

67-74

第4卷第5期
1996年10月光学 精密工程
OPTICS AND PRECISION ENGINEERINGVol. 4, No. 5
October, 1996

二元光学的优化设计

0438

桑涛 翁志成

(中国科学院长春光学精密机械研究所,应用光学国家重点实验室,长春 130022)

A摘要 我们在深入研究了现有的各类二元光学元件设计方法的基础上提出了一系列有自己特色的优化算法,包括神经网络优化设计方法,虚拟场调制法,自适应区域调制法,本文将围绕这些算法介绍二元位相光栅,位相型光束整形元件,扩展菲涅尔透镜(全称为“特征线宽被扩展的非涅尔透镜”)的优化设计,最后简要介绍了有关的制作结果。

关键词:二元光学;衍射;光学信息处理;光栅

信息光学

1 引言

从本质上讲,二元光学的设计就是寻找 BOE(binary optics elements)的最佳相移函数,使得在我们感兴趣的区域形成期望的强度分布(如光束整形及阵列发生),或形成期望的复振幅分布(如光束匀化和平行化),或形成期望的波面分布(如消像差及非球面检测)。在设计理论上我们对光波的标量波衍射理论和矢量模式理论都进行了深入研究,考虑到在处理绝大多数光学衍射问题时形式最为简单的标量波衍射理论已具有足够的精度,并能提供比后者更为宽大的特征线条,所以我们把研究的重点放在了标量波理论,并以此构成本文的研究内容。

我们认为,二元光学设计可分为直接设计和优化设计两大类;前者能够直接提供某种数学公式来表达 BOE 的相移函数,主要适用于菲涅尔透镜,分数泰伯光栅,特殊光束发生器,坐标变换元件等 BOE 的设计;后者较为复杂,主要用于位相光栅、位相型光束整形元件,多光谱 BOE,扩展菲涅尔透镜,像差校正元件等 BOE 的设计,这类元件一般无法用直接的数学公式而只能用数值形式来描述 BOE 的相移函数,通常的方法是把这种 BOE 和各点位相或其他可变因子作为满足某种约束(如量化台阶,最细线宽)的自由变量,并根据设计要求建立相关的目标函数或评价标准,在此基础上利用各种优化设计方法去寻求满足要求的解的数值形式。我们深入研究了当前已知的各类优化设计方法,在设计理论方面作出了如下几点具有创新性的工作:

1)完善和发展了神经网络的后向传播一维 Dammann 光栅设计,设计结果不亚于我们已知的文献上报道的采用其他方法设计的一维同类元件的结果^[1,2]。

2)根据 $(0, \pi)$ 型位相光栅衍射谱的对称性特点首次提出用于任意图形编码的 $(0, \pi)$ 型二元位相光栅设计的虚拟场调制法,设计结果优于我们已知的文献上报道的采用其他方法设计的

收稿日期:1996年8月5日

二维同类元件的结果^[3]。

3)将上述虚拟场调制法进一步扩展成一种新的傅立叶迭代算法用于相型光束整形元件的设计,与其他算法相比,这种算法能提供更好的衍射强度面形,而优化的衍射效率(>99%)可接近衍射极限^[4]。

4)首次提出一种称为自适应区域调制法的实用算法用于扩展菲涅尔透镜的设计,解决了大数值口径,多台阶菲涅尔透镜的特征现象过小的难题。

2 二元位相光栅的优化设计

二元位相光栅(binary phase gratings, BPG)因其是一种周期性的位相结构而具有分束功能,它在光计算,光学信息处理,光探测等领域有重要作用。从其扇出(即分束)方式可分为等强扇出型和非等强扇出型两类,人较研究得较为深入的 Dammann 光栅就属前一类,而在诸如光学形态处理等领域则需要后一类。BPG 的位相编码模式可分为可分离变量型和不可分离变量型两大类,前者设计简单,但衍射效率明显劣于后者;不可分离变量型主要包括方形编码,条形编码,梯形编码^[5]以及我们所设计的任意图形编码^[3]四种方案,它们的衍射效率依次提高。对 BPG 的优化设计就是在某种位相编码模式的基础上寻求这种编码所能提供的最佳结构^[1]。

我们在2.1节介绍了加快收敛速度的神经网络后向传播的优化算法,设计结果表明,在选取合适的初始结构下该算法可快速收敛到极值,均匀性可明显地得到改善,我们在2.2节介绍虚拟场调制法设计具有任意图形编码的二维 BPG,与其他编码相比,这种编码可获得更高的衍射效率和更小的衍射强度面形偏差。

2.1 神经网络后向传播算法的一维 Dammann 光栅设计

神经网络后向传播算法是一种 supervised 型训练神经网络的方法,设计思路表述如下:把自 BOE 出射的光波复振幅赋予神经网络权重的含义,将光波从 BOE 到谱面传播的富立叶变换关系比为信号从输入神经元到输出神经元的传播关系,输出神经元的输出就是光波传播到谱面的复振幅,将之取模平方即为谱面的光强,该光强与我们所需光强相比较获得误差信号,并依据神经网络后向传播原理把该误差逆着原来的传播方向传播至输入层,并利用有关规则修改该层权重,使得下次传播的输出误差减小。每一次正向传播和一次逆向传播合称为一次循环后输出结果与所需结果相比小于某一阈值或不再变化时便完成对神经网络的训练,由此时的神经元权重便可获得 BOE 的优化位相结构^[1]。

为了阐述思想,现籍设计输出为 $(2N + 1)$ 个光点一维 Dammann 光栅为例加以说明,假设光栅单位周期内有 M 个可变坐标 $[0, x_1, \dots, x_M, 1]$,位相的空间结构及与此对应的双层神经网络模型可参见文献[1],对 Dammann 光栅设计,入射光复振幅设为1,于是只需要一个输入神经元,取值为 $out_0 = 1$;从输入层到隐层代表光波透过光栅的传播过程,其间连接的权重设为 $W_{1m}^{[n]} = X_m^{[n]}$ $m = 1, 2, \dots, M + 1$; n 为训练次数;隐层各神经元向输出层的传播代表了光波从光栅传播到谱面的夫琅和费衍射过程,这两层神经元连接的权重为 $W_{2n}^{[n]}$,从而输出

神经元的输出是 $I_n^{[n]} = \left| \sum_{m=1}^{M+1} W_{2n}^{[n]} out_m^{[n]} \right|^2$,也即为谱面上各亮点的光强。

为了评价每一次训练神经网络和误差变化情况,引入消费函数(cost function)以表征输出光强相对于期望光强的偏差大小和输出光强的均匀性大小,训练神经网络的目的就是使消费函数减小到某一希望的极小值以内。根据神经网络后向传播原理,对于每一个输出神经

元,引入综合性误差 $\delta_{\text{总}}^{[1]}$,该偏差逆着原来的传播方向最终传播到输入层引起权重的变化为 $\Delta W_{[r+1]lm}^{[n+1]}$,由此可获得下次训练时的新权重 $W_{[r+1]lm}$ 。

依据上述神经网络模型,我们用 C 语言编制了优化程序并设计了 12 个 Dammann 光栅,均获得令人满意的结果^[1],例如,设计的 23 点扇出光栅具有 83.6% 的衍射效率,而其输出强度的最大相对偏差约为 10^{-5} ,好于我们已知的其他报道。

2.2 虚拟场调制法对具有任意图形编码的二维 $(0, \pi)$ 型 BPG 的设计

具有任意图形编码的 BPG (arbitrary-geometried BPG, ABPG) 因具有编码的普遍形式而应该有可能获得最高的衍射效率。如何表达这种任意性的图形是设计 ABPG 的首要问题。我们提出的方法是采用谱面上具有哈密特对称性 $((0, \pi)$ 型位相光栅的特征^[3]) 的虚拟点阵来源表达 ABPG 的光栅传输函数 (grating transfer function) $t(x, y)$, 该方法的优点是能够以最少的能数来表达光栅周期内具有任意图形编码的 $(0, \pi)$ 型二值位相结构,可供优化的参数谱面上虚拟点阵源的振幅大小的位相,因此称这种方法为虚拟场调制法。

根据衍射谱的哈密特对称性特点,可导出光栅面上光场的复振幅为:

$$U(x, y) = A(0, 0) + 2 \times \left(\sum_{m=-M}^M \sum_{n=1}^N + \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^N \right) A(m, n) \cos[2\pi(xm + yn) + \varphi(m, n)] \quad (1)$$

式中 $A(m, n)$ 和 $\varphi(m, n)$ 分别代表虚拟点源的振幅大小和位相。

为了在谱面上恢复具有期望振幅大小分布的复振幅,那么光栅的强度透过率 $|t(x, y)|^2$ 应正比于 $|U(x, y)|^2$, 其位相应等于 $\pi \cdot \text{sign}[U(x, y)]$, 但由于 $|U(x, y)|^2$ 是变化的函数,由此方法获得的光栅与纯位相光栅有较大差距,为了获得纯位相光栅以保证高的衍射效率,我们采用了两步优化策略: I 优化衍射效率。根据 Eyrowski's 衍射上限公式,通过级数展开导出一个物理意义更加明确的衍射上限公式,由此推出如下以获得最高衍射效率为目的的优化标准:

$$\sum_{m=1}^{2M} \sum_{n=0}^{2N} \left| \sum_{m=m-M}^M \sum_{n=n-N}^N A(m, n) A(m-m, n-n) \exp\{i[\varphi(m, n) + \varphi(m-m, n-n)]\} \right|^2 + \sum_{m=-2M}^0 \sum_{n=1}^{2N} \left| \sum_{m=-M}^{M+m} \sum_{n=n-N}^N A(m, n) A(m-m, n-n) \exp\{i[\varphi(m, n) - \varphi(m-m, n-n)]\} \right|^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

我们利用可快速收敛的梯度算法对上式进行优化,此时的优化变量是虚拟点的位相。在考虑了哈密特对称性特点后,独立的优化变量数可减少约一半,从而极大地降低了优化难度。

I 优化强度分布。上一步优化产生出可获得高衍射效率的初始相结构,然而该结构的实际衍射阵列的振幅大小分布同期望分布仍有一定差距,这是因为忽略了 $|U(x, y)|^2$ 的残余调制作用而引起的。为此我们把虚拟点源的振幅大小和位相都作为进一步优化的优化变量,并为此提出一种迭代算法,它可保证每次迭代时优化变量朝好的方向变化,以达到快速收敛的目的。该算法的原理及实现流程可参见文献[3]。

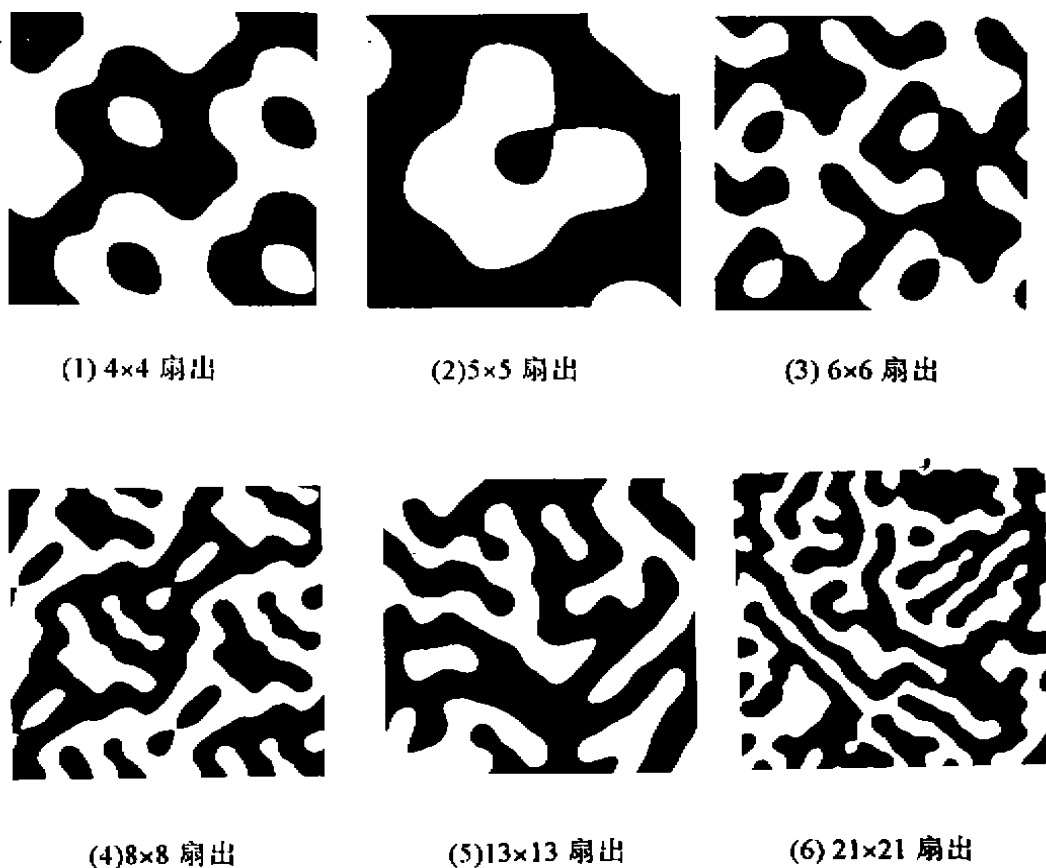
根据上述两步优化步骤,我们采用 C 语言编制了优化程序并对等强扇出光栅进行了设计。表 1 比较了任意图形,梯形和可分离变量型三种编码方案的结果。可见,我们设计的 ABPG 无论是衍射效率还是面形偏差都优于其它编码。表 2 给出了我们设计的其它结果,图 1 给出了部分 ABPG 的二值位相编码图案。此外我们还以高斯型扇出光栅为例设计了非等强扇出光栅,其结果包含在表 2 之中。

表1 三种编码方案的比较:其中衍射效率 η 和面形偏差 dR 的定义可参见文献[3]

fan-out	ABPG		梯形编码		可分离变量型	
	$\eta(\%)$	$dR(\%)$	$\eta(\%)$	$dR(\%)$	$\eta(\%)$	$dR(\%)$
4×4	78.8	<0.01	77.5	0.40	50.0	0.4
5×5	78.6	<0.01	77.0	0.60	59.9	0.4
6×6	80.4	<0.01	74.9	0.60	71.7	1.8
7×7	80.9	<0.01	79.0	0.50	61.9	0.4
8×8	80.5	<0.01	75.2	2.80	58.1	0.4
9×9	80.9	<0.01	76.9	0.50	52.6	0.8

表2 ABPG 的部分优化结果,其中#代表或实现高斯型扇出的 ABPG。

fan-out	25×25	23×23	21×21	19×19	17×17	15×15	13×13	12×12	10×10	11×11 [#]	5×5 [#]
$\eta(\%)$	80.5	80.6	80.7	80.7	81.0	80.7	80.8	80.2	80.7	81.7	81.6
$dR(\%)$	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.06	0.04

图1 部分 ABPG 的二值位相编码图案:黑代表位相 π ,白代表位相 0。Fig. 1 Part of ABPG two-value phase encoding: black present π , white is 0

3 位相型光束整形元件的优化设计

位相型光束整形元件在光学信息处理,激光加工,激光照排,激光核聚变等领域有着重要

的应用价值。其设计方法主要包括基于光线追踪的几何变换法和基于位相恢复的GS算法及其变形(如输入输出算法)。前者能够提供解析的位相,但因忽略了光束间的干涉作用而使衍射强度分布同期望分布产生一定的偏差;后一类算法具有很大的通用性,但容易陷入局部极值。我们将前面用于 $(0, \pi)$ 型BPG设计和虚拟场调制法进一步扩展成一种新的傅立叶迭代算法用于连续位相型光束整形元件的设计,多次设计的结果表明,在均由几何变换提供初始位相的条件下,该算法比GS算法及其变形有更好的收敛性能。

为了比较上述算法,现以高斯光束的方形匀化设计来加以说明:入射光为氦氖激光发出的腰径为 W 的单模高斯光束,设计时我们将它限制于长宽均为 a 的入窗内,对一维情形,它可表示为 $g(x) = \exp(-x^2/W^2) \text{rect}(x/a)$,衍射的振幅大小要求是宽为 A 的方波,即 $|G(u)| = \text{rect}(u/A)$ 。在均由几何变换法提供初始位相的前提下,分别由著名的GS算法,输入输出算法和我们的新算法进行迭代优化,经50次迭代后上述算法都产生了超过99%的衍射效率。但此时GS的输入输出算法已基本上陷入了局部极值,在250次循环后它们几乎未能进一步改善衍射强度的面形偏差;从图2所示的输出结果来看,新算法表现出更快的收敛和更强的抗极值性能,它产生出更好的(几乎接近理想的)衍射强度面形。

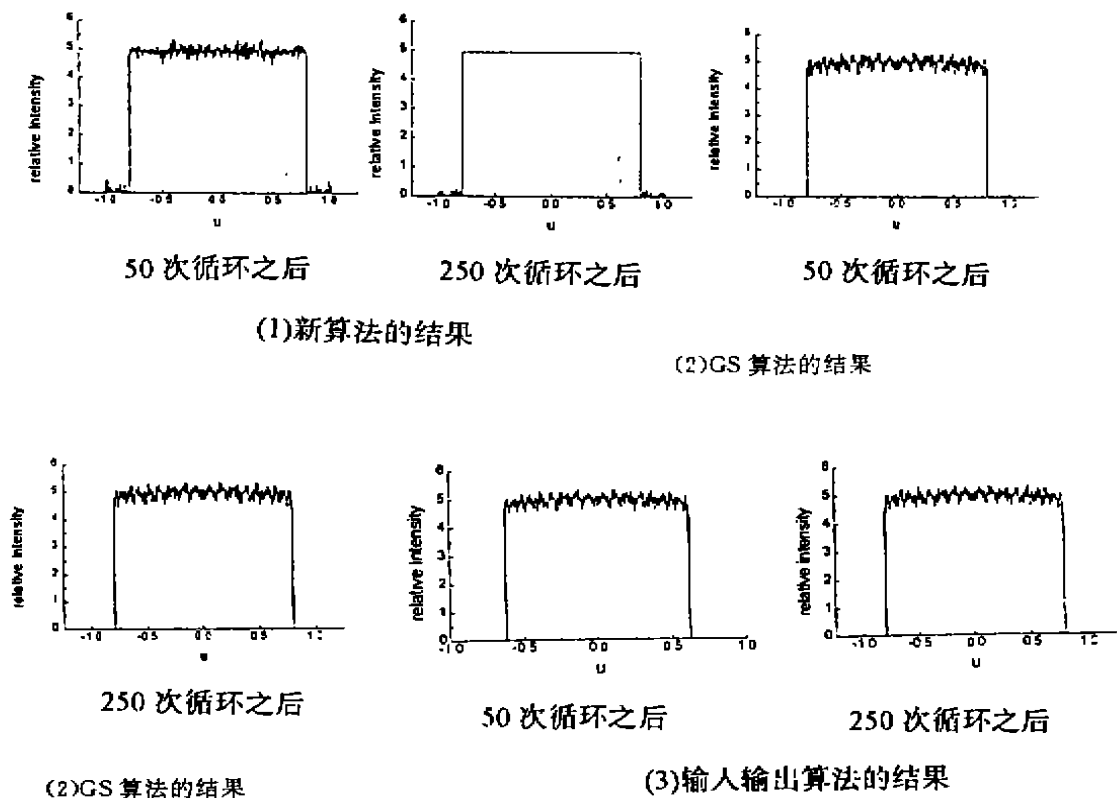


图2 3种算法的比较

Fig. 2 Compare of the three algorithms

4 自适应区域调制法对扩展菲涅尔透镜的设计

在许多情况下人们迫切需要大数值孔径的菲涅尔透镜以减小光学探测器的结构体积。比

如说,为了提高 CCD 的集光(探测)效率,可利用大数值孔径的非涅尔透镜将光能会聚到有效



图3 两类设计的比较

Fig. 3 Compare of design for the two kinds

区域内而不增加原器件的体积。然而数值孔径的增大势必导致非涅尔透镜的特征线宽(feature size)减小,造成制作困难。此外为了获得高衍射效率的非涅尔透镜,需要制作出较多的位相台阶,这也会导致特征线宽的急剧减小。例如, $F/1$ 的红外 $3\ \mu\text{m}$ 非涅尔透镜,当制作8个台阶时其特征线宽为 $0.6495\ \mu\text{m}$,目前国内尚无此加工能力。(注:据我们所知,目前国内只能制作最小线宽为 $1\ \mu\text{m}$ 的BOE)。所以设计满足加工条件的“扩展非涅尔透镜”具有重要的现实意义。我们提出一种称为“自适应区域调制法”的快速设计方法可以实现这类非涅尔透镜的设计。其设计思路不同传统的基于位相投影原理的光栅方程,在设计时就已经把可实现的最小线宽作为限制因子考虑,因此设计出来的非涅尔透镜必定满足加工要求。考虑到该算法设计流程较为复杂,限于篇幅,我们在这里只给出部分设计结果:(1)物距 ∞ ,像距 5mm ,口径 5mm 红外 $3.0\ \mu\text{m}$ 的非涅尔透镜,其 $F/1$,采用8位相台阶时由光栅方程算得其特征线宽为 $0.6495\ \mu\text{m}$,现将该线宽扩展到 $1\ \mu\text{m}$,由自适应区域调制法优化得衍射效率为 92.93% ;若将特征尺寸进一步扩展到 $1.2\ \mu\text{m}$,则衍射效率仍保持到 90.65% 。(2)物距为 $20\ \mu\text{m}$,像距为 $8.5\ \mu\text{m}$,波长,口径和位相台阶都与上相同,算得 $F/1.193$,由光栅方程求出其特征线宽为 $0.8947\ \mu\text{m}$,现将该线宽扩展到 $1.4\ \mu\text{m}$,由自适应区域调制法优化衍射效率为 90.542% 。我们于图3给出了这两类设计下该透镜的掩膜图案。

5 制作结果

我们采用薄膜沉积法制作了 25×25 和 23×23 扇出的ABPG^[6],它们的衍射谱阵列如图4所示,相应的光栅周期分别为 $512\ \mu\text{m}$ 和 $320\ \mu\text{m}$ 。其中前者获得较好的实测结果,其实测衍射效率为 80.65% (排除玻璃表面的两次反射),均匀性偏差为 3.3% 。

最后,对廖江红和卢振武两位老师的指导表示衷心的感谢。

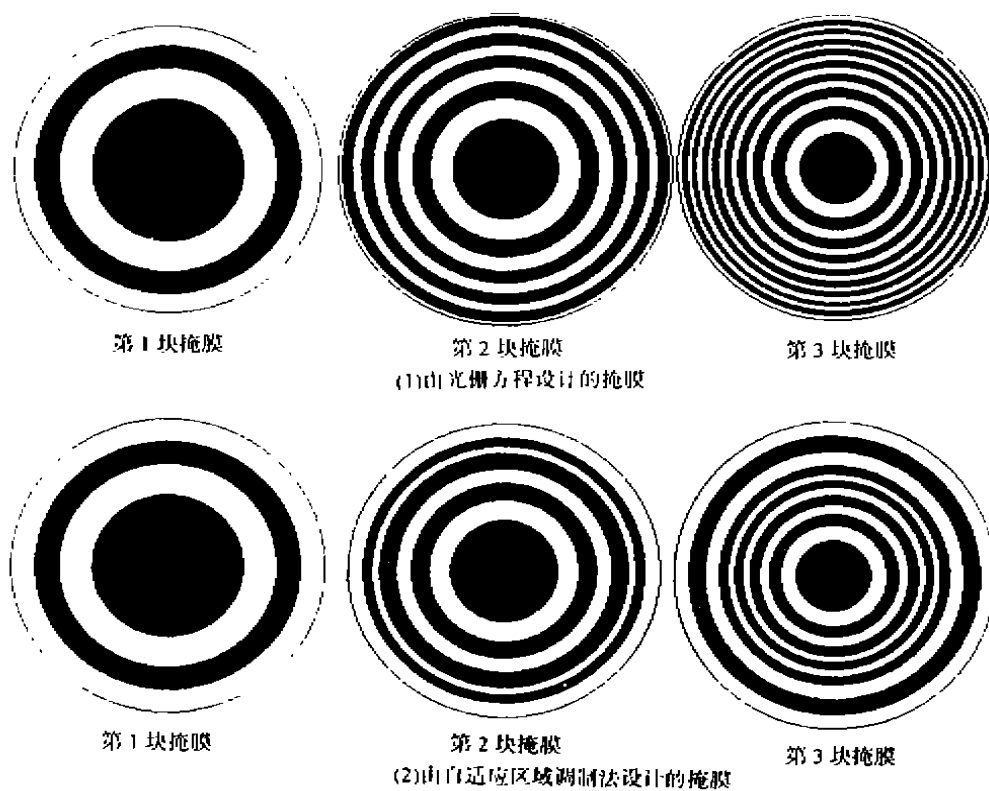


图4 扇出阵列的实验照片

Fig. 4 experiment photograph of fan-out array

参 考 文 献

- [1] 廖江红, 桑涛, 卢振武, 翁志成, 神经网络后向传播算法的 Dammann 光栅设计. 中国激光, 1995, A22 (10), 778
- [2] 廖江红, 桑涛, 卢振武, 翁志成, 神经网络后向传播算法的二元光学设计. (中国光学学会1995年年会宣读告). 激光与光电子学进展, 1995, 7170
- [3] 桑涛, 廖江红, 卢振武, 翁志成, 一种任意图形编码的 $(0, \pi)$ 型二维位相光栅的设计. 中国激光, 1996, A23 (5), 443-447
- [4] A. Vasara, M. R. Taghizadeh, J. Turunen, et. al., Binary Surface-Relief Gratings for Array Illumination in Digital Optics. Appl. Opt., 1992, 31(17), 3320-3336
- [5] 桑涛, 赵晶丽, 廖江红, 卢振武, 具有任意图形编码的二值位相光栅的制作. 光学精密工程, 将于1997年第一期发表

Binary Optics Design

Sang Tao, Liao Jianghong

*(The State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

Abstract

A series of characteristic optimization design algorithms have been proposed after our carefully research on the current binary optics design methods, which include the neural network algorithm, the virtual field modulating algorithm and the adaptive local modulating algorithm. Around these algorithms, the design of binary phase gratings, phase-only beam flatters and extended Fresnel lens (The Fresnel lens with extended feature size) will be introduced in this paper. Finally, the fabrication results will be reported generally.

Key words: Binary optics, Diffraction, Optical information processing, Grating.

桑涛 男, 1971年6月生, 1993年毕业于华东理工大学, 1996年于中国科学院长春光学精密机械研究光学硕士毕业, 主要从事光学及光电子学研究, 目前正在中国科学院上海技术物理研究攻读物理电子学与光电子学博士。