

微光机电系统

Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems

Manouchehr E.Motamedi 著

周海宪 程云芳 译

周华君 程 林 校



国防工业出版社

National Defense Industry Press

微光机电系统

Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems

Manouchehr E. Motamedi 著

周海宪 程云芳 译

周华君 程 林 校

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军—2008—062 号

图书在版编目(CIP)数据

微光机电系统 / (美) 莫塔麦迪 (Motamedi, M. E.) 著;
周海宪, 程云芳译. —北京: 国防工业出版社, 2010. 1
ISBN 978 - 7 - 118 - 06365 - 3

I. 微... II. ①莫... ②周... ③程... III. 微光技术—应用—
机电系统 IV. TH - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 092119 号

Copyright [2005] SPIE. All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the Publisher and SPIE.

Authorized Chinese-language edition

版权所有, 侵权必究。

※

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)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 960 1/16 印张 33 字数 659 千字

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

译者序

近代光学和光电子技术的迅速发展使光电子仪器及其元件(包括光学元件和机械零件)发生了巨大的变化,最重要的变化之一是从宏观概念发展到微观概念,因此,形成了不同的微光学仪器研究领域:微光学系统(Micro-Optics)、微机电系统(MEMS)和微光机电系统(MOEMS)。

微光学元件是应用现代微加工技术,例如光学蚀刻技术、激光束直写和电子束直写以及反应离子束蚀刻技术制造出的一类光学零件,一般地,这种元件的外形尺寸是微米数量级。微光学元件包括衍射和折射两种,例如微透镜、微反射镜、微扇出光栅、最佳相位元件和偏振器等,已经成为实现(而利用传统的光学元件不可能实现或者是不现实的)各种光学功能的强有力工具,几乎在所有的工程应用领域中,特别是在现代国防科学技术领域中有重要的应用价值和广阔的应用前景。与传统的光学元件相比,微光学元件最大的优点就是可以将大的复杂光学系统集成成为非常紧凑的形式,使光电子仪器及其零部件更加小型化、阵列化和集成化,因此,微光学元件是制造小型或超小型光电子系统的关键元件。

微机械加工技术与集成电路的发展密切相关,批量生产和减小尺寸是集成电路高度商业化成功的关键,微传感器得到了非常广泛的应用。因此,微机械加工技术是微电子处理工序中一种很重要的方法,对大量的微米级结构,例如沟、槽、微型梁和桥都必须使用微机械加工技术。微机电系统(MEMS)是利用微加工技术制造出的三维机械—电子装置,一个典型的 MEMS 装置至少包含一个可运动结构以满足某种机械作用的需要,顾名思义, MEMS 装置由电子和机械两种元件组成。在美国和其他国家,尤其在欧洲的一些国家,所有研发微系统的项目都广泛以缩写 MEMS 代表微电子—机械系统(micro-electro-mechanical systems)。

近期,工业界尤其是电信和光通信领域的快速发展,强烈要求光电装置微型化,这就必然导致微光学和微机电(MEMS)技术的融合。微光学与微机电系统(MEMS)相集成创立了一种新型的微光电系统,即微光学—微电子—微机械系统(micro-opto-electro-mechanical systems),也称为“光学 MEMS(optical MOEMS)”,简称为微光机电系统,缩写为 MOEMS,其性能和功能都达到了空前水平,不断开拓新的应用领域,并逐步地证明:对于需要高功能、高性能和低成本的光电子课题,这种技术是一种非常诱人的解决办法。

MOEMS 技术是 20 世纪 90 年代后期科学技术领域形成的一颗新星。MOEMS 发展的初期阶段,演示验证的主要目的是使宏观系统小型化,集成电路生产低成本化。后来,在该技术引导下研发出一大批新颖的微型器件,使光子学系统有了一个根本的变化,使光学网络和电信系统具有新的外形尺寸。到目前为止,该技术仍然是一种非常先进的技术。在不久的将来,全新型的微系统将会渗透到各个应用领域,得到更为广泛的应用。

《微光机电系统》一书的作者 M. Edward Motamedi 博士是国际上著名的微系统研究专家,获得美国西北大学(Northwestern University)电气工程系硕士和博士学位,并获得佩珀代因大学(Pepperdine University)行政管理专业 MSA 学位。在 Rockwell 公司国际部工作多年,有着丰富的微光机电系统科学研究经验和很强的行政管理能力。20 世纪 90 年代,M. E Motamedi 博士创建了两个技术公司:Asenten 和 MOEMS 技术公司,并担任公司的首席执行官,同时还担任了欧洲 Revoltech Microsystems 公司的总裁和首席科学家。Motamedi 博士一直引领着世界范围内的微机电系统和微光学技术的研究方向,目前,正逐步转向研究微光机电系统的生产制造技术。

Motamedi 博士是电气和电子工程师协会(IEEE)的资深会员,电气和电子工程师协会 Buenaventure 分部的副主席。同时又是国际光学工程师协会(SPIE)会员,曾担任过 SPIE 会议的主席以及多个 SPIE 有关 MEMS 和 MOEMS 会议的主席,现在是 SPIE 会议指导委员会的主席。在各种会议和期刊上发表过 100 多篇文章,获得 SPIE2005 年度终身成就奖。拥有 12 项(美)国内外高科技专利。

Motamedi 博士是 JM3 (MICRO/Nanolithography, MEMS and MOEMS) 杂志的资深编辑,是 11 种 SPIE 会议文章专辑的编审,开发有三种短训班课程。2005 年 4 月出版了新书《微光机电系统(Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems)》。

随着 MOEMS 越来越成熟以及许多其他光学分支与 MEMS 的结合,出版该领域内一本专著变得越来越有必要。由于该技术的先进性以及各种光学技术与 MEMS 相结合所具有的潜在优势,该书是一本跨(自然)学科的专著。为了使该书能够为读者提供全面的、实用的、权威性的指导,Motamedi 博士担任主编,同 23 位专家共同完成了《微光机电系统(Micro-Opto-Electro-Mechanical System)》一书的编撰。其 23 位专家中 12 位来自学术界,7 位来自工业界,4 位来自政府和国家实验室。

《微光机电系统(Micro-Opto-Electro-Mechanical System)》一书共由 12 章组成:

第 1 章 概述微光学、微机电(MEMS)和微光机电系统(MOEMS);

第 2 章 MEMS 技术的基础知识以及普通的微加工技术;

第 3 章 微光学技术光偏转的概念及主要的加工技术;

第 4 章 MOEMS 系统应用的微传感器和微致动器;

第 5 章 集成微系统模块——微光学元件;

- 第6章 纤维光学元件;
- 第7章 光学扫描器技术;
- 第8章 MOEMS 技术在显示、可见光和红外成像系统中的应用;
- 第9章 MOEMS 在自适应光学中的应用;
- 第10章 MEMS 和 MOEMS 的计算机辅助设计和仿真技术;
- 第11章 MEMS 和 MOEMS 装置的集成和封装;
- 第12章 MEMS 和 MOEMS 的材料。

在中文版《微光机电系统》的出版过程中,得到了 Motamedi 博士的大力支持,对原版英文书中的有关问题进行了及时的答复,对书中一些有重要变动的内容增加了译者注。为了便于读者理解各章节的内容,将原书中集中叙述的“问题与练习”分别列在各章之后,同时,保留英文参考文献,方便读者更准确地理解有关内容和有效地利用本书。

周海宪翻译了第1章—第11章,程云芳翻译了第12章。在美国工作的周华君和程林先生对全书认真进行了校对。程云芳高级工程师、孙维国研究员和杨耀山高级工程师对该书做了专业性校对。

中国工程院院士、清华大学教授金国藩先生, Motamedi 博士,北京理工大学王涌天教授和南京理工大学柏连生教授对本书的出版给予了极大的支持;刘永祥、郭世勇、潘新予、朱彬、李延蕊、黄存新、仇志刚、翟文军、邢妙娟、张小雷、金建东等高级工程师对该书的出版给予了极大的关注,并进行了有益的讨论,在此表示衷心的感谢。

本书可供光电子领域中从事光学仪器设计、光学设计和光机结构设计的研发设计师与从事光机制造工艺研究的工程师阅读,也可以作为大专院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。希望本书所述内容能够对研发微光机电系统,及对在军事、航空航天和民用光学仪器领域中的应用提供有益的指导。

译者

序

20 世纪 80 年代初期,已经可以利用各类微加工技术制造出具有初级功能的微型机械装置(但是,不包括电子器件),在使用术语 MEMS(微机电系统)之前,老一辈微机电技术的先驱者就预言:被称为 MEMS 的技术将逐渐形成一种通用核心技术,并会培养出一批骨干研究人员,许多应用领域都会受到 MEMS 技术的影响。

1995 年,固态传感器和致动器国际会议(Transducers' 95)在 Stockholm 举行,Kurt Petersen 博士注意到一个很重要的变化:MEMS 不再局限于“一个领域”,而是逐渐成为许多研究领域广泛应用的“创新技术”,每个学科都在尝试使用 MEMS 技术,针对不同学科特点举办新的学术研讨会议,并创建新的期刊杂志。从历史的观点来看,MEMS 技术的发展已经超出了电器工程师和微电子工程师的初期设想(但是,缩写 MEMS 本身是由犹他大学机器人技术机械工程小组在 20 世纪 80 年代中期首先提出的)。随着 MEMS 从一个领域的单一技术扩展为不同领域的“创新技术”,许多学科采用 MEMS 的专家都改变了研究项目的性质。将这些不同学科的知识基础与 MEMS 技术相结合,就会出现一些全新的应用和机遇,并成为具有高创新性的项目。以挑战性的价格制造出真实产品进入市场就可以为有魄力的领导人提供创业机遇,根据样机设计进行投资和建立新的生产线。这种机遇并不局限于那些大公司,凡是有市场销路的地方,风险资本家都投资了许多新的企业公司(毫不夸张,这些公司随时都伴随着相当高的投资风险)。然而,事实已经是在一些风险投资使人非常失望(原因不是技术问题,而是市场还没有准备好接受某些最新的概念)之时,另外一些风险投资的全部产权被买断,出现了新的公共商业公司以某种方式经销以 MEMS 技术为基础的实际生产线。

光学是应用 MEMS 技术的一门学科。光学工程人员采用 MEMS 技术发明了新的缩写 MOEMS,并得到广泛应用。对于具有实践经验、并经常考虑到应用 MOEMS 技术的光学人员,其研究范围已扩展到各种产品领域(传感器、光通信器件、扫描器和显示器),以满足实际的生产需要,例如调校对准、透镜阵列加工及晶片的气密封装。MEMS 技术是“创新技术”,原来为压力传感器或者加速度计研发的许多概念和加工技术已经出现在各种光学装置的应用中。创新技术在继续创新。

但是,MEMS 技术并不能确定其最终的应用范畴,相反,应当由具备实际工作经验的设计人员来完成,例如当采用致动器推动一个快门或者反射镜的简单想法无法做得更好

时就会想到这种创新技术。光的波动性为开发干涉和衍射提供了许多机会, MEMS 与主动光学装置相结合就发明了电磁调谐激光器。

Ed Motamedi 博士是 MOEMS 领域中的先驱者之一, 由他精心主编的这本书论述了电子机械学、微加工和光学相交叉的所有方面的内容。一些章节使用个案研究的方法, 介绍一些成功的实际例子; 另外一些章节则更多地包括了许多研究论文, 几乎是以编撰百科全书的方式收集相关的研究成果。该书提供了完整的参考文献, 为了对本书引用的例子能够进一步深入查证, 还为读者注明了引证出处。评价一本优秀图书应当这样询问: “如果你已经读懂了这本书的内容, 你知道什么内容是重要和有用的吗?” 答案很清楚, “是的。”

麻省理工学院电器工程系 **Stephen D. Senturia**
退休名誉教授

2004 年 9 月

前 言

微光学与微机电系统相集成而创立了一种新的微系统,即微光学—微电子—微机械系统(MOEMS)(或者微光机电系统),其性能和功能都达到了空前的高水平。微光学系统、微机电系统和微光机电系统(MOEMS)不断开拓新的应用领域,对于需要解决高功能、高性能和低成本的光学问题,MEOMS 技术是一种非常诱人的解决办法。在 MOEMS 发展的初期阶段,研制演示验证器件的主要目的是为了使宏观系统小型化,和集成电路的生产低成本化。在不久的将来,全新型的微系统将会向人们表明:MOEMS 完全能够代替宏观系统。高密度光学开关矩阵的未来发展就是这种发展趋势的一个很有说服力的例子。

该书的目的是向研究生、科学家和工程师介绍这种新颖的、快速发展的学科领域,向他们提供微光学和微机电系统两方面的基础知识,开发他们未来在 MOEMS 领域的研究兴趣。尽管本书内容及每章的思考题都以最先进的装置作为例子,但该书并不会仅仅是最先进研究成果的总结。其涵盖的主题要尽量论述得足够详细,为研究者在设计、加工和分析最先进的 MOEMS 时提供基础知识。

该书首先介绍集成电路的短暂历史和微加工的发展,然后对 MEMS 和微光学以及两种技术组合的发展潜力进行回顾和评述。在第 1 章“概述”之后,本书内容可以分为四部分:第一部分是 MEMS 技术的基础知识,包括微机械加工(第 2 章)和微光学(第 3 章);第二部分阐述微加工技术制造出的、在 MOEMS 中使用的传感器和致动器(第 4 章)以及微光学元件和测试(第 5 章),后者也是微系统中的集成模块;第三部分从器件设计、加工和系统集成等方面叙述 MOEMS 的几种主要应用领域。由于 MOEMS 的应用成果日新月异,所以,重点集中在四个方面:纤维光学(第 6 章);光学扫描(第 7 章);显示和成像(第 8 章)以及自适应光学(第 9 章);最后一部分讨论 MOEMS CAD 和模拟领域(第 10 章)、封装领域(第 11 章)及材料(第 12 章)方面的最新进展。

M. E. Motamedi

2005 年 1 月

致 谢

过去 10 年,我一直从事微光学、微机电和微光机电系统的研究,在该领域内开发和讲授一些短期课程,因此,出版该领域内一本专著变得越来越有必要,所以,开始撰写介绍 MOEMS 的参考书,使读者能够了解将光学技术与 MEMS 技术相结合所具有的潜在优势。随着 MOEMS 越来越成熟以及许多其他光学分支与 MEMS 的结合,我发现一个人的知识不可能涵盖整个领域,所以,改变了主意,决定组成一个专家团队,高标准地撰写这本书。

世界性的网络技术使我非常成功地寻找到合作者。本书的编写队伍由 23 名作者组成:12 位来自学术界,7 位来自工业界,4 位来自政府和国家实验室。如果只是我一个人编撰此书,也许永远都不会成功。大家团结在一起,形成一个强有力的和具有超前意识的队伍,为最先进的 MOEMS 技术提供全面的、权威性的指导。该书是一本特别实用的、跨(自然)学科的参考书,非常适合于工程院校的本科生和研究生阅读。

首先,我要感谢所有的贡献者,为此,在该书的最后,列出了每位作者的简历(译者注:中文版略)。非常高兴与这支队伍一起工作,根据读者的反馈意见不断地对本书进行修改。

我邀请了一些专业人士对该书进行了严格的审查,对他们的评论、建议和忠告表示感谢,并根据其意见对本书进行了修订。特别要感谢 Steve Senturia 博士的大力支持,以及 Doug Sparks 博士对本书商业化生产和制造方面的评述。

许多人为本书提供了最先进的技术,并从个人或专业方面鼓励该书的出版,使我从中受益匪浅。其中一些是 20 世纪 80 年代在 Rockwell 研发 CMOS MEMS 单板加速度计时一起工作的同事,另一些是 20 世纪 90 年代共同研发微光学、最后引导我从事 MOEMS 领域工作的同事。研发 CMOS MEMS 期间的同事有 Gus Andrews 博士、Jack Uppal 先生、Peter Hagon 先生以及 Eugene Whitcom 博士;研发 MOEMS 期间的同事有 Monte Khoshnevisan 博士、Bill Gunning 博士、Bill Southwell 博士、Haluk Sankur 博士、Gus Andrews 博士、Bill Tennant 博士、Hank Marcy 博士、Jeff DeNatali 博士、Sangtae Park 先生、Jeff Moranski 先生、Bob Anderson 先生、Mike Ugalde 先生、Arthur Chiou 博士和 Ian MacMichael 博士。

还要特别感谢 Rockwell 公司之外的许多人:General Dynamics 公司的 George Laskar 博士(在高 G MEMS 环境测试方面给予帮助)、UC 伯克利分校的 Richard Muller 教授和

Richard White 教授(在研发微加速度计领域给予帮助);林肯实验室的 Wilfred Veldkamp 博士、Bob Knowlden 博士、Margaret Stern 博士、Garry Swanson 博士、Michael Farn 博士和 Bill Delaney 先生(在微光学研发领域给予帮助);波斯顿大学的 Jan Smith 教授(在双压电晶片致动器研究方面给予帮助);UCLA 的 Chang-Jin Kim 教授和 Ming Wu 教授(在研发 MOEMS 器件和封装方面给予帮助);Larry Hornbeck 博士在介绍 DMD 方面的帮助;Kevin Chau 博士为模拟器件中 AD 气袋封装芯片提供资料帮助以及瑞士 Nuechatel 的 CSEM 的 Arno Hooogerwerf 博士和 Francis Cardot 博士在研发可制造 MOEMS 方面的帮助。

下面几位先生对该书的成功出版起到了不同的重要作用:Tom Krygowski 博士首先与我一起确定该书的内容结构,并在过去几年内一直鼓励我将该书的出版变为现实,此外,还帮助我在 MEMS 和 MOEMS 领域开设了几个短期课程,我真诚地感激他的指导及支持。在 Rockwell 公司几乎十年的时间内,Monte Khoshnevisan 博士都是激励我的动力,并与我共享本书中所涵盖的所有材料。他是将微光学以及 MOEMS 技术转化为商业化生产的先驱者之一,真诚地支持我申请 Rockwell 和政府基金来实现这个任务。正是他的鼓励才使我认识到微光学的潜力及其与 MEMS 相结合的重要性,对此,我非常感谢。

感谢欧洲 Revoltech Microsystems 公司的两位经理,H. Shafazand 博士和 A. Aria 先生,一直都鼓励我要写好这本书。当我不在公司时他们很主动地负责公司的业务。

非常感谢我的妻子 Fariba Motamedi,如果没有她做坚强后盾,将无法完成该份工作。在该书编写的三年时间内,她每天都鼓励我要保持最佳状态。

最后,还要感谢 SPIE 出版社的工作人员,是他们做了大量的工作才使该书与读者见面,尤其值得感谢的是 Timothy Lamkins 先生、Sharon Streams 女士、Rick Hermann 先生和 Eric Pepper 先生。感谢 Eric 先生为该书孜孜不倦地工作、和给予的鼓励与承诺,以及与 Tim Lamkins 先生友好、善良和愉快的合作。

M. E. Motamedi

2005 年 1 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 集成电路和微加工技术的发展	1
1.2 微机电系统的发展	3
1.3 微光学的最新发展	7
1.4 MEMS 中的微光学:MOEMS 回顾	10
1.4.1 光学开关的新发展	12
1.4.2 可调谐滤光片和波分复用技术(WDMs)	13
1.4.3 数字反射镜装置	13
1.4.4 MOEMS 扫描器	14
1.4.5 电信领域中的 MOEMS 技术	15
1.5 微系统:术语和范围	15
1.5.1 世界范围内 MEMS 和 MOEMS 的活动	16
1.5.2 世界范围内的 MEMS 和 MOEMS 学科	17
1.5.3 MEMS 和 MOEMS 的世界市场	17
1.6 本书涵盖的内容	17
参考文献	19
第 2 章 微机械加工技术	23
2.1 概述	23
2.2 散体微加工技术	27
2.2.1 湿散体微加工技术	27
2.2.2 干散体微加工技术	30
2.3 深 X 射线平版印刷术(DXRL)	36
2.4 表面微加工技术	42
2.5 与 CMOS 兼容的 MEMS 和 MOEMS	52
2.6 以半导体复合材料为基础的 MEMS 和 MOEMS	54
2.7 MOEMS 应用中与光学有关的问题	59
问题与练习	63

参考文献	64
第3章 微光学	69
3.1 概述	69
3.2 微光学发展史	69
3.3 光束通过微结构和纳米结构的偏转	70
3.3.1 折射和衍射微光学元件	71
3.3.2 模拟折射率材料	72
3.3.3 光子晶体	72
3.3.4 谐振滤光片	73
3.3.5 对轮廓形状的要求	74
3.4 二元和多阶光学元件	74
3.4.1 目的	74
3.4.2 二元光学结构的加工	75
3.4.3 多阶结构的加工	78
3.5 连续面浮雕结构的加工技术	80
3.5.1 平版印刷技术	80
3.5.2 表面轮廓转印到光学材料内	99
3.6 结论	103
问题与练习	103
参考文献	104
第4章 致动器和传感器	110
4.1 概述	110
4.1.1 微致动器	110
4.1.2 与 MOEMS 有关的传感器	112
4.1.3 本章的内容	112
4.2 静电致动器	113
4.2.1 背景	113
4.2.2 共面致动技术	116
4.2.3 异面致动技术	121
4.2.4 三维致动技术	124
4.3 热致动器	125
4.3.1 基本原理	125
4.3.2 共面致动技术	127
4.3.3 异面致动技术	132

4.3.4	三维致动技术	134
4.4	形状记忆致动器	135
4.4.1	基础知识	135
4.4.2	共面致动技术	138
4.4.3	异面致动技术	140
4.4.4	三维致动技术	142
4.5	压电致动器	143
4.5.1	基础知识	143
4.5.2	共面致动技术	146
4.5.3	异面致动技术	149
4.5.4	三维致动技术	153
4.6	磁性致动器	154
4.6.1	基础知识	154
4.6.2	共面致动技术	159
4.6.3	异面致动技术	162
4.6.4	三维致动技术	166
4.7	与 MOEMS 有关的传感器	168
4.7.1	位移传感器	168
4.7.2	化学传感器	170
4.7.3	荧光探测传感器	172
4.7.4	惯性传感器:加速度计	173
4.7.5	压力传感器	175
	问题与练习	177
	参考文献	179
第 5 章	微光学元件,测试和应用	191
5.1	微光学元件	191
5.1.1	微光学透镜	191
5.1.2	液晶光学元件	194
5.1.3	光束成形光学元件	195
5.2	微光学测试	198
5.2.1	光学轮廓测量	200
5.2.2	表面偏离的测量	208
5.2.3	波像差测量	226
5.3	微光学的应用	242

5.3.1	光束控制	243
5.3.2	微透镜和焦平面阵列(FPA)的集成	246
	问题与练习	249
	参考文献	251
第6章	纤维光学系统	256
6.1	概述	256
6.2	基础知识	257
6.2.1	光纤类型	257
6.2.2	纤维光学元件的关键参数	258
6.2.3	光纤或波导的直接移动	259
6.2.4	平行光束中的控制	261
6.3	光纤准直器及其阵列	262
6.3.1	光纤阵列	262
6.3.2	微透镜阵列的要求	264
6.3.3	微透镜阵列的制造	267
6.3.4	光纤阵列和微透镜阵列的安装技术	268
6.4	安装有 MOEMS 的纤维光学元件	269
6.4.1	可变光学衰减器	269
6.4.2	动态增益和通道均衡器	272
6.4.3	光学纤维开关	272
6.4.4	可调谐光源和滤光片	284
6.5	总结	287
	问题与练习	287
	参考文献	288
第7章	光学扫描	291
7.1	概述	291
7.2	光学扫描器的工作原理及其分类	291
7.3	机械扫描系统	292
7.3.1	倾斜微反射镜	292
7.3.2	透镜扫描器	293
7.3.3	微电机扫描器	295
7.3.4	安装有杠杆平衡机构的反射镜	296
7.3.5	采用表面微加工技术制造出的反射镜	297
7.4	多维扫描	299

7.5	扫描专用微致动器	300
7.5.1	静电扫描器	300
7.5.2	压电扫描器	306
7.5.3	电热扫描器	308
7.5.4	磁性扫描器	310
7.6	性能比较	313
7.7	环境试验和寿命测试	315
7.8	商业产品中的应用	317
7.9	MEMS 可移动反射镜的应用	319
7.9.1	图像显示系统	319
7.9.2	光通信组件	320
	问题与练习	325
	参考文献	328
第 8 章	显示和成像系统	333
8.1	概述	333
8.2	显示系统	333
8.2.1	视网膜扫描显示	335
8.2.2	光栅光阀显示	352
8.2.3	数字微反射镜装置	359
8.2.4	其他 MEMS 显示技术	367
8.3	成像系统	370
8.3.1	扫描成像系统	370
8.3.2	共焦成像系统	372
8.3.3	以 MEMS 为基础的其他光束扫描系统	380
8.3.4	探针扫描成像	382
8.3.5	扫描成像系统的像差校正	383
8.3.6	扫描成像系统中 MOEM 空间光调制器	385
8.3.7	阵列成像技术(焦平面系统)	388
	问题与练习	397
	参考文献	399
第 9 章	自适应光学	407
9.1	概述	407
9.1.1	自适应光学史	407
9.1.2	传统的可变反射镜技术	410

9.1.3	研发 MEMS 可变反射镜的动机	410
9.1.4	自适应光学中心	411
9.1.5	相干通信、成像和瞄准项目	414
9.2	膜片可变形微反射镜	415
9.3	多晶硅可变形微反射镜	417
9.4	单晶硅可变形微反射镜	420
9.5	金属可变形微反射镜	422
9.6	封装和电子线路	423
9.7	未来的发展趋势和挑战	425
	问题与练习	425
	参考文献	427
第 10 章	MEMS 和 MOEMS 的计算机辅助设计及模拟	430
10.1	概述	430
10.2	3D 器件模拟	431
10.2.1	概述	431
10.2.2	过程模拟	431
10.2.3	有限元法(FEM)和边界元法(BEM)模拟	433
10.2.4	非连续方法	438
10.3	致动器设计和模拟	438
10.3.1	概述	438
10.3.2	热致动器的模拟	438
10.3.3	静电致动器的模拟	440
10.4	光学解算器	442
10.4.1	概述	442
10.4.2	传播现象	442
10.4.3	光学理论	442
10.4.4	数学技术和近似表达式	443
10.4.5	编码	443
10.5	系统级模拟	444
10.5.1	优化	446
10.5.2	统计分析	447
10.5.3	专用 MOEMS 模拟和协同仿真	448
10.5.4	系统模拟实例—接通计算	449