

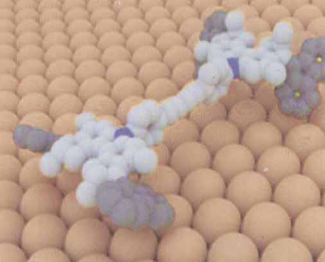
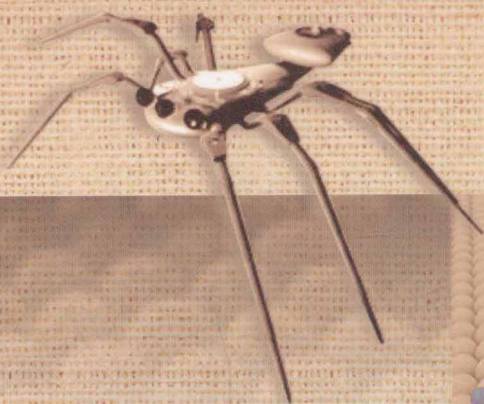


微米纳米技术丛书
MEMS与微系统系列

微米纳米器件 测试技术

Micro-Nanometer Devices
Measuring Technology

■ 张文栋 等 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

微米纳米器件测试技术/张文栋等编著. —北京:国防工业出版社, 2012. 10

(微米纳米技术丛书. MEMS 与微系统系列)

ISBN 978-7-118-07897-8

I. ①微... II. ①张... III. ①纳米材料—微电子技术—电子器件—测试技术 IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 072459 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18½ 字数 308 千字

2012 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

此书同时获得

总装备部国防科技图书出版基金资助

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邹江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

《微米纳米技术丛书·MEMS与微系统系列》

编写委员会

主任委员 丁衡高

副主任委员 尤 政

委 员 (以拼音排序)

丁桂甫 邓中亮 郝一龙 黄庆安

金玉丰 金仲和 康兴国 李佑斌

刘晓为 欧 黎 王晓浩 王跃林

温志渝 邢海鹰 杨拥军 张文栋

赵万生 朱 健

序

1994年11月2日,我给中央领导同志写信并呈送所著《面向21世纪的军民两用技术——微米纳米技术》的论文,提出微米纳米技术是一项面向21世纪的重要的军民两用技术,它的出现将对未来国民经济和国家安全的建设产生重大影响,应大力倡导在我国及早开展这方面的研究工作。建议得到了当时中央领导同志的高度重视,李鹏总理和李岚清副总理均在批示中表示支持开展微米纳米技术的跟踪和研究工作。

国防科工委(现总装备部)非常重视微米纳米技术研究,成立国防科工委微米纳米技术专家咨询组,1995年批准成立国防科技微米纳米重点实验室,从“九五”开始设立微米纳米技术国防预研计划,并将支持一直延续到“十二五”。

2000年的时候,我又给中央领导写信,阐明加速开展我国微机电系统技术的研究和开发的重要意义。国家科技部于当年成立了“863”计划微机电系统技术发展战略研究专家组,我担任组长。专家组全体同志用一年时间圆满完成了发展战略的研究工作,这些工作极大地推动了我国的微米纳米技术的研发和产业化进程。从“十五”到现在,“863”计划一直对微机电系统技术给以重点支持。

2005年,中国微米纳米技术学会经民政部审批成立。中国微米纳米学术年会经过十几年的发展,也已经成为国内学术交流的重要平台。

在总装备部微米纳米技术专家组、“863”专家组和中国微米纳米技术学会各位同仁的持续努力和计划的支持下,我国的微米纳米技术已经得到了长足的发展,建立了北京大学、上海交通大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中国电子科技集团公司第十三研究所等加工平台,形成了以清华大学、北京大学等高校和科研院所为主的优势研究单位。

十几年来,经过国防预研、重大专项、国防“973”、国防基金等项目的支持,我国已经在微惯性器件、RF MEMS、微能源、微生化等器件研究,以及微纳加工技术、ASIC技术等领域取得了诸多突破性的进展,我国的微米纳米技术研究平台已经形

成,许多成果获得了国家级的科技奖励。同时,已经形成了一支年富力强、结构合理、有影响力的科技队伍。

现在,为了更有效、有针对性地实现微米纳米技术的突破,有必要对过去的研究工作做一阶段性的总结,把这些经验和知识加以提炼,形成体系传承下去。为此,在国防工业出版社的支持下,以总装备部微米纳米技术专家组为主体,同时吸收国内同行专家的智慧,组织编写一套微米纳米技术专著系列丛书。希望通过系统地总结、提炼、升华我国“九五”以来微米纳米技术领域所做出的研究工作,展示我国在该技术领域的研究水平,并指导“十二五”及以后的科技工作。

丁衡高

2011年11月30日

前 言

随着微米纳米制造科学的快速发展,微米纳米器件在尺度范围、精度要求、制造效率、产品质量等方面得到了显著提高。微米纳米器件与系统由于具有集成度高,结构复杂,涉及高深宽比、多层、立体、可动微米纳米结构以及新效应、新机理、多域耦合效应等鲜明特点,因此,对微米纳米器件测试技术也提出了新的课题和挑战。目前,微米纳米器件测试技术一直是制约微米纳米制造科学发展的主要瓶颈之一,微米纳米器件测试技术的不完善,大大延长了微米纳米制造技术和器件系统研发的进程。因此,探索微米纳米器件测试技术新的测量原理、测试方法和表征技术,对传统产业的升级和高新产业的促进具有重要的推动作用,对国民经济、社会发展与国家安全具有重要的战略意义。

微米纳米器件测试技术是在微米纳米尺度及亚纳米精度下揭示尺度效应、表面/界面效应以及微米纳米结构与器件功能的测量理论与方法。它是微米纳米机械结构与器件制造的前提和基础,也是实现微米纳米制造过程定性或定量评判、高精度操纵与调控以及微米纳米器件质量水平控制的重要支撑手段。

本书在总结国家“863”计划项目和国家自然科学基金(重点基金)项目研究成果的基础上汇编而成,系统介绍了微米纳米结构和器件的几何量、形貌测试表征方法以及微米纳米器件的动态特性、在线测试方法等,将一些最新观点、最新成果涵盖其中。本书可作为仪器科学与技术学科以及相关学科专业研究生的基础课程讲义,主要目的是使学生对微米纳米器件测试技术的基本知识有一个比较系统、全面的了解和认识,培养他们对微米纳米相关学科的兴趣,为初学者提供一个微米纳米器件测试理论学习的平台。同时,也为从事微米纳米器件技术相关研究的专家、学者提供重要的参考资料。

本书全面系统地介绍了多种微米纳米器件测试理论和技术方法,融入了相关高校和科研院所专家学者多年来从事科研和教学工作的成果。全书分为6章,第1章简述微米纳米器件测试技术的发展、意义和研究现状(由太原理工大学张文栋(原中北大学)、中北大学薛晨阳编写),第2章介绍微米纳米结构的特征几何参量

测量技术(由中北大学丑修建、天津大学傅星、中科院上海微系统与信息技术研究所鲍海飞编写),第3章介绍微米纳米结构的动态特性测试技术(由中北大学熊继军、丑修建,天津大学栗大超,北京化工大学金翠云,中科院上海微系统与信息技术研究所鲍海飞,李昕欣,华中科技大学史铁林编写),第4章介绍微米纳米力学量测试技术(由哈尔滨工业大学陈立国、北京大学陈兢编写),第5章介绍 MEMS 在线测试技术(由北京大学陈兢编写),第6章介绍几种典型的微米纳米器件测试技术(由太原理工大学张文栋(原中北大学),中北大学丑修建、石云波编写)。由于水平有限,本书错误和遗漏之处在所难免,敬请各位批评指正。

感谢相关单位同仁在百忙之中为本书提供宝贵的原始资料和内容,并为本书提出了许多建设性的意见,使我们受益匪浅。在大家的通力合作下,全书编写工作得以顺利完成,在此表示衷心的感谢。同时对本书所引用的论文、图表和书籍的作者致以深切的谢意。另外,在书汇稿和编写过程中还得到许多同志的帮忙和协助,在此一并表示最诚挚的谢意。

编著者
2012 年 5 月

目 录

第 1 章 微纳测试技术概述	1
1.1 微纳米技术	1
1.1.1 MEMS 技术及其发展	1
1.1.2 NEMS 技术及其发展	2
1.2 微纳测试技术的研究	4
1.2.1 微纳测试技术的重要意义	4
1.2.2 微纳测试技术的研究内容	4
1.2.3 微纳测试技术的研究现状与发展趋势	6
第 2 章 微纳几何量测试技术	8
2.1 显微视觉测试技术	8
2.1.1 微纳平面几何参数测试	9
2.1.2 微纳结构的完整性检测与分析	10
2.1.3 微纳平面动态特性的测量	11
2.2 接触式三维形貌测试技术	11
2.2.1 扫描探针显微镜技术	11
2.2.2 近场扫描光学显微镜技术	18
2.2.3 扫描电子显微镜技术	23
2.2.4 透射电子显微镜技术	28
2.3 非接触式光学三维形貌测试技术	32
2.3.1 激光扫描显微测量技术	33
2.3.2 白光干涉形貌测试技术	35
2.4 微纳坐标测量技术	58
2.4.1 基本原理	59
2.4.2 微纳坐标测量仪器	62
2.5 薄膜厚度测试技术	66

参考文献	71
第3章 微纳动态测试技术	73
3.1 频闪动态视觉成像技术	73
3.1.1 频闪成像原理	73
3.1.2 微纳结构静态和动态特性测试设备	75
3.1.3 基于块匹配和相位相关的微纳平面运动测试技术	77
3.1.4 基于光流场的微纳平面运动测试技术	79
3.2 频闪显微干涉测试技术	82
3.2.1 频闪干涉视觉三维测量系统测试原理	82
3.2.2 系统光路	84
3.2.3 系统软件	87
3.3 显微激光多普勒测振技术	87
3.3.1 差动多普勒测振技术	90
3.3.2 激光扭振技术	90
3.3.3 纯扭振和纯弯曲振动的激光多普勒测量	92
3.3.4 激光多普勒颤振的测量	94
3.4 原子力显微镜测试技术	95
3.4.1 原子力显微镜的力学测试进展	95
3.4.2 原子力显微镜微纳米力学测试原理和方法	96
3.4.3 原子力显微镜微纳米力学测试系统及参考悬臂梁法的 弹性系数标定	101
3.4.4 悬臂梁弹性系数测试的系统验证	103
3.4.5 原子力显微镜在纳米计量上的应用	105
参考文献	107
第4章 微纳力学量测试技术	108
4.1 微结构残余应力测试技术	108
4.1.1 残余应力概念	109
4.1.2 残余应力测量	109
4.2 微结构轴向拉伸力学测试技术	117
4.2.1 传统拉伸方法力学测试技术	117
4.2.2 转换拉伸方法力学测试技术	122
4.2.3 集成拉伸方法力学测试技术	123
4.2.4 单轴拉伸位移的测量	124
4.3 纳米压入接触力学测试技术	125

4.3.1	纳米压痕技术的基本原理	125
4.3.2	纳米压痕测试的基本原则	133
4.3.3	纳米压入技术的特点	134
4.4	弯曲法微纳力学测试技术	135
4.4.1	弯曲梁法的分类及其原理	136
4.4.2	基于弯曲测试技术的微/纳米梁力学特性的表征方法	138
4.4.3	弯曲法测试技术的优缺点	141
4.5	谐振法微纳力学测试技术	141
4.5.1	谐振频率法	141
4.5.2	共振频率法	142
4.6	拉曼光谱应力测试系统	143
4.6.1	拉曼散射现象	143
4.6.2	拉曼光谱仪应力测试装置	144
4.6.3	拉曼应力测试理论研究	146
4.6.4	拉曼光谱应力测试	148
4.6.5	软件系统的搭建	155
4.6.6	实验测试	156
4.7	键合强度测试系统	157
4.7.1	键合强度测试机理	157
4.7.2	基于裂纹传播扩散法的键合强度测试系统	164
	参考文献	168
第 5 章	MEMS 在线测试技术	170
5.1	基于体硅加工工艺的在线测试技术	170
5.1.1	体硅加工技术	170
5.1.2	基于体硅工艺的定位平台	172
5.2	基于表面微机械加工工艺的在线测试技术	178
5.2.1	表面牺牲层工艺	179
5.2.2	基于表面加工工艺的多晶硅薄膜热导率测试结构	181
5.3	基于 Polymer 材料加工的在线测试技术	187
5.3.1	高分子 (Polymer) 材料概述	187
5.3.2	新型光敏聚酰亚胺微型阀	189
	参考文献	194
第 6 章	典型微纳器件测试技术	195
6.1	MEMS 压力传感器测试技术	195

6.1.1	MEMS 压力传感器简介	195
6.1.2	MEMS 压力传感器的原理及结构	195
6.1.3	MEMS 压力传感器的电气性能测试	200
6.1.4	MEMS 压力传感器的静态测试	204
6.1.5	MEMS 压力传感器的动态测试	208
6.1.6	MEMS 压力传感器影响量测试	209
6.1.7	MEMS 压力传感器的可靠性测试	210
6.2	MEMS 加速度传感器测试技术	213
6.2.1	MEMS 加速度传感器简介	213
6.2.2	中低量程 MEMS 加速度传感器的测试	214
6.2.3	高量程加速度传感器的性能参数	221
6.3	RF MEMS 测试技术	232
6.4	红外与光学微纳器件测试技术	240
6.4.1	红外与光学成像系统	240
6.4.2	红外光学成像测试	243
6.5	NEMS 器件测试技术	246
6.5.1	纳机电加速度传感器测试	246
6.5.2	纳机电声传感器测试	252
	参考文献	257

Table of Contents

Chapter 1	Micro-Nanometer Measuring Technology Summary	1
1.1	Micro-Nanometer Technology	1
1.1.1	MEMS Technology and Development	1
1.1.2	NEMS Technology and Development	2
1.2	Micro-Nanometer Measuring Technology Study	4
1.2.1	Important Significance of Micro-Nano Measuring Technology	4
1.2.2	Study Content of Micro-Nano Measuring Technology	4
1.2.3	Research State and Development Trend of Micro-Nano Test Technology	6
Chapter 2	Micro-Nano Geometry Measuring Technology	8
2.1	Microvision Measuring Technology	8
2.1.1	Micro-Nano Plane Geometry Parameter Test	9
2.1.2	Integrity Test and Analysis of Micro-Nano Structure	10
2.1.3	Micro-Nano Plane Dynamic Characteristic Test	11
2.2	Contact Mode Three-dimensional Appearance Measuring Technology	11
2.2.1	Scanning Probe Microscopy Technology	11
2.2.2	Near-field Scan Optics Microscopy Technology	18
2.2.3	Scanning Electron Microscope Technology	23
2.2.4	Transmission Electron Microscopy Technology	28
2.3	Non-contact Mode Optics Three-dimensional Appearance Measuring Technology	32
2.3.1	Laser Scan Microscope Measure Technology	33
2.3.2	White Light Interference Appearance Testing Technology	35
2.4	Micro- nano Three-coordinate Measuring Technology	58
2.4.1	Rationale	59
2.4.2	Micro- nano Coordinate Testing Instrument	62

2.5	Film Thickness Measuring Technology	66
	References	71
Chapter 3	Micro-Nano Dynamic Measuring Technology	73
3.1	Stroboscopic Dynamic Vision Imaging Technology	73
3.1.1	Stroboscopic Imaging Principle	73
3.1.2	Micro- nano Structure Static and Dynamic Test Devices	75
3.1.3	Micro- nano Plane Motion Measuring Technology Based on Block Matching and Phase Correlation	77
3.1.4	MEMS Plane Movement Testing Technology Based on Optical Flow Field	79
3.2	Stroboscopic Microscopy Interference Measuring Technology	82
3.2.1	Test Principle of Stroboscopic Interference Vision Measure System	82
3.2.2	System Optical Path	84
3.2.3	System Software	87
3.3	Microscope laser Doppler Vibration Measuring Technology	87
3.3.1	Differential Doppler Vibration Measure Technology	90
3.3.2	Laser Torsional Vibration Technology	90
3.3.3	Laser Doppler Vibration Measure of Pure Torsional Vibration and Pure Bend Vibration	92
3.3.4	Laser Doppler Flutter Test	94
3.4	Atomic Force Microscopy Measuring Technology	95
3.4.1	AFM Mechanics Measure Development	95
3.4.2	AFM Micro-Nano Mechanics Measuring Theory and Methods	96
3.4.3	Micro and Nano Mechanics Testing System and Reference Cantilever Elastic Coefficient Calibration	101
3.4.4	System Validation of Reference Cantilever Elastic Coefficient	103
3.4.5	Application of AFM in Nano measure	105
	References	107
Chapter 4	Micro-Nano mechanical Measuring technology	108
4.1	Microstructure Residual Stress Measuring Technology	108
4.1.1	Residual Stress Concept	109
4.1.2	Residual Stress Measure	109
4.2	Microstructure Axial Tensile Mechanical Measuring Technology	117
4.2.1	Traditional Tensile Method Mechanical Measuring Technology	117