
李少平 周斌 罗宏伟
杨少华 陈义强 莫富尧
章晓文 黄钦文 黄云
路国光 蔡伟 曾畅

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书介绍了电子元器件可靠性物理的基本概念和失效物理模型,并系统地论述了11类电子元器件的失效机理及相关数理模型。全书共13章,前两章介绍了可靠性物理及其发展现状,并介绍了8类经典的失效物理模型及工程应用的意义;后11章分别论述了微电子器件、微波器件、光电子器件、高密度集成电路、真空电子器件、MEMS器件、电阻器、电容器、继电器与接插件、磁性元件、板级组件(PCBA)在电应力和环境应力作用下的典型失效机理及其数理模型。

本书适用于从事电子元器件研制、生产和元器件选用的工程技术人员、质量管理人員和可靠性工作者学习参考,也可供高校有关专业的教师 and 研究生阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性物理/恩云飞,谢少锋,何小琦编著;工业和信息化部电子第五研究所组编. —北京:电子工业出版社,2015.10

(可靠性技术丛书)

ISBN 978-7-121-27232-5

I. ①可… II. ①恩… ②谢… ③何… ④工… III. ①电子元件—可靠性—研究 ②电子器件—可靠性—研究 IV. ①TN6

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第226020号

策划编辑:张 榕

责任编辑:张 迪

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:720×1000 1/16 印张:27.75 字数:560千字

版 次:2015年10月第1版

印 次:2015年10月第1次印刷

印 数:3500册 定价:88.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

丛 书 序

以可靠性为中心的质量是推动经济社会发展永恒的主题，关系国计民生，关乎发展大局。把质量发展放在国家和经济发展的战略位置全面推进，是国际社会普遍认同的发展规律。加快实施制造强国建设，必须牢牢把握制造业这一立国之本，突出质量这一关键内核，把“质量强国”作为制造业转型升级、实现跨跃发展的战略选择和必由之路。

质量是建设制造强国的生命线。作为未来10年引领制造强国建设的行动指南和未來30年实现制造强国梦想的纲领性文件，《中国制造2025》将“质量为先”列为重要的基本指导方针之一。在制造强国建设的伟大进程中，必须全面夯实产品质量基础，不断提升质量品牌价值和“中国制造”综合竞争力，坚定不移地走以质取胜的发展道路。

高质量是先进技术和优质管理高度集成的结果。提升制造业产品质量，要坚持从源头抓起，在产品的设计、定型、制造的全过程中按照先进的质量管理标准和技术要求去实施。可靠性是产品性能随时间的保持能力。作为衡量产品质量的重要指标，可靠性管理也充分体现了现代质量管理的特点。《中国制造2025》提出要加强可靠性设计、试验与验证技术开发应用，使产品的性能稳定性、质量可靠性、环境适应性、使用寿命等指标达到国际同类产品先进水平，就是要将可靠性技术作为核心应用于质量设计、控制和质量管理，在产品全寿命周期各阶段，实施可靠性系统工程。

工业和信息化部电子第五研究所是国内最早从事电子产品质量与可靠性研究的权威机构，在我国的质量可靠性领域开创了许多“唯一”和“第一”：唯一一个专业从事质量可靠性研究的技术机构；开展了国内第一次可靠性培训；研制了国内第一套环境试验设备；第一个将质量“认证”概念引入中国；建立起国内第一个可靠性数据交换网；发布了国内第一个可靠性预计标准；研发出第一个国际先进、国内领先水平的可靠性、维修性、保障性工程软件和综合保障软件……五所始终站在可靠性技术发展的前沿。随着质量强国战略的实施，可靠性工作在我国得到空前的重视，在新时期的作用日益凸显。五所的科研工作者们深深感到，应系统地梳理可靠性技术的要素、方法和途径，全面呈现该领域的最新发展成果，使之广泛应用于工程实践，并在制造强国和质量强国建设中发挥应有作用。鉴于此，五所在建所60周年之际，组织专家学者编写出版了“可靠性技术丛书”。这既是历史的责任，又是现实的需要，具有重要意义。

“可靠性技术丛书”内容翔实，涉及面广，实用性强。它涵盖了可靠性的设计、工艺、管理，以及设计生产中的可靠性试验等各个技术环节，系统地论述了提升或

保证产品可靠性的专业知识，可在可靠性基础理论、设计改进、物料优选、生产制造、试验分析等方面为产品设计、开发、生产、试验及质量管理等从业者提供重要的技术参考。

质量发展依赖持续不断的技术创新和管理进步。以高可靠、长寿命为核心的高质量是科技创新、管理能力、劳动者素质等因素的综合集成。在举国上下深入实施制造强国战略之际，希望该丛书的出版能够广泛传播先进的可靠性技术与管理方法，大力推动可靠性技术进步及实践应用，积极推进专业队伍建设。帮助广大的科技工作者和工程技术人员，为我国先进制造业发展，落实好《中国制造 2025》发展战略，在新中国成立 100 周年时建成世界一流制造强国贡献力量！



前言

PREFACE

可靠性物理 (Reliability Physics) 又称失效物理 (Physics of Failure), 它是 20 世纪 60 年代伴随可靠性技术发展而兴起的一门边缘学科, 是研究电子产品在各种应力下发生失效的内在原因及其机理的科学, 这门科学的发展使可靠性工程技术从传统的数理统计方法发展到现代的统计与理化分析相结合的新阶段。对于电子元器件而言, 可靠性物理就是从原子和分子的角度阐明与元器件及材料失效相关的内部物理、化学过程, 电子元器件可靠性物理研究的任务, 就是观察元器件失效模式和探求失效机理, 发现导致元器件失效的根本原因, 为改进元器件质量和提高元器件可靠性提供科学依据。

从可靠性物理学发展的时间坐标看, 可靠性物理起源于美军电子产品失效控制的需求, 伴随着半导体器件大量应用和失效分析而在 50 多年间快速进步和发展。学术界认为, 1962 年 9 月美国空军 (United States Air Force, USAF) 罗姆空间发展中心 (Rome Air Development Command, RADC) 发起并组织召开的第一届“失效物理 (Physics of Failure) 研讨会”是可靠性物理发展并正式走到台前的起点; 1967 年的第六届失效物理研讨会, 美国电气与电子工程师协会 (IEEE) 的电子器件分会与可靠性分会共同主办, 并由此更名为“国际可靠性物理讨论会”的年度会议, 该研讨会侧重半导体器件和大规模集成电路的失效分析及失效机理的探索。自 1962 年以来, 国际上失效物理的研究始终活跃, 不断有新机理发现和技术创新在文献中报道。20 世纪 60 年代, 针对半导体器件大量应用带来的严重失效问题, 首次研究了微电子器件可靠性物理, 如金属 Al 膜电迁移开路、MOS 器件的负偏压偏置不稳定效应、SiO₂ 绝缘层负充电或正充电状态, 发现和解决了半导体器件自身固有的可靠性问题; 70 年代, 针对半导体器件在恶劣环境下的退化问题, 研究获得了典型失效机理的激活能并建立了失效物理模型, 如首次实验获得金铝键合失效激活能为 0.690eV、水汽作用下铝丝键合部位生长白毛和微电路中金离子迁移的短路现象、封装材料中产生 α 粒子引起动态存储器介质击穿问题; 80~90 年代, 针对微电子器件批量生产质量控制不当带来的失效问题, 研究了人体污染 (包括皮肤、头发、汗液、唾液等) 造成器件失效的分析方法及控制措施, 以及采用聚焦离子束 (FIB) 对大规模集成电路进行

金属布线去除、填充等微区失效定位和失效分析技术；2000—2015年，针对MCM、SiP等高密度封装互连退化和失效的热点问题，研究了MCM多热源和多层布线基板散热问题，SiP组件硅片堆叠（SD）、芯片互连通孔（TSV）、组装堆叠（PoP）和封装堆叠（PiP）微互连结构失效物理问题，通过失效机理研究大大推动了微电路高密度封装技术的进步。在此期间，国内外学者编写并出版了失效物理相关书籍，如1969年日本盐见弘著的《故障物理入门》、1987年高光博等编著的《半导体器件可靠性物理》、2004年姚立真编著的《可靠性物理》、2010年Johan Liu等著的《Reliability of Microtechnology: Interconnects, Devices and Systems》和J.W. McPherson著的《Reliability Physics and Engineering: Time-To-Failure Modeling》，这些书籍研究总结了所在年代的电子元器件和微电路互连的失效物理研究成果，为后人在此领域的研究和工程应用提供了基础和经验。

但随着21世纪微电子器件向纳米尺度飞速发展、微机电技术与微电子技术的融合、高密度封装技术结构和材料的创新，以及可靠性工程技术的不断进步，仍有两方面的需求成为人们持续开展可靠性物理研究的动力。首先，新材料、新工艺和新器件在现代电子系统中大量应用，新的或潜在的失效机理成为电子系统新的隐患，已知的、未知的失效机理及其数理模型需要不断研究和积累，以满足产品可靠性提升对失效根本原因分析的需求；其次，可靠性工程技术的现代发展，已从单一的数理统计方式逐步过渡到统计与失效物理分析相结合的方式，使人们对如何应用可靠性物理支撑可靠性工程产生了极大的兴趣，如根据失效机理及敏感参数进行可靠性筛选，根据数理模型进行可靠性寿命试验设计和可靠性评价，针对工艺过程的失效机理进行生产质量控制、针对主要失效机理进行可靠性设计，由此可见科学的可靠性评价、质量控制，以及数据统计无不以失效物理及其数理模型为基础。

可以这样认为，电子元器件可靠性物理是可靠性工程的核心基础，也是电子元器件技术，特别是微电子技术发展的保证，是现代新型电子器件、新型机电元件、新型高密度封装组件工程应用的助推器。

本书基于可靠性工程对元器件可靠性物理基础理论及数理模型应用技术的需求，在总结了可靠性物理基本概念和经典失效物理模型的基础上，结合前人及近十年国内外最新研究成果，系统地论述了11类电子元器件的失效机理及相关数理模型，以期望让读者更好理解和科学应用。本书从可靠性物理的基本概念、物理模型、数学模型三个方面描述了各类电子元器件的失效物理和化学过程，并结合电子元器件的工艺和结构特点，深入浅出地介绍了元器件的典型失效机理及数理模型。本书作者长期从事电子元器件可靠性技术研究，承担过多种门类元器件失效物理分析及应用技术研究项目，积累了丰富的电子元器件失效物理研究素材和实验数据，为本书的编写奠定了基础。在本书编写过程中，同时参考了可靠性物理学及相关领域的大

量文献、专著和资料，通过总结提炼并结合作者的研究成果，完成本书编著。本书共 13 章，各章执笔分别是：第 1、2 章恩云飞、何小琦、谢少锋、陈义强，第 3 章章晓文，第 4 章来萍、黄云、曾畅，第 5 章路国光、黄云，第 6 章何小琦，第 7 章宋芳芳，第 8 章黄钦文，第 9、10 章蔡伟、莫富尧、李少平，第 11 章何小琦、罗宏伟、杨少华，第 12 章方文啸，第 13 章周斌。恩云飞、谢少锋、何小琦负责全书的组织、策划、汇总和校审工作，其他执笔人分别负责了相关章节的审阅工作。

在本书的编写过程中，参阅了中国电子产品可靠性与环境试验研究所前辈盛志森、郑廷圭、杨晋泰等人编写的“可靠性物理”研究资料，以及本实验室同事提供的可靠性文献、资料，在此表示衷心的感谢。

由于可靠性物理学是一门涉及半导体物理学、器件工艺学、材料学、化学、冶金学、电子学、力学、热学、环境工程学和系统工程学等多学科的综合性新兴边缘学科，许多新型元器件的失效物理科学问题并非十分清晰，需要不断研究和探索，因此书中难免有不妥和错误之处；同时，电子元器件门类很多，失效物理涉及面广、问题复杂，受篇幅所限，加之我们的经验和知识水平有限，所以本书没有对所有门类元器件的失效物理及数理模型一一论述。书中不足之处，敬请读者批评指正。

编著者

2015 年 6 月 于广州

目录

CONTENTS

第 1 章 可靠性物理的基本概念	(1)
1.1 可靠性物理的含义.....	(1)
1.2 失效及失效类型.....	(2)
1.3 可靠性物理及其发展.....	(4)
1.4 影响可靠性的关键因素.....	(5)
1.4.1 电子材料.....	(5)
1.4.2 应力与环境.....	(9)
1.5 可靠性物理研究的内容及意义.....	(14)
参考文献.....	(15)
第 2 章 失效物理模型	(17)
2.1 界面模型.....	(17)
2.2 耐久模型.....	(18)
2.3 应力-强度模型.....	(19)
2.4 基于反应速度论的模型.....	(20)
2.5 最弱环模型.....	(22)
2.6 并联模型.....	(22)
2.7 累积损伤模型.....	(23)
2.8 竞争失效模型.....	(23)
参考文献.....	(24)
主要符号表.....	(25)
第 3 章 微电子器件失效机理及数理模型	(27)
3.1 工艺结构和工作原理.....	(27)
3.1.1 二极管的工艺结构和工作原理.....	(27)
3.1.2 三极管的工艺结构和工作原理.....	(27)
3.1.3 功率 MOSFET 的工艺结构和工作原理.....	(28)
3.1.4 集成电路的工艺结构和工作原理.....	(29)
3.2 主要失效模式.....	(30)
3.2.1 失效模式的定义.....	(30)

3.2.2	主要失效模式	30
3.3	失效机理及数理模型	32
3.3.1	与芯片有关的失效机理	33
3.3.2	与封装有关的失效机理	61
3.3.3	与应用有关的失效机理	65
	参考文献	78
	英文缩略词及术语	79
	主要符号表	79
第 4 章	微波器件失效机理及数理模型	83
4.1	硅微波器件失效机理及数理模型	84
4.1.1	硅微波功率晶体管的工艺结构和工作原理	85
4.1.2	硅微波器件的主要失效模式	92
4.1.3	硅微波功率管的失效机理及数理模型	93
4.2	GaAs 微波器件失效机理及数理模型	99
4.2.1	GaAs 器件的工艺结构和工作原理	100
4.2.2	GaAs 器件及 MMIC 的主要失效模式	103
4.2.3	GaAs 器件及 MMIC 的失效机理及数理模型	104
4.3	GaN 微波器件失效机理及数理模型	113
4.3.1	GaN 器件的工艺结构和工作原理	115
4.3.2	GaN 器件的主要失效模式	119
4.3.3	GaN 器件的失效机理及数量模型	120
	参考文献	128
	英文缩略词及术语	132
	主要符号表	133
第 5 章	光电子器件失效机理及数理模型	134
5.1	半导体激光器的失效机理及数理模型	134
5.1.1	工艺结构和工作原理	135
5.1.2	半导体激光器主要失效模式	136
5.1.3	半导体激光器的失效机理及数理模型	138
5.2	发光二极管的失效机理及数理模型	146
5.2.1	发光二极管器件结构及工艺	147
5.2.2	发光二极管主要失效模式	148
5.2.3	发光二极管的失效机理及数理模型	150
5.3	红外焦平面探测器的失效机理及数理模型	168
5.3.1	器件结构及工艺	169

5.3.2	主要失效模式	(171)
5.3.3	失效机理及数理模型	(172)
	参考文献	(176)
	英文缩略词及术语	(181)
	主要符号表	(182)
第 6 章	高密度封装电路失效机理及数理模型	(183)
6.1	高密度封装电路结构	(184)
6.1.1	HIC 分类及封装结构	(184)
6.1.2	MCM 分类及封装结构	(189)
6.1.3	SiP 组件分类及封装结构	(196)
6.2	主要失效模式	(203)
6.2.1	导致电路失效的应力	(203)
6.2.2	HIC 失效模式	(204)
6.2.3	MCM 失效模式	(213)
6.2.4	SiP 失效模式	(220)
6.3	失效机理及数理模型	(225)
6.3.1	双金属键合界面退化	(225)
6.3.2	芯片焊接退化失效	(227)
6.3.3	芯片破裂	(227)
6.3.4	芯片过热损伤	(229)
6.3.5	导电胶粘接老化失效	(230)
6.3.6	金属布线腐蚀失效	(231)
6.3.7	薄膜多层互连退化	(232)
6.3.8	TSV 互连开路短路	(234)
6.3.9	叠层裸芯片破裂	(235)
6.3.10	芯片倒装焊 (FC) 互连凸点退化	(236)
6.3.11	PoP 封装翘曲及焊点疲劳	(237)
	参考文献	(238)
	英文缩略词及术语	(240)
	主要符号表	(240)
第 7 章	真空电子器件失效机理及数理模型	(243)
7.1	行波管失效机理及数理模型	(243)
7.1.1	行波管工艺结构和工作原理	(243)
7.1.2	行波管主要失效模式及失效原因	(247)
7.1.3	失效机理及数理模型	(251)

7.2	速调管失效模式和失效机理	(257)
7.2.1	速调管工艺结构和工作原理	(257)
7.2.2	速调管主要失效模式	(261)
7.2.3	速调管主要失效机理和失效原因	(262)
	参考文献	(267)
	主要符号表	(267)
第 8 章	MEMS 失效机理及数理模型	(268)
8.1	MEMS 结构特点及其工作原理	(268)
8.1.1	MEMS 的概念及范围	(268)
8.1.2	MEMS 结构分类	(269)
8.1.3	MEMS 工艺特点	(270)
8.2	主要失效模式和失效机制	(272)
8.3	失效机理及数理模型	(274)
8.3.1	粘连	(274)
8.3.2	断裂	(286)
8.3.3	材料疲劳	(293)
8.3.4	蠕变	(295)
8.3.5	磨损	(298)
	参考文献	(299)
	英文缩略词及术语	(301)
	主要符号表	(301)
第 9 章	电阻器失效机理及数理模型	(303)
9.1	工艺结构和工作原理	(303)
9.1.1	薄膜电阻器的工艺结构和工作原理 ^[2]	(303)
9.1.2	厚膜电阻器的工艺结构和原理	(304)
9.1.3	电位器的工艺结构和工作原理 ^[3]	(305)
9.2	电阻器的主要失效模式	(307)
9.3	电阻器的失效机理及数理模型	(308)
9.3.1	金属膜电阻器的失效机理及数理模型	(308)
9.3.2	碳膜电阻器的失效机理及数理模型 ^[6]	(311)
9.3.3	厚膜电阻器的失效机理及数理模型	(313)
9.3.4	电位器的主要失效机理及数理模型	(316)
	参考文献	(317)
第 10 章	电容器失效机理及数理模型	(318)
10.1	电容器的工作原理和工艺结构	(318)

10.1.1	铝电解电容器的工艺及结构特点	(319)
10.1.2	钽电解电容器的工艺及结构特点	(320)
10.1.3	陶瓷电容器的工艺及结构特点	(323)
10.2	电容器的主要失效模式	(323)
10.3	电容器的失效机理及数理模型	(324)
10.3.1	铝电解电容器的失效机理及数理模型 ^[5]	(324)
10.3.2	钽电解电容器的失效机理及数理模型 ^[6]	(327)
10.3.3	陶瓷电容器的失效机理及数理模型	(329)
	参考文献	(335)
第 11 章	继电器、接插件失效机理及数理模型	(336)
11.1	工艺结构和工作原理	(336)
11.1.1	继电器结构和工作原理	(336)
11.1.2	接插件结构和工作原理	(337)
11.2	主要失效模式 ^[2]	(340)
11.2.1	继电器失效	(341)
11.2.2	接插件失效	(344)
11.3	失效机理及数理模型 ^[2]	(347)
11.3.1	接触不良及电阻特性	(347)
11.3.2	接点粘接失效	(355)
11.3.3	接点的电腐蚀	(356)
	参考文献	(357)
	英文缩略词及术语	(358)
	主要符号表	(358)
第 12 章	磁性元件失效机理及数理模型	(360)
12.1	工艺结构和工作原理	(360)
12.1.1	铁氧体软磁材料	(361)
12.1.2	永磁材料	(362)
12.2	主要失效模式	(364)
12.2.1	烧毁	(364)
12.2.2	磁饱和	(365)
12.2.3	失磁	(366)
12.3	失效机理及数理模型	(366)
12.3.1	损耗	(367)
12.3.2	过热	(370)
12.3.3	励磁涌流	(371)

12.3.4 退磁	(373)
参考文献	(376)
主要符号表	(378)
第 13 章 PCBA 失效机理及数理模型	(380)
13.1 工艺结构和工作原理	(380)
13.1.1 通孔插装技术	(380)
13.1.2 表面组装技术	(381)
13.2 主要失效模式	(384)
13.2.1 焊点开路	(384)
13.2.2 焊点间短路	(385)
13.2.3 PCB 内部短路	(385)
13.2.4 PCB 镀覆孔开路	(385)
13.2.5 PCB 爆板	(386)
13.2.6 焊点表面裂纹	(387)
13.2.7 焊点脱落	(387)
13.2.8 枕头效应	(388)
13.2.9 立碑	(389)
13.2.10 腐蚀短路	(390)
13.3 失效机理和数理模型	(390)
13.3.1 焊点蠕变	(390)
13.3.2 低周热疲劳	(392)
13.3.3 高周振动疲劳	(396)
13.3.4 焊料电迁移	(402)
13.3.5 Kirkendall 空洞	(408)
13.3.6 板面枝晶生长	(409)
13.3.7 导电阳极丝	(411)
13.3.8 ENIG 黑焊盘	(413)
13.3.9 锡须	(415)
13.3.10 金脆	(420)
13.3.11 爬行腐蚀	(421)
参考文献	(422)
英文缩略词及术语	(424)
主要符号表	(425)

第1章

可靠性物理的基本概念

1.1 可靠性物理的含义

迅速发展的电子技术使我们今天要面对各种各样的产品，无论是哪种产品，在其寿命周期中都要面对失效。产品一旦发生失效，对有些产品意味着寿命已经終了，而对另外一些产品，通过更换部件、隔离失效部位等可完全恢复或部分恢复其功能。当产品丧失或部分丧失规定的功能，我们称为失效。对于可修复的产品，如机电组件、电路板、设备、整机系统等，这种失效通常称为故障^[1]。为方便叙述，本书统称为失效。

产品的失效，不仅指致命性的破坏或完全丧失功能，也指功能、特性降低到不能满足规定的要求。因此，判断产品的失效就必须首先确定其失效判据或标准，判据不明确，会造成生产检验上、供需验收上及维修服务等方面的混乱和分歧。

失效模式是指产品失效的形式、形态及现象，是产品失效的外在宏观表现。不同类别的产品失效模式各不相同。对于电子产品，最直接的失效模式有开路、短路、时开时断、功能异常、参数漂移等。

导致电子产品失效的原因是多种多样的。有因零部件本身的缺陷；有因系统、电路设计不当或装配欠佳；有因人为使用不当与差错致使系统的失效。无论是什么原因引起的产品失效，都是外因与内因共同作用的结果。引起电子产品失效的外因可以是环境应力、电应力、机械应力等，内因则是在其材料、结构中的一系列物理、化学变化。我们通常将这种内在原因称为失效机理。所谓失效机理，是指产品失效的物理、化学变化，这种变化可以是原子、分子、离子的变化，是失效发生的内在本质。但无论何种原因，都有一个共同点，即来自环境条件、工作条件的能量积聚，一旦超过某个限度，产品便开始劣化，直至失效。这种劣化的诱因——环境条件、工作条件等，一般称为应力，应力只是诱因。产品总是经过一段时间的演变



后才失效，因此产品在劣化过程中，时间也是一种应力。

上述包括时间在内的应力是产生失效的外因。而失效的内因，也即导致发生失效的物理、化学或机械的过程，称为失效物理。它是从原子或分子学观点来阐明与失效有关的物理、化学过程的。产品失效的形式、形态、现象称为失效模式。如果拿疾病来做比喻，失效模式相当于基本病症，而失效机理则相当于病理。研究失效机理的科学称为失效机理学，简称失效物理，或称为可靠性物理。

1.2 失效及失效类型

当产品质量控制不当引入的材料、工艺缺陷，由产品设计不当引入的设计缺陷，老化、筛选、装配中应力选择不当或环境控制不当引入的损伤，部件固有的可靠性问题，使用中工作应力和环境应力引入的可靠性问题，以及人为因素造成的可靠性问题等，都会导致产品失效。无论是什么原因引起的产品失效，都是外因与内因共同作用的结果。

由于电子产品门类多、结构复杂、材料多样，其失效分类也较复杂。若按失效发生的起因，可分为设计上的失效、工艺上的失效和使用上的失效；按失效的起源可分为自然失效和人为失效；按同其他失效的关系，可分为独立失效和从属失效；而按失效率浴盆曲线上不同阶段分，又可分为早期失效、偶然（或随机失效）、耗损（或老化）失效等。因此，人们较常用的失效类型名词，包括现场失效、致命失效、退化失效、间歇失效、人为失效、从属失效、早期失效、偶然失效和耗损失效等。

从研究和失效控制的角度，一般可以按照失效机理、失效时间特征，以及失效后果对产品的失效进行分类^[2]：

1. 按失效机理的失效分类

按照失效机理，电子产品的失效可以分为结构性失效、热失效、电失效、腐蚀性失效等。

(1) 结构性失效是指产品的结构件由于材料的损伤或蜕变而造成的失效，如疲劳断裂、磨损、变形等。对于电子产品，结构性失效主要是由于结构件的材料特性及受到的机械应力造成的，有时候也与热应力和电应力有关。

(2) 热失效是指产品由于过热或急剧温度变化而导致的烧毁、熔融、蒸发、迁移、断裂等失效。对于电子产品，热失效主要是由于热应力造成的，但往往也与产品的结构设计、材料选择有关。

(3) 电失效是指产品由于过电或长期电应力作用而导致的烧毁、熔融、参数漂

移或退化等失效。对于电子产品，电失效主要是由于电应力造成的，但与材料缺陷、结构密切相关。

(4) 腐蚀性失效是指产品受到化学腐蚀、电化学腐蚀，或材料出现老化、变质而造成的失效。对于电子产品，腐蚀性失效主要是由于腐蚀性物质（如酸、碱等）的侵入或残留造成的，也与外部的温度、湿度、电压等因素有关。

2. 按失效时间特征的失效分类

按照失效时间特征，电子产品的失效可以分为早期失效、偶然失效和耗损失效。

(1) 早期失效是由材料缺陷或制造过程中引入的缺陷等造成的失效，这时产品的失效率往往较高。可以通过特定的老化、筛选来剔除有缺陷的产品，使失效率很快降低并稳定下来。对于电子产品，早期失效的原因有材料缺陷、设计缺陷、制造过程引入的缺陷等。要减少产品的早期失效，必须明确引起失效的缺陷及产生途径，并加以有效控制。

(2) 偶然失效是由随机发生的事件引起的失效，这时产品失效发生的概率较小且具有随机性。要预防和控制偶然失效的发生，同样需要寻找失效发生的根源。对于电子产品，引起偶然失效的原因有设计裕度不当、潜在缺陷、偶发应力、人为因素等。

(3) 耗损失效是由于长期工作或恶劣环境造成产品性能、功能发生不可逆变化而引起的失效，这时产品的失效率快速增大，最终至全部产品失效。对于电子产品，引起耗损失效的原因有原子/离子迁移、界面效应、辐射效应、热电效应、电化学腐蚀、磨损、断裂、疲劳等。

3. 按失效后果的失效分类

按照失效后果，电子产品的失效可以分为退化失效、功能失效、间歇失效等。

(1) 退化失效是电子产品一个或多个参数，或产品的某个局部特性发生退化性变化直至达不到规定要求而失效。退化失效是一个渐变的过程。对于电子产品，引起退化失效的原因有长期应力作用、材料互扩散、电化学腐蚀、金属原子迁移等。

(2) 功能失效是电子产品部分丧失或完全丧失规定的功能而失效。对于电子产品，引起功能失效的原因有过应力、退化引起的性能突变、腐蚀等。

(3) 间歇失效是电子产品在试验或使用中出现的时好时坏的失效。对于电子产品，引起间歇失效的原因有导电多余物、沾污、金属间化合物生成、应力导致的裂缝等。

研究失效的目的就是要确认失效现象，分辨失效模式，明确失效机理，查找失效原因，提出改进措施，从而提升产品的可靠性。