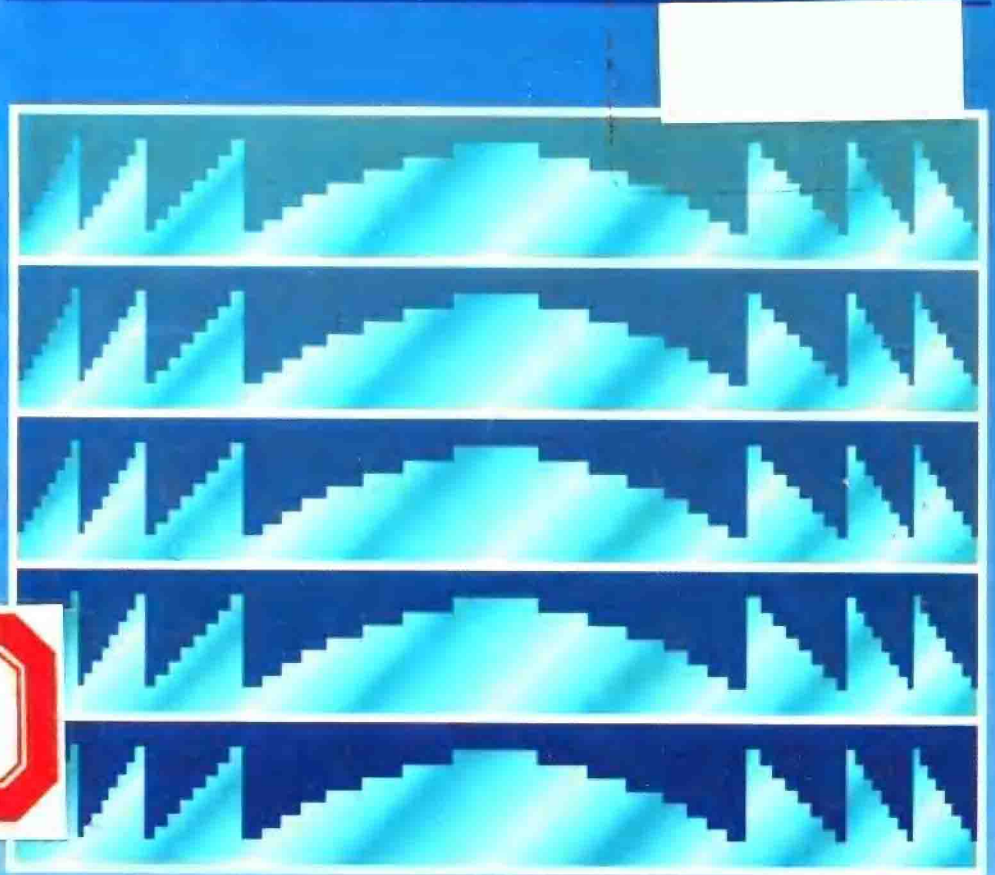


G F G Y G B S

二元光学

ERYUAN GUANGXUE

金国藩 严瑛白 鄂敏贤 等著



国防工业出版社

二元光学

金国藩 严瑛白 邬敏贤 等著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

二元光学/金国藩等著. —北京:国防工业出版社,
1998. 2

ISBN 7-118-01747-7

I. 二… II. 金… III. 二元光学 N. 0436.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 09187 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 100044)

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 10 $\frac{7}{8}$ 283 千字

1998 年 2 月第 1 版 1998 年 2 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:20.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

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,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. 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,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防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,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,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,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工业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 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾铎		
秘书长	刘琯德		
委员	尤子平	朱森元	朵英贤
(按姓氏笔划为序)	刘仁	何庆芝	何国伟
	何新贵	宋家树	张汝果
	范学虹	胡万忱	柯有安
	侯迁	侯正明	莫梧生
	崔尔杰		

前 言

二元光学是基于光波衍射理论发展起来的一个新兴光学分支,是光学与微电子技术相互渗透、交叉而形成的前沿学科。基于计算机辅助设计和微米级加工技术制成的平面浮雕型二元光学器件具有重量轻、易复制、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新功能,从而使光学工程与技术诸如空间技术、激光加工、计算技术与信息处理、光纤通信及生物医学等现代国防科技与工业的众多领域中显示出前所未有的重要作用及广阔的应用前景。二元光学于90年代初在国际上兴起研究热潮,并同时引起学术界与工业界的极大兴趣及青睐。本书作者及其研究组(以及国内其他一些单位),得益于国家自然科学基金及“863”高技术计划的资助,率先在国内开展了该领域的研究工作。初步成果已获1995年国家教委科技进步二等奖及1996年国家科技进步三等奖。

国内外已有关于二元光学的大量论文刊登在各种学术刊物或会议专集上,但尚无一本较为系统的专著出版。为尽快给关心和拟将开展此类研究工作的科技人员提供一本参考书,作者基于几年来的研究实践和成果,并吸取、综合国际学术新观点及研究进展,编著了此书,力图较全面地阐述二元光学的基础理论、设计方法、加工技术及主要应用等内容。希望这本书有助于二元光学的进一步发展。

全书内容共分九章。第一、二章分别是二元光学概述及其基础理论介绍。第九章综述二元光学器件的主要制作工艺。其余各章基本按器件功能或应用划分:第三、四、五章集中介绍二元光学分束器或阵列发生器,主要包括达曼(Dammann)光栅、相位型菲涅

耳波带透镜及泰伯(Talbot)光栅等三种类型,并分析阵列光学的若干问题;第六章讨论在成像系统中的二元光学器件;第七章阐述几种重要的特殊功能器件与系统的设计及应用;第八章介绍导波光学及波导衍射光学器件。按器件特点,各章建立了相应的物理模型与数学解析方法,并采用了有效的优化设计算法。书中给出了若干器件设计与制作实例及其实验或应用结果,并附有必要的数据、图表及曲线等。每章末列有适量的参考文献,以利参阅之便。

本书的三位主要作者金国藩院士、严瑛白教授及邬敏贤教授撰写了大部分章节内容,并负责全书的统稿、修改与审校。参加部分章节撰写的还有,毛文炜:第二章 § 2.1~ § 2.6;包红春:第九章及 § 7.3 中部分内容,并推导了第三章的部分公式;翟金会:第一章部分内容;第八章、§ 2.7 及 § 2.5 中的计算实例由本课题组的访问学者、芬兰赫尔辛基工业大学(Helsinki Technical University)Jyrki Saarinen 博士撰写英文初稿,并由翟金会翻译整理。

对于国家自然科学基金委员会及“863”高技术计划对二元光学研究工作给予的大力支持及国防科技图书出版基金为本书出版提供的资助,表示诚挚的感谢。

王大衍院士、母国光院士对二元光学的研究及本书的出版给予了极大的关怀,谨致以最深切的谢意。

感谢中国科学院微电子工艺研究所及北京大学介观物理国家实验室在器件的制作方面给予的热诚帮助与合作。

国防工业出版社责任编辑为本书的出版付出了辛勤劳动。赵丽萍、郑学哲、冯文毅、刘海松、姚长坤、姜培兰、黄高贵、郑玉红、谭峭峰及黄大为等为本书的撰写、定稿等工作提供了多方面的帮助。在此一并表示由衷的感谢。

书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者不吝指正。

作 者

1996年11月

目 录

第一章 二元光学概述	1
§ 1.1 简介	1
§ 1.2 国内外研究概况	5
§ 1.3 主要进展	7
§ 1.4 发展趋势	14
参考文献	16
第二章 二元光学的基础理论	19
§ 2.1 引言	19
§ 2.2 平面波的角谱	20
§ 2.3 衍射效率	22
§ 2.4 二元光学器件设计的评价函数	25
§ 2.5 模态理论	26
§ 2.6 耦合波理论	36
§ 2.7 等效均匀介质近似法	45
参考文献	51
第三章 达曼光栅及其变异型分束器	55
§ 3.1 引言	55
§ 3.2 空间坐标调制型二值相位光栅 (Dammann 光栅型分束器)	56
§ 3.3 任意孔径形状的二值相位光栅分束器件	64
§ 3.4 矩形孔径多阶相位调制型光栅	72
§ 3.5 矩形孔径坐标相位复合调制型光栅	79

§ 3.6 应用举例	81
参考文献	85
第四章 相位型菲涅耳波带透镜及其阵列	88
§ 4.1 引言	88
§ 4.2 菲涅耳波带透镜的标量衍射波设计理论与方法	89
§ 4.3 有限远轴上物点成像的菲涅耳波带透镜设计	101
§ 4.4 离轴菲涅耳波带透镜及平面光学系统	108
§ 4.5 面积编码的二元 Gabor 透镜	112
§ 4.6 产生超分辨率的异型菲涅耳透镜	115
§ 4.7 二元光学阵列发生器与阵列光学	118
§ 4.8 微透镜阵列光栅系统	128
§ 4.9 电磁理论及衍射透镜阵列设计	130
参考文献	140
第五章 泰伯光栅阵列照明器	143
§ 5.1 引言	143
§ 5.2 Talbot 效应及 2 阶相位 Talbot 光栅阵列 照明器	145
§ 5.3 多阶相位 Talbot 光栅阵列照明器的设计理论	152
§ 5.4 多阶相位 Talbot 阵列照明器的特点	159
§ 5.5 Talbot 光栅与相位型菲涅耳波带透镜阵列 的比较	161
§ 5.6 两种特殊情形的讨论	165
§ 5.7 复杂性理论及二元阵列照明器的若干问题	170
参考文献	179
第六章 二元光学透镜用于成像系统	181
§ 6.1 引言	181
§ 6.2 二元光学透镜的单色初级像差特性	182

§ 6.3	二元光学透镜的色散性质及色差的校正	188
§ 6.4	二元光学透镜的部分色散及二级光谱的校正	192
§ 6.5	谐衍射透镜及其成像特点	195
§ 6.6	通过衍射面的光线光路计算	201
§ 6.7	应用举例	204
	参考文献	210
第七章	几种特殊功能器件及其应用	212
§ 7.1	微透镜阵列灵巧扫描器	212
§ 7.2	用于纹理图像子波变换的二元全互连器件	219
§ 7.3	波面校正与光束整形	223
§ 7.4	无衍射光束传播及长焦深二元光学器件	241
§ 7.5	激光光束的叠加	250
	参考文献	258
第八章	波导计算全息与二元光学	262
§ 8.1	引言	262
§ 8.2	导波的传播	262
§ 8.3	波导光栅理论	270
§ 8.4	衍射波导元件的制作	275
§ 8.5	衍射波导元件的应用	280
	参考文献	295
第九章	二元光学器件的制造工艺	298
§ 9.1	多阶相位型二元光学元件的制作	299
§ 9.2	连续浮雕轮廓的微光学元件制作工艺	305
§ 9.3	特殊加工工艺	313
§ 9.4	复制技术	318
§ 9.5	加工误差对器件性能的影响	326
	参考文献	335

第一章 二元光学概述

§ 1.1 简介

光学是一门古老的科学。自伽利略发明望远镜以来,光学已走过了几百年的漫长道路。60年代激光的出现,促进了光学技术的飞速发展,但基于折反射原理的传统光学元(器)件,如透镜、棱镜等大都是以机械的铣、磨、抛光等来制作的,不仅制造工艺复杂,而且元件尺寸大、重量大。在当前仪器走向光、机、电集成的趋势中,它们已显得臃肿粗大极不匹配。研制小型、高效、阵列化光学元件已是光学界刻不容缓的任务。

80年代中期,美国MIT林肯实验室威尔得坎普(Veldkamp)领导的研究组在设计新型传感系统中,率先提出了“二元光学”的概念^[1,2],他当时描述道:“现在光学有一个分支,它几乎完全不同于传统的制作方式,这就是衍射光学,其光学元件的表面带有浮雕结构;由于使用了本来是制作集成电路的生产方法,所用的掩模是二元的,且掩模用二元编码形式进行分层,故引出了二元光学的概念。”随后二元光学不仅作为一门技术,而且作为一门学科迅速地受到学术界和工业界的青睐,在国际上掀起了一股二元光学的研究热潮。二元光学元(器)件因其在实现光波变换上所具有的许多卓越的、传统光学难以具备的功能,而有利于促进光学系统实现微型化、阵列化和集成化,开辟了光学领域的新视野^[3,4]。

关于二元光学概念的准确定义,至今光学界还没有统一的看法,但普遍认为,二元光学是指基于光波的衍射理论,利用计算机辅助设计,并用超大规模集成(VLSI)电路制作工艺,在片基上(或传统光学器件表面)刻蚀产生两个或多个台阶深度的浮雕结构,形

成纯相位、同轴再现、具有极高衍射效率的一类衍射光学元件。它是光学与微电子学相互渗透与交叉的前沿学科。二元光学不仅在变革常规光学元件,变革传统光学技术上具有创新意义,而且能够实现传统光学许多难以达到的目的和功能,因而被誉为“90年代的光学”。它的出现将给传统光学设计理论及加工工艺带来一次革命^[5,6]。

二元光学元件源于全息光学元件(HOE)特别是计算全息元件(CGH)^[7,8]。可以认为相息图(Kinoform)就是早期的二元光学元件。但是全息元件效率低,且离轴再现;相息图虽同轴再现,但工艺长期未能解决,因此进展缓慢,实用受限。二元光学技术则同时解决了衍射元件的效率和加工问题,它以多阶相位结构近似相息图的连续浮雕结构。图 1-1 表示一个折射透镜演变成 2π 模的连续浮雕及多阶浮雕结构表面二元光学元件的过程^[9]。

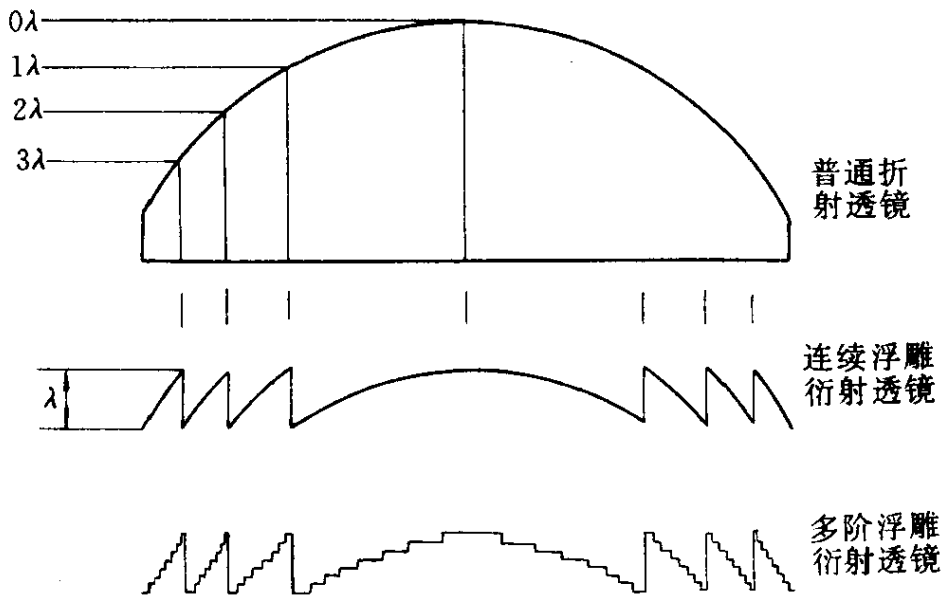


图 1-1 折射透镜到二元光学元件浮雕结构的演变

二元光学是微光学中的一个重要分支。微光学是研究微米、纳米级尺寸的光学元器件的设计、制作工艺及利用这类元器件实现光波的发射、传输、变换及接收的理论和技术的新技术。微光学发展的两个主要分支是:(1)基于折射原理的梯度折射率光学,(2)基于衍射原理的二元光学。二者在器件性能、工艺制作等方面各具特

色。本书仅限于讨论二元光学,它是微光学领域中最具活力、最有发展潜力的前沿学科分支^[10,11]。

微光学与微电子学是现代科学中两个相辅相成的学科门类,图 1-2 描述了它们相互关联的发展史^[3]。

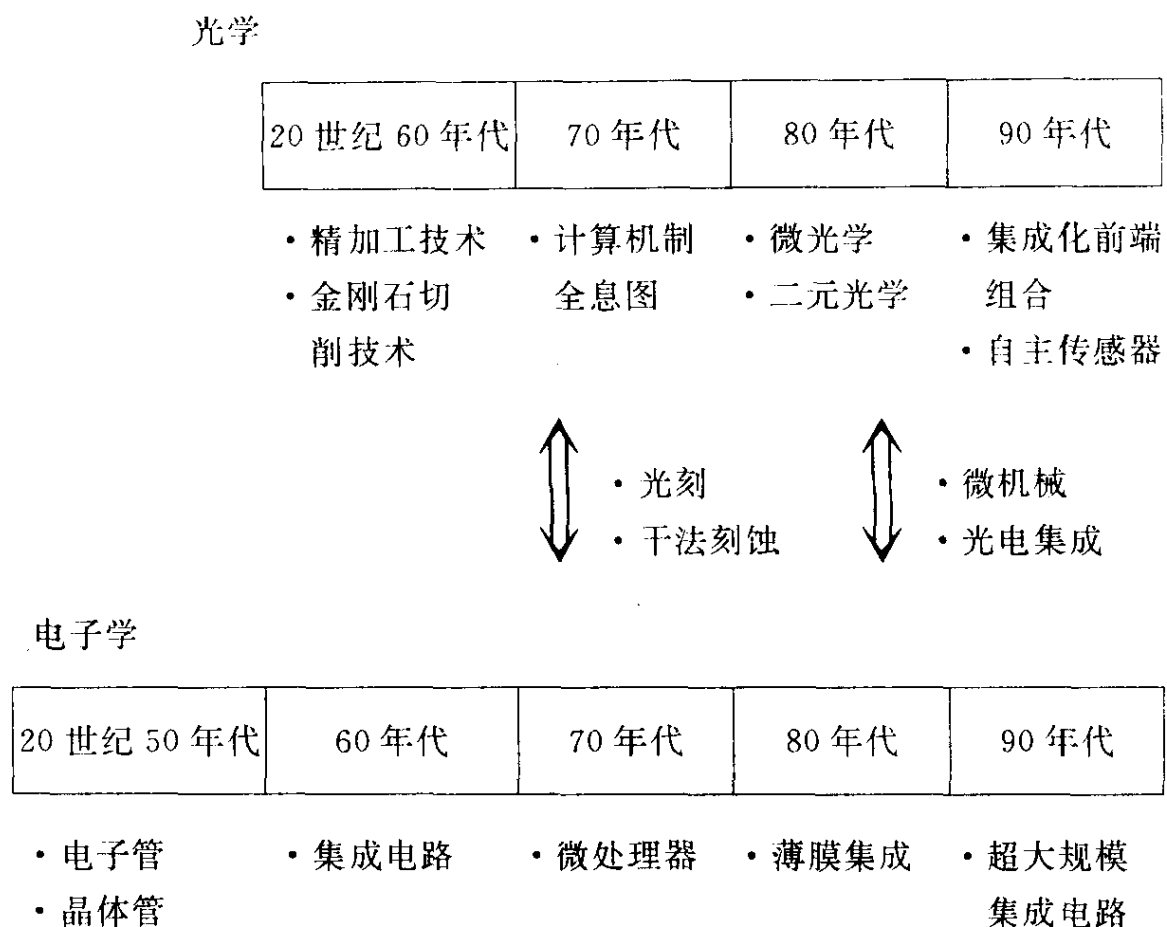


图 1-2 光学与电子学的研究进展

可以看出光学和电子学的发展都基于微细加工的两个关键技术:亚微米光刻和各向异性刻蚀技术。微电子学推动了二元光学学科的发展,而微电子工业的进步则得益于光刻水平的提高。此外,二元光学技术的发展又将促进微电子技术的发展与提高。例如,目前在大规模集成电路的制作中所采用的移相模版和在制作光纤光栅中所用的相位模版也都是建立在二元光学的基础上的。

二元光学技术一经提出就吸引了一些技术发达国家的注目,引起了各研究机构、大学及工业界的极大兴趣,并被 MIT 林肯实

验室称为振兴和发展美国光学工业的主要希望,可见其在整个光学领域的意义。二元光学能获得如此迅速的发展,除由于具有体积小、重量轻、容易复制等显而易见的优点外,还由于具有如下许多独特的功能和特点^[2,12~14]。

一、高衍射效率

二元光学元件是一种纯相位衍射光学元件,为得到高衍射效率,可做成多相位阶数的浮雕结构。一般使用 N 块模版可得到 L ($=2^N$) 个相位阶数,其衍射效率为: $\eta = |\sin(\pi/L)/(\pi/L)|^2$ 。由此计算,当 $L=2, 4, 8$ 和 16 时,分别有 $\eta=40.5\%、81\%、94.9\%$ 和 98.6% 。利用亚波长微结构及连续相位面形,可达到接近 100% 的效率。

二、独特的色散性能

在一般情况下,二元光学元件多在单色光下使用,但正因它是一个色散元件,具有不同于常规元件的色散特性,故可在折射光学系统中同时校正球差与色差,构成混合光学系统,以常规折射元件的曲面提供大部分的聚焦功能,再利用表面上的浮雕相位波带结构校正像差。这一方法已用于新的非球面设计和温度补偿等技术中。

三、更多的设计自由度

在传统的折射光学系统或镜头设计中只能通过改变曲面的曲率或使用不同的光学材料校正像差,而在二元光学元件中,则可通过波带片的位置、槽宽与槽深及槽形结构的改变产生任意波面,大大增加了设计变量,从而能设计出许多传统光学所不能的全新功能光学元件,这是对光学设计的一次新的变革。

四、宽广的材料可选性

二元光学元件是将二元浮雕面形转移至玻璃、电介质或金属

基底上,可用材料范围大;此外,在光电系统材料的选取中,一些红外材料如 ZnSe 和 Si 等,由于它们有一些不理想的光学特性,故经常被限制使用,而二元光学技术则可利用它们并在相当宽广的波段作到消色差;另外,在远紫外应用中,可使有用的光学成像波段展宽 1000 倍。

五、特殊的光学功能

二元光学元件可产生一般传统光学元件所不能实现的光学波面,如非球面、环状面、锥面和镗面等,并可集成得到多功能元件;使用亚波长结构还可得到宽带、大视场、消反射和偏振等特性;此外,二元光学在促进小型化、阵列化、集成化方面更是不言而喻了。

§ 1.2 国内外研究概况

80 年代中期,美国国防部领先科研项目处(DARPA)对 MIT 林肯实验室资助了名为“二元光学”的项目,其研究目标为^[11]:

(1)发展一种基于微电子制作工艺的光学技术,用以节约资金和劳动力,获取在设计和材料选择上更多的自由度,并开发新的光学功能元件;

(2)推动光电系统整体的计算机辅助设计;

(3)在美国工业界广泛应用衍射光学技术。

进入 90 年代,随着微细加工技术的发展,以及为了得到高衍射效率的二元光学元件,其浮雕结构从两个台阶发展到多个台阶,直至近似连续分布,但由于其主要的制作方法仍基于表面分步成形技术,每次刻蚀可得到二倍的相位阶数,故仍称其为二元光学,而且往往就称为衍射光学。

二元光学除在美国 MIT 林肯实验室开展外,美国的圣迭戈加利福尼亚大学分校李星海教授(S. H. Lee)也建立了计算全息与二元光学研究小组,并具有良好的设备条件,编制了通用设计软件,制作了许多高性能的二元光学元件;原美国 AT&T 实验室 Alan

Huang 小组的居尔根(Jurgen)博士还提出一种二元光学平面光学处理系统。此外,美国 JPL 喷气动力试验室和布朗、Perkin-Elmer、杜邦等公司都有二元光学元件研究成果及产品。加拿大国家光学实验室(NOL)也将衍射光学元件作为重点研究方向。德国的爱兰根(Erlangen)大学研究了制作二元光学元件的各种工艺方法,爱森(Essen)大学较早开展计算全息工作的布灵达尔(Bringhdal)教授,目前也在开展二元光学研究。俄罗斯的西伯利亚电工研究所,已经研制了氦镉激光直写机床、制作了多种相息图及二元光学元件。瑞士、日本等国的一些高校与研究所也相继开展了这一领域的工作。

近几年国际上召开的许多重要光学学术会议,二元光学的论文显著增加。许多重要的光学杂志也开辟有关二元光学的专集。如1990年11月召开的美国光学学会年会上,安排了“二元光学的理论与设计”的专题讲座;另外美国光学学会分别于1992年4月、1994年6月和1996年4月连续召开三次衍射光学(二元光学)专题会议。同时1992年5月美国商业性杂志《光子集锦》(Photonics Spectra)刊登了激光电子学与光学会议(CLEO)上的一篇专题文章^[15],其醒目的标题为“衍射光学大量产生新一代的产品并拥有数百万美元的市场”,这篇文章着重报道了衍射光学元件的新产品和它们的应用;该杂志又在1994年1月的“全球技术预测”专栏内的一篇文章中报道了衍射光学技术已经走出实验室,进入了可以解决实际问题的产品市场,二元光学元件可望在许多新的光学系统中变成标准光学元件^[16]。由此可见,二元光学不仅有许多基础理论和应用方面的学术研究价值,而且一开始就具有广阔的市场潜力。

其他重要的光学杂志中,欧洲的《现代光学杂志》(J. Modern Optics)和美国的《应用光学》(Applied Optics)在1993年4月和5月分别出版了衍射光学的专集^[17,18],共收集了几十篇研究论文,分别介绍了衍射光学系统和元件的设计、制作及应用。1995年5月美国光学学会又分别在两种重要的刊物《美国光学学会杂志》和