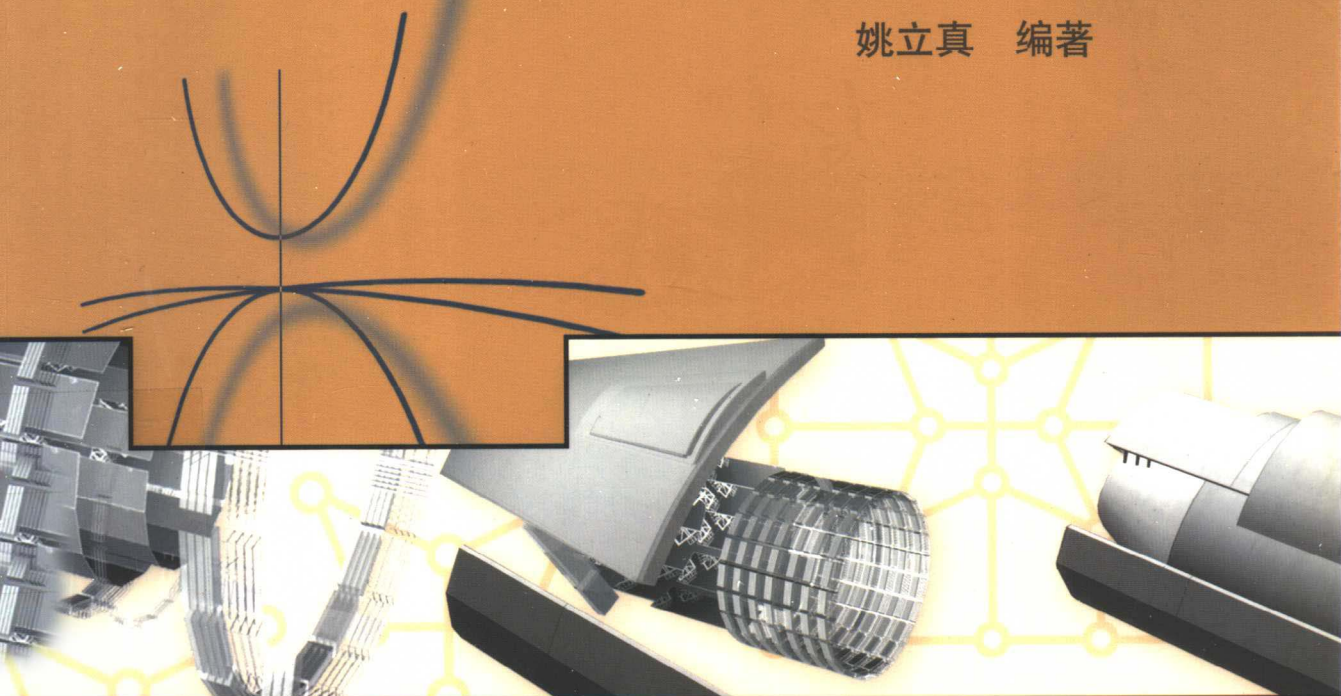


电子元器件质量与可靠性技术丛书

可靠性物理

姚立真 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电子元器件质量与可靠性技术丛书

可靠性物理

姚立真 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是“电子元器件质量与可靠性技术”丛书之一,较全面地论述并介绍了电子元器件可靠性物理的基础知识和失效分析技术。全书分为四个部分。首先阐述了电子元器件失效分析中的理论基础,包括有关原子物理学、材料学、化学、冶金学及元器件的基本工作原理,介绍了与元器件失效相关的制造工艺和技术;第二部分论述了失效的物理模型,介绍了失效分析程序、常用的失效分析方法和技术,以及用于失效分析的较先进的微理化分析技术;第三部分结合具体的元器件:微电子器件、阻容元件、继电器及连接器、光电子器件和真空电子器件,以及元器件的引线 and 电极系统的失效模式和失效机理加以剖析,提出了提高电子元器件可靠性的措施。最后阐述了元器件静电放电失效的原理和防护;元器件的辐射效应和抗辐射加固技术。

本书供从事各类电子元器件的研制、生产和使用的科技人员、管理人员、质量和可靠性工作者学习与参考,也可供高等学校电子、电工、光电子、真空电子、材料和信息类等相关专业的师生阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性物理/姚立真编著. —北京:电子工业出版社,2004.8

(电子元器件质量与可靠性技术丛书)

ISBN 7-121-00209-4

I. 可… II. 姚… III. 电子元件—可靠性物理学 IV. TN6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 079158 号

责任编辑:陈晓莉 特约编辑:李双庆

印 刷:北京兴华印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:43.5 字数:986 千字

印 次:2004 年 8 月第 1 次印刷

印 数:3000 册 定价:88.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

《电子元器件质量与可靠性技术丛书》 编审委员会

主 任：李纪南

副 主 任：汤小川 郝 跃 孔学东

委 员：罗 辑 何卫东 杨崇峰 张蜀平
赵和义 符 彬 戚 伟 贾鲲鹏
王 丽 闻俊锋 罗 雯

主 编：张鹤鸣

编 委：（按姓氏笔划排序）

王群勇	王蕴辉	冯晓丽	刘明治
庄奕琪	张德胜	杨银堂	姚立真
莫郁薇	贾新章	顾 英	彭苏娥

策划编辑：陈晓莉

序

军用电子元器件是重点工程和武器装备研制、生产的重要物质基础。电子元器件的质量与可靠性水平关系到武器装备的技术性能和作战能力,甚至决定着武器装备研制、试验乃至实战的成败。

为了提高军用电子元器件的质量与可靠性,多年来,在电子元器件研制、使用、管理等各部门的共同努力下,经过几十年的奋斗,采取了诸多有效措施,军用电子元器件整体质量水平在稳步提高,以“载人航天飞船成功返回”为代表的典型成功范例也证实了这一点。但是,应该看到,我国军用电子元器件的质量和可靠性与国际水平相比,还比较落后。部分元器件产品的质量隐患仍然存在,一些过去常见的失效模式(常见病、多发病)还时有发生,管理问题和低层次问题比较突出,少数产品暴露出来的质量问题触目惊心。电子元器件的质量和可靠性已经成了武器装备建设的“瓶颈”和“卡脖子”问题,值得我们深刻反思,警钟长鸣,常抓不懈。

随着电子产品水平的迅速提高,从 20 世纪 80 年代开始,国际上在保证和评价电子元器件质量与可靠性的观念、方法等方面均发生了很大的变化。在“可靠性是设计和制造出来的”基本观点基础上,又有了“只有在高水平的生产线上,在统计受控的条件下生产的元器件才会具有高可靠性”的共识。基于上述观点,美国军方从 1991 年开始已全面实施统计过程控制(SPC)技术。目前美国集成电路的失效率已下降至 10 非特以下。

针对世界格局的变化和发展,中央军委做出了军事装备的关键电子元器件要立足于国内的英明决策。提高电子元器件的质量和可靠性是贯彻这一决策的重要步骤。为此,总装备部电子信息基础部按照以人为本的原则,决定对军用电子元器件质量工作人员进行系统的培训。培训工作由总装备部军用电子元器件合同管理办公室组织实施,由西安电子科技大学和信息产业部电子 5 所长期从事可靠性研究和教学工作的教授和专家授课。培训内容包括:军用电子元器件质量工作的基本内容、方法以及必备的理论和基础知识。同时了解世界先进国家军用电子元器件质量与可靠性现状、质量工作的新理念和新技术以及发展趋势。

2003 年 8 月,总装备部电子信息基础部在西安举办了第一期军工骨干企业、单位质量检测中心主任培训班,取得明显成效,得到广泛好评。为了实现对军用电子元器件质量工作人员的全员培训,特组织有关教授和专家在第一期培训教材的基础上,编写了“电子

元器件质量与可靠性技术丛书”：《可靠性物理》、《可靠性工程数学》、《可靠性试验》、《统计过程控制与评价—— C_{PK} 、SPC 和 PPM 技术》和《质量与可靠性管理》。

我们相信，本套技术丛书的出版，对开展电子元器件质量工作培训，提高我国军用电子元器件质量和可靠性水平，将起到推动和促进作用。

李纪南

2004 年 7 月

前 言

本书是“电子元器件质量与可靠性技术”丛书之一,重点阐述电子元器件失效分析中的理论基础、失效的物理模型、失效分析的方法和技术、剖析电子元器件的失效模型和失效机理、静电放电失效的防护和抗辐射加固技术。

可靠性物理是涉及到材料学、物理学(包括原子物理)、化学、冶金学和各种电子元器件专业诸多学科的综合知识,失效分析中涉及到电子元器件的工作原理、结构和工艺设计、制造技术及测试和检测方法,并广泛采用各种理化分析仪器及设备进行分析与研究。这些对可靠性工作者和可靠性物理专家不断地扩充知识面和更新知识是大有好处的。

本书共分四个部分:

第一部分为电子元器件理论基础与技术基础,第1章介绍了电子元器件工作原理有关的基本理论;第2章讲述了电子元器件特别是微电子器件的制造技术及加工工艺;失效分析中涉及的基础理论。

第二部分为电子元器件的失效分析,从第3~7章,分别介绍了失效分析的概念和程序;失效分析和破坏性物理分析方法;电子元器件失效的微(理化)分析技术、失效分析事例。

第三部分为电子元器件失效模式和失效机理,从第8~13章,分别阐述了各类电子元器件的失效模式和失效机理。

第四部分由第14章和第15章组成。分别阐述了电子元器件的静电放电失效的模型、模式和防护;电子元器件的辐射效应和抗辐射的加固技术。

本书内容丰富、结构层次清晰、系统性好。编写过程中力求理论和实践相结合;分析方法尽量贯彻标准;适当地给出实例,对那些想系统了解或学习电子元器件可靠性物理的读者有一定的帮助和借鉴。由于时间紧,编写仓促,电子元器件的门类包含不够,失效的案例、失效的分析资料及国内外的分析技术与手段等调研不足,有待今后进一步补充。本人水平有限,书中有误之处,切望读者批评、指正。

本书是在总装备部电子元器件合同管理办公室领导的直接组织与支持下完成的。在编写中得到了同事们的大力帮助和热忱鼓励,各方同行朋友们在百忙中给予了文献、资料的支持,中国电子科技集团第8研究所鲁家龙、第11研究所耿晓宇、第12研究所王小勇、第44研究所魏进、成都国光电气股份有限公司雷鹏兵、国营715厂安果芒、海军701所马卫东、北京七星华创电子股份有限公司杨雪等同志亲自参与了撰写及组编;航天一院林德键、航天772所李兴鸿、中国电子科技集团第5研究所恩云飞、中国电子科技集团第4研究所胡燕、北京航空航天大学郑鹏洲同志等对本书的一些章节提出了宝贵的意见和建议;

张鹤鸣教授的精心策划,组织讨论并认真审校书稿;鼎力支持的还有各方的朋友贾新章、郝跃、张德胜、庄奕琪、陈松、杨银堂、蔡黎明和陈晓莉等;校内的老师冯晓丽和博士、硕士研究生胡辉勇、黄大鹏、朱永刚等给予了热情的帮助。在此,一并表示衷心感谢!

感谢我夫人于建华及姚东涛、姚东伟等家人!

姚立真

2004年4月于西安电子科技大学

目 录

绪 论	1
0.1 信息时代与电子元器件	1
0.1.1 21 世纪是信息时代	1
0.1.2 信息技术的发展趋势	2
0.1.3 电子元器件的发展	3
0.2 电子元器件的质量和可靠性	5
0.2.1 一代器件、一代整机、一代装备	5
0.2.2 电子元器件的定义	7
0.2.3 电子元器件可靠性物理研究的内容	8
0.2.4 电子元器件的质量和可靠性	9
第 1 章 电子元器件的理论基础	11
1.1 固体及半导体导电理论简介	11
1.1.1 晶体的基本类型	11
1.1.2 晶体的结构	14
1.1.3 晶体的能带结构	16
1.1.4 N 型和 P 型半导体	18
1.1.5 载流子的漂移与扩散	21
1.1.6 金属热电子发射和接触电势差	22
1.2 基础元件	24
1.2.1 电阻器	24
1.2.2 电感器	26
1.2.3 电容器	27
1.3 pn 结	28
1.3.1 pn 结的空间电荷区	28
1.3.2 pn 结的伏安特性	29
1.3.3 pn 结的势垒电容和扩散电容	30
1.3.4 pn 结的击穿	31
1.4 晶体三极管	33
1.4.1 半导体晶体管的发明	33
1.4.2 双极(型)晶体管的静态特性	34

1.4.3 双极晶体管的频率特性	36
1.5 半导体表面概论	36
1.5.1 半导体表面效应	36
1.5.2 功函数和氧化层电荷	38
1.6 MOS 场效应晶体管(MOSFET)	39
1.6.1 MOS 晶体管的工作原理	39
1.6.2 MOS 晶体管的电流电压方程	41
1.7 半导体的光—电子学效应	44
1.7.1 内光电效应	44
1.7.2 外光电效应	45
1.7.3 受激发射	46
1.8 真空电子器件基础	47
1.8.1 什么是电子	47
1.8.2 自由电子在静电场中的运动	47
1.8.3 电子在磁场中的运动	48
1.8.4 电子在复合电场和磁场中的运动	49
1.9 相图	49
1.9.1 一元相图	50
1.9.2 二元相图	50
1.9.3 共晶相图	52
1.9.4 包晶反应及其他反应	54
1.10 金属膜及金属化层	55
1.10.1 金属膜的电阻	56
1.10.2 金属—绝缘体(膜)接触	56
1.10.3 金属—半导体的欧姆接触	58
习题与思考题	61
第2章 电子元器件的技术基础	62
2.1 平面工艺与集成电路	62
2.1.1 硅平面型晶体管	62
2.1.2 硅平面工艺的特点	63
2.1.3 集成电路的出现	64
2.1.4 MOS 晶体管在大规模集成电路中的重要地位	65
2.1.5 微电子工艺技术	66
2.2 氧化工艺	67
2.2.1 SiO_2 膜的特性	67

2.2.2 热生长氧化膜制备	69
2.2.3 氧化层错	70
2.3 刻蚀技术	71
2.3.1 刻蚀工艺流程	71
2.3.2 抗蚀剂	73
2.3.3 曝光技术	74
2.3.4 显影工序	78
2.3.5 套刻容差	79
2.3.6 刻蚀技术	79
2.3.7 干法刻蚀工艺的比较	83
2.4 扩散法掺杂技术	83
2.4.1 微电子技术对掺杂的要求	84
2.4.2 固体中的扩散模型和杂质分布	85
2.4.3 扩散系数和扩散机制	88
2.4.4 微电子技术中的扩散方法	90
2.4.5 测量技术	93
2.5 离子注入掺杂技术	94
2.5.1 离子注入深度和注入浓度分布	94
2.5.2 离子注入设备	96
2.5.3 注入损伤和退火	98
2.5.4 离子注入层的检测	99
2.5.5 离子注入与扩散法掺杂工艺的比较	99
2.6 晶体外延生长技术	100
2.6.1 外延工艺的作用	100
2.6.2 外延设备和反应室中的工作状态	101
2.6.3 外延的基本原理	102
2.6.4 外延掺杂和杂质浓度分布	102
2.6.5 外延缺陷及降低缺陷的方法	103
2.6.6 其他外延生长技术	104
2.7 表面薄膜气相淀积技术	107
2.7.1 物理气相淀积(PVD)技术	107
2.7.2 化学气相淀积(CVD)技术	109
2.7.3 台阶的覆盖问题	113
2.7.4 淀积方法的比较	114
2.8 清洁处理	115

2.8.1 表面污染及来源	115
2.8.2 清洁处理方法的分类	116
2.8.3 等离子清洗	117
2.9 双极集成电路制造工艺	117
2.10 CMOS 集成电路制造工艺	120
2.11 低压气体放电和等离子体	122
2.11.1 自持放电	122
2.11.2 等离子体的产生方法	123
2.11.3 气体放电中的物理和化学现象	124
2.12 腐蚀	125
2.12.1 原电池的电极和电极反应	125
2.12.2 电极电势	126
2.12.3 电解	128
2.12.4 金属的腐蚀和钝化	130
2.12.5 原电池的电化学腐蚀	131
2.12.6 金属迁移	133
习题与思考题	136
第 3 章 电子元器件失效的物理模型	137
3.1 失效与环境应力	138
3.1.1 失效的定量判据	138
3.1.2 失效的分类	139
3.1.3 环境应力与失效	142
3.1.4 环境保护设计	143
3.1.5 材料的结构与失效	147
3.2 失效物理模型	149
3.2.1 界限模型	149
3.2.2 耐久模型	149
3.2.3 应力-强度模型	150
3.2.4 反应速度论——阿列里乌斯(Arrhenius)模型	150
3.2.5 反应速度论——艾林(Eyring)模型	152
3.2.6 最弱环模型及串联模型	154
3.2.7 并联模型和筷子表模型	154
3.2.8 累积损伤(疲劳损伤)模型	155
3.3 失效模式与失效机理	155
3.3.1 失效机理的各种主要原因	155

3.3.2 失效机理和失效模式的相关性	157
3.3.3 失效模式和失效机理随时间变化	158
3.3.4 失效模式和机理与质量等级的关系	159
3.3.5 集成电路的质量等级	161
习题与思考题	162
第4章 失效分析和破坏性物理分析	163
4.1 电子元器件失效分析的目的及作用	163
4.2 失效分析工作的流程和通用原则	165
4.2.1 失效分析工作的流程	165
4.2.2 电子元器件失效分析的一些原则	165
4.3 失效分析报告	166
4.3.1 失效的数据收集	166
4.3.2 失效分析报告内容	168
4.3.3 失效分析报告格式	171
4.3.4 失效分析报告的审查、处理和应用	172
4.4 失效机理的验证试验和失效模式的统计评估	175
4.4.1 失效原因和机理的假设及分析	175
4.4.2 失效机理验证工作	178
4.4.3 估计失效模式的发生概率和危害性	178
4.5 电子元器件失效分析的程序	180
4.5.1 电子元器件失效分析程序的步骤	180
4.5.2 中国军用标准的微电路失效分析程序	181
4.5.3 军用标准中微电路失效分析程序的特点	185
4.5.4 微电路失效分析程序的比较	187
4.6 破坏性物理分析	191
4.6.1 破坏性物理分析的目的和试验项目	191
4.6.2 破坏性物理分析的作用与失效分析的关系	192
4.6.3 破坏性物理分析的方法和程序	193
4.6.4 破坏性物理分析案例	197
习题与思考题	203
第5章 电子元器件失效分析方法	204
5.1 电子元器件失效分析的常用程序及方法	204
5.1.1 元器件的解焊技术	204
5.1.2 非破坏性的分析方法	205
5.1.3 半破坏性的分析方法	216

5.1.4	破坏性分析方法	220
5.1.5	综合评价和对策	228
5.2	失效分析中几种常用方法介绍	228
5.2.1	结截面显示方法	228
5.2.2	内涂料去除方法	231
5.2.3	钝化层等的去除方法	231
5.2.4	材料缺陷的显示方法	232
5.2.5	扩散管道显示方法	233
5.2.6	判断二氧化硅层针孔的几种方法	233
5.2.7	微小区域的探测技术	234
5.3	从失效器件的电学特性分析失效	236
5.3.1	电连接性检测	236
5.3.2	端口的伏安特性检测	237
5.3.3	引出端之间的电测试	237
5.3.4	晶体管异常输出特性曲线	239
5.3.5	MOS管异常输出特性曲线	241
5.3.6	测试分析时应注意的几个问题	242
5.4	电子元器件失效分析技术	242
5.4.1	光学显微镜分析技术	243
5.4.2	红外显微镜分析技术	246
5.4.3	显微红外热像仪分析技术	247
5.4.4	声学显微镜分析技术	249
5.4.5	液晶热点检测技术	251
5.4.6	光辐射显微分析技术	254
5.4.7	判断失效部位和机理的方法	257
5.5	电子元器件失效分析常用设备	259
5.5.1	元器件失效分析的常用设备	259
5.5.2	国外可靠性失效分析实验室设备情况	261
	习题与思考题	265
第6章	微分析技术	267
6.1	引言	267
6.2	电子显微镜和 X 射线谱仪	268
6.2.1	电子束与固体表面的作用	268
6.2.2	扫描电镜 (SEM)	270
6.2.3	电子探针 X 射线显微分析 (EDX, XES 和 WDX)	276

6.2.4 电子束测试系统(EBT)	278
6.2.5 透射电镜(TEM)	279
6.3 俄歇电子能谱(AES)	281
6.3.1 俄歇电子能谱仪的工作原理	281
6.3.2 俄歇电子能谱在电子元器件失效分析中的应用	282
6.3.3 综合性能分析装置	284
6.4 二次离子质谱(SIMS)	285
6.4.1 离子质谱仪	285
6.4.2 SIMS 在失效分析中的应用	286
6.5 光电子能谱	288
6.5.1 X射线光电子能谱(XPS,ESA)	288
6.5.2 紫外光电子能谱(UPS)	290
6.6 卢瑟夫背散射频谱学(RBS)	290
6.7 其他微分析技术	291
6.7.1 中子活化分析(NAA)	291
6.7.2 X射线荧光(XRF)	292
6.7.3 激光反射(LR)	292
6.7.4 NRA 和 EDX	293
6.8 检测缺陷的 IDDQ 测试技术	293
习题与思考题	294
第7章 在管理工作中的失效分析和失效分析事例	296
7.1 电子元器件失效分析事例	296
7.1.1 齐纳二极管的失效分析	296
7.1.2 功率晶体管的疲劳寿命	298
7.1.3 由尘埃引起的开关接点接触不良的分析	299
7.1.4 对由硅污染引起的接触不良现象的分析	300
7.1.5 短路原因的分析	302
7.1.6 开路原因的分析	303
7.1.7 特性劣化原因的分析	305
7.1.8 钝化层过薄	307
7.1.9 氧化层缺陷	307
7.1.10 半导体器件内部可动多余物的失效分析	309
7.2 失效分析在工程管理中的应用	312
7.2.1 电子元器件和 VLSI 的制造环境	312
7.2.2 VLSI 对硅单晶材料的要求	314

7.2.3 液体中微粒子的测定	317
7.2.4 半导体的表面检测技术	317
习题与思考题	321
第8章 电子元器件的电极系统及封装的失效机理	322
8.1 金属膜和金属化层的失效机理	322
8.1.1 机械损伤	322
8.1.2 非欧姆接触和接触电阻过大	323
8.1.3 结尖峰与结穿刺的失效	323
8.1.4 铝金属化再结构造成器件失效	326
8.1.5 氧化层台阶处金属膜断路	327
8.1.6 过合金化造成器件失效	328
8.1.7 金属化互连线开路的失效定位方法	329
8.2 金属的电迁移	330
8.2.1 电迁移现象	330
8.2.2 电迁移引起的器件失效模式	331
8.2.3 提高抗电迁移能力的措施	331
8.2.4 VLSI 与电迁移	334
8.2.5 VLSI 中的铜互连技术	336
8.3 引线键合的失效机理	338
8.3.1 键合工艺差错造成失效	338
8.3.2 内引线断裂和脱键	339
8.3.3 金属间化合物使 Au-Al 系统失效	340
8.3.4 热循环使引线疲劳而失效	340
8.3.5 内涂料应力造成断丝	341
8.3.6 键合应力过大造成失效	341
8.3.7 引线键合失效的分析技术	342
8.4 电子元器件电极系统焊(压)接的失效	342
8.4.1 焊接、压接的失效模式	342
8.4.2 焊接的主要失效机理	344
8.4.3 消除焊接失效和隐患的措施	345
8.5 芯片贴装失效机理	345
8.5.1 银浆烧结	346
8.5.2 合金焊	346
8.5.3 有机聚合物粘接	347
8.5.4 芯片粘接失效的分析技术	349

8.6 电子元器件封装的可靠性	349
8.6.1 电子元器件封装的要求和类型	349
8.6.2 封装的失效模式	350
8.6.3 金属封装的失效机理	351
8.6.4 塑料封装的失效机理	352
8.6.5 封装失效的分析技术	355
8.7 电极系统和封装的腐蚀	355
8.7.1 电子元器件外引线的腐蚀	355
8.7.2 电子元器件内引线的腐蚀	357
8.8 电子元器件的热应力失效	360
8.8.1 热应力来源	360
8.8.2 热应力失效	361
8.8.3 电子元器件的热匹配设计	362
8.9 提高电极系统和封装可靠性的基本保证	363
8.9.1 封装	363
8.9.2 金属	364
8.9.3 其他材料	364
8.9.4 内部导体	365
8.9.5 封装元件材料和镀涂	367
8.9.6 器件镀涂工艺	367
8.9.7 芯片的镀覆与安装	368
8.9.8 零件镀涂工艺	369
8.9.9 返工规定(GJB 33A 中规定)	371
习题与思考题	371
第9章 半导体和微电子器件的失效和可靠性	373
9.1 微电子器件的失效模式和失效机理	373
9.1.1 集成电路主要失效机理	373
9.1.2 半导体器件、集成电路失效模式与相应的失效机理	374
9.2 微电子器件的表面失效模式与失效机理	377
9.2.1 氧化层中的电荷	377
9.2.2 二氧化硅层缺陷对器件性能的影响	377
9.2.3 二氧化硅中正电荷对器件性能的影响	378
9.2.4 硅—二氧化硅的界面陷阱电荷对器件性能的影响	385
9.3 VLSI 中金属—半导体接触系统的可靠性	387
9.3.1 铝—硅接触系统	388