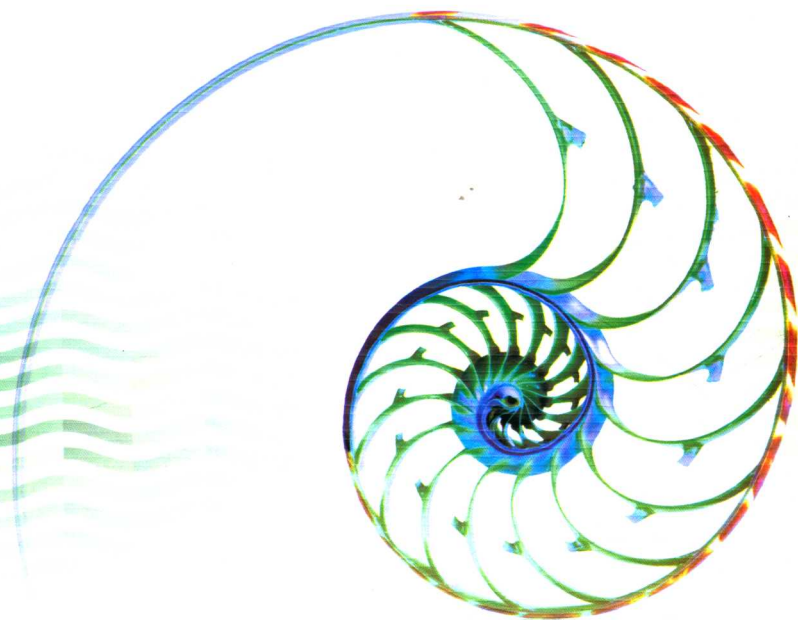


可靠性技术丛书

工业和信息化部电子第五研究所 组编



电子元器件 失效分析技术

◎ 恩云飞 来萍 李少平 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

电子元器件失效分析技术

工业和信息化部电子第五研究所 组编

恩云飞 来萍 李少平 编著

编写组成员：师谦 许广宁 何小琦

何胜宗 宋芳芳 陈媛

陈选龙 邹雅冰 杨少华

罗宏伟 林晓玲 林道谭

武慧薇 袁光华 黄云伟

章晓文 路国光 蔡伟

蔡金宝

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了电子元器件失效分析技术。全书共 19 章。第一篇电子元器件失效分析概论,分两章介绍了电子元器件可靠性及失效分析概况;第二篇失效分析技术,用 7 章的篇幅较为详细地介绍了失效分析中常用的技术手段,包括电测试、显微形貌分析、显微结构分析、物理性能探测、微区成分分析、应力试验和解剖制样等技术;第三篇电子元器件失效分析方法和程序,介绍了通用元件、机电元件、分立器件与集成电路、混合集成电路、半导体微波器件、板级组件和电真空器件共 7 类元器件的失效分析方法和程序;第四篇电子元器件失效预防有 3 章内容,包括电子元器件失效模式及影响分析方法(FMEA)、电子元器件故障树分析(FTA)和工程应用中电子元器件失效预防。

本书是作者总结多年的研究成果和工作经验编写而成的,可供从事电子元器件失效分析的技术人员学习,也可供电子元器件研制、生产和元器件选用的工程技术人员、质量管理人员和可靠性工作者参考,还可供高校有关专业的教师和研究生阅读。

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

电子元器件失效分析技术 / 恩云飞, 来萍, 李少平编著; 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 978-7-121-27230-1

I. ①电… II. ①恩… ②来… ③李… ④工… III. ①电子元件—失效分析②电子器件—失效分析 IV. ①TN6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 226319 号

策划编辑: 张 榕

责任编辑: 张 京

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: 720×1 000 1/16 印张: 29.75 字数: 618.8 千字

版 次: 2015 年 10 月第 1 版

印 次: 2015 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 3 500 定价: 98.00 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。

可靠性技术丛书编委会

主 任 谢少锋

副主任 王 勇 陈立辉

委 员 (按姓氏笔画排序)

王晓晗 王蕴辉 刘尚文 纪春阳

张 铮 张增照 张德平 罗道军

赵国祥 胡湘洪 莫郁薇 恩云飞

潘 勇

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来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

电子元器件失效分析 (Failure Analysis) 是对已失效元器件进行的一种事后检查。根据需要, 使用电测试及必要的物理、金相和化学分析技术, 验证所报告的失效, 确定其失效模式, 找出失效机理。失效分析技术就是开展失效分析中采用的所有技术。电子元器件失效分析技术是开展可靠性工程的支撑技术, 属于可靠性物理及其应用技术的范畴。

可靠性物理学 (Reliability Physics) 又称失效物理学 (Failure Physics), 是 20 世纪 60 年代后期崛起的一门新兴的边缘学科, 是在半导体器件物理、半导体工艺学、材料化学、冶金学、电子学、环境工程学和系统工程学等多学科基础上发展起来的并从半导体器件扩展到其他电子元器件和电子产品。可靠性物理学的主要任务是研究产品的失效模式, 探究失效机理 (即导致失效的物理、化学过程及有关现象, 有时需要深入到原子和分子层面), 从而为电子产品的可靠性设计、生产控制、可靠性增长与评价、使用和维护提供科学的依据。

失效分析技术是开展可靠性物理学研究及工程应用的核心和关键技术。不同于其他产品的失效分析技术, 元器件的失效分析技术在空间观察尺度上需要深入到微米 (10^6m) 甚至纳米级 (10^9m), 在微区成分分析上要精确到 ppm (10^6) 甚至 ppb (10^9) 级。所谓“工欲善其事, 必先利其器”。因此, 本书第一篇简要介绍电子元器件可靠性及失效分析技术概况后, 第二篇用较大篇幅对各种失效分析技术进行了重点阐述。在开展元器件失效分析时, 首先要采用电气测试技术对失效现象、失效模式进行确认; 而显微形貌和显微结构分析技术则在微米和纳米尺度对元器件进行观察和分析, 以发现元器件内部的失效现象和区域; 物理性能探测技术则对元器件在特定状态下激发产生的微量光、热、磁等信息进行提取和分析, 以确定失效部位、分析失效机理; 微区成分分析技术用来对内部微小区域的微量成分进行分析; 应力试验技术通过施加各种应力对元器件进行失效再现或验证; 解剖制样技术则是开展失效分析的基本手段, 如开展透射显微镜 (TEM) 分析时, 就需要采用聚焦离子束 (FIB) 对元器件进行定点制样和提取。

具备了各种失效分析技术手段后, 还必须采用适当的方法、遵循合理的程序开展失效分析。由于各类元器件的材料、结构和工艺特点不同, 在失效分析方法和程序上既有相同点又有不同点。因此, 本书第三篇中以 7 种主要元器件门类为对象介

绍了相应的失效分析方法和程序。开展元器件失效分析，首先必须了解和掌握各类元器件的主要材料、工艺和结构及主要的失效模式和失效机理；然后根据元器件的失效背景信息和失效现象，选择合适的分析技术和手段，遵循合理的分析程序，以求快速而准确地确定失效机理，找到失效原因。

只有从失效分析入手，取得前期同类产品在生产、试验及使用中的失效信息，分析其失效模式及失效机理，联系产品结构、材料和工艺，揭示其失效的内在原因，才能根据新产品的可靠性要求，进行可靠性设计和工艺改进，并对失效进行控制和预防，从而提高产品的可靠性。本书第四篇介绍的电子元器件失效模式及影响分析方法（FMEA）是开展产品可靠性设计和工艺改进的基础，电子元器件故障树分析方法（FTA）则为元器件的故障归零提供了标准化的元器件级 FTA 方法，而工程应用中电子元器件失效预防方法从潮敏、机械、腐蚀、静电放电、门锁、假冒翻新等几个方面阐述了失效预防的必要性和具体的技术手段。

总体来说，元器件失效分析技术是开展元器件质量和可靠性工作的基本手段，是可靠性工程的重要技术支撑。希望本书的出版能为开展失效分析的工程技术人员提供帮助，并希望吸引更多的人加入到元器件失效分析技术研究和工程应用的行列中来。

本书作者长期从事电子元器件失效分析技术研究，并承担和开展了大量失效分析工作，既有很好的技术理论积累，也有丰富的工程应用经验，为本书的编写奠定了基础。在本书编写过程中，还参考了失效分析技术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和工作成果，完成了本书的编写。本书共有四篇 19 章，各章执笔分别是：第 1、2 章由恩云飞、来萍、李少平、罗宏伟编写，第 3 章由师谦编写，第 4、9 章由林晓玲编写，第 5 章由陈媛编写，第 6 章由林晓玲、宋芳芳编写，第 7 章由路国光编写，第 8、11 章由杨少华编写，第 10 章由蔡伟编写，第 12 章由章晓文、陈选龙编写，第 13 章由何小琦编写，第 14 章由许广宁、黄云编写，第 15 章由邹雅冰编写，第 16 章由宋芳芳编写，第 17 章由陈媛、来萍编写，第 18 章由何小琦、陈媛编写，第 19 章由李少平、何胜宗、林道谭、武慧薇、袁光华和蔡金宝编写。恩云飞、来萍、李少平负责全书的组织、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郑廷圭、徐爱斌、刘发等人编写的《半导体器件失效分析》等研究资料，本实验室同事提供了可靠性文献、资料，在此表示衷心的感谢。

随着元器件技术的不断进步，失效分析技术也在迅速发展，加之作者经验和知识水平的限制，一些最新的失效分析技术可能没有涉及，或者已有的内容存在不妥或错误之处，请读者批评指正。

编著者

目录

CONTENTS

第一篇 电子元器件失效分析概论

第 1 章 电子元器件可靠性	(2)
1.1 电子元器件可靠性基本概念	(2)
1.1.1 累积失效概率	(2)
1.1.2 瞬时失效率	(3)
1.1.3 寿命	(5)
1.2 电子元器件失效及基本分类	(6)
1.2.1 按失效机理的分类	(7)
1.2.2 按失效时间特征的分类	(7)
1.2.3 按失效后果的分类	(8)
参考文献	(8)
第 2 章 电子元器件失效分析	(9)
2.1 失效分析的作用和意义	(9)
2.1.1 失效分析是提高电子元器件可靠性的必要途径	(9)
2.1.2 失效分析在工程中有具有重要的支撑作用	(10)
2.1.3 失效分析会产生显著的经济效益	(10)
2.1.4 小结	(11)
2.2 开展失效分析的基础	(11)
2.2.1 具有电子元器件专业基础知识	(11)
2.2.2 了解和掌握电子元器件失效机理	(12)
2.2.3 具备必要的技术手段和设备	(12)
2.3 失效分析的主要内容	(13)
2.3.1 明确分析对象	(14)
2.3.2 确认失效模式	(14)
2.3.3 失效定位和机理分析	(14)
2.3.4 寻找失效原因	(14)

2.3.5	提出预防和改进措施	(15)
2.4	失效分析的一般程序和要求	(15)
2.4.1	样品信息调查	(16)
2.4.2	失效样品保护	(16)
2.4.3	失效分析方案设计	(16)
2.4.4	外观检查	(17)
2.4.5	电测试	(17)
2.4.6	应力试验分析	(18)
2.4.7	故障模拟分析	(18)
2.4.8	失效定位分析	(18)
2.4.9	综合分析	(21)
2.4.10	失效分析结论和改进建议	(21)
2.4.11	结果验证	(21)
2.5	失效分析技术的发展及挑战	(22)
2.5.1	定位与电特性分析	(22)
2.5.2	新材料的剥离技术	(22)
2.5.3	系统级芯片的失效激发	(22)
2.5.4	微结构及微缺陷成像的物理极限	(22)
2.5.5	不可见故障的探测	(23)
2.5.6	验证与测试的有效性	(23)
2.5.7	加工的全球分散性	(23)
2.5.8	故障隔离与模拟软件的验证	(23)
2.5.9	失效分析成本的提高	(23)
2.5.10	数据的复杂性及大数据量	(23)
2.6	结语	(24)
	参考文献	(24)

第二篇 失效分析技术

第3章	失效分析中的电测试技术	(26)
3.1	概述	(26)
3.2	电阻、电容和电感的测试	(27)
3.2.1	测试设备	(27)
3.2.2	电阻测试方法及案例分析	(27)
3.2.3	电容测试方法及案例分析	(29)

3.2.4	电感测试方法及案例分析	(31)
3.3	半导体器件测试	(32)
3.3.1	测试设备	(32)
3.3.2	二极管测试方法及案例分析	(34)
3.3.3	三极管测试方法及案例分析	(39)
3.3.4	功率 MOS 的测试方法及案例分析	(42)
3.4	集成电路测试	(46)
3.4.1	自动测试设备	(46)
3.4.2	端口测试技术	(47)
3.4.3	静电和门锁测试	(49)
3.4.4	IDDQ 测试	(51)
3.4.5	复杂集成电路的电测试及定位技术	(52)
	参考文献	(53)
第 4 章	显微形貌分析技术	(54)
4.1	光学显微观察及光学显微镜	(54)
4.1.1	工作原理	(54)
4.1.2	主要性能指标	(55)
4.1.3	用途	(56)
4.1.4	应用案例	(56)
4.2	扫描电子显微镜	(57)
4.2.1	工作原理	(57)
4.2.2	主要性能指标	(59)
4.2.3	用途	(60)
4.2.4	应用案例	(60)
4.3	透射电子显微镜	(61)
4.3.1	工作原理	(61)
4.3.2	主要性能指标	(62)
4.3.3	用途	(63)
4.3.4	应用案例	(64)
4.4	原子力显微镜	(65)
4.4.1	工作原理	(65)
4.4.2	主要性能指标	(66)
4.4.3	用途	(66)
4.4.4	应用案例	(67)
	参考文献	(68)

第 5 章 显微结构分析技术	(70)
5.1 概述	(70)
5.2 X 射线显微透视技术	(70)
5.2.1 原理	(70)
5.2.2 仪器设备	(78)
5.2.3 分析结果	(79)
5.2.4 应用案例	(80)
5.3 扫描声学显微技术	(84)
5.3.1 原理	(84)
5.3.2 仪器设备	(90)
5.3.3 分析结果	(90)
5.3.4 应用案例	(91)
参考文献	(92)
第 6 章 物理性能探测技术	(94)
6.1 光探测技术	(94)
6.1.1 工作原理	(94)
6.1.2 主要性能指标	(96)
6.1.3 用途	(96)
6.1.4 应用案例	(97)
6.2 电子束探测技术	(99)
6.2.1 工作原理	(99)
6.2.2 主要性能指标	(101)
6.2.3 用途	(101)
6.2.4 应用案例	(101)
6.3 磁显微缺陷定位技术	(102)
6.3.1 工作原理	(102)
6.3.2 主要性能指标	(105)
6.3.3 用途	(106)
6.3.4 应用案例	(106)
6.4 显微红外热像探测技术	(108)
6.4.1 工作原理	(108)
6.4.2 主要性能指标	(111)
6.4.3 用途	(111)
6.4.4 应用案例	(111)
参考文献	(113)

第 7 章 微区成分分析技术	(114)
7.1 概述	(114)
7.2 俄歇电子能谱仪	(114)
7.2.1 原理	(114)
7.2.2 设备和主要指标	(115)
7.2.3 用途	(117)
7.2.4 应用案例	(120)
7.3 二次离子质谱仪	(121)
7.3.1 原理	(121)
7.3.2 设备和主要指标	(123)
7.3.3 用途	(125)
7.3.4 应用案例	(126)
7.4 X 射线光电子能谱分析仪	(128)
7.4.1 原理	(128)
7.4.2 设备和主要指标	(129)
7.4.3 用途	(131)
7.4.4 应用案例	(132)
7.5 傅里叶红外光谱仪	(133)
7.5.1 原理	(133)
7.5.2 设备和主要指标	(135)
7.5.3 用途	(138)
7.5.4 应用案例	(142)
7.6 内部气氛分析仪	(142)
7.6.1 原理	(142)
7.6.2 设备和主要指标	(143)
7.6.3 用途	(146)
7.6.4 应用案例	(146)
参考文献	(147)
第 8 章 应力试验技术	(148)
8.1 应力影响分析及试验基本原则	(148)
8.2 温度应力试验	(150)
8.2.1 高温应力试验	(150)
8.2.2 低温应力试验	(151)
8.2.3 温度变化应力试验	(152)
8.3 温度-湿度应力试验	(152)

8.3.1	稳态湿热应力试验	(152)
8.3.2	交变湿热应力试验	(153)
8.3.3	潮湿敏感性试验	(154)
8.3.4	应用案例	(154)
8.4	电学激励试验	(155)
8.5	振动冲击试验	(157)
8.6	腐蚀性气体试验	(159)
	参考文献	(160)
第9章	解剖制样技术	(161)
9.1	概述	(161)
9.2	开封技术	(162)
9.2.1	机械开封	(162)
9.2.2	化学开封	(163)
9.2.3	激光开封	(165)
9.3	芯片剥层技术	(167)
9.3.1	去钝化层技术	(167)
9.3.2	去金属化层技术	(169)
9.4	剖面制样技术	(170)
9.4.1	金相切片	(170)
9.4.2	聚焦离子束剖面制样技术	(171)
9.5	局部电路修改验证技术	(173)
9.6	芯片减薄技术	(174)
	参考文献	(176)

第三篇 电子元器件失效分析方法和程序

第10章	通用元件的失效分析方法和程序	(180)
10.1	电阻器失效分析方法和程序	(180)
10.1.1	工艺及结构特点	(180)
10.1.2	失效模式和机理	(183)
10.1.3	失效分析方法和程序	(186)
10.1.4	失效分析案例	(189)
10.2	电容器失效分析方法和程序	(190)
10.2.1	工艺及结构特点	(191)
10.2.2	失效模式和机理	(194)

10.2.3	失效分析方法和程序	(195)
10.2.4	失效分析案例	(199)
10.3	电感器失效分析方法和程序	(201)
10.3.1	工艺及结构特点	(201)
10.3.2	失效模式和机理	(203)
10.3.3	失效分析方法和程序	(203)
10.3.4	失效分析案例	(204)
	参考文献	(205)
第 11 章	机电元件的失效分析方法和程序	(206)
11.1	电连接器失效分析方法和程序	(206)
11.1.1	工艺及结构特点	(206)
11.1.2	失效模式和机理	(209)
11.1.3	失效分析方法和程序	(214)
11.1.4	失效分析案例	(215)
11.2	继电器的失效分析	(222)
11.2.1	工艺及结构特点	(222)
11.2.2	失效模式和机理	(226)
11.2.3	失效分析方法和程序	(229)
11.2.4	失效分析案例	(231)
	参考文献	(237)
第 12 章	分立器件与集成电路的失效分析方法和程序	(239)
12.1	结构及工艺特点	(239)
12.1.1	分立器件的主要结构及其生产工艺	(239)
12.1.2	集成电路的主要结构及其生产工艺	(243)
12.2	失效模式和机理	(246)
12.2.1	分立器件的失效模式	(246)
12.2.2	集成电路的失效模式	(247)
12.2.3	分立器件的主要失效机理	(249)
12.2.4	集成电路的主要失效机理	(250)
12.3	失效分析方法和程序	(254)
12.3.1	分立器件的失效分析方法和程序	(254)
12.3.2	集成电路的失效分析方法和程序	(256)
12.4	失效分析案例	(265)
12.4.1	分立器件的失效分析案例	(265)
12.4.2	集成电路的失效分析案例	(266)

参考文献	(269)
第 13 章 混合集成电路的失效分析方法和程序	(271)
13.1 定义和分类	(271)
13.1.1 混合集成电路的定义	(271)
13.1.2 混合集成电路的分类	(272)
13.2 主要结构、工艺及要求	(274)
13.2.1 电路基本结构	(274)
13.2.2 厚膜成膜基片	(275)
13.2.3 薄膜成膜基片	(276)
13.2.4 多层布线基片	(278)
13.2.5 内装元器件	(282)
13.2.6 元器件组装与互连	(282)
13.2.7 外壳封装	(283)
13.3 主要失效模式和机理	(285)
13.3.1 厚膜基片及互连失效	(285)
13.3.2 薄膜基片及互连失效	(287)
13.3.3 元器件与厚膜导体的焊接失效	(288)
13.3.4 元器件与厚膜导体的黏结失效	(290)
13.3.5 元器件与薄膜基片的焊接失效	(291)
13.3.6 基板与外壳的焊接失效	(292)
13.3.7 气密性封装失效	(292)
13.3.8 功率电路过热失效	(294)
13.4 失效分析方法和程序	(295)
13.4.1 失效样品接收	(295)
13.4.2 失效信息调查	(296)
13.4.3 失效分析方案制定	(296)
13.4.4 非破坏分析	(296)
13.4.5 破坏分析	(297)
13.4.6 失效分析报告的编写	(298)
13.5 失效分析案例	(298)
参考文献	(300)
第 14 章 半导体微波器件的失效分析方法和程序	(302)
14.1 工艺及结构特点	(302)
14.1.1 微波分立器件的工艺及结构特点	(302)
14.1.2 微波单片集成电路的工艺及结构特点	(303)

14.1.3	微波组件的工艺及结构特点	(307)
14.2	失效模式和机理	(307)
14.2.1	微波分立器件的主要失效模式和失效机理	(307)
14.2.2	微波单片集成电路的主要失效模式和失效机理	(308)
14.2.3	微波组件的主要失效模式和失效机理	(309)
14.3	失效分析方法和程序	(310)
14.4	失效分析案例	(311)
	参考文献	(314)
第 15 章	板级组件的失效分析方法和程序	(315)
15.1	印制板工艺技术概述	(315)
15.1.1	印制电路技术概论	(315)
15.1.2	印制电路板失效的主要原因与机理分析	(319)
15.2	电子组装技术概述	(320)
15.2.1	电子组装工艺概述	(320)
15.2.2	焊点形成过程与影响因素	(322)
15.2.3	焊点缺陷的主要原因与机理分析	(323)
15.3	板级组件失效分析基本流程	(325)
15.4	焊点失效分析方法	(326)
15.5	板级组件的失效分析案例	(327)
15.5.1	阳极导电丝(CAF)生长失效	(327)
15.5.2	焊盘坑裂失效	(330)
15.5.3	孔铜断裂失效	(335)
	参考文献	(337)
第 16 章	电真空器件的失效分析方法和程序	(338)
16.1	工艺结构及工作原理	(338)
16.1.1	行波管的工艺结构和工作原理	(338)
16.1.2	磁控管的工艺结构和工作原理	(340)
16.1.3	速调管的工艺结构和工作原理	(343)
16.2	失效模式和机理分析	(345)
16.2.1	行波管的失效模式及机理分析	(346)
16.2.2	磁控管的失效模式及机理分析	(348)
16.2.3	速调管的失效模式及机理分析	(351)
16.3	失效分析方法和程序	(353)
16.4	失效分析案例	(360)
	参考文献	(363)