

微 纳 系 统 系 列 译 丛

RELIABILITY OF MEMS

MEMS 可靠性

[日本] O. Tabata, T. Tsuchiya / 著
宋 竞 尚金堂 唐洁影 黄庆安 / 译



东南大学出版社



WILEY-VCH



MEMS 可靠性

Reliability of MEMS

[日本] O. Tabata T. Tsuchiya 著
宋 竞 尚金堂 唐洁影 黄庆安 译

东南大学出版社
· 南京 ·

内 容 简 介

本书是国际上 MEMS 可靠性领域第一本专著, 共分为两部分。第一部分论述 MEMS 材料的可靠性内容及主要表征方法, 包括 MEMS 材料的可靠性, 微纳压痕仪, 鼓胀测试, 弯曲测试, 单轴张应力测试, 片上测试; 第二部分论述 MEMS 器件的可靠性, 包括压力传感器可靠性, 惯性传感器可靠性, RF MEMS 可靠性和光 MEMS 可靠性。内容新颖, 数据充实, 适合于微机电系统、微电子、光电子、传感器、通讯技术领域的高年级大学生、研究生和工程技术人员参考。

O. Tabata, T. Tsuchiya. Reliability of MEMS (ISBN 978-3-527-31494-2). Wiley-VCH, © 2008

本书中文简体字翻译版由 WILEY-VCH 授权东南大学出版社独家出版发行。未经出版者预先书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有, 翻印必究。

本书封面贴有 Wiley 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

图字: 10 - 2008 - 155 号

图书在版编目(CIP)数据

MEMS 可靠性/(日)田畑修,(日)土屋智由著;宋竞等译. —南京:东南大学出版社, 2009. 3

(微纳系统系列译丛)

书名原文: Reliability of MEMS

ISBN 978-7-5641-1575-3

I. M… II. ①田… ②土… ③宋… III. 微机电—可靠性 IV. TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 025464 号

东南大学出版社出版发行
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人: 江 汉

网 址: <http://press.seu.edu.cn>

电子邮件: press@seu.edu.cn

全国各地新华书店经销 兴化市印刷厂印刷

开本: 700 mm×1000 mm 1/16 印张: 16.5 字数: 330 千

2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5641-1575-3

印数: 1~2000 册 定价: 50.00 元

本社图书若有印装质量问题, 请直接与读者服务部联系。电话(传真): 025-83792328

序 言

微机电系统(Micro-electro-mechanical systems, MEMS)是指可以批量制造的、集微结构、微传感器、微执行器以及信号处理和电路等于一体的器件或系统。其特征尺寸一般在 $0.1\sim 100\ \mu\text{m}$ 范围。目前国际上通常将 MEMS 冠以 Inertial-, Optical-, Chemical-, Bio-, RF-, Power-等前缀以表示其不同的应用领域。MEMS 集约了当今科学技术的许多尖端成果,更重要的是它将信息处理与敏感及执行机构相结合,改变了人们感知和控制外部世界的方式。

MEMS 可靠性是其进入实用化的关键技术之一, MEMS 可靠性主要分为几个过程:①加工过程中的可靠性(包括制造过程、划片、超声键合引线、封装等);②工作过程中的可靠性;③储存过程中的可靠性。同时,为了保证 MEMS 的可靠性,还需要材料、工艺、器件、系统等可靠性的测试、表征和预测。MEMS 在工作过程中的可靠性可以分为四类:①没有可以滑动的部件(例如压力传感器、喷头等);②有可以滑动但没有摩擦或表面相互作用的部件(例如谐振器、陀螺等);③有可以滑动和表面相互作用的部件(例如继电器、泵等);④有可以滑动并有摩擦和表面相互作用的部件(例如光开关、光栅等)。美国喷气推进实验室(JPL)在 NASA 支持下对 MEMS 空间应用的可靠性进行了广泛研究,并在 1999 年 1 月发布了 MEMS 空间应用的可靠性保障指南(MEMS Reliability Assurance Guidelines for Space Applications);美国桑地亚国家实验室(SNL)在 DARPA 支持下,详细研究了 MEMS 基本失效机理与模式,并在 2000 年 1 月发布了 MEMS 基本单元的可靠性测试结构、实验与失效模式报告(MEMS Reliability: Infrastructure, Test structure, Experiments, and Failure modes)。这两份是内部报告,未公开出版。日本学者 O. Tabata 和 T. Tsuchiya 两位教授组织专家所著的

《Reliability of MEMS》一书,是目前本领域唯一公开发行的著作。其内容主要包括两个方面:①MEMS 材料机械特性评价方法及其评价标准,包括弹塑性压痕接触力学、膨胀测试、轴向拉伸测试、在片测试等;②MEMS 器件的可靠性,包括压力传感器可靠性、惯性传感器可靠性、光 MEMS 可靠性等。虽然该书没有完全覆盖 MEMS 可靠性相关内容,但在 MEMS 材料可靠性表征、器件可靠性分析等方面有较深入的概述,适合于 MEMS 可靠性研究领域的高年级大学生、研究生和工程技术人员参考。

东南大学黄庆安教授长期从事 MEMS 教学和科研工作,他带领的团队在 MEMS CAD、RF MEMS、芯片上的气象站等方面进行了长期研究,时常关注国际上有关 MEMS 技术信息,已经翻译出版《微系统封装基础》、《RF MEMS 理论·设计·技术》、《CMOS MEMS 技术与应用》等,这一次又及时地把《MEMS 可靠性》一书介绍到国内,值得赞赏,同时也向为翻译该书付出辛勤劳动的有关师生表示敬意。

希望该书的翻译出版对有志从事 MEMS 研发的广大师生和科研人员有所帮助。

丁衡高

2008 年 5 月

译者序

自 MEMS 技术出现后,一直倡导、关心和支持我国 MEMS 发展的丁衡高院士在百忙中为本书中文版作序,并对翻译工作一直给予鼓励,使我们深受鼓舞。

东南大学 MEMS 教育部重点实验室与东南大学出版社合作,组织出版微纳系统系列译丛,在选择原版书籍时,主要基于以下考虑:①书籍是国际知名专家所写,以保证内容的权威性;②书籍是近期出版的,以保证技术的先进性;③国内还没有同类书籍翻译,避免重复引进;④本实验室也在进行该方向的研究,以保证翻译质量。

2005 年翻译出版了:R. Tummala, *Fundamentals of Microsystems Packaging*, New York: McGraw-Hill(2001)和 G. Rebeiz, *RF MEMS Theory, Design, and Technology*, John Wiley & Sons(2003)。2007 年翻译出版了:O. Brand, G. K. Fedder, *CMOS MEMS*, Wiley-VCH(2005)。本次所选 O. Tabata, T. Tsuchiya, *Reliability of MEMS*, Wiley-VCH(2008),该书是 Wiley-VCH 出版社 *Advanced Micro and Nanosystems* 丛书的第六卷。

本书由从事 MEMS 封装与可靠性技术研究的宋竞博士、尚金堂副教授、唐洁影教授和我负责组织、翻译,东南大学 MEMS 教育部重点实验室封装与可靠性技术课题组的研究生参加,具体翻译分工如下:黄庆安(概述、第 10 章)、唐洁影(第 1 章)、尚金堂(第 2 章)、宋竞(第 3 章)、许李园(第 4 章)、陈龙龙(第 5 章)、刘星(第 6 章)、王斌(第 7 章)、王振中(第 8 章)、王磊(第 9 章)。宋竞博士、尚金堂副教授、唐洁影教授分别审校了全书的有关章节,宋竞博士对全书进行了统稿。在这里对参加翻译的研究生们表示感谢。

如读者想对 MEMS 可靠性进行深入研究,除本书内容外,还建议阅读

美国喷气推进实验室(JPL)1999年发布的MEMS空间应用的可靠性保障指南(MEMS Reliability Assurance Guidelines for Space Applications)和美国桑地亚国家实验室(SNL)2000年发布的MEMS基本单元的可靠性测试结构、实验与失效模式报告(MEMS Reliability: Infrastructure, Test structure, Experiments, and Failure modes)。

本书翻译得到唐洁影教授和我所负责的国防预先研究计划和国家“863”计划“MEMS结构可靠性评估方法及测试的研究”(2007AA04Z320)项目的支持。

在翻译过程中,我们对书中专用名词、术语及相关问题进行定期讨论与商榷,但由于翻译水平有限、加之时间紧迫,译书中肯定有这样或那样的错译、误译或不恰当之处,恳请读者批评指正。

黄庆安

2008年10月

原 书 序

可靠性是指系统或元件在规定的条件下并在特定的时间内完成所要求功能的能力。对商用产品,可靠性是最重要的指标之一。因为可靠性经常决定了器件的设计,所以,可靠性是性能设计必须考虑的因素。而且,可靠性评价与控制对器件性能的改进也有作用。今天,工业产品分布在世界各地并在各种环境下使用,从而使产品的可靠性评价比以往任何时候都重要。

用半导体制造工艺制备的微机械器件,即 MEMS 器件,他们是未来集成系统小型化和多功能的核心器件。由于它们的紧凑性和便携性,正在应用于移动通信产品中。由于微制造的精度和尺寸小型化引起的尺寸效应, MEMS 器件的可靠性被认为是最重要的问题,这已被诸如压力传感器、加速度计、打印机喷墨头、投影显示等商用产品所证实。尽管经过许多研究者和工程师持续的努力,已经确立了 MEMS 器件的可靠性,但一些可靠性问题和相关现象仍没有完全理解,建立 MEMS 器件与材料可靠性的一般理论仍然需要巨大努力。不久的将来, MEMS 可靠性知识将会系统地组织到一起。通过这种知识,每一个工程师都能够设计高性能和高可靠的 MEMS 器件。

MEMS 结构中微尺度材料的机械可靠性是 MEMS 可靠性的基本部分。这些内容是微电子器件所没有的,是全新的内容。过去十年,在评价方法、实验程序、测量结果的分析等研究方面取得了长足发展。

《MEMS 可靠性》一书是先进微纳系统丛书的第六卷。目的是总结机械可靠性评价方法、测量结果、测量数据的处理以及性能提高等相关的前沿知识。

本书的第一部分主要论述机械特性评价方法及在可靠性认证中的作用。第 1 章向读者解释 MEMS 可靠性和机械特性之间的关系以及测量的

标准化。第 2、3、4 章介绍测量方法,包括纳米压痕、鼓胀方法、单轴张应力测试,用这些方法测量微结构材料的基本机械特性。第 5 章介绍了器件结构的可靠性评价方法,这种方法可以评价制备工艺以及特殊器件设计对可靠性特性的影响。

本书的第二部分综述了高可靠的 MEMS 商用产品。通过这些例子说明在产品研发阶段可靠性认证的重要性。第 6、7、8 章详细介绍了基于 MEMS 的机械传感器,即压力传感器、加速度计、角速度传感器(振动陀螺)。重点放在器件封装和组装方面,说明这些工艺步骤对器件可靠性的影响。第 9、10 章介绍了用于光纤通信的可变光衰减器和二维光扫描仪。这两种器件工作时都处于扭转变形。这些器件在高频下工作,且常常是在谐振频率下工作。由于它们应用在通信系统、安全系统和显示系统中,因此需要长的寿命。

本书的另一目的是向读者介绍日本的 MEMS 研究与发展。日本工业拥有大量 MEMS 器件的关键技术,而且没有详细介绍过。因此我希望读者能够从本书中得到了解。

最后,要感谢本书每一章的作者,他们花了大量时间书写相关内容。另一方面,也希望读者喜欢本书,并通过本书内容进一步理解 MEMS 可靠性。

Osamu Tabata

Toshiyuki Tsuchiya

Kyoto, June 2007

目 录

概述:MEMS 可靠性导论	1
1 MEMS 材料力学性能评价及评价标准	8
1.1 简介	9
1.2 薄膜材料的力学性能与 MEMS	10
1.2.1 弹性性能	10
1.2.2 内应力	11
1.2.3 强度	12
1.2.4 疲劳	12
1.3 力学性能评价的关键问题	13
1.3.1 样品	13
1.3.2 测试方法	14
1.3.3 标准	15
1.4 薄膜拉伸测试方法的综合比对	15
1.4.1 拉伸测试方法	16
1.4.2 样品设计	17
1.4.3 材料	18
1.4.4 样品制备	19
1.4.5 结果	19
1.4.5.1 单晶硅与多晶硅	20
1.4.5.2 镍	22
1.4.5.3 钛	22
1.4.6 讨论	24
1.5 MEMS 材料的国际标准	24
1.5.1 MEMS 标准化机构	25
1.5.1.1 IEC	25
1.5.1.2 ASTM International	25
1.5.1.3 SEMI	25
1.5.1.4 日本微机械中心	25
1.5.2 薄膜单轴应力测试的国际标准	25

1.6	结论	26
	参考文献	26
2	匀质材料和涂层-衬底复合材料的弹塑性压入接触力学	28
2.1	简介	29
2.2	微纳压痕仪	30
2.3	压入载荷与压入深度的关系	33
2.4	圆锥/棱锥形压痕的弹塑性接触变形理论	34
2.4.1	弹性接触	35
2.4.2	塑性接触	35
2.4.3	弹塑性接触	36
2.4.4	压入接触面积 A_c 与 Oliver-Pharr/Field-Swain 近似	41
2.4.5	压入接触的能量原理	44
2.5	涂层-衬底复合材料的接触力学	45
2.5.1	弹性压入接触力学	46
2.5.2	弹塑性压入接触力学	52
2.6	结论	55
2.7	备注	56
	参考文献	58
3	MEMS 薄膜材料的鼓胀测试	62
3.1	简介	63
3.2	理论	65
3.2.1	单层膜片的基本定义	66
3.2.2	平面应变条件下的多层膜片	68
3.2.3	化简为无量纲形式	70
3.2.4	薄膜	73
3.2.5	基本步骤	74
3.3	载荷-挠度模型	74
3.3.1	简介	74
3.3.1.1	直接解	74
3.3.1.2	变分分析法	74
3.3.1.3	有限元分析	77
3.3.2	方形膜片	78
3.3.2.1	近似载荷-挠度公式	79
3.3.2.2	方形薄膜	80
3.3.3	矩形膜片	80

3.3.4	刚性支撑的长膜片	81
3.3.4.1	平面应变响应	82
3.3.4.2	长薄膜	84
3.3.4.3	泊松比的提取	84
3.3.5	平面应变条件下弹性支撑的单层长膜片	85
3.3.6	平面应变条件下弹性支撑的多层长膜片	87
3.3.7	断裂力学参数的提取	89
3.3.8	热膨胀	91
3.4	实验	91
3.4.1	制备	91
3.4.2	测量技术	93
3.4.3	步骤	94
3.5	结果	98
3.5.1	氮化硅	98
3.5.2	氧化硅	101
3.5.3	多晶硅	104
3.5.4	金属、聚合物和其他材料	105
3.6	结论	107
	参考文献	108
4	MEMS 材料的轴向拉伸测试	113
4.1	简介	114
4.2	薄膜样品单轴拉伸测试中的技术问题	114
4.2.1	样品夹持	116
4.2.2	应变测量	119
4.2.3	纳米尺度结构的拉伸测试	122
4.3	MEMS 材料力学特性的评价方法	123
4.3.1	脆性材料	123
4.3.2	金属材料	127
4.3.3	聚合物膜	131
4.3.4	形状记忆合金膜	136
4.4	薄膜样品的疲劳测试	141
4.5	结论	143
	参考文献	144
5	MEMS 的在片测试	146
5.1	MEMS 在片力学测试的简介	147

5.2	杨氏模量测量	147
5.2.1	横向谐振结构	148
5.2.2	悬臂梁结构	149
5.3	残余应力测量	150
5.3.1	被动应力测试器件	150
5.3.2	应力梯度	150
5.4	粘附和摩擦	151
5.5	磨损	152
5.6	断裂韧度和断裂强度	152
5.6.1	断裂韧度、断裂强度和静态应力腐蚀的被动测量	153
5.6.2	断裂韧度、断裂强度的主动测量	154
5.7	疲劳测量	157
5.7.1	变平均应力与变幅疲劳	158
	参考文献	160
6	电容式压力传感器的可靠性	163
6.1	简介	164
6.2	结构和原理	164
6.3	有限元分析	165
6.4	制备工艺	168
6.5	基本特性	170
6.6	机械可靠性	171
6.6.1	粘附	171
6.6.2	灰尘	172
6.7	湿度特性	175
6.8	隔膜的谐振	175
6.9	浪涌(静电)	176
6.10	结论	176
	参考文献	177
7	惯性传感器的可靠性	178
7.1	简介	178
7.2	电容式三轴加速度传感器	181
7.2.1	加速度检测原理	181
7.2.2	结构、材料和工艺	183
7.3	电感式陀螺传感器	185
7.3.1	工作原理	186

7.3.2	谐振器设计	187
7.3.3	工艺和材料	187
7.4	电容式陀螺传感器	190
7.5	系统	192
7.6	结论	192
7.7	感谢	192
	参考文献	192
8	高精度、高可靠 MEMS 加速度传感器	194
8.1	简介	195
8.2	加速度传感器芯片	195
8.2.1	传感器芯片的结构以及检测原理	195
8.2.2	干扰应力的控制问题	196
8.2.3	减小传感器芯片初始翘曲	197
8.2.4	减小干扰应力	198
8.2.5	实验结果	199
8.3	数字修调 IC	200
8.3.1	概览	200
8.3.2	读出电路的问题	201
8.3.3	改进型读出电路特性	201
8.3.3.1	PROM 增益修调	201
8.3.3.2	斩波放大器	202
8.3.3.3	二阶补偿	202
8.4	实验结果	202
8.4.1	器件结构	202
8.4.2	测量结果	202
8.5	结论	204
	参考文献	204
9	MEMS 可变光衰减器的可靠性	205
9.1	简介	205
9.2	MEMS VOA 的设计和制备	207
9.3	光机械性能	211
9.4	关于可靠性的探讨	214
9.4.1	机械强度	214
9.4.2	低电压工作和振动容限	215
9.4.3	温度特性	218

9.4.4	静电漂移	221
9.4.5	工艺残留	224
9.4.6	HF 蒸汽释放工艺	224
9.4.7	防止使用中粘附的机械方法	226
9.4.8	防止使用中粘附的化学方法	227
9.4.9	密封	228
	参考文献	229
10	扫描 MEMS 谐振镜的可靠性	230
10.1	简介	231
10.2	特点	232
10.3	工作原理	232
10.3.1	一维扫描镜	233
10.3.2	二维扫描镜	233
10.4	制造工艺	233
10.4.1	一维扫描镜	233
10.4.2	二维扫描镜	234
10.5	工作特性	235
10.6	光学微镜材料	240
10.7	可靠性	240
10.7.1	静态强度	240
10.7.1.1	腐蚀损伤	240
10.7.1.2	凹口部分的强度表征	241
10.7.2	疲劳寿命	242
10.7.2.1	疲劳寿命的设计	242
10.7.2.2	疲劳寿命测试结果	242
10.8	应用举例	243
10.8.1	空气中飘浮粒子的可视化	243
10.8.2	物体形状的测量	244
10.8.3	阻塞型场地传感器	244
10.8.4	车载激光雷达	244
10.8.5	激光打印机	245
10.8.6	条形码读出器	245
10.8.7	测距传感器	245
10.8.8	激光显示	245
	参考文献	247

概述:MEMS 可靠性导论

Toshiyuki Tsuchiya and Osamu Tabata

Department of Micro Engineering, Kyoto University, Japan

本章 MEMS 可靠性导论描述了目前对 MEMS 机械可靠性的理解,以便扩展到器件应用。确切的说, MEMS 可靠性含义较广,因为 MEMS 是一种包含各种物理和化学理论的复杂系统。MEMS 制造工艺大部分是半导体工艺,因此可利用诸如高温下热循环测试和加速寿命时间测试等电学性能评估方法。但是,在 MEMS 中,应该考虑机械可靠性。在机械可靠性方面,需要使用诸如冲击试验、静态和动态加载时的长期耐疲劳度等各种机械测试。除此之外, MEMS 主要由硅组成,而硅是一种脆性材料,并不认为是一种机械结构材料。工程师们认为 MEMS 在工作时要求能巧妙处理与设计。本章主要讨论 MEMS 可靠性,尤其是讨论由硅构成的器件可靠性。

MEMS 中的机械可靠性

微机电系统(MEMS)是一种用(硅)微机械加工技术制备的集成器件,它是由单片或多芯片构成的含有机电结构、换能器以及控制和探测电路的系统。美国的研究机构对 MEMS 的定义是:

MEMS 是一种批量制造的小型器件,这些器件把物理参数转化为电信号,或从电信号转化为物理参数,并且它们的工作原理取决于机械结构或这些物理参数^[1]。

该定义清楚地说明:MEMS 中材料的机械特性与器件性能以及它们的机械可靠性密切相关。性能与可靠性之间存在强烈的关系,而且可靠性常常会限制其性能。器件应该能够承受冲击,但同时它又能探测输入加速度引起的微小惯性力。

机械冲击会引起 MEMS 结构两种严重的可靠性问题:粘附和断裂。粘附意味着两个结构粘合在一起,并且无论是人为控制或非人为控制都无法将其分开。较小结构中的粘附更为重要,因为恢复力小于界面力。这两种力的控制甚为重要。通过化学处理可以减小界面力,本章我们不讨论该内容。对于粘附而言,控制接触

面积和表面条件是重要的。为了避免冲击加速度引起的较大挠度,器件中通常设计有限位结构来限制可动结构的运动。增加结构的弹簧常数可增加弹性恢复力,但在实际中是不现实的,因为高的刚度会降低灵敏度。

当较大的力施加到悬浮结构上且结构中的应力超过它的强度极限时,会发生断裂。由于 MEMS 中的结构单元通常是由脆性材料构成的,因此需要研究静态或动态负载作用下断裂的行为。MEMS 材料的机械可靠性评价方法是机械特性测量研究的主要动机之一。而用于性能设计的弹簧常数测量方法是另外一个动机。基于过去的机械特性测量研究,本文就 MEMS 的尺寸和特征,指出了机械可靠性评价的一些问题。

► MEMS 中机械可靠性评价相关问题

尽管已经完成了很多机械可靠性评价,但由于这些评价是由不同方法和在不同测试步骤下进行的,因此很难讨论 MEMS 可靠性特征的一般理论。这些方法的差别主要是由于缺乏标准测试方法及其步骤引起的。由于器件特性各异,因此也就无法建立标准的测试方法。后面将会讨论这些测试方法的差别。

在可靠性表征中决定测试条件会有很多困难。对于动态断裂(疲劳)测试,各种实验条件中有应力和应变幅度、应力比、测试频率及周期。大部分器件的结构在工作过程中会经历张应力和压应力,即经历的应力比率为 -1 。但是,断裂测试中通过单轴张应力将均匀应力加载到微小样品上是困难的。同样,不能精确地测量微小力、位移/拉伸,在循环加载期间,控制应力和应变也是困难的。

疲劳测试中,测试频率和周期是关键问题。在 MEMS 可靠性评价中,由于 MEMS 尺寸小,需要超高频率周期。为了降低可靠性表征的时间和成本,我们更喜欢振动测试;但是在 MEMS 结构中缺乏加速因子理论。同样,缺乏标准测试程序引起了测试条件的差异。

对于硅结构,寿命预测和测量结果的分析仍在研究中,这与缺乏微材料特性的有关知识密切相关。还没有建立好的数值模型,也没有寿命评估方法。半导体器件的寿命通常用加速寿命测试(ALT)来表征。在加速寿命测试中,需要知道测试条件中诸如温度、湿度、应力和频率等加速因子。但是,在 MEMS 中缺乏疲劳机制,很难进行可靠的加速寿命测试。

可靠性评估方法

MEMS 中已使用了各种可靠性评估方法,也报道了很多的研究论文。每一种表征方法的细节是不同的。因为这些表征方法的目的不同,如用于产品开发、材料科学以及评价方法本身的发展。本节中,为了理解可靠性评价方法中的差异,把