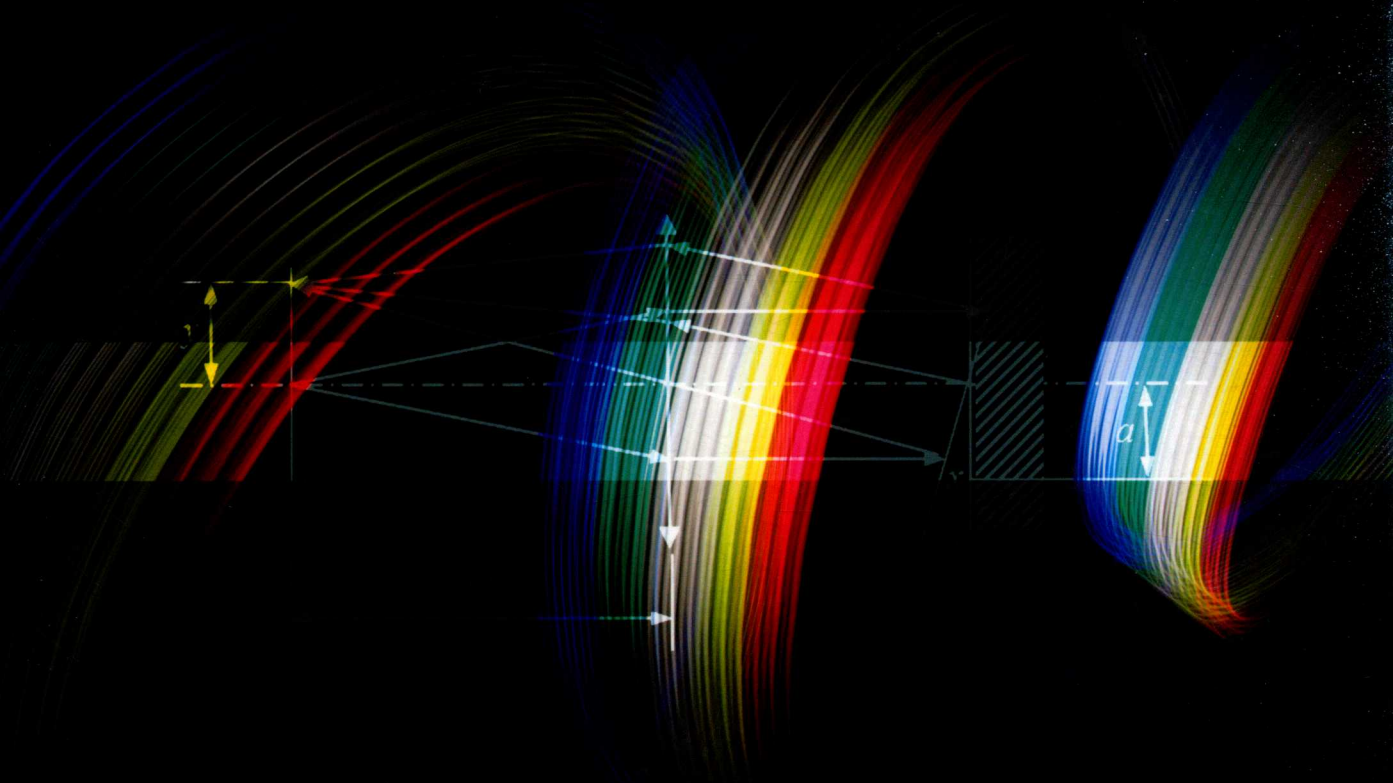




Contemporary
Applied Optics

现代应用光学

▶ 张以谟 主编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国家科学技术学术著作出版基金 资助出版
工业和信息产业科技与教育专著出版资金

现代应用光学

Contemporary Applied Optics

张以谟 主编



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

近年来,应用光学领域中出现了许多新技术。本书基于作者多年光学领域的研究和积累,系统阐述了应用光学的现代理论和应用,并引入这些新技术。全书内容包括波面像差理论及几何像差理论、以非球面和自由光学曲面简化光学系统设计、太阳能电站和现代高效照明中的非成像光学等;反映了应用光学中的前沿技术,如光学系统焦深扩展与衍射极限的突破、微纳光子学和表面等离子体微纳光学设备中的光学系统、自适应光学等;叙述了现代物理光学仪器的光学系统原理,包括光电干涉光学系统、光电光谱仪及分光光度光学系统、偏振光电仪器光学系统及偏振光成像技术等。

本书既讲解应用光学基础理论,又涵盖国内外应用光学领域最新的技术理论和实现方法,适合作为相关专业高校师生和广大科研人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代应用光学/张以谟主编. —北京:电子工业出版社,2018.1

ISBN 978-7-121-31473-5

I. ①现… II. ①张… III. ①应用光学 IV. ①O439

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第097431号

策划编辑:曲 昕 (quxin@phei.com.cn)

责任编辑:曲 昕 张来盛 特约编辑:张传福

印 刷:北京天宇星印刷厂

装 订:北京捷迅佳彩印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:72.75 字数:2052千字

版 次:2018年1月第1版

印 次:2018年1月第1次印刷

定 价:298.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zlbs@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254468, quxin@phei.com.cn。

前 言

近年来,应用光学中出现了许多新技术,如自由光学曲面、衍射光学、非成像光学、非对称光学系统像差理论、共形光学系统、紧凑型光学系统,以及扩展和提高光学系统性能的原理与技术、微纳光子学技术和表面等离子体微纳技术等。国内外已有相关研究和论文发表,也有一些单项内容的图书出版,如《Non-imaging Optics》《二元光学》《自适应光学理论》等。本书延续了已出版 30 多年的《应用光学》,并考虑引入上述应用光学的新技术,故定名为“现代应用光学”。

本书基于作者多年光学领域的研究和积累,对有关光学系统设计进行阐述,并介绍国内外最新的技术理论和方法。本书主要特点:

(1) 本书是张以谟主编的《应用光学》的延伸,重点叙述现代应用光学新技术理论和应用。

(2) 突出波面像差理论及几何像差理论,因其贯穿于各类光学系统的像质设计,如非对称光学系统、微型光学成像系统和鱼眼成像光学系统等。

(3) 以非球面和自由光学曲面为线索,将大部分章节中的现代光学系统设计联系起来,简化了光学系统,提高了性能。

(4) 突出现代应用光学技术,如非成像光学在太阳能电站和现代高效照明中的光学应用等。

(5) 反映了现代应用光学中的前沿技术,如光学系统的焦深扩展与衍射极限的突破,微纳光子学、表面等离子体微纳技术、光学设备中的光学系统,以及自适应光学与相控阵光学导论等。

(6) 叙述了现代物理光学仪器的光学系统原理,包括光电干涉光学系统、光电光谱仪及分光光度光学系统、偏振光电仪器光学系统及偏振光成像技术。

(7) 以应用光学基础理论为主题,体现了多学科交叉,突出了光学的应用理论和技术。

(8) 本书是在国内外科研单位及天津大学光学研究成果和资料的基础上编写的,颇有“它山之石以攻玉”之感。

全书共 16 章,主要内容和结构如下:

第 1 章在理论和方法上与《应用光学》紧密联系,介绍现代应用光学基础理论。

第 2~5 章给出常规光学球面以外的特殊光学面及其光学系统设计原理和示例。

第 6~8 章讨论当前光学系统的某些特殊应用技术。

第 9、10 章叙述对光学系统的某些性能指标的提高和扩展。

第 11~13 章讨论光学在微纳光子学技术中的应用。

第 14~16 章阐述了三种物理光学仪器及其光学系统的设计原理。

本书的编写者均从事过多年光学科研和教学工作,具有严谨的工作作风、深厚的专业背景和语言文字功底,确保了本书能准确地反映本领域的新技术内容。其中,吕且妮编写

了第3章中的部分内容；张红霞、谢洪波为第8章示例做了计算；贾大功编写了第8章中的部分内容，并审核了第10章；蔡怀宇编写了第9章中的部分内容，并审核了该章全部内容；张红霞编写了第11章；范世福编写了第12章；张以谟完成了其他章节的撰写和全书统稿工作。本书在撰写过程中参考了很多国内外同行的研究成果和资料，他们开创性的工作和贡献使本书的内容更加丰富，在此谨向他们表示诚挚的感谢。

现代应用光学是一个快速发展的学科，它与众多其他学科交叉的新兴研究课题更是层出不穷。由于我们的水平有限，书中难免有疏漏或错误之处，敬请读者不吝指正。

张以谟

2017年10月

目 录

第 1 章 现代应用光学基础理论概述	1
1.1 概述	1
1.1.1 本书的背景	1
1.1.2 本书的内容安排	1
1.2 光学系统设计中常用的光学材料特征参数	2
1.2.1 光学材料的光学参量	2
1.2.2 热系数及温度变化效应的消除	4
1.2.3 其他玻璃数据	4
1.3 新型光学材料	5
1.3.1 新型光学材料概述	5
1.3.2 光学材料发展概况	6
1.4 液晶材料及液晶显示器	12
1.4.1 液晶材料及其分类	12
1.4.2 常用液晶显示器件的基本结构和工作原理	16
1.4.3 STN-LCD 技术	27
1.4.4 液晶光阀技术	32
1.4.5 硅上液晶 (LCoS) 反射式显示器	36
1.4.6 光计算用 SLM	38
1.5 电光源和光电探测器	38
1.5.1 电光源	38
1.5.2 激光器	41
1.5.3 光电导探测器	48
1.5.4 光伏探测器	49
1.5.5 位敏探测器	53
1.5.6 阵列型光电探测器	56
1.6 波像差像质评价基础知识	59
1.6.1 光学系统像差的坐标及符号规则	59
1.6.2 无像差成像概念和完善镜头聚焦衍射模式	60
参考文献	63
第 2 章 光学非球面的应用	67
2.1 概述	67
2.2 非球面曲面方程	67
2.2.1 旋转对称的非球面方程	67
2.2.2 圆锥曲线的意义	68

2.2.3	其他常见非球面方程	70
2.2.4	非球面的法线和曲率	71
2.3	非球面的初级像差	71
2.3.1	波像差及其与垂轴像差的关系	71
2.3.2	非球面的初级像差	73
2.3.3	折射锥面轴上物点波像差	75
2.3.4	折射锥面轴外物点波像差	76
2.4	微振 (perturbed) 光学系统的初级像差计算	77
2.4.1	偏心 (decentered) 光学面	78
2.4.2	光学面的倾斜	80
2.4.3	间隔失调 (despace) 面	81
2.5	两镜系统的理论基础	82
2.5.1	两镜系统的基本结构形式	82
2.5.2	单色像差的表示式	82
2.5.3	消像差条件式	84
2.5.4	常用的两镜系统	85
2.6	二次圆锥曲面及其衍生高次项曲面	86
2.6.1	消球差的等光程折射非球面	86
2.6.2	经典卡塞格林系统	87
2.6.3	格里高里系统	88
2.6.4	只消球差的其他特种情况	88
2.6.5	R-C (Ritchey-Chrétien) 系统及马克苏托夫系统	89
2.6.6	等晕系统的特殊情况	90
2.6.7	库特 (Cuder) 系统及同心系统	91
2.6.8	史瓦希尔德 (Schwarzschild) 系统	92
2.6.9	一个消四种初级像差 ($S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = 0$) 的系统	93
2.6.10	无焦系统	93
2.7	两镜系统的具体设计过程	93
2.7.1	R-C 系统的设计	93
2.7.2	格里高里系统与卡塞格林系统	94
2.8	施密特光学系统设计	95
2.8.1	施密特光学系统的初级像差	95
2.8.2	施密特校正器的精确计算法	98
2.9	三反射镜系统设计示例	99
2.9.1	设计原则	99
2.9.2	设计过程分析	100
2.9.3	设计示例	101
	参考文献	103

第 3 章 衍射光学元件	105
3.1 概述	105
3.1.1 菲涅耳圆孔衍射——菲涅耳波带法	106
3.1.2 菲涅耳圆孔衍射的特点	108
3.1.3 菲涅耳圆屏衍射	109
3.2 波带片	110
3.2.1 菲涅耳波带片	110
3.2.2 相位型菲涅耳波带片	112
3.2.3 条形或方形波带片	113
3.3 衍射光学器件衍射效率	113
3.3.1 锯齿形一维相位光栅的衍射效率	113
3.3.2 台阶状(二元光学)相位光栅的衍射效率及其计算	114
3.4 通过衍射面的光线光路计算	115
3.5 衍射光学系统初级像差	118
3.5.1 衍射光学透镜的单色初级像差特性	118
3.5.2 折衍混合成像系统中衍射结构的高折射率模型及 PWC 描述	121
3.5.3 P_{∞} 、 W_{∞} 、 C 与折衍混合单透镜结构的函数关系	122
3.6 折衍光学透镜的色散性质及色差的校正	123
3.6.1 折衍光学透镜的等效阿贝数 ν	123
3.6.2 用 DOL 实现消色差	124
3.6.3 折衍光学透镜的部分色散及二级光谱的校正	125
3.7 衍射透镜的热变形特性	127
3.7.1 光热膨胀系数	127
3.7.2 消热变形光学系统的设计	129
3.7.3 折衍混合系统消热差系统设计示例	130
3.8 衍射面的相位分布函数	132
3.8.1 用于平衡像差的衍射面的相位分布函数	132
3.8.2 用于平衡热像差的衍射面的相位分布函数	133
3.9 多层衍射光学元件 (multi-layer diffractive optical elements)	133
3.9.1 多层衍射光学元件的理论分析	134
3.9.2 多层衍射光学元件的结构	134
3.9.3 多层衍射光学元件材料的选择	134
3.9.4 多层衍射光学元件的衍射效率	135
3.9.5 多层衍射光学元件在成像光学系统中的应用举例	136
3.10 谐衍射透镜 (HDL) 及其成像特点	137
3.10.1 谐衍射透镜	137
3.10.2 谐衍射透镜的特点	137
3.10.3 单片谐衍射透镜成像	138
3.10.4 谐衍射/折射太赫兹多波段成像系统设计示例	139

3.11 衍射光学轴锥镜 (简称衍射轴锥镜)	143
3.11.1 衍射轴锥镜	143
3.11.2 设计原理和方法	144
参考文献	150
第 4 章 非对称光学系统像差理论	153
4.1 波像差与 Zernike 多项式概述	153
4.1.1 波前像差理论概述	153
4.1.2 角向、横向和纵向像差	154
4.1.3 Seidel 像差的波前像差表示	155
4.1.4 泽尼克 (Zernike) 多项式	162
4.1.5 条纹 (fringe) Zernike 系数	164
4.1.6 波前像差的综合评价指标	165
4.1.7 色差	167
4.1.8 典型光学元件的像差特性	167
4.2 非对称旋转成像光学系统中像差理论	174
4.2.1 重要概念简介	174
4.2.2 倾斜非球面光学面处理	176
4.2.3 局部坐标系统 (LCS) 近轴光方法计算单个光学面像差场中心	176
4.2.4 OAR 的参数化	179
4.2.5 倾斜和偏心的光学面的定位像差场对称中心矢量 (像差场偏移量的推导)	181
4.2.6 基于实际光线计算单个面的像差场中心	182
4.2.7 失调光学系统的波像差表示式	183
4.2.8 举例: LCS 近轴计算与其实际光线等价计算的比较	185
4.3 近圆光瞳非对称光学系统三级像差的描述	187
4.3.1 光学系统的像差场为各个面的贡献之和	187
4.3.2 带有近圆光瞳的非旋转对称光学系统中的三级像差	187
4.3.3 节点像差场	191
4.3.4 波前误差以及光线的横向像差	194
4.3.5 非对称光学系统中的三级畸变	195
4.4 非旋转对称光学系统的多节点五级像差: 球差	197
4.4.1 非旋转对称光学系统像差概述	197
4.4.2 非旋转对称光学系统的五级像差	198
4.4.3 五级像差的特征节点行为: 球差族包括的各项	199
参考文献	203
第 5 章 光学自由曲面的应用	205
5.1 光学自由曲面概述	205
5.2 参数曲线和曲面	206
5.2.1 曲线和曲面的参数表示	206

5.2.2 参数曲线的代数和几何形式	210
5.3 Bézier 曲线与曲面	212
5.3.1 Bézier 曲线的数学描述和性质	212
5.3.2 Bézier 曲面	215
5.4 B 样条 (B-spline) 曲线与曲面	217
5.4.1 B 样条曲线的数学描述和性质	217
5.4.2 B 样条曲线的性质	219
5.4.3 B 样条曲面的表示	220
5.5 双三次均匀 B 样条曲面	221
5.5.1 B 样条曲面	221
5.5.2 双三次均匀 B 样条曲面的矩阵公式	223
5.6 非均匀有理 B 样条 (NURBS) 曲线与曲面	224
5.6.1 NURBS 曲线与曲面	224
5.6.2 NURBS 曲线的定义	224
5.6.3 NURBS 表示	226
5.6.4 非均匀有理 B 样条曲面	228
5.7 Coons 曲面	229
5.7.1 基本概念	229
5.7.2 双线性 Coons 曲面	230
5.7.3 双三次 Coons 曲面	231
5.8 自由曲面棱镜光学系统	232
5.8.1 自由曲面棱镜概述	232
5.8.2 矢量像差理论及初始结构确定方法	233
5.8.3 自由曲面棱镜设计	236
5.8.4 用光学设计软件设计含自由曲面的光学系统	238
参考文献	239
第 6 章 共形光学系统	241
6.1 概述	241
6.1.1 共形光学系统的一般要求	241
6.1.2 共形光学系统的主要参量	244
6.1.3 共形光学系统中的像差校正	250
6.1.4 共形光学系统实际应用须考虑的问题	252
6.2 椭球整流罩的几何特性及消像差条件在共形光学系统中的应用	253
6.2.1 椭球面几何特性分析	253
6.2.2 椭球整流罩的几何特性	256
6.2.3 利用矢量像差理论分析椭球整流罩结构的像差特性	258
6.3 基于 Wassermann-Wolf 方程的共形光学系统设计	259
6.3.1 共形光学系统解决像差动态变化的方法概述	259
6.3.2 共形光学系统的像差分析	260

6.3.3	Wassermann-Wolf 非球面理论	261
6.3.4	利用 Wassermann-Wolf 原理设计共形光学系统	265
6.4	折/反射椭球形整流罩光学系统的设计	268
6.4.1	折/反射椭球形整流罩光学系统的设计原则	269
6.4.2	椭球形整流罩像差分析	269
6.4.3	两镜校正系统初始结构设计原理	269
6.4.4	用平面对称矢量像差理论分析光学系统像差特性	274
6.4.5	设计结果	275
6.5	共形光学系统的动态像差校正技术	276
6.5.1	共形光学系统的固定校正器	276
6.5.2	弧形校正器	278
6.5.3	基于轴向移动柱面—泽尼克校正元件的动态像差校正技术	280
6.6	二元光学元件在椭球整流罩导引头光学系统中的应用	283
6.6.1	二元光学元件的光学特性	284
6.6.2	二元衍射光学元件在椭球形整流罩导引头光学系统中的应用	286
6.6.3	利用衍射光学元件进行共形整流罩像差校正的研究	288
6.6.4	折/衍混合消热差共形光学系统的设计	291
6.7	利用自由曲面进行微变焦共形光学系统设计	295
6.7.1	自由曲面进行微变焦共形光学系统的特点	295
6.7.2	利用自由曲面的像差校正方法	295
6.8	基于实际光线追迹的共形光学系统设计概述	298
6.8.1	实际光线追迹设计方法可在共形光学系统整个观察视场内得到较好像质	298
6.8.2	实际光线追迹方法概述	299
	参考文献	302
第 7 章	非成像光学系统	308
7.1	引言	308
7.1.1	太阳能热发电技术简介	308
7.1.2	太阳能光伏发电	311
7.1.3	照明非成像光学	312
7.2	非成像光学概述	314
7.2.1	非成像会聚器特性	314
7.2.2	光学扩展不变量	314
7.2.3	会聚度的定义	315
7.3	会聚器理论中的一些几何光学概念	316
7.3.1	光学扩展量的几何光学概念	316
7.3.2	在成像光学系统中像差对会聚度的影响	317
7.3.3	光学扩展量(拉氏不变量)和相空间的广义概念	318
7.3.4	斜不变量	320
7.4	非成像光学的边缘光线原理	322

7.4.1	边缘光线原理	322
7.4.2	边缘光线原理应用——“拉线”方法	322
7.5	复合抛物面会聚器 (CPC)	324
7.5.1	光锥会聚器	324
7.5.2	复合抛物面会聚器 (CPC) 概述	324
7.5.3	复合抛物面会聚器的性质	326
7.5.4	增加复合抛物面会聚器的最大会聚角	328
7.6	同步多曲面设计方法	331
7.6.1	SMS 方法设计会聚器概述	331
7.6.2	一个非成像透镜的设计: RR 会聚器	332
7.6.3	XR 会聚器	335
7.6.4	RX 会聚器	337
7.7	XX 类会聚器	340
7.7.1	XX 类会聚器的原理	340
7.7.2	RX1 会聚器	341
7.7.3	RX1 会聚器的三维分析	341
7.8	非成像光学用于 LED 照明	343
7.8.1	边缘光线扩展度守恒原理和控制网格算法	344
7.8.2	LED 的非成像光学系统设计实例	346
7.8.3	大范围照明光源设计 (二维给定光分布设计)	347
7.9	非成像光学用于 LED 均匀照明的自由曲面透镜	348
7.9.1	均匀照明的自由曲面透镜概述	348
7.9.2	LED 浸没式自由曲面透镜设计方法	349
7.9.3	设计示例	351
	参考文献	353
第 8 章 光电光学系统中紧凑型照相光学系统设计		356
8.1	概述	356
8.1.1	数码相机的组成	356
8.1.2	数码相机中图像传感器 CCD 和 CMOS 的比较	357
8.1.3	数码相机的分类	359
8.1.4	数码相机的光学性能	364
8.1.5	数码相机镜头的分类和特点	365
8.2	数码相机镜头设计示例	367
8.2.1	球面定焦距镜头设计示例	367
8.2.2	非球面定焦距镜头设计示例	370
8.3	变焦距镜头设计示例	372
8.3.1	变焦透镜组原理	373
8.3.2	非球面变倍镜头初始数据	373
8.3.3	折叠式 (潜望式) 变焦镜头示例	376

8.4	手机照相光学系统	378
8.4.1	手机照相光学系统概述	378
8.4.2	两片型非球面手机物镜设计示例	379
8.4.3	三片型手机物镜设计	382
8.5	手机镜头新技术概述	385
8.5.1	自由曲面在手机镜头中的应用	385
8.5.2	液体镜头	385
8.6	鱼眼镜头概述	388
8.6.1	鱼眼镜头是“仿生学的示例”	388
8.6.2	鱼眼镜头基本结构的像差校正	390
8.6.3	鱼眼镜头基本光学结构的演变	391
8.6.4	鱼眼镜头的发展	391
8.6.5	鱼眼镜头的光学性能	393
8.6.6	光阑球差与入瞳位置的确定	396
8.6.7	光阑彗差与像差渐晕	398
8.6.8	鱼眼镜头示例与投影方式比较	399
	参考文献	402
第9章	光学系统焦深的扩展与衍射极限的突破	405
9.1	概述	405
9.1.1	扩展焦深概述	405
9.1.2	超衍射极限近场显微术概述	409
9.1.3	远场超分辨成像	418
9.2	光学成像系统景深的延拓	420
9.2.1	景深延拓概述	420
9.2.2	延拓景深的方形孔径相位模板	425
9.2.3	增大景深的圆对称相位模板	438
9.3	多环分区圆对称相位模板设计	442
9.3.1	多环分区圆对称相位模板的概念	442
9.3.2	多环分区圆对称相位模板对应系统的特性	448
9.3.3	圆对称相位模板成像系统的优缺点	450
9.3.4	初级像差的影响以及延拓景深图像的复原	451
9.3.5	延拓景深相位模板系统的图像复原与其光学成像系统的光学设计	456
9.3.6	延拓景深光学成像系统的光学设计	460
9.4	轴锥镜(axicon)扩展焦深	468
9.4.1	轴锥镜	468
9.4.2	小焦斑长焦深激光焦点的衍射轴锥镜的设计	476
9.5	近场光学与近场光学显微镜	478
9.5.1	近场光学概念	478
9.5.2	近场扫描光学显微镜(NSOM)	482

9.6	扫描探针显微镜	488
9.6.1	与隧道效应有关的显微镜	489
9.6.2	原子力显微镜 (AFM)	491
9.6.3	扫描力显微镜 (SFM)	495
9.6.4	检测材料不同组分的 SFM 技术	498
9.6.5	光子扫描隧道显微镜 (PSTM)	499
9.7	原子力显微镜	504
9.7.1	原子力显微镜的基本组成	504
9.7.2	近场力	505
9.7.3	微悬臂力学	507
9.7.4	AFM 探测器信号	508
9.7.5	原子力显微镜的测量模式	509
9.7.6	原子力显微镜检测成像技术	512
9.7.7	AFM 的优点和正在改进之处	513
9.7.8	电力显微镜 (EFM)	513
9.8	远场超高分辨率显微术	516
9.8.1	远场超高分辨率显微术概述	516
9.8.2	4Pi 显微镜	517
9.8.3	3D 随机光学重建显微镜 (STORM)	519
9.8.4	平面光显微镜 (SPIM) 基本原理	520
9.8.5	福斯特共振能量转移显微镜 (FRETm)	521
9.8.6	全内反射荧光显微镜 (TIRFM)	522
9.9	衍射光学组件用于扫描双光子显微镜的景深扩展	524
9.9.1	远场超分辨显微镜扩展焦深概述	524
9.9.2	扩展焦深显微光学系统设计	525
9.9.3	扫描双光子显微成像系统的扩展景深实验	528
	参考文献	532
第 10 章	自适应光学技术应用概述	542
10.1	引言	542
10.1.1	自适应光学技术的发展	542
10.1.2	自适应光学系统	544
10.1.3	自适应光学应用技术	545
10.1.4	自适应光学在相控阵系统中的应用	547
10.1.5	高能激光相控阵系统简介	549
10.2	自适应光学系统原理	553
10.2.1	自适应光学概念	553
10.2.2	共光路/共模块自适应光学原理及衍生光路	557
10.3	自适应光学系统的基本组成原理和应用	569
10.3.1	波前传感器	569

10.3.2	波前校正器	578
10.3.3	波前控制器及控制算法	584
10.3.4	激光导星原理及系统	589
10.4	天文望远镜及其自适应光学系统	601
10.4.1	2.16 m 望远镜及其自适应光学系统	601
10.4.2	37 单元自适应光学系统	608
10.4.3	1.2 m 望远镜 61 单元自适应光学系统	612
10.5	锁相光纤准直器的自适应阵列实验系统	620
10.5.1	概述	620
10.5.2	光纤准直器的自适应阵列中的反馈控制	626
10.6	阵列光束优化式自适应光学的原理与算法	631
10.6.1	光学相控阵技术基本概念	631
10.6.2	优化算法自适应光学	633
10.6.3	阵列光束优化式自适应光学的原理与发展	634
10.6.4	阵列光束优化式自适应光学算法	635
10.7	自适应光学技术在自由空间光通信中的应用	642
10.7.1	自由空间光通信概述	642
10.7.2	自由空间光通信系统概述	643
10.7.3	一些自由空间光通信的示例	649
10.7.4	自适应光学结合脉冲位置调制 (PPM) 改善光通信性能	653
10.7.5	无波前传感自适应光学 (AO) 系统	656
10.8	自由空间激光通信终端系统原理	659
10.8.1	终端系统结构和工作原理	659
10.8.2	激光收发子系统	660
10.8.3	捕获跟踪瞄准 (ATP) 子系统	662
10.8.4	光学平台子系统	662
10.8.5	卫星终端系统概述	666
10.8.6	基于自适应光学技术的星载终端光学系统方案示例	673
10.9	自适应光学技术的其他典型应用举例	675
10.9.1	自适应光学技术在惯性约束聚变技术中的应用概述	675
10.9.2	自适应光学用于月球激光测距	679
10.9.3	自适应光学系统在战术激光武器中的应用简介	682
10.9.4	自适应光学在医学眼科成像中的应用	689
	参考文献	696
第 11 章	微纳投影光刻技术导论	711
11.1	引言	711
11.2	光刻离轴照明技术	717
11.3	投影光刻掩模误差补偿	721
11.4	投影光刻相移掩模	728

11.5	电子投影光刻 (EPL)	735
11.6	离子束曝光技术	750
11.7	纳米压印光刻 (NIL) 技术	754
	参考文献	761
第 12 章	投影光刻物镜	769
12.1	概述	769
12.1.1	光刻技术简介	769
12.1.2	提高光刻机性能的关键技术	769
12.1.3	ArF 光刻机研发进展	771
12.1.4	下一代光刻技术的研究进展	772
12.2	投影光刻物镜的光学参量	772
12.2.1	投影光刻物镜的光学特征	772
12.2.2	工作波长与光学材料	774
12.3	投影光刻物镜结构形式	784
12.3.1	折射式投影物镜结构形式	784
12.3.2	折射式光刻投影物镜	785
12.3.3	深紫外 (DUV) 投影光刻物镜设计要求	786
12.3.4	深紫外 (DUV) 非球面的投影光刻物镜	786
12.3.5	光阑移动对投影光刻物镜尺寸的影响	787
12.4	光刻物镜的像质评价	788
12.4.1	波像差与分辨率	788
12.4.2	基于 Zernike 多项式的波像差分解	791
12.4.3	条纹 Zernike 多项式的不足与扩展	794
12.5	运动学安装机理与物镜像质精修	795
12.5.1	运动学安装机理	795
12.5.2	物镜像质精修	796
12.5.3	投影光刻物镜的像质补偿	796
12.6	进一步扩展 NA	801
12.6.1	用 Rayleigh 公式中的因子扩展 NA	801
12.6.2	非球面的引入	802
12.6.3	反射光学元件的引入	802
12.6.4	两次曝光或两次图形曝光技术	803
12.7	浸没式光刻技术	803
12.7.1	浸没式光刻的原理	803
12.7.2	浸没液体	804
12.7.3	浸没式大数值孔径投影光刻物镜	805
12.7.4	偏振光照明	806
12.7.5	投影光刻物镜的将来趋势	808
12.8	极紫外 (EUV) 光刻系统	810

12.8.1 极紫外 (EUV) 光源 810

12.8.2 EUVL (extreme ultraviolet lithography) 投影光刻系统的主要技术要求 813

12.8.3 两镜 EUV 投影光刻物镜 815

12.8.4 ETS 4 镜原型机 819

12.9 EUVL6 镜投影光学系统设计 820

12.9.1 非球面 6 镜投影光学系统结构 820

12.9.2 分组设计法——渐进式优化设计 6 片 (22 nm 技术节点)
反射式非球面投影光刻物镜 821

12.9.3 EUVL 照明系统设计的要求 825

12.10 鞍点构建方法用于光刻物镜设计 827

12.10.1 构建鞍点的价值函数的基本性质 827

12.10.2 鞍点构建 828

12.10.3 DUV 光刻物镜的枢纽 830

12.10.4 深紫外 (DUV) 光刻物镜设计举例 832

12.10.5 用鞍点构建方法设计 EUV 投影光刻系统 835

12.10.6 极紫外 (EUV) 光刻物镜举例 836

12.10.7 鞍点构建设计方法中加入非球面设计概述 837

参考文献 840

第 13 章 表面等离子体纳米光子学应用 850

13.1 表面等离子体概述 850

13.1.1 表面等离子体相关概念 850

13.1.2 表面等离子体激发方式 852

13.2 SPP 产生条件和色散关系 854

13.2.1 电荷密度波 (CWD) 与激发 SPP 的条件 854

13.2.2 介电质/金属结构中典型的 SPP 色散曲线 856

13.3 SPP 的特征长度 858

13.3.1 概述 858

13.3.2 SPP 的波长 λ_{SPP} 859

13.3.3 SPP 的传播距离 δ_{SPP} 860

13.3.4 实验 862

13.3.5 SPP 场的穿透深度 δ_d 和 δ_m 863

13.4 SPP 的透射增强 864

13.4.1 透射增强 864

13.4.2 围绕单孔的同心环槽状结构 865

13.4.3 平行于单狭缝的对称线性槽阵列 866

13.5 突破衍射极限的超高分辨率成像和银超透镜的超衍射极限成像 867

13.5.1 超透镜的构成 867

13.5.2 银超透镜 868

13.5.3 银超透镜成像实验 869