

颜树华 著

Design of Diffractive Micro-optics

衍射微光学设计



国防工业出版社

National Defense Industry Press

衍射微光学设计

Design of Diffractive Micro-optics

颜树华 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

衍射微光学设计 / 颜树华著. —北京: 国防工业出版社, 2011. 4

ISBN 978 - 7 - 118 - 07224 - 2

I. ①衍... II. ①颜... III. ①衍射-微光技术-研究 IV. ①TN223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 071887 号

※

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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 10½ 字数 280 千字

2011 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 45.00 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;紧密结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,紧密结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镛 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

前 言

随着 MEMS 技术的发展,光学系统的微小型化、集成化、多功能和低成本必然是未来的发展方向之一,而微光学器件是制造微小型光机电系统的关键部件,具有体积小、质量小、衍射效率高、易复制和造价低等特点,并能实现传统光学难以完成的微小、阵列、集成及任意波面变换等功能,对以光学元件为基础的信息捕获、抽取、测量和控制等产生了极大的影响,在诸如空间技术、微光机电系统、光计算、光通信、信息处理、生物医学、国防军事及娱乐消费等众多领域有很广泛的应用前景。

本书是作者结合自身近年来从事衍射微光学的科研实践,收集、阅读和消化数百篇中外文献资料,综合国际学术新观点和研究进展,认真总结并撰写而成。该书系统、全面地论述了衍射微光学的理论基础和设计方法,反映了近年来衍射微光学设计方面的最新进展和研究成果。

全书共分为 12 章。第 1 章介绍衍射微光学的基本概念、衍射微光学器件设计理论和制作方法的研究进展。第 2 章叙述标量衍射理论,重点在基尔霍夫标量衍射理论。第 3 章对基于基尔霍夫衍射原理的精细化设计理论进行深入浅出的分析,系统地建立精细化设计时输入、输出平面的抽样原则。第 4 章至第 7 章分别论述衍射微光学器件的多种设计方法——盖师贝格—撒克斯通算法、模拟退火算法、遗传算法和杨—顾算法。第 8 章分析衍射透镜、谐衍射透镜的设计方法及其色散特性,给出大数值孔径衍射和谐衍射透镜更为准确的设计公式,同时介绍折衍混合成像系统的

设计方法。第9章、第10章分别详细地讨论矢量衍射理论——等效介质理论和严格耦合波分析理论。第11章介绍FDTD分析衍射光学器件特性的相关方法。第12章介绍利用矢量衍射理论设计抗反射元件、偏振分束器、相位延迟器、衍射微透镜和高效率等光强分束器等多种亚波长结构器件。

本书从基础理论和设计方法两个方面体现出较高的学术水平和实用价值,书中精选的设计实例对初步涉足微光学研究的学者具有较大的启发作用,且许多设计结果可直接应用于科研实践和工程应用。本书可供从事微光学研究、微光机电系统集成、光电子器件和系统的设计、制作及应用的相关科技工作者参考,也可作为高等院校相关专业的高年级本科生和研究生的教材或参考书。

在编著本书时,作者参阅了国内外许多的文献资料,在此对引用的文献作者表示感谢!对国防科技图书出版基金的资助及国防工业出版社的支持表示感谢!书中错误和不妥之处在所难免,敬请各位专家、学者和读者批评指正。

编著者

2010年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 二元光学及其内涵	1
1.2 衍射微光学器件设计理论的研究进展	3
1.2.1 基于标量衍射理论的设计方法	4
1.2.2 基于矢量衍射理论的设计方法	5
1.2.3 衍射微光学器件设计理论的发展趋势	7
1.3 衍射微光学器件制作方法的研究进展	8
1.3.1 传统套刻法	9
1.3.2 激光直写法	10
1.3.3 灰度掩模法	19
第 2 章 衍射微光学基本理论	23
2.1 基尔霍夫标量衍射理论	23
2.1.1 基尔霍夫衍射公式	23
2.1.2 基尔霍夫衍射积分模型	24
2.1.3 菲涅耳衍射积分模型	25
2.1.4 夫琅和费衍射积分模型	27
2.1.5 圆对称形式菲涅耳衍射积分模型	28
2.1.6 圆对称形式夫琅和费衍射积分模型	29
2.2 平面波角谱衍射理论	29
2.2.1 角谱及其物理解释	29
2.2.2 角谱的传播	30
2.2.3 衍射孔径对角谱的效应	32
2.3 衍射微光学器件的衍射效率	33

2.4	衍射微光学器件设计的评价函数	36
第3章	基于标量衍射理论的精细化设计	39
3.1	精细化设计时输入平面的抽样原则	39
3.1.1	输入平面光场振幅的频谱	39
3.1.2	衍射光学器件复振幅透过率的频谱	40
3.1.3	输入平面的近似抽样	43
3.2	精细化设计时输出平面的抽样原则	44
3.2.1	基于正向衍射变换的优化算法	44
3.2.2	基于正、逆向衍射变换的优化算法	45
3.3	精细化设计时变换函数的抽样原则	47
3.3.1	基尔霍夫衍射变换函数的抽样原则	47
3.3.2	菲涅耳衍射变换函数的抽样原则	48
3.3.3	夫琅和费衍射变换函数的抽样原则	48
3.3.4	引入折射聚焦元件后变换函数的抽样原则	49
3.3.5	变换函数的近似抽样	51
3.4	空间延拓分量的理论分析	51
3.4.1	传播过程的线性空间滤波特性	51
3.4.2	空间延拓分量的形成机理	52
3.4.3	空间延拓分量的无影响条件	53
3.5	精细化设计时抽样原则的仿真验证	54
3.5.1	设计实例的对象模型	55
3.5.2	性能评价参数的定义	57
3.5.3	空间延拓分量交叠现象的仿真验证	57
3.5.4	非抽样点上失真现象的仿真验证	60
3.6	精细化设计时的综合考虑	65
第4章	GS 算法设计衍射光学元件	66
4.1	基本 GS 算法	66
4.1.1	基本原理	66
4.1.2	衍射和逆衍射积分公式	70
4.1.3	分析讨论	71

4.2	Adaptive-Additive 算法	72
4.2.1	基本原理	72
4.2.2	收敛性证明	73
4.3	GS 算法设计实例	76
4.3.1	二维衍射光学束匀滑器的设计	76
4.3.2	二维衍射光学十字架发生器的设计	80
4.4	其他 GS 改进算法	82
4.4.1	ST 改进算法	82
4.4.2	相位混合算法	83
4.4.3	加权串行迭代算法	84
第 5 章	杨—顾算法设计衍射光学元件	87
5.1	杨—顾算法	87
5.1.1	基本原理	87
5.1.2	迭代算法	91
5.1.3	一维杨—顾算法	92
5.2	加权杨—顾算法	93
5.2.1	基本原理	94
5.2.2	收敛性证明	95
5.3	杨—顾算法设计实例	99
5.3.1	设计对象及参数设置	99
5.3.2	普通杨—顾算法的设计结果	99
5.3.3	加权杨—顾算法的设计结果	101
5.3.4	迭代收敛速率曲线	103
5.4	其他杨—顾改进算法	105
5.4.1	ST 改进算法	106
5.4.2	ST-输入/输出联合改进算法	106
第 6 章	模拟退火算法设计衍射光学元件	108
6.1	基本模拟退火算法	108
6.1.1	退火过程的物理图像	108
6.1.2	Metropolis 准则	109

6.1.3	模拟退火算法的运行流程	110
6.1.4	模拟退火算法的退火方式	111
6.1.5	模拟退火算法的改进	113
6.2	模拟退火算法设计 Dammann 光栅	114
6.2.1	Dammann 光栅型分束器	114
6.2.2	Dammann 光栅的设计原理	114
6.2.3	设计实例	117
第 7 章	遗传算法设计衍射光学元件	124
7.1	基本遗传算法	124
7.1.1	遗传算法的结构要素	124
7.1.2	遗传算法的伪代码描述	125
7.1.3	遗传算法的特点	126
7.2	遗传算法的基本实现技术	127
7.2.1	染色体编码方法	128
7.2.2	适应度函数	129
7.2.3	选择算子	131
7.2.4	交叉算子	131
7.2.5	变异算子	133
7.2.6	遗传算法运行参数的确定	134
7.2.7	遗传算法的改进	135
7.3	遗传算法设计实例	136
第 8 章	衍射光学透镜及折衍混合成像系统	137
8.1	小数值孔径衍射光学透镜的设计公式	137
8.1.1	衍射透镜	137
8.1.2	谐衍射透镜	140
8.1.3	近似成立条件	143
8.2	大数值孔径衍射光学透镜的设计公式	144
8.2.1	衍射透镜	145
8.2.2	谐衍射透镜	146
8.3	衍射光学透镜的初级像差和色差	147

8.3.1	衍射光学透镜初级像差公式	147
8.3.2	衍射光学透镜色差特性	150
8.4	衍射光学透镜的热差特性	152
8.5	折衍混合成像系统的设计	155
8.5.1	折衍混合光学系统简介	155
8.5.2	折衍混合成像系统的设计方法	156
8.5.3	折衍混合遥感系统的设计实例	157
第9章	亚波长结构及等效介质理论	162
9.1	亚波长结构	162
9.2	一维亚波长结构的等效介质理论	163
9.2.1	一维亚波长结构的零级等效近似	163
9.2.2	一维亚波长结构的二级等效近似	166
9.2.3	材料折射率随波长变化的经验公式	167
9.2.4	等效折射率的仿真分析	168
9.2.5	一维亚波长结构的周期阈值	170
9.3	二维亚波长结构的等效介质理论	171
9.3.1	二维矩形柱状亚波长结构的近似分析	171
9.3.2	二维亚波长结构的周期阈值	174
第10章	严格耦合波理论	176
10.1	引言	176
10.2	一维周期结构的严格耦合波分析	177
10.2.1	一维表面浮雕结构	177
10.2.2	任意偏振入射光	177
10.2.3	TE 偏振入射光	191
10.2.4	TM 偏振入射光	195
10.3	二维周期结构的严格耦合波分析	199
10.3.1	二维表面浮雕结构	199
10.3.2	严格矢量解描述	201
10.3.3	数值求解	205

第 11 章 FDTD 分析衍射光学器件特性	207
11.1 引言	207
11.2 直角坐标系中的 FDTD 差分公式	209
11.2.1 三维 FDTD 差分公式	209
11.2.2 二维 FDTD 差分公式	219
11.3 圆柱坐标系中的 FDTD 差分公式	225
11.3.1 三维 FDTD 差分公式	225
11.3.2 二维 FDTD 差分公式	235
第 12 章 亚波长结构器件设计及其特性分析	243
12.1 亚波长结构抗反射光栅的设计	243
12.1.1 设计背景	243
12.1.2 设计方法	244
12.1.3 设计结果及分析	246
12.1.4 一维多层光栅抗反射设计与特性分析	249
12.2 亚波长结构消色散 $\lambda/4$ 波片的设计	250
12.2.1 设计背景	250
12.2.2 设计方法	251
12.2.3 设计结果及分析	255
12.3 亚波长结构偏振分束器设计	256
12.3.1 设计背景	256
12.3.2 设计方法	257
12.3.3 设计结果及分析	259
12.4 二元亚波长衍射微透镜的设计	262
12.4.1 设计方法	262
12.4.2 BOR FDTD 分析	264
12.4.3 计算结果	265
12.5 高衍射效率亚波长结构 Dammann 光栅的设计	267
12.5.1 设计方法	267
12.5.2 优化设计结果	271

12.5.3 设计结果分析	272
附录 A 逆衍射积分公式的推导	284
A.1 菲涅耳逆衍射积分公式	284
A.2 夫琅和费逆衍射积分公式	285
A.3 圆对称形式菲涅耳逆衍射积分公式	286
A.4 圆对称形式夫琅和费逆衍射积分公式	287
附录 B 衍射透镜及谐衍射透镜透过率函数级数展开形式 的推导.....	289
B.1 连续结构衍射及谐衍射透镜	289
B.2 量化结构衍射及谐衍射透镜	290
参考文献.....	293

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Binary Optics and Its Connotation	1
1.2 Research Progresses on Design Theories of Diffractive Micro-optical Elements	3
1.2.1 Design Methods Based on the Scalar Diffraction Theory	4
1.2.2 Design Methods Based on the Vector Diffraction Theory	5
1.2.3 Development Trends for Design Theories of Diffractive Micro-optical Elements	7
1.3 Research Progresses on Manufacturing Methods of Diffractive Micro-optical Elements	8
1.3.1 Traditional Overlay Method	9
1.3.2 Laser Direct Writing Method	10
1.3.3 Gray-level Mask Method	19
Chapter 2 Fundamental Theories of Diffractive Micro-optics	23
2.1 Kirchhoff Scalar Diffraction Theory	23
2.1.1 Kirchhoff Diffraction Formula	23
2.1.2 Kirchhoff Diffraction Integral Model	24
2.1.3 Fresnel Diffraction Integral Model	25
2.1.4 Fraunhofer Diffraction Integral Model	27
2.1.5 Circular Symmetric Fresnel Diffraction Integral Model	28

2.1.6	Circular Symmetric Fraunhofer Diffraction Integral Model	29
2.2	Plane Wave Angular Spectrum Diffraction Theory	29
2.2.1	Angular Spectrum and Its Physical Interpretation	29
2.2.2	Propagation of Angular Spectrum	30
2.2.3	Effects on Angular Spectrum by a Diffraction Aperture	32
2.3	Diffraction Efficiency of Diffractive Micro-optical Elements	33
2.4	Design Evaluation Function of Diffractive Micro-optical Elements	36
Chapter 3 Fine Design Based on the Scalar Diffraction		
	Theory	39
3.1	Sample Principle in the Input Plane for Fine Design	39
3.1.1	Spectrum of Optical Field Amplitude in the Input Plane	39
3.1.2	Spectrum of Complex Amplitude Transmittance of Diffractive Optical Elements	40
3.1.3	Approximate Sampling in the Input Plane	43
3.2	Sample Principle in the Output Plane for Fine Design	44
3.2.1	Optimization Based on the Forward Diffraction Transform	44
3.2.2	Optimization Based on the Forward and Backward Diffraction Transform	45
3.3	Sample Principle of Transformation Function for Fine Design	47