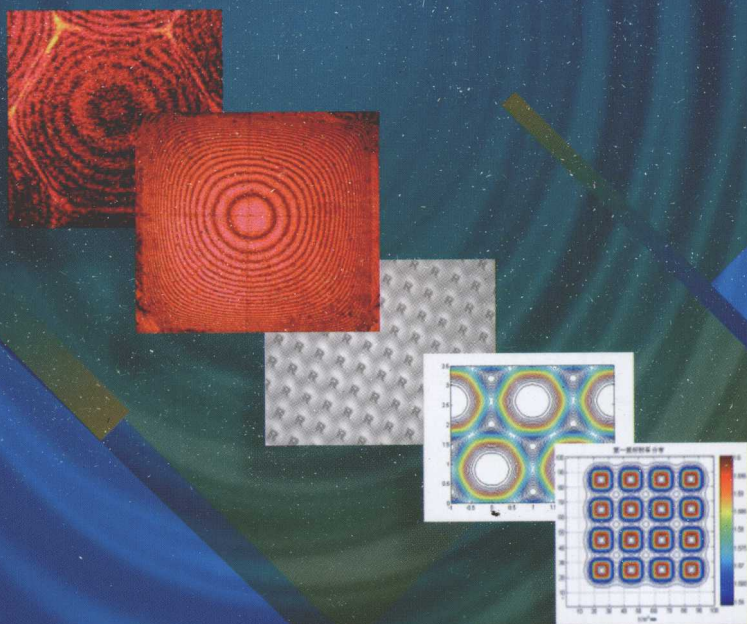


微小光学与微透镜阵列

刘德森 等 著



科学出版社

013032642

043

77

微小光学与微透镜阵列

刘德森 等 著



科学出版社

北 京

043/77



北航

C1640170

248600010

内 容 简 介

微小光学是研究微米尺度范畴内光与物质相互作用和微米尺寸光学元件的制作、光学特性和应用的科学,是光学的新发展和重要国际前沿。本书结合作者及其同事多年的研究工作成果,全面、系统地讨论了变折射率光学、多种(特别是异形孔径)微透镜阵列和其他微小光学元件的基础理论、设计方法、制作技术、光学特性和器件应用。全书既注重理论的系统性和严密性,又注重内容上的实用性,最后简单讨论了微小光学今后的发展动向。

本书可供光纤通信、变折射率光学、微纳光学、光纤传感技术、集成光子学等领域的科技工作者、工程技术人员参考,也可供高等院校有关专业的老师、研究生和高年级学生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

微小光学与微透镜阵列/刘德森等著. —北京:科学出版社, 2013
ISBN 978-7-03-037247-5

I. ①微… II. ①刘… III. ①光学-光纤-工程应用-研究 IV. ①O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 064177 号

责任编辑:余 丁 / 责任校对:包志虹
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝 正

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 4 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013 年 4 月第一次印刷 印张: 34

字数: 658 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

从光学的发展来看,人类社会的发展历史,就是人类对自然界光学现象的感知、认识及对它作深入研究,总结出规律,并利用这些规律来制作各种光学仪器,以便进一步认识自然,改造自然,为人类造福的艰苦奋斗历史。

光学的发展,可以按研究对象的尺度和制作工艺的不同划分为宏观光学(古典光学)、微小光学和纳米光学三个阶段。其研究对象的尺度分别是毫米(米)、微米和纳米量级,其制作工艺分别为机械加工技术、光学微加工技术和光学纳米加工技术。20世纪70年代初,低损耗石英光纤和变折射率透镜(自聚焦透镜)的出现,开创了变折射率光学和微小光学发展的新篇章,促进了光学元件向微型化、集成化、智能化方向发展。各种微阵列元件(如微透镜阵列、微反射镜阵列、微光纤阵列、微光源阵列、微探测器阵列、多种微无源器件阵列)如雨后春笋般地发展起来。科学推动了技术的发展,新技术又促进了科学的飞跃。研究光学对象的尺度随着科技的发展,又进一步发展到纳米量级,出现了纳米光学。

刘德森教授先后在中国科学院西安光学精密机械研究所和西南大学工作,从事纤维光学、变折射率光学和微小光学研究工作近50年。1962年,在我国应用光学创始人之一龚祖同院士亲自指导下,他参与了我国第一根玻璃光学纤维和第一只变折射率透镜(自聚焦透镜)的研制。1987年,在国家高技术研究发展计划项目(863项目)和国家自然科学基金的支持下,开展微透镜阵列研究,制出自聚焦平面微透镜阵列。21世纪初,在西南大学研制出异形孔径(正方形和正六角形)自聚焦透镜和异形孔径自聚焦平面微透镜阵列。在上述几个方面做出了国内首创的研究工作,有较高的学术造诣和较丰富的实践经验。《微小光学与微透镜阵列》一书是基于他和他的同事们多年的研究工作实践和科研成果,并汲取、综合了国内外该领域新的学术思想和研究进展而写成的一本专著。该书中,在变折射率光学、平面微透镜阵列、异形孔径变折射率透镜、阵列和阵列光学等方面都有自己的特色。该书对折射型微小光学的基本理论、设计方法、制作技术、光学特性和主要应用进行了较全面、系统、深入地论述,既注重理论的系统性和严密性,又注重内容上的实用性,更重要的是该书大部分内容是作者本人和他的同事们工作实践的第一手资料,是十分难能可贵的。因此,该书是一本有较高学术水平和科学价值的专著。我热忱地向从事微小光学有关领域的科技工作者、研究生和高等学校有关专业师生推荐这本很有用的参考书。

金國藩

2012年1月15日

前 言

微小光学研究的是微米、亚微米尺度内光与物质的相互作用和光学元件(包括光源、光纤、波导、折射和衍射型微透镜、微棱镜等)的光学微加工技术及利用该元件实现光信息的发射、耦合、传输、变换、分光、成像和图像处理等功能的理论和技术,是光学的新发展、光学与微电子和微机械相互融合、渗透、交叉而形成的有广阔应用前景的重要前沿学科。1969年,日本学者北野一郎(Kitano I)首先采用离子交换工艺制作出直径为 $0.1\sim 1\text{mm}$ 的变折射率透镜(gradient index lens, GRIN),即“自聚焦透镜”(selfoc lens)。1970年,美国康宁公司采用化学气相沉积工艺和高温拉丝技术,成功地制作出芯径只有几十微米的低损耗石英光纤。这两种元件,从元件的尺寸和制作技术来讲,已不再属于宏观光学的范畴,而属于微小光学领域。它们的出现,开创了微小光学发展的新篇章,是光学的一次重大飞跃。科学进步推动了技术发展,新技术出现又促进了科学的发展。光学元件的微型化势必使分立光学元件向阵列光学元件发展。微透镜阵列元件的发展,促进了光学元件进一步向微型化、集成化和光机电一体化方向发展,促使微工程系统、光纤通信、光信息处理和光传感技术发展到一个新的阶段。

应用光学创始人之一龚祖同院士是我国微小光学的倡导者,在他领导下,中国科学院西安光学精密机械研究所在国内首先开展了纤维光学、变折射率光学和微小光学研究。1963年,在国内研制出第一根玻璃光导纤维,1973年,在国内研制出第一只变折射率透镜,龚老亲自命名为“变折射率透镜”。1989年,刘德森教授等研制出单透镜直径只有几十微米的变折射率平面微透镜阵列,2005年,又率先研制出异形孔径(正方形和正六边形)径向变折射率透镜和异形孔径平面微透镜阵列,促使微小光学在我国迅速发展。为了与微弱光信息研究(如微光夜视)的“微光学”有所区别,本领域的研究工作不再称为“微光学”,而称为“微小光学”。

微小光学元件最明显的特点是微型化、轻量化、阵列化和集成化。这种光学元件有利于发挥光信息的并行处理和构建三维光集成器件。本书出版有两个目的:一是将我们近50年的工作成果与实践经验提供给读者,为我国微工程系统和微光子集成器件的发展,为我国光纤通信、光信息处理、光纤传感技术及先进国防的微型化与集成化,为在我国产生更多的新兴高技术产业贡献自己的微薄力量;二是以本书的出版来缅怀我国微小光学学科的倡导者、敬爱的龚老!

由于作者研究领域所限,本书仅讨论折射型微小光学元件,主要是变折射率透镜和微透镜阵列的制作技术和理论基础。全书共18章,其中,第1~6章、第9

章、第 12 章、第 14 章和第 15 章由刘德森撰写,第 7 章由刘德森、胡建明撰写,第 18 章由刘德森、靳伟、居剑撰写,第 8 章和第 11 章由蒋小平、周素梅撰写,第 10 章由周自刚、刘德森、韩艳玲撰写,第 13 章由周自刚、刘德森撰写。为使读者对“微小光学”有一个较全面的了解,特请中国科学院长春光学精密机械研究所王立军、郝明明撰写第 16 章,香港理工大学靳伟、居剑撰写第 17 章。全书由刘德森统一整理、定稿。

本书取材主要来自作者及其同事多年研究工作发表的学术论文、专利、著作、研究报告和实验总结。这些成果是在中国科学院西安光学精密机械研究所、西南大学物理学院的领导与支持下,在龚老学术思想指引下,在国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划项目 863 项目、中国科学院基金和各部委、省市科技项目的资助下取得的。借本书出版的机会,作者向他们表示最崇高的敬意!本书内容大都是作者和课题组的同事、研究生共同完成的,他们是高应俊、宋辉、阎国安、覃亚丽、霍军民、高凤、姚胜利、曹庆林、陈邹生、殷宗敏、祝颂来、程希望、王学忠、阎国安、朱传贵、程东、陈倜、王克逸、梅锁海、刘丹东、贾振安、郭文革、郎贤礼、李景艳、朱少丽、韩艳玲、张玉、边玲等,作者对他们表示最真挚的感谢!

在本书写作过程中得到了中国工程院金国藩院士、中国科学院刘颂豪院士、中国科学院侯洵院士、中国工程院牛憨笨院士的大力支持与鼓励,还为本书的出版写了热情洋溢的推荐信和序。这里,作者对他们表示最衷心的感谢!

由于作者水平所限,书中不足之处在所难免,热忱希望读者批评指正。

刘德森

2012 年 2 月 12 日

于西南大学桃花山

目 录

序

前言

第 1 章 从宏观光学到微小光学	1
1.1 宏观光学与微小光学	1
1.1.1 宏观光学	1
1.1.2 微小光学	1
1.1.3 纳米光学	3
1.2 微小光学的内容	4
1.2.1 微系统	4
1.2.2 微小光学研究领域	5
1.3 尺度效应带来的特殊问题	5
1.4 微小光学的发展	6
参考文献	10
第 2 章 向量波动方程和光线方程	15
2.1 麦克斯韦方程和程函方程	15
2.1.1 麦克斯韦方程	15
2.1.2 程函方程	17
2.2 向量波动方程式	19
2.2.1 基本方程式	19
2.2.2 基本方程式的解	20
2.3 标量波动方程	22
2.4 抛物线型波动方程式	24
2.5 光线方程式	26
2.6 光线方程的微分形式	29
2.7 光学哈密顿正则方程	30
2.8 在圆柱坐标系下的光线方程	33
2.9 光线方程的积分形式	34
2.10 光线光学与波动光学	37
参考文献	40

第3章 径向变折射率透镜的光线轨迹及成像特性	41
3.1 光线轨迹的一般解	41
3.2 在径向变折射率透镜中的光线轨迹	45
3.3 特殊情况下的光线轨迹	49
3.3.1 光线平行入射和平行出射情况	49
3.3.2 光线平行入射和出射光聚焦在出射端面上	49
3.4 径向变折射率透镜中光线轨迹的一般解	50
3.4.1 子午光线的轨迹	53
3.4.2 抛物线型折射率分布透镜中的光线轨迹	53
3.4.3 双曲线正割折射率分布透镜中的光线轨迹	54
3.5 径向变折射率透镜的成像特性	55
3.5.1 光线追迹方法	55
3.5.2 光线矩阵方法	58
3.5.3 径向变折射率透镜的成像特性与透镜长度的关系	63
3.6 径向变折射率透镜的数值孔径	69
3.7 球形端面的径向变折射率透镜的成像特性	72
3.7.1 成像光线矩阵	72
3.7.2 近轴光学成像特性	74
3.8 径向锥形变折射率透镜的光线轨迹和成像特性	77
3.8.1 光线轨迹方程	77
3.8.2 锥形变折射率透镜的成像光线矩阵	81
3.8.3 近轴成像特性	82
3.8.4 锥形变折射率光纤的制作	83
3.9 聚合物径向变折射率透镜	86
3.9.1 制作工艺	86
3.9.2 最佳制作工艺条件分析	87
3.9.3 聚合物径向变折射率透镜的光学特性	92
参考文献	93
第4章 变折射率透镜的傅里叶变换和成像特性	95
4.1 光学脉冲响应函数	95
4.2 薄径向变折射率透镜的傅里叶变换和成像特性	97
4.2.1 薄径向变折射率透镜的位相调制函数	97
4.2.2 薄径向变折射率透镜的傅里叶变换性质	99
4.2.3 薄径向变折射率透镜的成像特性	101
4.3 径向变折射率透镜的傅里叶变换和成像特性	103

4.3.1 径向变折射率透镜的脉冲响应函数	103
4.3.2 径向变折射率透镜的成像和傅里叶变换特性	106
参考文献	109
第5章 轴向变折射率透镜的光线轨迹和成像特性	111
5.1 轴向变折射率介质的光线轨迹	112
5.2 光线轨迹的特性	113
5.2.1 光程	113
5.2.2 光线的平面性	113
5.2.3 积分不变量	113
5.2.4 倾斜度不变性	114
5.2.5 类均匀平板的偏折作用	114
5.3 轴向变折射率透镜的成像特性	114
5.3.1 成像光线矩阵	115
5.3.2 成像特性	117
5.4 几种特殊的轴向变折射率分布形式	119
5.4.1 $n(z)=n(0)+\alpha z$	120
5.4.2 $n^2(z)=n^2(0)+\alpha z$	120
5.4.3 $n^2(z)=n^2(0)(1-\alpha^2 z^2)$	121
5.4.4 $n^2(z)=n^2(0)(1+\alpha^2 z^2)$	122
5.4.5 $n^2(z)=n^2(0)(1+\alpha z)$	122
5.5 双曲线正割变折射率平面波导的光线轨迹	123
5.5.1 光线轨迹方程	124
5.5.2 聚焦特性	126
5.5.3 准直特性	127
5.5.4 准直光输入时的光线轨迹	128
参考文献	129
第6章 球向变折射率透镜	131
6.1 球向变折射率透镜的光线轨迹及光学特性	132
6.1.1 球向变折射率透镜的光线轨迹	132
6.1.2 平面极坐标下球向变折射率透镜的光线轨迹	133
6.1.3 光线曲率向量	134
6.1.4 倾斜度不变性	135
6.2 麦克斯韦鱼眼透镜	137
6.2.1 光线轨迹	137
6.2.2 光线方程式	138

6.2.3 成像特性	140
6.2.4 光程	141
6.3 鲁尼伯格透镜	143
6.3.1 平行入射情况	143
6.3.2 广义鲁尼伯格透镜	145
6.3.3 特殊的鲁尼伯格透镜	149
6.3.4 鲁尼伯格透镜中的光程	149
6.4 聚合物球向变折射率透镜	150
6.4.1 制作工艺	150
6.4.2 聚合物球向变折射率透镜的光学特性	153
参考文献	154
第7章 变折射率平面微透镜阵列	157
7.1 变折射率平面微透镜的折射率分布	158
7.2 变折射率平面微透镜的光线轨迹	161
7.2.1 广义鲁尼伯格模型	161
7.2.2 旋转对称模型	164
7.3 变折射率平面微透镜的成像特性	173
7.3.1 光学成像矩阵	173
7.3.2 近轴光学特性	175
7.3.3 变折射率平面微透镜的几个主要光学特性	176
7.4 双层变折射率平面微透镜的成像特性	178
7.5 变折射率平面微透镜阵列的制作	181
7.6 两种离子交换技术的理论分析	183
7.6.1 开孔式离子交换技术	183
7.6.2 掩盘式离子交换技术	186
7.7 变折射率平面微透镜阵列制作技术中的几个关键问题	188
7.7.1 窗口表面凸起现象分析	188
7.7.2 窗口大小的影响	192
7.7.3 衍射极限和瑞利判据	195
7.7.4 微透镜微小化极限	198
7.8 球形变折射率平面微透镜阵列	201
7.8.1 制作工艺	201
7.8.2 椭球形变折射率平面微透镜的光学特性	202
7.8.3 高温电场辅助下的两阶段离子交换理论	203
7.9 平面交叉型变折射率微透镜阵列	205

7.9.1 制作工艺	205
7.9.2 焦距	206
参考文献	207
第8章 光刻热熔微透镜阵列	211
8.1 圆形孔径热熔微透镜阵列模板的光学设计	211
8.1.1 模板设计理论	211
8.1.2 抗蚀剂体积变化的影响	212
8.1.3 光刻胶-基片间界面的影响	213
8.2 异形孔径热熔微透镜阵列模板的光学设计	214
8.2.1 模板设计	214
8.2.2 热熔后微透镜的曲率半径	215
8.2.3 接触角	216
8.3 制作工艺	216
8.3.1 光刻胶的选择	216
8.3.2 基片预处理	217
8.3.3 涂胶和前烘	217
8.3.4 光刻和显影	218
8.3.5 热熔	219
8.4 热熔微透镜阵列的成像特性	220
8.4.1 成像矩阵	220
8.4.2 近轴光学成像特性	222
8.5 热熔微透镜阵列性能测试	223
8.5.1 阵列均匀性测试	223
8.5.2 阵列形貌检测	223
8.5.3 光学特性测试	225
参考文献	227
第9章 光敏热处理型微透镜阵列	229
9.1 光敏热处理型微透镜阵列形成工艺的理论基础	229
9.1.1 光敏热处理型微透镜阵列凸起高度与玻璃密度变化的关系	229
9.1.2 表面凸起的形状与表面张力分析	231
9.2 单层光敏热处理型微透镜阵列	234
9.2.1 单元透镜的光学参量	234
9.2.2 单层透镜的光线矩阵	234
9.2.3 近轴光学成像特性	236
9.3 双层光敏热处理型微透镜阵列	239

9.3.1 成像光线矩阵	239
9.3.2 双层微透镜阵列的近轴光学特性	242
9.4 单层光敏热处理型微透镜阵列的辐射照度	245
9.5 双层光敏热处理型微透镜阵列的辐射照度	247
9.6 弯曲的光敏热处理型微透镜阵列	250
参考文献	252
第10章 异形孔径径向变折射率透镜及阵列	254
10.1 填充系数是微透镜阵列重要的质量指标	254
10.1.1 填充系数定义	254
10.1.2 普通圆形透镜(包括径向变折射率透镜)阵列的填充系数	254
10.2 异形径向变折射率透镜的制作	257
10.2.1 先成形后离子交换方法	257
10.2.2 先离子交换后成形方法	257
10.2.3 先做异形预制棒、拉丝再离子交换方法	258
10.2.4 三种制作方法的比较	259
10.3 异形孔径径向变折射率透镜折射率分布的有限差分法研究	260
10.3.1 有限差分法	260
10.3.2 方形径向变折射率透镜的二维有限差分法分析	262
10.3.3 方形透镜阵列的三维有限差分法研究	264
10.3.4 正六边形径向变折射率透镜的有限差分法分析	267
10.3.5 正方形径向变折射率透镜折射率分布的解析解	267
10.3.6 正六边形径向变折射率透镜阵列折射率分布的解析解	271
10.3.7 正偶多边形径向变折射率透镜折射率分布的解析解	274
10.4 正方形径向变折射率透镜折射率分布的实验研究	275
10.4.1 折射率分布表达式	275
10.4.2 方形径向变折射率透镜折射率分布的实验研究	275
10.4.3 正方形径向变折射率透镜折射率分布的特点	278
10.5 正方形径向变折射率透镜和阵列的光学特性	279
10.5.1 正方形径向变折射率透镜光学特性分析	279
10.5.2 正方形径向变折射率透镜光学性能的测量	280
参考文献	282
第11章 异形孔径变折射率平面微透镜阵列	284
11.1 异形窗口的离子扩散	284
11.1.1 圆形窗口的离子扩散	284
11.1.2 异形窗口的离子扩散	285

11.2 异形孔径变折射率平面微透镜阵列的制作	287
11.2.1 模板设计	287
11.2.2 基片玻璃的离子扩散特性	289
11.2.3 异形孔径变折射率平面微透镜阵列的制作	290
11.3 六角形孔径变折射率曲面微透镜阵列	292
11.3.1 平面掩模板对球面基片曝光时的图形形变影响	292
11.3.2 异形孔径曲面型微透镜阵列的制作	294
11.4 异形孔径变折射率平面微透镜阵列的光学特性研究	296
11.4.1 异形孔径变折射率平面微透镜阵列的离子交换时间对光学特性的影响	296
11.4.2 两种窗口形状的离子扩散特性对比分析	297
11.4.3 曲面六角形窗口阵列的离子扩散特点	299
11.4.4 异形孔径变折射率曲面微透镜阵列的光学特性测试	300
11.5 异形孔径变折射率平面微透镜阵列的动态成像	305
11.5.1 微透镜放大倍率与元件结构参数的关系	307
11.5.2 微图形放大倍率与元件结构参数的关系	308
11.5.3 微图形动态显示效果与元件结构参数的关系	309
11.5.4 微透镜阵列特殊显示效果设计	312
参考文献	314
第 12 章 阵列光学理论	316
12.1 从叠合平面光学到阵列光学	316
12.2 光学元件阵列的特性	319
12.3 光学元件阵列的光线理论	319
12.3.1 光轴平行型微透镜阵列	319
12.3.2 一般光学透镜阵列的近轴光学特性	322
12.3.3 光学透镜阵列的综合成像特性	325
12.4 光学微透镜阵列的衍射理论	328
12.4.1 用传输矩阵元表示的脉冲响应函数	328
12.4.2 微透镜阵列光学系统的衍射积分和脉冲响应函数	329
12.4.3 微透镜阵列系统的多重成像特性	332
12.4.4 微透镜阵列系统的综合成像特性	333
12.5 变折射率平面微透镜阵列的成像特性	334
12.5.1 变折射率平面微透镜阵列的近轴光学理论	334
12.5.2 变折射率平面微透镜阵列的衍射理论	335
12.6 径向变折射率透镜阵列的成像特性	337

12.6.1 径向变折射率透镜阵列的光线轨迹	337
12.6.2 轨迹方程式	338
参考文献	341
第 13 章 掩埋式变折射率玻璃光波导	343
13.1 掩埋式变折射率波导的制作	343
13.2 电场辅助下离子交换过程分析	344
13.3 光功分器的设计	348
13.3.1 对称的 S 分支波导	349
13.3.2 不对称 S 型分支波导	351
13.3.3 S 型功分器弯曲路径的优化设计	351
13.4 光学特性的测量	355
13.4.1 六个区域的浓度分布	355
13.4.2 插入损耗测试	358
13.4.3 近场模式测试	358
13.4.4 低损耗波段测试	360
13.4.5 分光比测试	362
13.4.6 附加损耗测试	363
参考文献	364
第 14 章 变折射率透镜像差分析和改善像差特性的方法	366
14.1 光学哈密顿方程	367
14.2 光学哈密顿方程的近轴近似	368
14.3 光学哈密顿方程的近轴解	371
14.3.1 轴光线	371
14.3.2 场光线	372
14.4 三级像差表示式	373
14.5 三级像差方程	376
14.6 变折射率透镜的像差分析	377
14.6.1 子午光线的像差	377
14.6.2 三级像差	378
14.6.3 螺旋光线	380
14.6.4 五级像差	380
14.7 变折射率透镜的畸变和场曲的测量	381
14.7.1 变折射率透镜的折射率分布	381
14.7.2 变折射率透镜像差测量	383
14.8 变折射率透镜的色差分析	385

14.8.1 径向变折射率透镜的色差方程	385
14.8.2 色差方程在特殊情况下的解	388
14.9 改善变折射率透镜像差的方法	390
14.9.1 折射率分布各阶系数与扩散常量 T 的关系	390
14.9.2 改善变折射率透镜像差的方法	392
参考文献	397
第 15 章 光学微加工技术	400
15.1 离子交换技术	400
15.1.1 玻璃的基本结构	401
15.1.2 玻璃折射率的理论分析	403
15.1.3 最佳离子交换工艺的确定	411
15.2 光刻技术	418
15.2.1 模板设计	418
15.2.2 光刻过程	419
15.3 蚀刻技术	420
15.3.1 湿法蚀刻	420
15.3.2 干法蚀刻	421
15.3.3 离子束加工	422
15.4 直写技术	423
15.4.1 激光束直写技术	423
15.4.2 电子束直写	425
15.4.3 激光图形发生器	427
15.4.4 激光烧蚀技术	427
15.5 微小光学元件的复制技术	428
15.5.1 电铸技术	428
15.5.2 热压技术	429
15.5.3 模压复制技术	429
15.5.4 紫外复制技术	429
参考文献	431
第 16 章 光束整形中的微小光学元件	434
16.1 半导体激光器应用中的微小光学	434
16.2 半导体激光的光束特性	438
16.3 半导体激光准直中的微小光学元件	442
16.3.1 圆柱透镜准直系统	442
16.3.2 非球面柱透镜准直系统	443

16.3.3 半导体激光器慢轴激光准直系统	446
16.4 半导体激光列阵光束整形中的微小光学元件	448
16.5 半导体激光器和光纤耦合中的微小光学元件	450
16.6 半导体激光合束技术中的微小光学元件	452
16.7 其他光源光束整形中的微小光学元件	456
参考文献	458
第 17 章 光子晶体光纤	460
17.1 微结构与光子晶体	460
17.2 二维光子晶体	461
17.3 光子晶体光纤	464
17.3.1 光子晶体光纤概念	464
17.3.2 光子晶体光纤的制作	466
17.4 折射率导引型光子晶体光纤	468
17.4.1 全波段单模光纤	468
17.4.2 大范围双模光纤	470
17.4.3 高非线性光纤	474
17.4.4 高双折射和单偏振光纤	476
17.5 光子带隙光纤	478
17.5.1 空心带隙光纤	478
17.5.2 全固态带隙光纤	479
17.5.3 折射率/光子带隙混合导引光纤	480
参考文献	483
第 18 章 微纳光学纤维	488
18.1 微纳光纤的波导理论	489
18.2 微纳光纤中的功率分布	492
18.3 圆锥形微纳光纤	494
18.4 微纳光纤的制作	497
18.4.1 火焰加热技术	497
18.4.2 激光加热技术	497
18.4.3 电加热技术	499
18.5 微纳光纤应用	501
18.5.1 耦合器与干涉仪	501
18.5.2 环形谐振器	502
18.5.3 微纳光纤激光器	502
18.5.4 微纳光纤长周期光栅	503

18.5.5 超连续光谱产生	504
18.6 纳米光子学	504
18.6.1 纳米科学与纳米光子学	504
18.6.2 近场光学	505
18.6.3 纳米光子学材料	507
参考文献	509
本书名词中英对照索引	512