

微电子器件应用 可靠性技术

庄奕琪 主编

QJYYKKXJSH



电子工业出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了微电子器件应用可靠性的原理和实用技术。全书分为原理篇和应用篇。原理篇阐述使用应力对器件可靠性的影响机理,包括静电、热、二次击穿、电销、化学和辐射效应,同时介绍了在器件设计制造中的抗应力设计和工艺技术;应用篇阐述在器件的应用过程中,为避免不适当的应力或操作对器件可靠性产生的影响,应采取的各种技术措施,涉及到器件的选择、防浪涌、防静电、防噪声、防辐射、线路布局设计、装配、储存、运输和测量方法等,同时还专门介绍了集成运算放大器、集成稳压器、CMOS 电路和功率晶体管的可靠性应用方法。

本书密切结合我国电子产品研制生产实际,突出实用性,兼顾先进性和学术性,可供从事各类电子整机研制和生产,以及微电子器件设计和制造的工程技术人员使用,也可作为大专院校有关专业的教学参考书。

微电子器件应用可靠性技术

庄奕琪 主编

责任编辑 陈晓莉

电子工业出版社出版

北京市海淀区万寿路 173 信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

北京科技大印刷厂印刷

*

开本:850×1168 毫米 1/32 印张:11.375 字数:300 千字

1996 年 5 月第 1 版 1996 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:3000 册 定价:25.00 元

ISBN 7-5053-3644-4/TN·974

序

当今世界新技术革命的核心是电子信息技术,电子信息技术的基础是微电子。可以说,谁拥有微电子技术的优势,谁就掌握了21世纪的主动权,在经济领域是这样,在军事领域更是如此。随着未来战争向着综合化、系统化和智能化发展,高技术性能和高可靠性成为军事电子武器装备的两个制高点,而微电子器件的可靠性在其中占有举足轻重的地位。大量事实已证明,重视质量和可靠性,将会带来显著的社会效益和经济利益;不重视质量和可靠性,就可能导致巨大的经济损失和恶劣的政治影响。“千里之堤,溃于蚁穴”,这样的事例不胜枚举。因此,开展微电子器件可靠性技术的研究和应用,是保证我国军用电子装备和其它高技术电子产品发展的一个重要课题。

根据近年来国内外军用电子整机装备的失效统计分析,因使用不当造成失效所占元器件失效的比例一直在50%上下浮动,而且多年来总是居高不下。这一严重事实已引起人们的普遍关注,提出了开展应用可靠性研究的迫切要求。所以,这本专著的问世,如同雪中送炭,将会博得军事电子科研工作者的青睐。该书较系统地总结了诸应用可靠性领域内的研究和技术经验,又在此基础上作了深化和提炼。全书取材丰富,适用面广,融学术性和实用性为一体,既有理论指导,又有具体实践总结,既面向器件使用者,也面向器件制造者。相信本书的出版,对于解决目前急需解决的微电子器件应用失效问题,推动我国军事电子装备和高技术电子产品的可靠性增长,将会起到十分有益的作用。

畢克允

1995.12

书名题字:张学东

撰 序:毕克允

主 编:庄奕琪

副主编:张德胜

编 委:(以姓氏笔划为序)

王 红	李 进	李新培	张蜀平
汤小川	周文琴	赵策洲	贾新章
新宝善			

顾 问:(以姓氏笔划为序)

王长河	王锡吉	孔学东	孙 青
史宝华	毕克允	余振醒	郑鹏洲
金毓铨	徐道松	韩 勤	熊和生
薛仁经	魏宪章		

前 言

半导体集成电路和分立器件,是构成各类电子整机系统的最主要的器件,在本书中统称为微电子器件。电子整机系统的可靠性在很大程度上取决于这些微电子器件的可靠性。微电子器件的可靠性通常可由固有可靠性和应用可靠性来予以表征。固有可靠性一般是指器件制造完成时所具有的可靠性。它取决于器件的设计、工艺和原材料性能。应用可靠性则是指器件用于整机系统时所具有的可靠性。它不仅与器件的固有可靠性有关,而且与器件从制造出厂至失效所经历的工作与非工作条件有关。如果器件使用时遭受到各种不适当的电、热、机械和化学等应力的作用,将会对其应用可靠性水平造成严重影响。

近年来,因应用不当引起器件失效的比例有明显上升趋势。来自国内外不同渠道的统计数目均表明,在航天、航空和武器装备等高新技术领域,因应用不当造成的器件失效已达到甚至超过总失效数的 50%。造成这种状况的原因涉及到以下三个方面的因素:

首先,现代微电子器件不断朝着微细化和高密度化方向发展,加上电源电压和信号电平的相应下降,使得器件对外界应力或环境干扰变得更加敏感。例如:MOS 器件栅氧化层的减薄,使其抗静电的能力下降;双极型器件发射区周长、面积以及扩散结深的缩小,使其抗电浪涌的能力下降;集成电路铝金属化布线的细线条化,使其抗电迁移和抗腐蚀的能力下降;器件构成材料的日益多样化,又使得材料之间的不匹配性和化学相互作用增强,由机械应力和化学应力导致的失效也会更加容易发生。

其次,随着新材料与新结构器件的不断涌现,某些器件使用者未能及时掌握这些新型器件的结构特点和使用方法,这是造成应

用可靠性问题增加的另一个原因。

再者,随着微电子器件在材料、工艺和结构方面的不断改进,其固有可靠性水平有了显著的增长,相对而言,由应用不当造成的器件失效的比例越来越大。

可以预言,随着未来微电子器件朝着高集成度和高性能化方向发展,由使用环节所引起的可靠性问题将会变得越来越突出。因此,微电子器件应用可靠性技术的研究和开发利用,既有现实的迫切性,也有深远的应用前景,是值得高度重视的问题。

微电子器件应用可靠性研究至少涉及到三个方面的内容:一是如何正确地选用器件,不仅要考虑其功能规格要求,而且要考虑其质量等级和可靠性指标;二是如何控制器件的装配、储存、运输和测量等非工作条件;三是如何通过器件周边的线路设计、机械设计和热设计等手段来控制器件在整机中的工作条件。应用可靠性研究的总体目标是防止各种不适当的应力或操作给器件带来损伤,最大限度地发挥器件固有可靠性的潜力。

要提高微电子器件的应用可靠性,器件的用户和器件的制造者都负有重要的责任。器件用户要掌握器件的正确应用方法,必须对各种电、热、机械和化学等应力对器件可靠性的作用机理和物理效应有所了解;器件设计和制造者也必须透彻地了解器件出厂后可能遇到的各种工作与非工作条件以及容易出现可靠性问题,从而有可能在器件的设计制造阶段就采取适当的预防措施,以减少或消除因应用失误造成的损失。因此,在应用可靠性方面,器件制造方与器件使用方的相互沟通是十分重要的。编撰本书的初衷之一,就是希望对这种沟通起到有益的作用。为此,本书分为两大部分,一是“原理篇”,侧重于阐述各种过应力影响器件可靠性的作用机理与效应以及与器件设计、工艺和材料性能之间的关系;二是“应用篇”,侧重于阐述在器件应用过程中如何避免各种不当应力对其可靠性的影响。从某种意义上可以说,应用篇试图解决“知其然”的问题,原理篇试图解决“知其所以然”的问题。

如果将微电子器件应用可靠性作为一门专业技术来看,那么

它应该包括两个技术范畴。一是微电子器件本身的应用可靠性设计技术,即在器件的设计制造阶段,如何通过设计和工艺改进来提高器件抵抗过应力的能力,如防静电设计、热设计、防二次击穿设计、防门锁设计、防潮湿设计和辐射加固设计等。二是微电子器件的可靠性应用技术,即在器件的应用过程中采取何种技术措施来避免各种不适当的应力对器件可能产生的影响,如防浪涌应用、防静电应用、防噪声应用、防辐射应用、降额应用和可靠性安装等。在本书中,将上述两部分内容合称为“应用可靠性技术”,而将其中第二部分的内容称之为“可靠性应用技术”,希望不会引起读者的混淆。上述第一部分内容主要安排在“原理篇”中介绍,第二部分的内容则安排在“应用篇”中介绍。微电子器件使用者的主要兴趣可能会放在后一部分,而微电子器件设计制造人员会给前一部分给予更大的关注。不过,如前所述,这两部分内容实际上有着密切的联系,所以,希望读者能够较为全面(但又有重点)地阅读本书的内容,使“原理”得以触类旁通,“技术”得以灵活应用,这样得到的收获可能会更大些。

本书着重阐述微电子器件应用可靠性的保证技术,但是,如何保证器件的应用可靠性,不只是技术问题,而且也有管理上的问题。制订和贯彻与保证微电子器件应用可靠性有关的标准、规范和使用准则,开展有关规章制度的宣传和教育,加强设计和操作人员的培训和考核,建立严格的评审、认证和监督制度,对于提高器件应用可靠性都是行之有效的措施。

由于微电子器件种类繁多,涉及到的应用可靠性问题又十分广泛,本书不可能在有限的篇幅内对所有的微电子器件应用可靠性问题都给予论述,例如对最近发展起来的一些新型微电子器件的应用可靠性问题,因缺乏系统研究而未作专门讨论。由于作者水平有限,虽经数次修改,书中错误和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

致 谢

国防科工委和电子工业部的有关领导对本书的策划、审定和出版给予了大力的支持和帮助。特别要感谢国防科工委副主任张学东同志为本书题写了书名,电子工业部电子科学研究院副院长、军工基础局局长毕克允同志为本书作了序。

在本书搜集素材的过程中,曾走访了许多工作在军工电子研制生产第一线的专家、工程技术人员和管理人员。他们为本书的编写提供了许多珍贵的技术资料和数据。本书中的一些有关内容实际上是他们长期工作实践经验的系统总结。

在本书的撰写过程中,曾参考和引用了大量的国内外文献、书籍和资料。除本书末尾“参考文献”、“参考书目”和“引用标准”已经列出的之外,还参考了许多非正式出版的研究报告、学术论文、产品手册、可靠性试验报告和失效分析数据等等。提供这些资料的单位主要有电子部 24 所、55 所、13 所、1 所、4 所、5 所、20 所、777 厂、华晶电子集团、北京半导体器件三厂、877 厂、航天工业总公司 502 所、511 所和 771 所等。

在本书初稿完成之后,承蒙国防科工委军用电子元器件可靠性专业组和电子工业部可靠性专家组的有关专家,在百忙之中对本书进行了认真的审阅,就本书的内容和形式诸方面,提出了许多富有建设性的建议和修改意见,对于提高本书的质量和适用性起了非常重要的作用。

在此谨向上述专家、领导、单位和其它人员一并表示诚挚的感谢和崇高的敬意!

目 录

上篇 原理篇

篇首语	2
第一章 静电效应	4
1.1 静电的产生与来源	4
1.1.1 静电的产生	4
1.1.2 静电的来源	7
1.2 静电放电模型	10
1.2.1 带电人体的静电放电模型	10
1.2.2 带电器件的静电放电模型	11
1.2.3 场感应静电放电模型	13
1.3 静电放电灵敏度	14
1.3.1 静电放电灵敏度的测量	14
1.3.2 静电敏感器件的分类	16
1.4 静电放电失效	18
1.4.1 失效模式	18
1.4.2 失效机理	18
1.5 微电子器件的防静电设计	22
1.5.1 MOS器件的防静电设计	22
1.5.2 双极型器件的防静电设计	27
1.5.3 静电保护网络的结构设计	27
第二章 热效应	30
2.1 热阻	31
2.1.1 最高允许结温	31
2.1.2 热阻的定义	32
2.1.3 峰值热阻和瞬态热阻	36

2.2	温度对微电子器件电参数的影响	39
2.2.1	双极晶体管电参数的温度特性	39
2.2.2	MOS 器件电参数的温度特性	43
2.3	热不匹配效应	45
2.3.1	热应力来源	45
2.3.2	热应力失效	47
2.4	微电子器件的热设计	50
2.4.1	热匹配设计	50
2.4.2	管芯的热设计	52
2.4.3	管壳的热设计	54
第三章	二次击穿效应	57
3.1	二次击穿现象	57
3.2	二次击穿机构	61
3.2.1	双极晶体管二次击穿机构	61
3.2.2	MOS 场效应管二次击穿机构	68
3.2	微电子器件的防二次击穿设计	72
3.3.1	发射极镇流设计	72
3.3.2	内部匹配网络设计	75
3.3.3	收集极镇流设计	76
3.3.4	版图设计	77
3.3.5	工艺上的改进措施	78
第四章	闩锁效应	80
4.1	闩锁现象	80
4.2	闩锁机理	82
4.3	闩锁发生条件	84
4.4	闩锁检测方法	86
4.4.1	电检测方法	87
4.4.2	扫描电镜检测方法	88
4.4.3	激光扫描检测方法	88
4.5	CMOS 电路的防闩锁设计	89
4.5.1	版图的防闩锁设计	89
4.5.2	工艺的防闩锁设计	91
第五章	化学效应	92

5.1	微电子器件外引线的腐蚀	92
5.1.1	腐蚀机理	92
5.1.2	腐蚀发生的原因	94
5.1.3	防腐蚀的措施	95
5.2	微电子器件封装的耐湿性	96
5.2.1	塑料封装的耐湿性	96
5.2.2	气密封装的耐湿性	99
5.3	潮湿对芯片可靠性的影响	101
5.3.1	铝金属化布线的腐蚀	101
5.3.2	铝一金接触结构的腐蚀	103
5.3.3	水汽引起芯片电性能劣化	104
5.3.4	芯片的防潮湿保护	106
5.4	微电子器件耐湿性的评价方法	107
第六章	辐射效应	110
6.1	辐射环境	110
6.1.1	核辐射环境	110
6.1.2	空间辐射环境	112
6.2	辐射对微电子器件的作用机理	113
6.2.1	位移辐射效应	113
6.2.2	电离辐射效应	115
6.3	微电子器件的辐射诱发失效	116
6.3.1	辐射对双极型器件性能的影响	116
6.3.2	辐射对 MOS 器件性能的影响	120
6.3.3	α 粒子在大规模集成电路中产生的软误差	122
6.4	微电子器件的辐射加固	125
6.4.1	双极型器件的辐射加固	125
6.4.2	MOS 器件的辐射加固	127
6.4.3	减少 α 粒子产生的软误差的措施	129
 下篇 应用篇		
篇首语		131
第七章	微电子器件选择通则	132

7.1	微电子器件的分类和型号命名	132
7.1.1	分类	132
7.1.2	型号命名	132
7.2	微电子器件的质量等级	139
7.2.1	我国微电子器件的质量等级	140
7.2.2	国外微电子器件的质量等级	143
7.3	微电子器件的选择方法	145
7.3.1	选用符合质量和可靠性保证规范的器件	145
7.3.2	器件品种型号的选择原则	147
7.3.3	高可靠场合不宜使用的器件类型	147
7.3.4	其它选择规则	148
7.4	微电子器件的最大额定值和降额使用	150
7.4.1	最大额定值	150
7.4.2	降额使用	153
第八章	微电子器件可靠性应用通则	159
8.1	微电子器件的防浪涌应用	159
8.1.1	集成电路开关工作产生的浪涌电流	160
8.1.2	接通电容性负载时形成的浪涌电流	162
8.1.3	断开电感性负载时产生的浪涌电压	163
8.1.4	驱动白炽灯时产生的浪涌电流	168
8.1.5	供电电源引起的浪涌电压	170
8.1.6	接地不当引起器件损坏	174
8.1.7	TTL 电路防浪涌干扰应用	175
8.2	微电子器件的防静电应用	179
8.2.1	器件使用环境的防静电措施	179
8.2.2	器件使用者的防静电措施	182
8.2.3	器件包装、运送和储存过程中的防静电措施	185
8.2.4	器件使用时的防静电管理	186
8.3	微电子器件的防噪声应用	187
8.3.1	接地不良引入的噪声	188
8.3.2	静电耦合和电磁耦合产生的噪声	190
8.3.3	串扰引入的噪声	192
8.4.4	反射引起的噪声	194

8.4	微电子器件的抗辐射应用	196
8.4.1	抗辐射加固电子系统的器件选择	196
8.4.2	系统设计中的抗辐射措施	198
8.5	防护元件	202
8.5.1	瞬变电压抑制二极管	202
8.5.2	压敏电阻	204
8.5.3	铁氧体磁珠	208
8.5.4	PTC 和 NTC 热敏电阻	210
8.5.5	电花隙防护器	213
8.6	微电子器件电路布局的可靠性设计	215
8.6.1	电子线路的可靠性设计原则	215
8.6.2	常用集成电路的应用设计规则	218
8.6.3	印制电路板的布线设计	223
8.7	微电子器件的可靠性安装	229
8.7.1	引线成形与切断	229
8.7.2	在印制电路板上安装器件	230
8.7.3	焊接	233
8.7.4	器件在整机系统中的布局	234
8.8	微电子器件的运输、储存和测量	235
8.8.1	运输	235
8.8.2	储存	236
8.8.3	测量	237

第九章 集成运算放大器可靠性应用 240

9.1	集成运放的选择	240
9.2	集成运放的可靠性相关系数	243
9.2.1	极限参数	243
9.2.2	稳定性参数	244
9.2.3	噪声参数	244
9.3	集成运放的过应力失效与预防	245
9.3.1	输入过电压损伤及其预防	245
9.3.2	电源故障及其预防	250
9.3.3	输出端故障及其预防	251
9.4	集成运放的自激及其消除	252

9.4.1	自激的产生	253
9.4.2	自激的消除	254
9.5	集成运放的安装和筛选	258
9.5.1	输入漏电流的隔离	258
9.5.2	电源的交流旁路	259
9.5.3	运放的接地	260
9.5.4	运放的屏蔽	260
9.5.5	运放的二次筛选	261
第十章	集成稳压器可靠性应用	263
10.1	集成稳压器的选择	263
10.1.1	集成稳压器的分类	263
10.1.1	集成稳压器的选用	266
10.2	集成稳压器的可靠性相关参数	267
10.2.1	稳定性参数	268
10.2.2	极限参数	268
10.2.3	噪声参数	270
10.3	集成稳压器的安全保护	271
10.3.1	保护电路	271
10.3.2	使用中的安全保护	273
第十一章	CMOS 电路可靠性应用	278
1.1	CMOS 电路概述	278
1.1.1	CMOS 电路的特点	278
1.1.2	CMOS 电路的分类	281
1.1.3	CMOS 电路的可靠性相关参数	283
1.2	CMOS 电路的防闩锁应用	284
1.3	CMOS 电路的防静电和防浪涌应用	290
第十二章	功率晶体管可靠性应用	299
12.1	双极型功率晶体管的可靠性应用	299
12.1.1	双极型功率管的最大额定值	299
12.1.2	双极型功率管的安全工作区	302
12.1.3	双极型功率管的安全保护	306
12.2	VMOS 功率晶体管的可靠性应用	312
12.2.1	VMOS 功率管的特点	312

12.2.2	VMOS 功率管的最大额定值和安全工作区	316
12.2.3	VMOS 功率管的安全保护	318
12.3	微波 GaAs 场效应功率管的可靠性应用	324
12.4	散热器的使用	328
12.4.1	散热器的选配	329
12.4.2	散热器的安装	334
参考文献		340
参考书目		345
引用标准		347

篇首语

微电子器件在实际使用时总要处于一定的应用环境,包括工作环境和非工作环境(如贮存环境、安装环境和在整机中的休眠环境等),因此不可避免地要受到各种应力的作用。如果器件使用时出现设计和装配失误,或者未采取有效的应力控制措施,使器件承受到过大的应力作用,或者处于恶劣的环境条件之中,那么就会对其性能和可靠性产生不利影响,重则造成器件的即时损坏,轻则也会引入潜在损伤导致器件寿命的缩短,这就是所谓“使用失效”问题。要解决此类问题,应该对引起使用失效的各种应力以及它们对器件的作用机理,有一个全面透彻的了解。

微电子器件种类繁多,使用环境也是复杂多样,一本使用规则即使再全面也难以解决实际工作中遇到的所有具体问题,而如果掌握了应用可靠性的基本原理,就能够举一反三,触类旁通,达到一石三鸟的效果。这是本书安排“原理篇”的主要目的。

表 0.1 概括了各种使用应力对微电子器件可靠性的影响。其中,电应力和温度应力是最常见的器件工作应力,气候应力、机械应力和辐射应力则是器件处于特殊环境中时受到的应力。

本篇着重阐述了器件使用中最常见的应力效应,具体安排是:第一章、第三章和第四章分别阐述电应力中的静电效应、二次击穿效应和闩锁效应;第二章阐述温度应力中的高温和温度循环效应,统称热效应;第五章阐述与气候应力中的湿度和盐雾密切相关的一些效应,称为化学效应;第六章专门阐述与辐射应力有关的效应。每章在阐述了应力的来源及其对器件的作用机理之后,还介绍了在器件设计制造过程中,为提高器件抗应力水平可采取的各种设计和工艺改进方法,包括防静电设计、热设计、防二次击穿设计、

防闩锁设计、防潮湿保护和辐射加固设计等。

表 0.1 使用应力对微电子器件可靠性的影响

应力类别	应力形式	失效场合	主要失效模式
电应力	静电 浪涌 过电压 噪声	工作 安装 测量	栅击穿(MOS 器件) pn 结短路(双极型器件) 二次击穿(功率晶体管) 闩锁失效(CMOS 电路)
温度应力	高温 低温 温度循环	大功率工作 脉冲工作 高寒地区工作 焊接	热击穿、热疲劳 参数漂移 密封性失效 键合、压焊不良
机械应力	振动 冲击 加速度	安装、运送 航天器 航空器 移动装备	管壳漏气 管芯裂纹 引线断裂
气候应力	高湿度 盐雾 气压	储存 海上、沿海 亚热带地区	外引线腐蚀 芯片金属化腐蚀 电参数劣化
辐射应力	空间辐射 核辐射 强电磁场	宇宙空间 核反应现场	电参数变化 软误差、误动作 闩锁失效