

国外电子与通信

MEMS 可靠性

MEMS Reliability

Allyson L. Hartzell

[美] Mark G. da Silva 著

[瑞士] Herbert R. Shea

恩云飞 贾玉斌 黄钦文 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是关于 MEMS 可靠性的一本专著, 主要内容包括: 用于寿命预测的可靠性统计理论, MEMS 产品设计阶段和制造阶段的失效模式, MEMS 在使用中的失效模式, MEMS 的失效根源及分析, MEMS 的试验和鉴定标准, 以及提升 MEMS 可靠性的工具和技术。本书的几位作者在 MEMS 可靠性方面拥有多年的学术研究和工业生产经验, 所写内容具有较高的参考价值。

本书可作为 MEMS 领域高年级本科生、研究生的教科书, 也可作为相关工程技术人员的参考书。

Translation from the English language edition:

MEMS Reliability by Allyson L. Hartzell, Mark G. da Silva, Herbert R. Shea

Copyright ©2011 Springer Science + Business Media

All rights reserved.

本书简体中文专有翻译出版权由 Springer Science + Business Media 授予电子工业出版社。专有出版权受法律保护。

版权合同登记号 图字: 01-2012-3039

图书在版编目(CIP)数据

MEMS 可靠性/(美)哈策尔(Hartzell, A. L.), (美)席尔瓦(Silva, M. G.), (瑞士)谢伊(Shea, H. R.)著; 恩云飞, 贾玉斌, 黄钦文译. —北京: 电子工业出版社, 2012. 11

书名原文: MEMS Reliability

(国外电子与通信教材系列)

ISBN 978-7-121-18805-3

I. ① M… II. ①哈… ②席… ③谢… ④恩… ⑤贾… ⑥黄… III. ①微电子技术-可靠性-高等学校-教材
IV. ① TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 253621 号

策划编辑: 余 义

责任编辑: 余 义

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

装 订: 北京中新伟业印刷有限公司

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: 787 × 1092 1/16 印张: 14.75 字数: 378 千字

印 次: 2012 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 55.00 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 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐 杨千里	北京邮电大学校长、教授、博士生导师 总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择和自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为作好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

原 著 序

MEMS 器件能使用多长时间？这是一个很重要的问题。实际上，对于任何在市场上取得成功的产品，使用寿命都是一个基本问题。当然，答案只能在统计的基础上给出，而统计的答案所依赖的数据，则来源于使用中恶劣的温度、湿度、化学侵蚀、冲击及其他条件下的寿命测量。这些加速寿命试验的设计，以及对试验数据的解释，则需要更深层的知识，这些知识包括可能导致失效的器件结构、组成材料、物理机理等，也包括失效速率与诸如温度、失效模式的物理和统计建模的相关性等。这种寿命试验的知识来自于单个器件失效的经验，不管是由于加工缺陷引起的早期失效，还是众所周知的机理，例如腐蚀或金属疲劳，仅当长期暴露在一定的应力环境中时才会出现。建立这样的知识库，并加以灵活运用，这是很高的要求。

最后，器件的可靠性要想达到高水平，则需要在器件设计、加工和质量控制等方面有严谨的方法。如果能够预测器件的失效模式，并在器件设计时利用该信息将失效风险降到最低，如果能严格监控加工过程，以保证整个器件没有瑕疵，如果能够基于合理的器件物理及其相关模型，设计加速寿命试验，如果能严格检查每种器件失效，记录每一个加工步骤，并对每一个观察到的失效追根溯源，以确认其根源，那么就有希望生产使用寿命可预测的可靠产品。

这本书是每一个专注于 MEMS 可靠性问题的人的理想起点。甚至不只是在 MEMS 自身的领域，因为 MEMS 可靠性触及了方方面面：从基本的化学和物理，到寿命预测的统计方法，甚至是器件设计和开发中的每个步骤，针对器件可靠性所需的组织管理问题。我很高兴本书能作为 Springer MEMS 参考书库的重要组成部分，呈现在 MEMS 领域中。

Stephen D. Senturia

2010 年 6 月

译 者 序

随着 MEMS 产品不断成熟, MEMS 产品在医疗、汽车及军事工业等领域得到广泛应用。基于市场的需求及政府更严格的安全制度, 可靠性将成为 MEMS 产品需要面对的挑战。

MEMS 可靠性是一个涉及范围非常广泛的领域。在一本书中覆盖 MEMS 可靠性的各个方面是非常困难的。本书的几位作者, 在 MEMS 设计、加工制造及可靠性分析等不同方面各自拥有丰富的经验, 因此, 本书是 Allyson L. Hartzell、Mark G. da Silva 和 Herbert R. Shea 三位作者将各自专长的领域中的知识系统化后提炼、综合而成的, 这使得本书内容较为全面。

本书的内容包括可靠性统计、可靠性设计、加工阶段的失效模式、使用中的失效物理、失效根源分析、MEMS 的失效和鉴定标准, 以及提升 MEMS 可靠性的工具和方法等内容。本书为首次接触 MEMS 可靠性的技术人员提供了对这门学科的理解, 也可作为 MEMS 可靠性领域的工程技术人员在制订 MEMS 可靠性方案时的指南。

电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室从“十五”期间就开始开展 MEMS 可靠性方面的研究, 关注国内外的最新研究动态。基于相关的工作基础, 译者非常愿意将此书介绍到国内。

本书由恩云飞研究员组织翻译和审校, 参加翻译的人员包括: 恩云飞、贾玉斌、黄钦文、方文啸、陈义强、李向光, 参加部分译文审校的人员包括: 艾果、尧彬、师谦、林晓玲。何小琦研究员对本书一些专业术语的翻译给予了帮助。

在翻译过程中, 我们对书中的专用术语进行多次讨论, 但由于翻译水平有限, 时间仓促, 书中不妥之处, 恳请读者批评指正。

译 者
2012 年 10 月

致 谢

Allyson Hartzell 非常感谢在 ADI 公司 MPD 部门的工作经历,并特别想对 Bill O'Mara, Ira Moskowitz, Ray Stata 和 Bob Sulouff 在这段时间的支持表示感谢。Hartzell 女士于 1997 年在 ADI 公司开始从事 MEMS 可靠性方面的工作;当她还在 MPD 部门工作的时候,就出版了本书中关于 Analog Devices 的例子。Hartzell 女士也想对 BMC(Boston Micromachines 公司)的 Paul Bierden、Jason Stewart 博士,以及波士顿大学的 Tom Bifano 教授表示感谢,感谢他们的评论和意见。Allyson Hartzell 非常感激在写书的过程中给予她坚定支持的 David,以及她的母亲 Silvana 和一直相信她的家庭。

Herb Shea 在加入贝尔实验室 MEMS 可靠性小组之后开始踏入 MEMS 可靠性领域。他非常感谢整个贝尔实验室的 LambdaRouter™ 团队,并特别感谢 S. Arney 博士、A. Gasparyan 博士、M. E. Simon 博士和 F. Pardo 博士。第 4 章中许多例子是基于贝尔实验室 MEMS 团队的研究工作的。Herb Shea 要对 Subramanian Sundaram 表示感谢,当他还是 EPEL 的实习生时,Subramanian Sundaram 就建立了第 4 章中有关冲击和振动的响应模型。Herb Shea 非常感激 Véronique 的耐心和她一直的支持,同时非常感激父母的爱和他们无私的奉献。

Mark da Silva 对 Coventor 公司、Exponent 公司和 Analog Devices 公司的所有现在和以前同事表示感谢,以及其他许多在 MEMS 领域中做出贡献的同事们表示感谢,感谢他们的教学和讨论。没有他们的帮助,Mark da Silva 就不会对 MEMS 可靠性领域有如此的认识。另外,Mark 也特别想感谢 Mike Judy、Shawn Cunningham、Robert Giasolli 和 Stuart Brown,他们协助制订了 ASME MEMS 可靠性的短期课程,为 MEMS 可靠性提供了非常宝贵的经验,并帮助完善了 MEMS 可靠性中的知识缺口。此外,Mark 非常感激 Stephen Senturia, Roger Howe, Stephen Bart 和 Steven Elliot(Springer)的评论和建议。最后,Mark 要非常感谢他的家庭——他的妻子 Anna、儿子 Max、父母和兄弟,感谢他们的耐心、爱及工作中一直以来的鼓励。

前 言

微系统技术,从消费电子到太空和军事领域,有多种多样的应用。微系统技术要获得接受并实现广泛增长,取决于产品在质量和费用上是否达到了恰当的平衡。本质上,质量是指一件产品能够按照数据手册中的规定来工作,也就是能够可靠地运行。MEMS 器件可靠性的基本方法使用了一些与高量产汽车及 IC 制造中相同的基本概念和方法,包括 FMEA(故障模式及影响分析-失效根源)、DfM(制造设计)、DfR(可靠性设计)和寿命预测。MEMS 中的主要问题是潜在应用的多样性、新材料及新工艺、独特的敏感与激励原理及制造技术,因此,本书是以应用于 MEMS 器件的可靠性技术及可靠性方法为中心的。

MEMS 可靠性,尤其是在可靠性物理方面的研究,即使在学术课程的初期仍然是一个非常大的领域。大学、政府实验室及企业的研究都已经并将继续为 MEMS 可靠性物理做出非常宝贵的贡献。但是,正在应用于工业中的及大规模生产的可靠 MEMS 器件数以亿计,一些更是应用于关键安全领域,这为我们提供了一个非常不同的角度。本书的作者们在 MEMS 设计、加工和可靠性等方面拥有多年的学术和工业生产经验。每个人都有自己专长的领域,他们聚集到一起,根据 MEMS 可靠性领域的研究主题及对成功产品可靠性开发案例的研究,编写了一本在方法上科学系统、结构上条理分明的著作。当为现实中的产品建立可靠性计划时,我们希望本书可以作为一个有用的指南,并从根本上进一步促使该领域内具有挑战性的难题的解决。

这不是一本汇编而成的书,因为在学术领域它可以为学生参加行业工作做准备;在进行任意产量的 MEMS 可靠制造时,可以作为工程师的参考指南,因此在 MEMS 可靠性领域本书是独一无二的。它汇集了可靠性统计、加速测试、加工失效模式、可靠性设计、使用中的失效物理、失效根源分析、失效分析、MEMS 的测试方法、MEMS 质量认证等。方法上持续改良,以促进这门具有挑战性的学科以协作的方式发展。这是非常关键的。

Allyson L. Hartzell(马萨诸塞州威明顿市)

Mark G. da Silva(马萨诸塞州威明顿市)

Herbert R. Shea(瑞士诺恩堡)

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 引言: MEMS 可靠性	1
参考文献	5
第 2 章 寿命预测	6
2.1 引言	6
2.2 可靠性数学方法	6
2.3 可靠性分布	7
2.3.1 浴盆曲线	7
2.3.2 指数分布	8
2.3.3 韦布尔分布	9
2.3.4 对数正态分布	12
2.3.5 加速因子	14
2.3.6 寿命单位	16
2.4 实例研究	17
2.4.1 TI 公司的数字微镜器件	17
2.4.2 实例研究: AD 公司的加速度计	21
2.4.3 实例研究: RF MEMS	24
2.5 小结	29
参考文献	30
第 3 章 失效模式和失效机理: MEMS 中的失效模式和失效机理	32
3.1 引言	32
3.2 设计阶段的失效模式	33
3.2.1 功能失效模式	33
3.2.2 MEMS 材料失效模式	42
3.2.3 非分析条件	48
3.3 制造中的失效模式	49
3.3.1 前端工艺缺陷	49
3.3.2 后端工艺失效	58
3.4 小结	60
参考文献	60
第 4 章 使用中失效	64
4.1 引言	64
4.2 机械失效模式	64

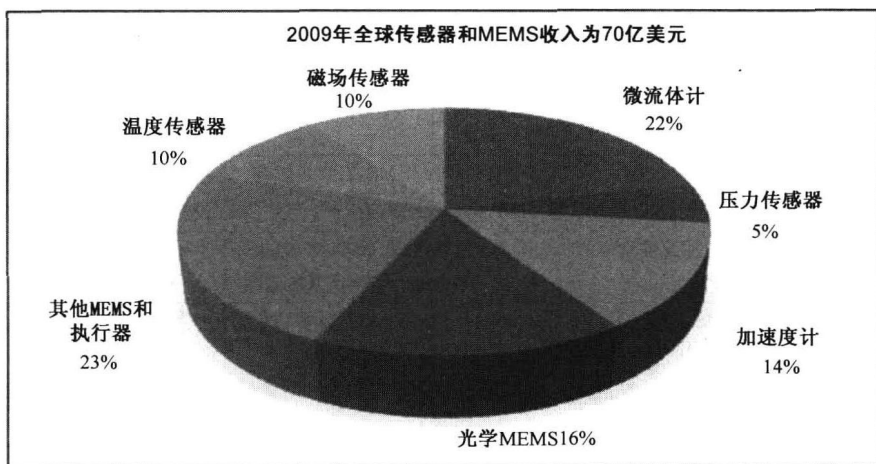
4.2.1	断裂	65
4.2.2	抗机械冲击性	68
4.2.3	振动	84
4.2.4	蠕变	86
4.2.5	疲劳	89
4.3	电失效模式	93
4.3.1	MEMS 的充电	93
4.3.2	电击穿及 ESD	105
4.3.3	电迁移	112
4.4	环境	113
4.4.1	辐照	113
4.4.2	硅的阳极氧化及电化腐蚀	120
4.4.3	金属腐蚀	125
4.5	小结	129
	参考文献	129
第 5 章	失效根源及分析	137
5.1	介绍	137
5.2	失效模式及影响分析(FMEA)	137
5.2.1	风险优先数(RPN)等级	138
5.2.2	RFMEA 例子	138
5.3	RFMEA 失效模式案例研究	140
5.3.1	RFMEA 预防措施:可靠性设计、镜面曲率匹配	140
5.3.2	RFMEA 预防:曲率测试	142
5.3.3	RFMEA 预防:进行加速热试验,对比预测值,比较曲率半径变化	144
5.3.4	生产过程中 RFMEA 方法的执行	145
5.4	寻找失效根源的失效分析工具	146
5.5	失效分析方法	146
5.5.1	激光多普勒测振仪(LDV)	146
5.5.2	干涉仪	148
5.5.3	扫描电子显微镜(SEM)	149
5.5.4	电子束散射探测仪(EBSD)	150
5.5.5	电子透射显微镜(TEM)	151
5.5.6	聚焦离子束(FIB)	152
5.5.7	原子力显微镜(AFM)	153
5.5.8	能量散射 X 射线分析(EDS、EDX、EDAX)	155
5.5.9	俄歇电子分析	156
5.5.10	X 射线光电子能谱(ESCA/XPS)	158
5.5.11	飞行时间二次离子质谱仪(TOFSIMS)	160
5.5.12	傅里叶变换红外光谱(FTIR)	160

5.6 小结	161
参考文献	162
第6章 试验和鉴定标准	164
6.1 介绍	164
6.2 MEMS 测试	164
6.2.1 MEMS 器件的分类	165
6.3 MEMS 测试设备	166
6.3.1 用于振动测试的振动台	166
6.3.2 可变形镜面的光学测试	167
6.3.3 动态干涉仪	168
6.3.4 MEMS 光学开关测试系统	170
6.3.5 激光多普勒测振仪/频闪视频系统	172
6.3.6 Sandia 微机械可靠性大批量测试	173
6.4 质量标准及质量鉴定	173
6.4.1 Mil-Std-883(目前是 H 版)	177
6.4.2 Mil-Std-810(目前是 G 版)	180
6.4.3 Telcordia 标准	182
6.4.4 汽车标准	183
6.5 MEMS 质量鉴定试验	184
6.5.1 配置在气囊上的 AD 加速度计	184
6.5.2 Motorola MEMS 压力传感器	186
6.5.3 例子:空间和军事领域的质量认证	188
6.6 小结	189
参考文献	190
第7章 持续改进:提升可靠性的工具和技术	192
7.1 合格率与可靠性的关系	192
7.2 合格率提高技术	194
7.2.1 可制造性设计(DfM)	194
7.2.2 测试设计(DfT)	199
7.2.3 工艺和封装集成	201
7.2.4 合格率模型	202
7.3 可靠性提升	203
7.3.1 工艺稳定性和重复性	203
7.3.2 产品鉴定	209
7.4 可靠性设计(DfR)	212
7.5 小结	214
参考文献	214
主题词索引	218

第 1 章 引言: MEMS 可靠性

在最近 20 年中, MEMS(Micro-Electro Mechanical Systems)的发展和市场上 MEMS 产品的推出已经取得了令人难以置信的进步, 实现了有良好可靠性的廉价、复杂器件的构想^①。MEMS 是集成的微型系统, 它结合了电子、机械或其他(磁、液体和热等)元件, 通常采用传统的半导体批量工艺技术来制造, 其尺寸范围从几纳米到微米, 甚至毫米^[1]。这些系统的敏感或执行模式被设计为与外部环境相互作用, 从而产生状态信息或在不同的程度上对外部环境进行控制。

近几年来, MEMS 技术在一些工业领域, 包括汽车、工业、医疗甚至军事的应用中已经获得广泛的认可。MEMS 市场规模和增长通常由典型的传感器总量来描述, 2009 年这个市场大约是 70 亿美元的规模, 由压力传感器、加速度计、光学器件和微流体器件占主要份额(如图 1.1 所示^②), 相当于大约 80 ~ 100 亿个元件。



Databeans评估

图 1.1 2009 年 MEMS 市场估值(Databeans 授权引用)

与传统的没有运动部件的半导体微电子器件不同, MEMS 面临几个严峻的技术挑战。比较而言, MEMS 设计师利用各种不同的材料, 在微米尺度下, 创造了各种不同的 3D 结构和高度复杂的形状(如图 1.2 所示)。MEMS 的另一个独特的挑战是目标产品的功能常常与其制造工艺密切相关, 导致了“一种产品, 一种工艺”。这与许多产品共用相同的工艺的 IC 工业显著不同(也就是说, MEMS 没有等同的 32 nm 工艺节点)。

近些年, MEMS 工艺或制造技术取得了很大的发展, 可利用标准光刻工艺对不同材料(包括传统的半导体材料)在微尺度上大批量进行加工, 制造 MEMS 器件。

① 世界已进入器件可靠性高、价格便宜、复杂度高的时代——V. Bush 博士(1945)^[2]。

② Databeans 评估。

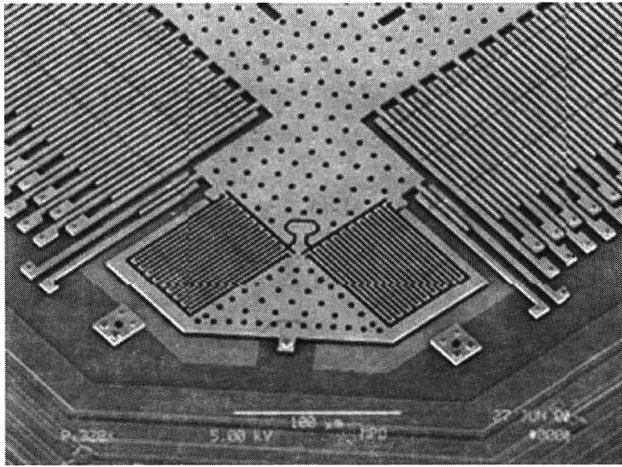


图 1.2 多晶硅制造的加速计(Analog Devices 授权引用)

这条路并不平坦，MEMS 制造技术的逐步发展已经取得了 20 年来的最好成果。当今，基于 MEMS 的产品已经从有限的样品量跨越到大批量生产阶段。诸如 Freescale 公司的 MPX 系列压力传感器、Analog Devices 公司的 ADXL 系列加速计和 Texas Instruments 公司的 DLP 镜，是仅有的几个成功取得性能和价格目标的产品范例，这些产品必然要取代一些特定的市场中的竞争性技术(如图 1.3 所示)。

时 间	应 用	对 MEMS 工业的影响	产业的主要参与者
1990	▼ 内置到设备的 MEMS(喷墨头等)	▼ 建立大规模生产	设备制造商和汽车制造商
2000	▼ MEMS 器件(加速度计等)	▼ 加快了低成本技术的发展,扩大了生产基础设施	半导体制造商
2005	▼ 集成的 MEMS(与 CMOS 及 LSI 等结合在一起的器件)	▼ 开发生产工艺标准,推进与 LSI 产品的集成	半导体制造商 MEMS 代工厂
2010	▼ 来自半导体制造商的 MEMS 集成器件	▼ 开发了具有 MEMS 功能的 IP 内核	硅半导体制造商/MEMS 代工厂

图 1.3 MEMS 的发展历史(MMC 授权引用)

尽管注意到产品要随市场不断改进和更新换代，但是从最初的概念到最终的批量生产和进入市场，开发这些产品平均要持续几年时间。目前为止，每个实例中最耗时的因素是对传统制造方法的保留(如图 1.4 所示)，它使得产品大批量生产要经历许多个不断学习和改进的周期，因此比预期要花更长的时间。MEMS 技术的新颖性、缺少足够的设计工具、没有标准工艺流程、封装和 MEMS 器件之间复杂的相互作用，以及 MEMS 可靠性，都是阻碍产品更快地推向市场的挑战。尽管当今面向制造设计(Design for Manufacturing, DFM)和全面质量管理(Total Quality Management, TQM)策略存在于几乎所有的工业界^[3]，但是在早期，缺少把 MEMS 工业中所有产品工程化过程联系起来的综合设计方法^[4]。近些年，就 MEMS 产品设计而言，产品研发方法中多采用自顶向下的设计工具。今天，为达到更短的设计周期和更快的批量生产，更多采用并行工程，如图 1.5 所示。而在预期应用中，主要的挑战仍然是 MEMS 产品的可靠性。

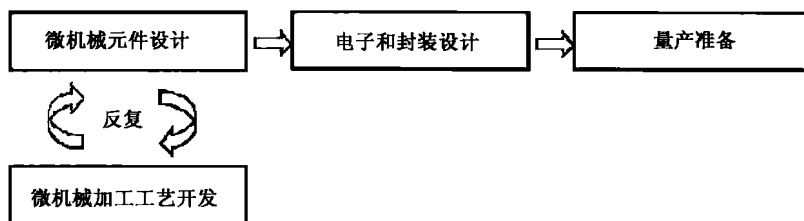


图 1.4 传统的 MEMS 产品开发周期(Sensors Expo 授权引用)

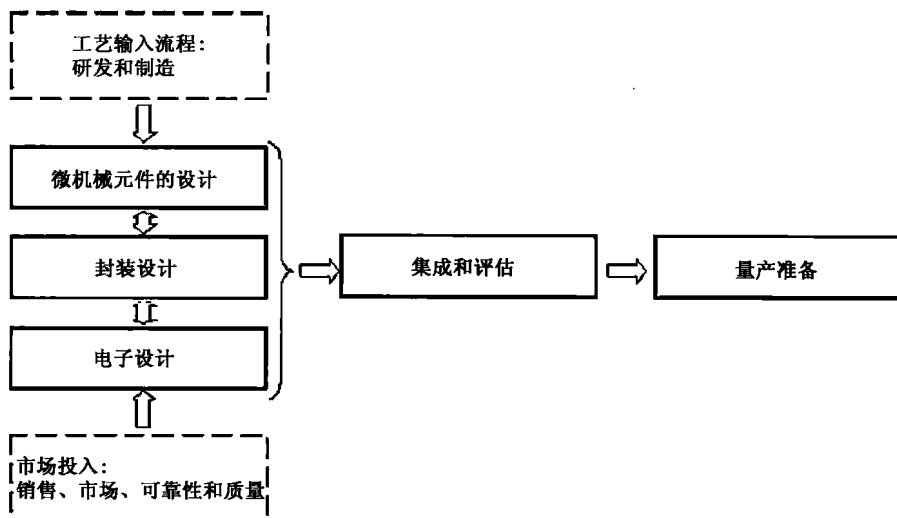


图 1.5 基于并行工程实践的产品开发流程(Sensors Expo 授权引用)

写本书的目的在于，通过提供对这门学科的理解和最佳实践，以帮助改善 MEMS 产品可靠性，并用文献证明这种方法能够促进 MEMS 产品的改进。期望给读者提供一个有价值的参考，包括详细的失效机理描述，可靠性物理的理解、寿命预测、试验方法和在各种 MEMS 产品中改进可靠性的许多范例。虽然如今的 MEMS 产业多样化，但为提前或在设计中解决具体的可靠性挑战，一个最佳的案例参考有助于给新产品的研发提供指导，从而缩短产品投入市场的时间。图 1.6 说明了本书所涉及专题之间的联系，虽然做了明显的简化，但还是能让读者理解 MEMS 可靠性专题之间的联系。

本章作为一个介绍性章节，加深对 MEMS 可靠性问题的理解。

第 2 章介绍了用于寿命预测的可靠性统计理论，包括韦布尔分布、对数正态分布和指数分布，给出了浴盆曲线概念，以及 MEMS 失效物理的加速因子和加速试验。本章通过三个基础案例向读者介绍了 MEMS 可靠性。阐述了 Texas Instruments 公司的 DLP 镜中与扭梁相关的蠕变失效加速方法，以及与 Analog Devices 公司加速度计测试试验中与粘连相关的机械冲击预测模型。这是两类用量大、可靠性高的 MEMS 产品。第三个案例研究的是有巨大潜力、但由于可靠性问题还没有进入市场的 MEMS 产品，并对 MEMTronics 公司的 RF MEMS 产品情况进行了回顾。

第 3 章详细探讨了在设计和制造阶段的 MEMS 技术和产品所引入的失效机理和模式。这一章介绍了起源于产品设计和制造阶段的失效模式对最终产品可靠性的影响。这些失效包

括功能性分析和非功能性失效,是产品寿命中的主要决定因素。本章的下半部分给出了由典型 MEMS 制造工艺失效模式导致的制造(或工艺)失效,包括像污染缺陷、释放粘连、材料内因和外因失效、运输和封装失效模式。

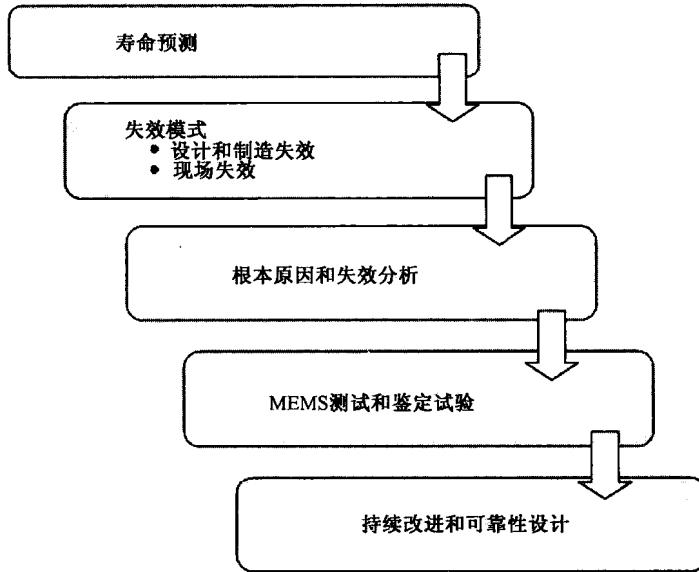


图 1.6 可靠性专题

第 4 章讲述了现场(工作和非工作状态)失效物理模式。这是一个综合性的章节,结合理论和实验数据,全面讨论了机械失效机理、电子失效机理和环境失效机理。对于每一种失效模式,都给出了缓解技术和性能/可靠性的折中办法。应记住,每一种失效机理都有一个不同于其他机理的占主导地位的影响因素,这取决于器件及器件制造工艺、工作环境和类别。本章针对 MEMS 的机械失效模式做了详细的讨论,包括断裂、抗冲击性、疲劳和塑性形变。电失效模式包括电介质击穿、电介质充电、ESD 和电迁移。环境失效模式包括致电离和非电离辐射对 MEMS 的影响,以及对金属材料 and 硅材料的不同类型的腐蚀。

第 5 章详细说明了找出失效根源的方案,并以失效模式及其影响分析(Failure Modes and Effect Analysis, FMEA)作为开始。FMEA 是一个很有用的工具,它能找到失效根源并做出改进,从而确定所包含的失效机理并将其消除。作为示范给出了典型的光学开关可靠性 FMEA。本章也包含丰富的失效分析内容,基于 MEMS 分析结果,描述了常规的失效分析技术。一个可靠性工作必须包含确定潜在失效模式、失效机理、设计和工艺中的风险区域的方案,以及纠正措施。确定了失效根源后,就要实施相应的改进,并应用于产品的生产中,有效控制失效发生,降低现场失效率。对于 MEMS 技术,使用已有的方法(比如 FMEA 和失效分析技术)来确定潜在的失效模式和机理是可靠性方法的重要部分。

第 6 章讨论了 MEMS 的测试和鉴定流程与程序,并讨论了相关可靠性。结合各种目标产业包括汽车和军事应用的质量标准,本章首次介绍了在 MEMS 行业中使用的独特测试设备和可靠性试验方法。实例涉及 MEMS 专用测试设备测试数据、资格审查及可靠性研究。

第 7 章总结了在 MEMS 产品中改进可靠性的最优方法。本章的信息资料是大量深入研究工作的一个概要,读者要了解更详细的信息,可参考本书的其他章节或本章末尾所列出的