



国家“十一五”重点图书
国家科学技术学术著作出版基金资助项目

微光学与系统

MICRO-OPTICS AND SYSTEM

杨国光 等编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社



国家“十一五”重点图书
国家科学技术学术著作出版基金资助项目

微光学与系统

MICRO-OPTICS AND SYSTEM

杨国光 等编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

微光学与系统 / 杨国光等编著. —杭州: 浙江大学出版社, 2008. 3

(科技中国)

ISBN 978-7-308-05833-9

I. 微... II. 杨... III. 微光技术 IV. TN223

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 038091 号

微光学与系统

杨国光 等编著

策 划 应伯根

责任编辑 樊晓燕 王元新

责任校对 邹小宁

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>

<http://www.press.zju.edu.cn>)

电话: 0571—88925592, 88273066(传真)

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 杭州富春印务有限公司

开 本 889mm×1194mm 1/16

印 张 26.75

字 数 755 千

版 印 次 2008 年 3 月第 1 版 2008 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-05833-9

定 价 68.00 元

版权所有 侵权必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88072522

内 容 提 要

微光学是微米与纳米尺度上的光学。由于这种微结构尺度已接近或小于光波长,因此,常规光学的理论与加工技术已不适宜于微光学。本书以微光学与纳米光学理论为基础,主要阐述微光学器件及系统的原理与技术,以及微光学加工与测试技术。

微光学是 20 世纪 90 年代的产物,是知识密集、前沿与先进的光学新分支,被誉为光学新技术。本书主要取材于作者近 15 年来承担国家相关科研的成果和部分国内外最新成果,是一本综合而成的有新理论、新技术、新方法的有实用参考价值的专业技术书。

本书适合从事应用物理、光学工程、光电工程、自动控制、先进制造和先进国防的研究人员,亦适合从事微电子技术、微电机系统、微系统、微结构的设计与制造人员,同时本书可作为高等学校相关专业教师、研究生、高年级大学生的教材和参考书。

前言

微光学(micro-optics)是20世纪90年代的产物,被誉为光学高新技术,是知识密集、前沿和先进的光学新分支,具有推动现代光学学科与其他学科交叉的作用。随着近代IC产业、光通信等信息产业的快速发展以及工业自动化、航空航天、先进国防急需微型化,促使微光学、微机电系统(MEMS)、微光机电系统(MOEMS)等微系统技术得到了急速发展。本书的出版,对微系统学科的交叉,对促进我国先进技术的发展 and 竞争力的增强,对我国航空航天、先进国防、科学研究中的微型化,都将起到关键的先行作用,具有理论与技术指导意义。

微光学是微米与纳米尺度上的光学。由于这种微结构尺寸已接近或小于光波长,因此,常规光学的理论与光学冷加工技术已完全不适宜于微光学。本书是以微光学与纳米光学理论为基础,来阐述微光学器件、系统的原理与技术以及微光学加工方法与测试的微光学入门参考书,使读者有理论与技术发展空间,并为应用打下良好的基础。

光的最大特点是它的非接触性、高速性和高精度性。随着光刻技术等微细加工技术的发展,以及能制造出微米左右尺度的光学微结构,就出现了二元光学(binary optics),二元光学使光学系统走出了几何光学的范畴,开始用表面微结构的衍射光学实现光学设计,出现了混合光学(hybrid optics)新技术。随着信息技术(IT)及微机电系统(MEMS)的发展,光学微结构在光通信及其集成化中起着关键作用,形成了微光机电系统(MOEMS),使科学与工业在信息化、微型化、智能化上形成了一个新的技术平台,这个平台就是将光机电在微型化上实现学科交叉,并在技术上实现一体化的微集成平台。希望本书的出版可以促进对微光学的发展,并加深在微系统上的学科交叉。

本书共分8章进行阐述,作者主要是杨国光教授(第1、2、3、6、7章),白剑教授(第4、6章),侯西云高工(第5章),童利民教授(第8章),吴兴坤教授(第5章),徐建锋博

士(第2、3章),侯昌伦博士(第3、7章),梁宜勇博士(第5章),黄腾超博士(第5章),马韬博士(第2、3章)及胡宏华硕士(第6章)。全书由杨国光教授统稿、定稿。

在编著本书时,作者除应用15年来主持或参加国家相关科研的成果外,还参考和应用了国内外许多最新成果,在此对引用的论文作者表示感谢!对出版社的支持表示感谢!对国家科学技术学术著作出版基金的资助表示感谢!由于作者众多、时间仓促,编写中定存在不妥与错误,希望有关专家及读者给予指正。

编著者

2007年9月浙江大学求是园

目 录

第 1 章 微光学与系统概述	1
1.1 微光学引言	1
1.1.1 什么是微光学、MEMS (MST)、MOEMS、iMS 及 NEMS	1
1.1.2 什么是微加工(MFT)	2
1.1.3 什么是折/衍混合光学系统(HOS)	3
1.2 形成背景与意义	4
1.2.1 形成背景.....	4
1.2.2 光学 MEMS 的意义	5
1.2.3 经济意义.....	7
1.3 研究领域	8
1.3.1 微系统的研究领域.....	8
1.3.2 微光学的研究领域.....	9
1.3.3 发展前景.....	9
1.4 尺度效应与光技术.....	10
1.5 微光学发展概要.....	12
参考文献	13
第 2 章 微光学理论基础	15
2.1 微结构光学理论概述.....	15
2.1.1 理论涉及领域	15
2.1.2 设计模型	16
2.1.3 微光学分类	16

2.2	标量衍射理论基础	17
2.2.1	电磁理论基础	17
2.2.2	标量衍射模型	19
2.2.3	波的传播与基尔霍夫衍射分析	22
2.2.4	平面波角谱分析	23
2.2.5	瑞利—索末菲(Rayleigh-Sommerfeld)衍射分析	24
2.2.6	基于标量理论的衍射光学设计	26
2.2.7	利用曲面基底衍射光学元件替代非球面	27
2.3	矢量衍射理论基础	30
2.3.1	发展概况	30
2.3.2	严格耦合波理论(RCW)	31
2.3.3	矢量分析的模方法(BKK 法)	40
2.3.4	逐层分析的 BKK 法	42
2.4	时域有限差分法(FDTD)	42
2.4.1	FDTD 理论基础	42
2.4.2	光波导的模耦合理论	48
2.4.3	时域有限差分法(FDTD)	52
2.4.4	FDTD 中的激励源	68
2.4.5	FDTD 的子域合成	72
2.5	光线追迹模型——高折射率模型(HRI)	76
2.5.1	衍射的几何光学追迹	76
2.5.2	DOE 的光线追迹——光栅方程模型	77
2.5.3	Sweatt 模型——高折射率模型(HRI)	78
2.5.4	曲面 DOE 的 HRI 表示	80
2.6	微结构等效介质理论	82
2.6.1	等效折射模型	82
2.6.2	二阶等效介质理论	84
2.7	光学微结构的偏振变换	89
2.7.1	引言	89
2.7.2	偏振光的基本特性	90
2.7.3	微结构的偏振特性	94
2.7.4	微结构偏振变换的应用	95
	参考文献	102

第3章 微光学器件及系统技术 104

3.1	衍射光学器件(DOE)与二元光学器件(BOE)	104
3.1.1	DOE 和 BOE 技术	104
3.1.2	DOE 和 BOE 的变换函数	106

3.1.3	衍射效率分析	107
3.2	衍/折混合光学系统设计	107
3.2.1	混合光学原理	107
3.2.2	衍/折混合光学系统消色差设计	109
3.2.3	HOS 的消色差设计	110
3.2.4	混合光学系统设计	113
3.3	多层衍射光学设计理论	116
3.3.1	引言	116
3.3.2	多层 DOE 的设计理论	118
3.3.3	多层 DOE 的色散分析	124
3.3.4	多层 DOE 的形态扩展	125
3.3.5	多层二元 DOE 制作误差的影响	128
3.3.6	多层衍射光学元件的温度特性	130
3.3.7	衍射效率对系统 MTF 的影响	131
3.4	多层衍射光学元件在 HOS 中的应用	133
3.4.1	色散特性与工程应用	133
3.4.2	HOS 中的能量效率	134
3.4.3	多层衍射光学的 HOS 设计	137
3.4.4	应用性能的测试	142
3.5	谐衍射光学及系统	144
3.5.1	形成背景	144
3.5.2	谐衍射光学理论	144
3.5.3	HDL 的应用技术	147
3.6	亚波长光学元件(SOE)	151
3.6.1	概述	151
3.6.2	二元亚波长衍射器件	151
3.6.3	亚波长螺旋相位器件	155
3.6.4	表面等离子亚波长光学	160
3.7	微光学阵列技术	162
3.7.1	技术概要	162
3.7.2	泰伯阵列发生器	164
3.7.3	达曼光栅阵列发生器	166
3.7.4	微透镜阵列发生器	167
3.8	微光学波导器件技术	181
3.8.1	微光学波导传感器	181
3.8.2	光波导中的光栅理论	187
3.8.3	光波导的调制技术	191
3.8.4	波导损耗和散射的测量	198

参考文献	199
第 4 章 光通信中的微光学器件	201
4.1 引言	201
4.2 光波导器件的分类和加工	203
4.2.1 分类	203
4.2.2 集成电光调制	203
4.2.3 用于传输的光波导器件	205
4.2.4 阵列波导光栅 AWG 原理	205
4.3 光源器件	208
4.3.1 半导体激光器的振荡波长	208
4.3.2 不同波长 LD 的一并制作	209
4.3.3 多波长集成阵列光源	210
4.3.4 波长可变光源	210
参考文献	217
第 5 章 光学微细加工技术	218
5.1 光学微细加工概述	218
5.2 光刻技术	218
5.2.1 概述	218
5.2.2 光学光刻技术	219
5.2.3 电子束光刻技术	230
5.2.4 离子束曝光和 X 射线曝光	233
5.3 掺杂技术(扩散和离子注入技术)	235
5.3.1 扩散	235
5.3.2 离子注入	240
5.4 蚀刻技术	241
5.4.1 湿法蚀刻	241
5.4.2 离子束蚀刻	242
5.4.3 聚焦离子束	245
5.4.4 激光蚀刻	247
5.4.5 体硅制造工艺	248
5.5 LIGA 技术	252
5.5.1 LIGA 工艺	253
5.5.2 准 LIGA 技术	254
5.5.3 SLIGA 技术	257
5.5.4 MMLIGA 技术	257
5.5.5 抗蚀剂回流 LIGA 技术	258

5.6 连续浮雕微光学器件制作技术	259
5.6.1 表面微结构的套刻技术	259
5.6.2 连续浮雕制作中的光刻胶	260
5.6.3 灰阶掩膜技术	262
5.6.4 直接写入技术	266
5.7 激光图形发生器	268
5.7.1 激光图形发生器介绍	269
5.7.2 激光图形发生器关键技术	276
5.8 软光刻技术	286
5.8.1 软光刻技术的特点及发展	286
5.8.2 软光刻技术的关键部件	288
5.8.3 软光刻在微光学中的应用:从通常的二维向三维结构的飞跃	289
参考文献	292
第6章 微系统中的光技术	295
6.1 微系统中光技术的应用	295
6.2 微系统中的光干涉技术	295
6.2.1 光的相干性	296
6.2.2 双光束干涉法	297
6.2.3 多光束干涉法	298
6.2.4 不同频率的光干涉——外差干涉法	302
6.3 微系统中的光衍射技术	305
6.3.1 衍射方法和衍射光栅	305
6.3.2 衍射光的控制与效率	306
6.3.3 衍射光栅的应用	310
6.4 微分析中的荧光检测技术	315
6.4.1 微分析芯片和荧光检测原理	315
6.4.2 共焦型激光诱发荧光检测技术	317
6.4.3 非共焦型激光诱发荧光检测技术	318
6.4.4 光纤型微流控芯片荧光检测技术	319
6.4.5 波导型微流控芯片荧光检测技术	320
6.4.6 微透镜型微流控分析芯片中的荧光检测技术	322
6.4.7 集成微流控分析芯片的荧光检测技术	325
6.5 微系统中的傅里叶(Fourier)光学	328
6.6 光束精密定位与控制技术	331
6.6.1 原理与分类	331
6.6.2 间断定位与控制	331
6.6.3 连续定位与控制	333

6.6.4 离散跟踪与控制	335
6.7 激光捕捉技术	336
6.7.1 激光捕捉技术的产生	336
6.7.2 激光捕捉技术的基本原理	337
6.7.3 激光捕捉技术的特点及应用	347
参考文献	351
第7章 自由空间微光学	354
7.1 概述	354
7.1.1 应用背景	354
7.1.2 光—光集成	355
7.1.3 光电集成	356
7.2 层叠式微光学系统	357
7.2.1 微光学系统设计	357
7.2.2 层叠微结构设计理论	359
7.3 平面集成微光学系统	362
7.3.1 平面集成光学	362
7.3.2 平面光学互连技术	362
7.4 自由空间微光学的应用	366
7.4.1 非衍射光束	366
7.4.2 信息微系统中的应用	367
7.4.3 在光通信中的应用	369
7.5 光束整形变换微光学	370
7.5.1 腔外光束整形变换	371
7.5.2 腔内光束整形变换	373
7.6 自适应微光学	374
7.6.1 自适应光学与自适应微光学	375
7.6.2 自适应微变形镜	376
7.6.3 变焦微镜	377
参考文献	380
第8章 纳米光子学基础	381
8.1 引言	381
8.2 纳米光子学基础	382
8.2.1 光子与电子	382
8.2.2 倏逝波	383
8.2.3 表面等离子体共振	386
8.2.4 量子效应	388

8.3 近场光学探测技术	392
8.3.1 近场光学	392
8.3.2 近场扫描光学显微镜	392
8.3.3 近场光学扫描显微镜的典型应用	395
8.4 纳米光子学结构及其制备技术	397
8.4.1 气相法	397
8.4.2 液相法	402
8.4.3 双光子聚合	403
8.4.4 纳米压印技术	404
8.4.5 电子束刻蚀	406
8.4.6 高温拉伸法	406
8.5 纳米光子学技术应用举例	408
8.5.1 亚波长线宽光波导	408
8.5.2 半导体纳米线激光器	409
8.5.3 纳米光纤器件	409
8.5.4 硅基电光调制器	410
参考文献	411

第 1 章

微光学与系统概述

1.1 微光学引言

1.1.1 什么是微光学、MEMS (MST)、MOEMS、IMS 及 NEMS

微光学(micro-optics)是微米(10^{-6} m)尺度上的光学,其中包括微米尺度的光学表面微结构。微光学在日本称为微小光学。微小光学是广义上的微光学,不是物理意义上的微光学。物理意义上的微光学其单元尺寸已在光波长量级,因此,建立在单元尺度远大于光波长的常规光学,其主要理论及设计方法已不适用微光学或其计算结果不够精确,特别是常规光学的光学冷加工工艺则已完全不适于微光学制作。自从微电子学的微细加工技术发展以来,在光学这个学科上就产生了微光学这个前沿学科分支。因此,微光学是一个知识密集、前沿和技术先进的新的光学学科分支。

MEMS 是指微机电系统,主要由微机械(MicroMachining, MM)与微电器(MicroElectronics, ME)组成,如图 1-1 所示。在美国,这项技术称为 MicroElectro Mechanical SystEms(MEMS);在欧洲,这项技术称为 MicrosyStems Technology(MST);在日本,这项技术称为微机械(micromachine)。MEMS 或 MST 的共同特点是“小人国”^[1]——从外部去观察,在系统功能相同的条件下,用这种技术设计与生产出的产品就是尺寸特别小,大致尺寸是几十微米到几毫米之间,便于携带和隐藏,从内部去观察,其设计方法和工艺技术又完全不同于常规机电系统的设计和加工,因此 MEMS (MST)从物理学及方法论上说实际上是一种新的工具箱,用于研究和开发下列目标:

- (1)创立小型化系统的总体设计与工艺过程;
- (2)这种专用的 MEMS 物理产品是一般电子商店买不到的;
- (3)MEMS 是一种微尺度(micro scale)制造技术,是用于工业、科学技术中物理信息参数控制的传感器与执行过程的先进方法。

MOEMS(Micro-Opto-Electro-Mechanizing System)是指微光机电系统(见图 1-1),也可称为光学 MEMS(optical MEMS),是微光学技术与 MEMS 结合的微系统技术(MST)。MOEMS 是当前性能最佳、精度最高、知识密集度最高的微系统。

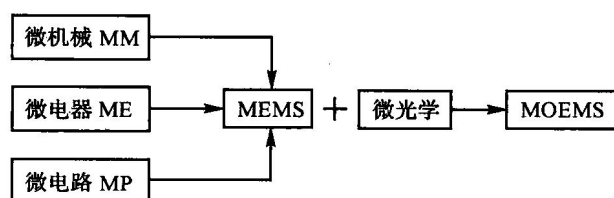


图 1-1 MEMS 与 MOEMS 的构成

信息微系统(information Micro System,iMS)是指将外界信息通过 MEMS 或 MOEMS(光学 MEMS)技术来实现功能或动作的系统,是广泛意义上的微系统,其构成原理如图 1-2 所示。

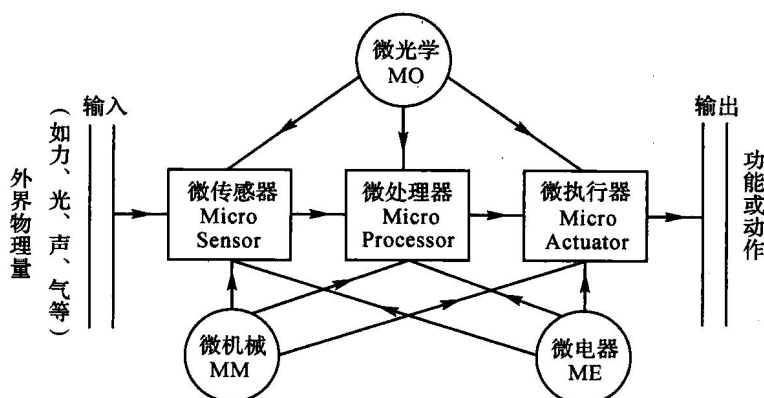


图 1-2 iMS 的构成原理

因此,信息微系统是集微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和电路甚至接口、通讯和电源等集成于一体的器件或系统。微系统是具有低成本、体积小、重量轻、高可靠性和能批量生产、可集成并实现复杂功能的系统。微系统是一个多学科领域的系统,有物理机电系统(physical MEMS)、光机电系统(optical MEMS)、化学机电系统(chemical MEMS)、生物机电系统(bio-MEMS)、射频机电系统(RFMEMS)和电源机电系统(power MEMS)。

NEMS(Nano-Electro-Mechanics System)是纳米机电系统,这种系统的微结构尺度在纳米(10^{-9}m , nm)量级上,也称为纳米技术。用光学方法实现的纳米技术称为纳米光学。NEMS 及纳米光学是更新一代的微技术,是目前科学技术刚进入的一个新领域。

本书主要以微光学为基础,阐述可应用于 MOMES(optical MEMS)系统中的光学原理、设计、制造及应用技术,以促进光机电为一体的微制造业发展并形成一个新的先进产业,最后还介绍了纳米光学,以促进 NEMS 的发展。

1.1.2 什么是微加工(MFT)

微加工(MFT)是用于加工 MEMS 或 MOMES 这种微小器件的方法与技术,也称为微制造技术(MicroFabrication Technology, MFT)。微加工完全不同于传统的机械加工方法。常规机械加工是依靠各种机床进行切削、磨削、锻压、铸造、焊接等工艺手段来完成零件的三维加工,而微系统的零件加工尺度在微米量级,不能用精密加工或超精密加工方法来完成,而是要用光刻或微光刻、离子注入、扩散、沉积、外延、溅射、离子刻蚀等方法来实现三维微雕刻,也就是微加工成形。对微光学来说就是不能用传统的光学冷加工方法(粗磨、上盘、细磨、抛光等工序)来加工微透镜等光学零

件,而必须用微掩模(电子束及激光直写加工)、光刻热熔、化学离子刻蚀等工艺来实现微光学加工。由于工艺方法完全不同,因而微加工中的测试技术以及封装技术也与常规测试与装配方法有很大差异,形成微测试与微装配,这些都将在以后的章节中给予介绍。

微加工技术是由微电子加工技术发展而来的,但又不同于制造集成电路(IC)的微电子加工技术。这种独特的微加工技术,一般由三部分组成:(1)表面微制造;(2)体硅微制造;(3)LIGA工艺。

表面微制造主要由沉积、掺杂(离子注入)扩散、外延、溅射等工艺组成,主要用于二维微加工,也称平面微加工,或称为 IC 工艺。体硅微制造主要由蚀刻技术(湿法与干法)、键合技术、牺牲层技术等组成,用于三维微成形。LIGA 工艺是德国发明的一种著名制造微系统的工艺方法,这个术语由光刻、电铸和压模的德语首字母缩略而成。LIGA 是一个从零件微加工到能批量生产的微制造工艺过程,图 1-3 所示是微加工工艺组成图。光学微加工的技术内容将在第 5 章中给予详细介绍。

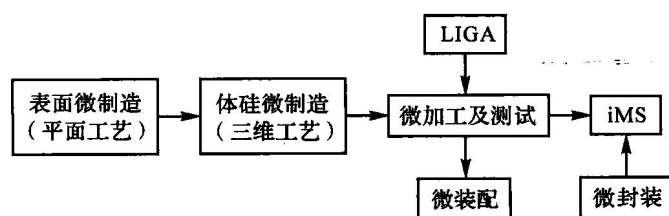


图 1-3 微加工工艺组成图

1.1.3 什么是折/衍混合光学系统(HOS)

混合光学系统(Hybrid Optical System, HOS)是将微光学中的衍射光学元件包括二元光学元件(衍射系统)与传统光学元件(折/反系统)结合形成的一种新型光学系统,所以也称为折/衍混合光学系统(Hybrid Refractive/Diffractive Lens, 或称 R/D HOS)。R/D HOS 是具有微结构的新一代光学系统,在美国被称为 20 世纪 90 年代的光学。HOS 由于引入了衍射微光学元件,为光学设计提供了新的物理手段,相当于增加了新的材料与参数,这就为简化光学系统结构,减少光学系统尺寸、重量,提高像质等提供了新手段和新功能。它一般可使结构简化 $\frac{1}{2}$, 重量减轻 $\frac{3}{5}$, 并获得接近衍射极限的成像质量。另外,利用衍射光学的色散特性和负热差特性,可获得系统的复消色差、消热差特性和提供非球面自由度,这是传统光学无法实现的功能,因此 R/D HOS 是新一代的微结构光学系统。

随着 MEMS 技术的发展,把微光学、微电子、微传感器等单元技术在自由空间中集成为系统,实现实验室功能芯片化(lab. on chip)或系统芯片化(system on chip),将生化实验室和信息微系统做在一个或几个芯片上,形成自由空间微光学,以达到光学系统小型化、微型化,实现微系统的多功能、高精度、高可靠和低成本化,这是先进制造与科学发展的方向。微光学系统将在本书第 7 章中叙述。

1.2 形成背景与意义

1.2.1 形成背景

MOS(微光学系统)、MEMS、MOMES 的出现是由当代工业与科学技术发展的需求推动而形成的。当代科技与现代工业发展包括以下三个主要方向。

1. 信息化

信息化是当代工业与科技发展的原动力。只有迅速获取精确的信息,才能适应变化。而如何获取信息并加以处理,则是产生新理论、新技术、高技术和获得技术竞争胜利的关键。信息化的流程如表 1-1 所示。

表 1-1 信息化流程、组成及成果

流程	信息探测→放大→传输→变换→处理→显示		
组成	微传感器	微光机电一体化	计算机技术
典型成果	色觉、听觉、触觉、味觉、动觉等微传感器的出现	RF 技术(如手机射频技术) 光通信——光纤到户、视频图像技术 iMS——信息微系统(包括生物、化学分析)	手提计算机 DSP 芯片 嵌入式芯片

信息化实际上就是信息技术的光机电算一体化。

2. 微型化

信息技术一体化后就必须追求微型化,即体积、重量必须实现最小。微电子学的超大规模电路技术(VLST)使处理电路实现了微型化。为使机械、电器及光学也实现微型化,并与微电子芯片的微型化相适应,就产生了 MEMS 及 MOEMS 技术,从而实现了微传感器与微执行器,出现了微系统(iMS),其技术构成如图 1-4 所示。微系统中的微机械(MM)与微电器(ME)结合就是微机电系统(MEMS);MEMS 与微光学(MO)结合就形成了微光机电系统(MOEMS)。

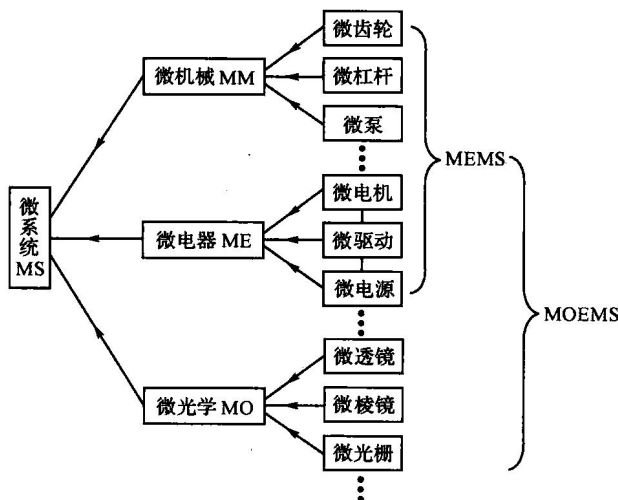


图 1-4 微型化的技术构成