

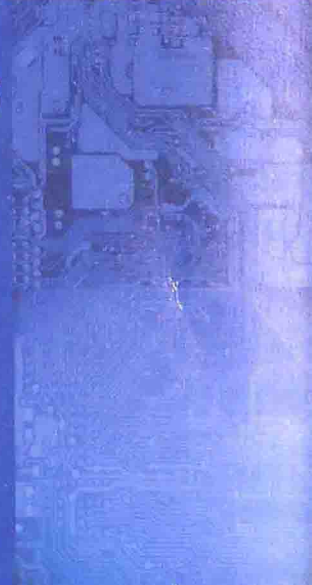
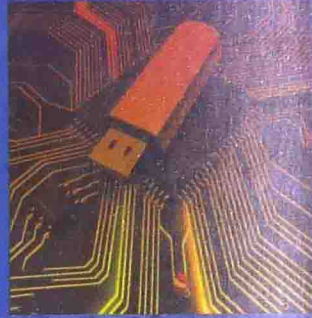


国际制造业先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

微系统光学 检测技术

OPTICAL INSPECTION OF MICROSYSTEMS



[德] Wolfgang Osten 主编
王伯雄 等译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际制造业先进技术译丛

微系统光学检测技术

[德] 伏尔夫岗·奥斯腾 主编
王伯雄 等译



机械工业出版社

微系统的尺度小,材料组合性强,功能多,对它的测量与检测构成了该领域新的挑战。本书内容丰富,覆盖面广,汇聚了各国知名大学共28位作者的卓越成果。书中将检测技术原理与众多应用实例相结合,介绍了微系统检测的应用光学技术,主要提供该领域中典型光学检测技术的全面回顾,包括光散射法、扫描探针显微技术、共焦显微技术、条纹投影技术、栅格和莫尔技术、干涉显微技术、激光多普勒测振技术、全息术、散斑测量术及光谱技术,同时还详述了上述技术相关数据的获取和处理方法。

本书是微纳米检测领域一本不可多得的参考书,适合从事微纳制造、微系统检测的科技人员、高等院校相关研究方向的师生参考使用。

Optical Inspection of Microsystems/by Wolfgang Osten/ISBN: 9780849336829
Copyright©2007 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved;

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记图字:01-2007-4184号。

图书在版编目(CIP)数据

微系统光学检测技术 / (德) 奥斯腾 (Osten, W.) 主编; 王伯雄等译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 2
书名原文: Optical inspection of microsystems
ISBN 978-7-111-45837-1

I. ①微… II. ①奥… ②王… III. ①微电子技术—光学测量 IV. ①TB96

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第027095号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:孔劲 责任编辑:孔劲 舒雯

版式设计:霍永明 责任校对:任秀丽

责任印制:刘岚

北京京丰印刷厂印刷

2014年8月第1版·第1次印刷

169mm×239mm·28.75印张·626千字

0 001—2 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-45837-1

定价:95.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

社服务中心:(010) 88361066

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

策划编辑电话:(010) 88379772

网络服务

教材网:<http://www.cmpedu.com>

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

译丛序言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是20世纪80年代提出的，它由机械制造技术发展而来，通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制：制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术具有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方向发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流源远流长

近年来，国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到，我国制造业与工业发达国家相比，仍存在较大差距。因此必须加强原始创新，在实践中继承和创新，学习国外的先进制造技术和经验、引进消化吸收创新，提高自主创新能力，形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史，可以追溯到唐朝甚至更远一些，唐玄奘去印度取经可以说是一次典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式，早在 20 世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体，图书是一个海洋，虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段，但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性，看书总比在计算机上看资料要方便习惯，不同层次的要求可以参考不同层次的图书，不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书，同时它具有比较长期的参考价值 and 收藏价值。当然，技术图书的交流具有时间上的滞后性，不够及时，翻译的质量也是个关键问题，需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者做出贡献，为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作，从而能够提升我国制造业的自主创新能力，引导和推进科研与实践水平的不断进步。

三、选译严谨质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书，在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量，力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担，充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书，组成一套“国际制造业先进技术译丛”。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性，应能代表相关专业的技术前沿，对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业，例如机械、材料、能源等，既包括对传统技术的改进，又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员, 高等院校的教师和学生, 可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版“国际制造业先进技术译丛”的专家学者, 感谢积极推荐国外相关优秀图书, 仔细评审外文原版书, 推荐评审和翻译的知名专家, 特别要感谢承担翻译工作的译者, 对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意, 同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助, 欢迎广大读者不吝指教, 提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

译者序

微纳米技术是 21 世纪最重要的科学技术之一，微系统也称为微机电系统 (MEMS) 或微光机电系统 (MOEMS)，采用 LIGA 技术和紫外线光刻技术，实现具有高深宽比和结构尺寸的非硅和硅材料微零件，集成了传感器、执行器和信号处理器的众多功能。由于微系统的尺度小，材料组合性强，功能多，对它的测量与检测便构成了该领域中新的挑战。本书讲述了微系统检测的应用光学技术，主要提供该领域中典型光学检测技术的一个全面的回顾，包括光散射法、扫描探针显微技术、共焦显微技术、条纹投影技术、栅格和莫尔技术、干涉显微技术、激光多普勒测振技术、全息术、散斑测量术及光谱技术，同时还介绍了有关这些技术的数据获取和处理方法。

本书主编伏尔夫岗·奥斯腾是著名的德国斯图加特大学应用光学技术研究所的教授，长期从事光学测量技术、传感器技术和光学图像处理的研究工作，尤其是微系统和微纳结构器件的测量研究。本书内容丰富，覆盖面广，汇聚了各国知名大学共 28 位作者的辛勤工作成果。本书在介绍每种检测技术原理的同时，给出了许多应用实例，十分有利于读者理解和仿效，是微纳米检测领域一本不可多得的参考书。

本书由清华大学王伯雄教授主译，参加翻译工作的还有：刘文峰（第 1 章），刘涛（第 2 章），张金（第 3、4 章），崔园园（第 7、10、11、14 章），柳建楠（第 8 章），秦垚（第 9 章），任怀艺（第 12 章），赵博华（第 13 章），译文的整理由罗秀芝担任，全书由王伯雄审校。

本书内容广、篇幅大，由于译者水平有限，书中缺点错误在所难免，恳请读者批评指正。

译者
于清华园

前 言

复杂装置如传感器和执行器，它们的小型化构成了现代技术中的最大挑战之一。不同制造技术，如 LIGA 技术和紫外线光刻术，能够在从纳米到毫米的范围内实现具有高深宽比和结构尺寸的非硅的和硅的微零件。LIGA 是一个缩略语，代表以下工艺的主要步骤，即深 X 射线光刻、电铸和塑模成型。这三个步骤能够用来批量生产高质量的微零件和微结构部件，尤其是使用廉价的塑料、陶瓷和金属来制造这些零件。基于紫外线光刻术或先进硅蚀刻工艺（ASE）的技术能够直接集成电子器件实现先进的微机电系统（MEMS）装置。其他工艺如激光微加工、电化学铣削（ECM）、放电加工及纳米压印光刻术（NIL）同时也为紫外线光刻、真空紫外光刻和下一代的光刻术提供一种经济和高分辨率的替代技术。

一种新技术要取得商业成功，不断增长的产量、高的系统性能、产品的可靠性和寿命是十分重要的，因此，高的质量标准对所有的制造商都是必需的。然而，随着不断增长的小型化，测量和试验的重要性迅速增大，因此需要采用微系统技术进行测试。可靠性和寿命极大地依赖于材料的性质和热力学设计。与常规技术相比较，微系统技术中的情况尤其复杂。现代微系统（MEMS 和 MOEMS）及其零件用多样性的材料和材料组合的大量集成来表征。这种多样性用来实现非常不同和变化的功能，如传感器和执行器性能、信号处理等。再者，已知与新的结构设计相结合的材料的行为不能容易地被理论仿真所预测。比如，用有限元方法计算得到的关于微装置操作性能的错误预测的可能原因是：缺乏可靠的微尺度的材料数据和边界条件。所以，测量和试验程序将面对一组复杂的要求。大体上，我们面临以下的潜在挑战：

- 硅片尺度的微观和纳观的测量。
- 高度异类混合系统的不同尺度性质和功能性质的快速在线测量。
- 系统技术指标包括几何参数、动力学参数和热力学参数的验证。
- 快速和可靠地识别表面和表面缺陷，并能够检查和修复。
- 复杂深宽比三维结构的测量。
- 已为块体材料块体所定义的、但将为微尺度所规定的材料性质的确定。

我们要求测量和检测的技术对被检查的产品应该是快速、鲁棒和较低成本的。对这种要求的原因是显而易见的：在很大样品上确定的性质不能够没有经过实验的验证，便进行缩小。另外，在微尺度上，材料行为明显地受生产工艺所影响。因此，我们需要简单、可靠的方法来分析微零件的形状和变形。结合我们对施加载荷和合适的物理模型的认识，这些数据能用于导出材料参数和不同的系统性质。很明

显，单个的方法和一类测量技术都不能完全满足这些要求。常规的拉伸试验技术（如应变片）因为它们有限的分辨率和部分不希望的接触特性，不能试验亚毫米尺寸领域的样品。其他的方法如微硬度测量，则不能揭示材料方向的变化性质。

然而，全场光学方法给常规方法提供了一种有前景的替代方法。这些方法的主要优点是它们的非接触、无破坏和现场工作原理；快速的响应潜力；高灵敏度和精度（典型的位移分辨力为几纳米，应变值为 100 微应变）；高的数据点分辨力（比如对亚毫米视场为 1000×1000 点）；系统的先进性能即对结果的自动分析；以及为满足内在的数学或解析的模型的数据预处理。因此，本书为微系统检测的应用光学测量技术的研究提供了一个适时的回顾。作者对最重要的和最具有挑战性的光学方法，如光散射法、扫描探针显微技术、共焦显微技术、条纹投影技术、栅格和莫尔技术、干涉显微技术、激光多普勒测振技术、全息术、散斑测量术、以及光谱技术给出了一个总体的概述。此外，还介绍了数据获取和处理的现代方法（比如数字图像处理和相关技术）。

编者希望本书能有力地推进光学方法在微系统研究中的应用。在此感谢所有作者对本书做出的贡献，他们提供了对在富有魅力和挑战的光学微系统测量技术领域中的当今技术水平全面的回顾。最后，编者还要感谢由 Taisuke Soda、Preethi Cholmondeley、Gerry Jaffe 和 Jessica Vakili 所代表的 CRC 出版社所给予的合作。

伏尔夫岗·奥斯腾

于斯图加特

目 录

译丛序言

译者序

前言

第 1 章 用于 MEMS 测试的图像处理和计算机视觉	1
1.1 概述	1
1.2 任务分类	1
1.3 图像处理和计算机视觉元件	3
1.3.1 光、颜色和滤波器的行为	4
1.3.2 照明	7
1.3.3 透镜系统	11
1.3.4 传感器	13
1.4 图像数据的处理与分析	20
1.4.1 计算机视觉过程	20
1.4.2 图像数据预处理和处理方法	22
1.4.3 图像数据分析方法	29
1.4.4 解决测试任务	33
1.5 商业与非商业的图像处理和计算机视觉软件	44
1.6 用于光学计量中条纹图案的图像处理技术	45
1.7 结论	47
参考文献	47
第 2 章 微系统检测用图像的相关技术	50
2.1 概述	50
2.2 用数字图像相关 (DIC) 技术的变形测量法	51
2.2.1 数字微图像的互相关算法	51
2.2.2 位移和应变场的提取	55
2.2.3 确定衍生性质	58
2.2.4 功能与限制	59
2.2.5 有限元 (FE) 仿真与 DIC 方法的结合	62
2.3 DIC 应用中的基本设备	64
2.3.1 测量系统元件	64
2.3.2 对高分辨率扫描显微镜的要求	65
2.3.3 软件工具	67
2.4 DIC 技术在微系统中的应用	70

2.4.1	微元件的应变分析	70
2.4.2	缺陷检测	73
2.4.3	有限元模型验证	74
2.4.4	材料性质测量	75
2.4.5	微裂纹评估	82
2.4.6	基于 AFM 微图的三维变形分析	87
2.4.7	确定微元件中的残余应力	87
2.5	总结与展望	92
	参考文献	93
第3章 微组件和微结构光散射检查技术		96
3.1	概述	96
3.2	光散射的理论背景	96
3.3	测量装置	98
3.4	光散射法的标准化	102
3.5	微元件和微结构检查应用	102
3.6	光散射技术和轮廓测量技术组合	107
3.7	结论和展望	109
	参考文献	110
第4章 原子力显微镜表征及测量微元件		113
4.1	概述	113
4.2	AFM 部件及工作原理	113
4.2.1	探针	114
4.2.2	扫描器	114
4.2.3	控制器	115
4.2.4	探测、输入信号、设置点与错误信号	115
4.2.5	Z 反馈回路	116
4.3	AFM 成像模式	116
4.3.1	一次 AFM 成像模式	116
4.3.2	二次 AFM 成像模式	118
4.4	AFM 非成像模式	125
4.5	AFM 用于微组件检查——案例研究	126
4.6	原子力轮廓仪 (AFP) ——AFM 和触针轮廓仪的组合	131
4.7	AFM 的补充光学测量技术	133
4.8	结论与展望	133
	参考文献	134
第5章 MEMS 测量用光学轮廓测量技术		135
5.1	概述	135
5.2	共焦显微镜术原理	135
5.2.1	共焦点传感器	135

5.2.2	共焦显微镜	139
5.2.3	用共焦显微镜测量	140
5.2.4	MEMS 测量应用	142
5.3	显微镜深度扫描条纹投影 (DSFP) 原理	145
5.3.1	概述	145
5.3.2	强度模型	145
5.3.3	实验实现	146
5.4	结论	149
	参考文献	149
第 6 章	微测量用栅格法和莫尔法	152
6.1	概述	152
6.2	栅格或光栅制造方法	153
6.2.1	光刻胶	153
6.2.2	移动点源全息干涉仪	153
6.2.3	电子束平版印刷术	153
6.2.4	聚焦电子束 (FIB) 铣削	155
6.3	微莫尔干涉仪	155
6.3.1	原理	155
6.3.2	光纤微莫尔干涉仪	157
6.3.3	在微电子封装中的应用	159
6.3.4	结论	162
6.4	采用高分辨率显微术的莫尔法	162
6.4.1	电子束莫尔法	162
6.4.2	AFM 莫尔法	163
6.4.3	SEM 扫描莫尔法	164
6.4.4	FIB 莫尔法	165
6.4.5	TEM 莫尔法	165
6.4.6	应用	166
6.4.7	结论	169
6.5	显微栅格法	170
6.5.1	概述	170
6.5.2	采用傅里叶变换法的栅格线图形分析方法	172
6.5.3	结合相移法的栅格线图形分析法	175
6.5.4	栅格衍射法	175
6.5.5	应用	177
6.6	结论	183
	参考文献	183
第 7 章	微零件面内位移和应变测量的光栅干涉法	186
7.1	概述	186

7.2	光栅干涉法原理	186
7.3	波导光栅干涉法	189
7.3.1	波导光栅干涉仪头的概念	189
7.3.2	用于位移矢量测量的改进波导光栅干涉仪	191
7.4	测量系统	192
7.5	样品光栅技术	193
7.6	波导光栅干涉技术的典型应用	194
7.6.1	材料常数的确定	194
7.6.2	多晶材料分析	194
7.6.3	半导体微型激光器矩阵试验	196
7.6.4	电子封装	198
7.7	结论	199
	参考文献	199
第 8 章 微系统特性的干涉显微检测技术		201
8.1	概述	201
8.2	干涉显微镜	201
8.2.1	工作原理	201
8.2.2	光源	202
8.2.3	干涉仪	203
8.2.4	光程差调制的干涉显微镜	204
8.2.5	波长调制的干涉显微镜	204
8.2.6	直接相位调制的干涉显微镜	204
8.2.7	光谱分解干涉显微镜	204
8.3	双光束零差干涉显微镜建模	205
8.3.1	单色照明双光束干涉技术	205
8.3.2	宽带照明双光束干涉技术	206
8.3.3	双光束干涉显微镜	207
8.4	干涉显微镜静态测量	207
8.4.1	单色干涉显微技术检测表面轮廓	207
8.4.2	低相干干涉测量表面轮廓	208
8.5	干涉显微测量技术的性能和问题	209
8.5.1	边缘效应	209
8.5.2	非均质表面的测量	209
8.5.3	膜厚成像	211
8.5.4	谱反射率成像	212
8.6	干涉轮廓仪在 MEMS 领域的应用	214
8.7	干涉显微镜动态测量	215
8.7.1	概述	215
8.7.2	动态条件下的干涉信号	215

8.7.3 频闪干涉显微镜振动测量	217
8.7.4 时间平均干涉显微技术振动测量	220
8.7.5 动态干涉显微技术在 MEMS 领域的应用	221
8.8 结论	221
致谢	222
参考文献	222
第 9 章 用激光多普勒测振技术测量运动中的 MEMS	227
9.1 概述	227
9.2 激光多普勒效应及其干涉检测	228
9.2.1 激光多普勒效应	228
9.2.2 光探测中的散粒噪声	230
9.2.3 干涉检测	230
9.2.4 波前像差和激光散斑	231
9.3 激光多普勒测振技术	231
9.3.1 光学装置	231
9.3.2 零差和外差检测技术	232
9.3.3 信号处理	234
9.3.4 数据采集	239
9.4 全场测振技术	241
9.4.1 扫描测振仪	241
9.4.2 工作偏差形状	242
9.5 微观结构的测量	243
9.5.1 光学装置	243
9.5.2 3D 技术	245
9.5.3 范围和限制	247
9.6 分辨力和精度	249
9.6.1 噪声限制的分辨力	249
9.6.2 激光多普勒测振仪的测量精度和标定	252
9.7 与其他技术的结合	257
9.8 实例	260
9.8.1 双模式 MEMS 反射镜	260
9.8.2 悬臂梁加速度传感器	261
9.9 结论与展望	265
参考文献	267
第 10 章 一种用于对 MEMS 和 MOEMS 离面变形进行静态、准静态和动态 评价的干涉测量平台	270
10.1 概述	270
10.2 干涉测量平台的结构和操作原理	271
10.3 通过“逐点”偏移法对膜进行光机特性描述	273

10.3.1	SiO _x N _y 薄膜的组成和原子密度	273
10.3.2	SiO _x N _y 薄膜的机械特性	276
10.3.3	实验结果	278
10.4	通过离面微位移干涉测量确定刮抓式驱动执行器 (SDA) 的机械技术	284
10.4.1	SDA 的操作	285
10.4.2	实验结果	286
10.5	使用带频闪技术的干涉测量法动态评估工作中的微光机电系统器件	290
10.5.1	概述	290
10.5.2	工作薄膜的动态特性	290
10.5.3	扭转微镜的动态特性	293
10.6	结论与展望	295
	致谢	295
	参考文献	295
第 11 章	试验电子封装和 MEMS 的光电子全息术	298
11.1	概述	298
11.2	MEMS 制造过程概述	299
11.3	光电子全息术	301
11.3.1	光电子全息显微镜 (OEHM)	302
11.3.2	静态模式	303
11.3.3	时间平均模式	304
11.4	典型应用	305
11.4.1	NIST 可溯源量具的试验	305
11.4.2	MEMS 加速度计的研究和表征	307
11.4.3	晶片级试验	311
11.4.4	表面安装技术的测量和模拟	314
11.5	总结	318
	致谢	319
	参考文献	319
第 12 章	数字全息术及其在 MEMS/MOEMS 检测方面的应用	322
12.1	简介	322
12.2	数字全息术理论及基本原理	323
12.2.1	波阵面的数字记录和重构	323
12.2.2	数字全息术重构的原理	327
12.2.3	离散化影响	332
12.3	数字全息干涉	333
12.3.1	基本原理	333
12.3.2	全息位移测量	335
12.3.3	全息形状测量	337
12.3.4	直接的和绝对的相位测量	340

12.3.5 数字全息的优点	343
12.4 数字全息显微镜 (DHM)	343
12.4.1 数字全息显微术的光学装置	344
12.4.2 数字全息术中的像差补偿	345
12.4.3 通过在图像重构平面测定相位码来去除畸变	346
12.4.4 数字全息显微术 (DHM) 中的焦点跟踪	352
12.4.5 与距离和波长无关的控制尺寸	356
12.5 数字全息术用于微器件研究	359
12.5.1 微器件研究的实验前提条件	359
12.5.2 采用技术表面研究物体	363
12.5.3 带光学表面的微器件研究	372
12.6 结论	388
参考文献	388
第 13 章 微系统的散斑测量法	391
13.1 概述	391
13.2 基本原理	391
13.2.1 成像系统中的散斑性质	391
13.2.2 从散斑图案中提取信息	394
13.3 应用	405
13.3.1 晶片水平的质量保证	405
13.3.2 工作行为的表征	408
13.4 结论	417
参考文献	418
第 14 章 MEMS 检测的光谱技术	420
14.1 概述	420
14.2 拉曼光谱法 (RS)	420
14.2.1 原理	420
14.2.2 测量仪器	422
14.2.3 在微系统中的应用	423
14.3 光谱椭偏法 (SE)	432
14.3.1 原理	432
14.3.2 在 MEMS 中的应用	433
14.4 双光束光谱法 (DBS)	434
14.4.1 原理	434
14.4.2 在 MEMS 中的应用	434
14.5 X 射线光电子光谱法 (XPS)	436
14.5.1 原理	436
14.5.2 在 MEMS 中的应用	436
14.6 高分辨率电子能量损失光谱法 (HREELS)	437

14.6.1	原理	437
14.6.2	在 MEMS 中的应用	437
14.7	俄歇电子能谱法 (AES)	438
14.7.1	原理	438
14.7.2	在 MEMS 中的应用	438
14.8	布里渊散射 (BS)	439
14.8.1	原理	439
14.8.2	在 MEMS 中的应用	439
14.9	结论	439
	参考文献	440