

doi:10.3788/gzxb20174612.1223002

基于瑞利-索墨菲积分的大角度激光分束器设计

王广逸^{1,2}, 庞辉², 王佳舟², 张满², 刘鑫², 史立芳², 吴向东¹, 邓启凌²

(1 西南交通大学 机械工程学院 机电测控系, 成都 610000)

(2 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

摘 要: 针对目前激光分束器只能产生小发散角的问题, 基于严格的非傍轴近似的衍射积分公式, 提出了一种大发散角分束器的设计方法。先对目标光场分布进行坐标和光强修整, 再利用改进的 Gerchberg-Saxton 迭代算法得到所需分束器的相位分布, 分别采用本文设计方法和原有方法设计了发散全角为 $40^\circ \times 40^\circ$ 的 5×5 分束器, 仿真和实验结果表明: 原有方法设计得到的 5×5 子光束存在着显著的枕形畸变, 并且光强分布不均匀, 而本文方法设计得到的子光束呈均匀等间隔排列, 并且强度分布更为均匀。

关键词: 瑞利-索墨菲积分; 大角度激光分束; 衍射光学元件; 衍射光学; 光栅

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)12-1223002-8

Design of the Laser Beam Splitter with Large Diffraction Angle Based on Rayleigh-Sommerfeld Integral

WANG Guang-yi^{1,2}, PANG Hui², WANG Jia-zhou², ZHANG Man², LIU Xin²,
SHI Li-fang², WU Xiang-dong¹, DENG Qi-ling²

(1 Mechanical and Electrical Department, College of Mechanical Engineering, South-west Jiaotong University, Chengdu 610000, China)

(2 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: In order to solve the problem that the recent design method can only fit the small divergence angle situation, a novel method is presented for designing the beam laser splitter with large angle based on the Rayleigh-Sommerfeld Integral. In the design, firstly the target intensity distribution is modified with coordinate transformation and intensity adjustment, then the modified Gerchberg-Saxton algorithm is adopted to optimize the phase distribution of the beam laser splitter. Our method and original method are used to design the 5×5 splitter with $40^\circ \times 40^\circ$ diffraction angle. The simulation and experiment result shows that original method shows significant pillow distortion and uneven intensity distribution. In contrast, the sub beams of the splitter designed by our method are well-proportioned and the intensity distribution is even.

Key words: Rayleigh Sommerfeld integral; Wide-angle laser beam splitting; Diffractive optical element; Diffractive optics; Gratings

OCIS Codes: 230.1150; 050.1960; 090.2890

0 引言

衍射光学元件(Diffractive Optical Element, DOE)是指基于光波的衍射理论, 利用计算机辅助设计, 并

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.61505214, 61605211), 四川省应用基础研究项目(Nos.2016JY0175, 2016RZ0067), 中国国防基金(No. CXJJ-16M116), 中国科学院青年创新促进会, 西部之光

第一作者: 王广逸(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光机电一体化. Email: 229155882@qq.com

导师(通讯作者): 吴向东(1963—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为液压元件及流体控制. Email: wxd99@sina.com

收稿日期: 2017-06-08; **录用日期:** 2017-09-01

<http://www.photon.ac.cn>

用超大规模集成电路制作工艺,在片上刻蚀产生两个或者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光学元件^[1].激光分束器作为一种典型的衍射光学元件,将入射激光分为多束激光,在激光切割、激光打孔、激光划线、光纤通信、3D体感、激光测量、雷达成像等领域有着广泛的应用前景.除了好的均匀性和较高的衍射效率,越来越多的领域包括结构光投影和全息显示等领域需要大角度的分束器^[2],实际运用中例如需要利用机载激光扫描雷达做一个大范围激光扫描时,就要用到可以实现大角度分束的激光分束器.

现有的分束器设计主要有两类:采用空间坐标调制型的达曼光栅和采用均匀矩形孔径相位调制的光栅^[3].不管是采用哪种设计方法,衍射的计算都是采用了夫琅禾费衍射积分.而这种积分只是标量衍射理论框架内严格的基尔霍夫衍射公式的傍轴近似解,当分束器衍射角增大,傍轴近似条件不满足时,设计结果与目标之间会存在严重的偏差.根据光栅方程 $d \sin \theta = m\lambda$ 可知,对于大角度分束器时(发散全角大于 30°),光栅的周期 d 将变得很小,此时相邻衍射级次之间的空间距离不再是等间隔的,级次越高间隔越大,使得子光束不再是等间隔分布,而是呈现枕形分布.同时,由于傍轴近似不再成立,输入和输出不再是准确的傅里叶变换的关系,从而造成子光束强度分布十分不均匀.国内外激光分束器的研究都偏向于二元 Dammann 激光分束器^[4],1991年,美国贝尔实验室的 Morrison 提出了偶数点阵 Dammann 光栅^[5],2004年日本科学技术振兴机构光子技术项目的 Takayuki 研究了利用飞秒激光加工 Dammann 分束 DOE^[6],国内学者对二元 Dammann 分束 DOE 也开展了大量的研究其中以中国科学院上海光机所周长河研究员为代表^[7],然而这些 Dammann 分束 DOE 都是在标量衍射理论基础上进行的,DOE 周期很大不能实现大角度分束,2016年,中科院光电所的周崇喜老师提出了一种基于严格耦合波理论和遗传算法的大角度分束器设计方法^[8],虽然解决了子光束强度分布不均匀的问题,但不能解决枕形畸变的问题.同时,该方法只能实现简单对称的分束.

瑞利-索末菲衍射积分,作为一种严格的非傍轴的衍射积分算法,能用于大衍射角的衍射计算,但是由于该积分并不能直接简化,因而只能采用逐点求和的方法计算,因此计算量庞大,而未能引起人们广泛的关注.我们发现,在远场的衍射计算中,瑞利-索末菲衍射积分可以简化成包含有傅里叶变换的形式,因而计算速度可以极大提升.在此基础上,本文提出了一种基于瑞利-索末菲衍射积分的大角度激光分束器的设计方法.

1 基本原理

以设计衍射全角为 $\theta \times \theta$,子光束数为 $m \times m$ 的分束器为例,来说明本文提出的大角度分束器设计方法假定入射光的波长为 λ ,输出面距离为 z .

1.1 目标光场建立

根据 DOE 的最大衍射角度,确定 DOE 的采样间隔 $dx = \lambda/2 \tan(\theta/2)$.选择 DOE 的单周期尺寸为 P ,同时 P 应该小于等于入射激光的光斑直径.根据 DOE 周期和采样间隔,确定 DOE 的采样点数,假设 DOE 单周期点数为 $M \times M$.据此,先建立一个 $M \times M$ 的全零矩阵,代表整个输出面的光场.再根据所需的子光束数 $m \times n$,均匀等间隔选择全零矩阵中的相应元素赋值为 1,代表子光束的空间分布.需要说明的是,应当根据输出面上的采样间隔 $dx = \lambda z/P$,确定相邻子光束的间隔像素.最终得到的矩阵 $u_0(x, y)$.

这里以生成一个分辨率为 $a \times b$ 目标图为例,首先利用建立一个 $a \times b$ 的 0 点阵,再根据所需的分束要求将零点阵的对应位置的 0 值替换为 1,以中心点为原点,以原点为参考点,根据分束需要将特定点的 0 值替换为 1 值,这样生成了以 $a \times b$ 个值为 1 的点所形成 $a \times b$ 的点阵即为分束器 DOE 目标图.典型的激光分束器系统结构见图 1.分束器目标图设计的一般流程为,根据特征尺寸建立 0 点阵,根据分束需要将特定点的赋值为 1,再生成目标图.

1.2 目标光场预处理

根据严格的非傍轴近似的瑞利-索墨菲积分可知,DOE 面的光场分布 $u_i(x, y)$ 和输出面上的光场分布

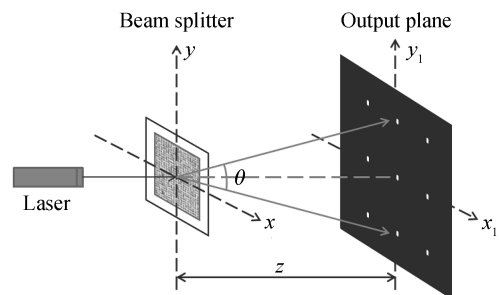


图1 典型的激光分束器系统结构示意图
Fig.1 Schematic of the system of laser beam splitter

$u(x, y)$ 之间满足关系

$$u(x_1, y_1) = \iint u_t(x, y) \frac{z \exp(ikR)(1 - ikR)}{2\pi R^3} dx dy$$

式中 k 为自由空间中波数, z 为衍射距离, R 为 DOE 面和输出面采样点的距离.

$$R = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + z^2}$$

当 DOE 被用于分束器设计时,输出面通常位于 DOE 的远场衍射区,对瑞利-索末菲衍射积分作远场近似可以得到

$$u(x_1, y_1) = \frac{1}{i\lambda z} \exp(ikr) \frac{z^2}{r^2} \iint u_t(x, y) \times \exp\left[\frac{-i2\pi}{\lambda z} \left(x \frac{x_1 z}{r} + y \frac{y_1 z}{r}\right)\right] dx dy \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_2 = \frac{z}{r}x_1, y_2 = \frac{z}{r}y_1 \\ u(x_2, y_2) = u(x_1, y_1) \frac{r^2}{z^2} \end{cases} \quad (2)$$

其中距离 r 为

$$r = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z^2}$$

因此根据所有的研究基础在大角度分束器设计中先对目标场 $|u_d(x_1, y_1)|^2$ 按照式进行坐标变换和强度调整,变成 (x_2, y_2) 坐标下的光场分布 $|u_d(x_2, y_2)|^2$,然后将 $|u_d(x_2, y_2)|^2$ 作为设计中的理想振幅分布.

通过以上分析可知,大角度分束器设计中首先按照第一步生成目标图后,接下来需要对目标图进行处理,根据式(2)的坐标关系对目标图的横纵坐标进行处理,实际的处理中,因为分束器的目标图为点阵形式并非连续的图案因此在进行处理时可以直接对点阵各个点的横纵坐标进行处理.同理根据式(2)的光强关系对各个点的强度进行替换,从而最终得到处理后的目标图.

1.3 迭代设计

大角度分束器设计流程见图 2.

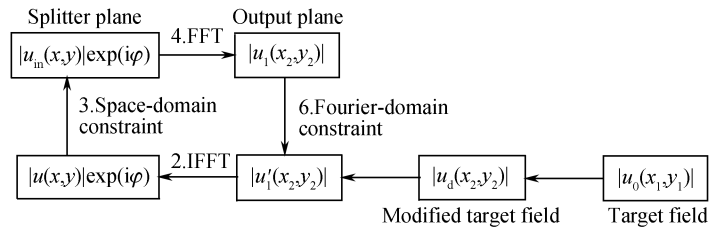


图 2 迭代过程流程

Fig.2 Block diagram of the proposed design method

1) 假设入射光的振幅分布为 $u(x_1, y_1)$,随机产生一个相位分布 $\varphi(x_1, y_1)$, $\varphi(x_1, y_1)$ 为随机产生的二维矩阵,每个矩阵元素的取值在 $0 \sim 2\pi$ 之间.

2) 对透射过 DOE 的光场进行二维傅里叶变换得到输出面上的复振幅分布 $u(x_2, y_2)$,保持 $u(x_2, y_2)$ 的相位不变对振幅进行限制,得到 $u'(x_2, y_2)$.

3) 对振幅限制后的复振幅分布 $u'(x_2, y_2)$ 做二维傅里叶逆变换,得到输入面的光场分布 $u'(x, y)$,保持 $u'(x, y)$ 的相位保持不变,振幅替换为入射光的振幅分布.

4) 重复步骤 2)~3),可以完成多次迭代,直到重构的光场与理想光场的误差满足要求.最后得到输入面的相位分布即为所求解的分束器相位分布.

1.4 参数分析

大衍射角的分束器设计原理见图 3, z 为衍射距离.

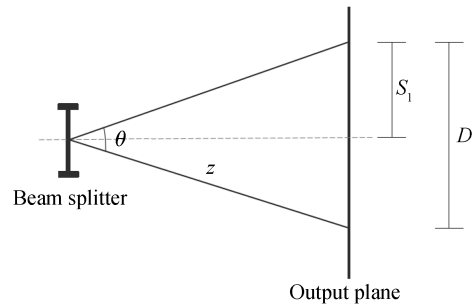


图 3 激光分束器系统原理

Fig.3 The schematic diagram of the system of laser beam splitter

当进行畸变时,对目标场进行坐标变换,设图中 s 畸变后为 s_1 ,根据式(2)有

$$s_1 = \frac{z}{r}s = \frac{z}{\sqrt{z^2 + s^2}}s = z \frac{\sqrt{s^2}}{\sqrt{z^2 + s^2}} \leq z \quad (3)$$

由式(3)可以分析得到,当对目标场进行坐标变换时,畸变后的坐标 s_1 与畸变前的坐标 s 有 $s_1 \leq s$ 恒成立.

而 DOE 的采样间隔为 $dx = \frac{\lambda}{2 \tan \theta}$,其中 λ 为波长, θ 为衍射角.

$$\because \tan \frac{\theta}{2} = \frac{s_1}{z} < 1 \quad (4)$$

$$\therefore \frac{\theta}{2} < 45.$$

$$\therefore dx = \frac{\lambda}{2 \tan \frac{\theta}{2}} > \frac{\lambda}{2}$$

由式(4)推导出了 DOE 取样间隔与入射光波长的关系,如当入射光波长 $\lambda = 650 \text{ nm}$,根据式(4)所得的关系,可知当 $dx > 325 \text{ nm}$,可以实现 180° 左右的角度的大衍射角衍射.另外

$$d \sin \theta = \lambda \quad (5)$$

当 $2dx \sin \theta = \lambda, \theta = 90^\circ$ 时

$$dx = \frac{\lambda}{2} = 325 \text{ nm}$$

其中 d 为 DOE 周期.也就是当衍射角为 90° 时,分束器的取样间隔是波长的二分之一.

在实际制作中因为技术原因 DOE 的取样间隔最小为 250 nm ,设入射光斑直径为 D_λ ,根据实际的分束要求可知 DOE 周期 $d < \frac{D_\lambda}{2}$.

2 设计实例

以 5×5 大角度分束器为例,来验证本文方法的可行性. 5×5 分束器在输出面上的理想分布如图 4(a),其中 5×5 的点阵为信号区.采样点数为 256×256 ,衍射角即水平和垂直方向相对于 DOE 的角度 θ 为 40° .在实际设计中对信号区外进行了两倍的补零操作,从而得到最终 DOE 的采样点数为 506×506 入射激光波长为 650 nm .最终得到的 DOE 的特征尺寸为:采样点数为 506×506 ,采样间隔为 $450 \text{ nm} \times 450 \text{ nm}$,采样周期为 $227.7 \mu\text{m} \times 227.7 \mu\text{m}$.采用上节所述大角度分束器的设计方法,先对目标光强分布根据式(2)进行强度和坐标调整,修正后的光强分布如图 4(b).根据式(2)和式(3)分析可知,对于形状来说,畸变后的坐标不大于畸变前的坐标,且 r 越大新坐标较原坐标的缩小比例也就越大,实际的修整结果可以看出,因为输出面上越靠近边缘的点 r 值越大,从而其压缩程度也就越大.相同地由式(2)中的强度修整公式, r 越大强度越高,可以看出分束器越靠近边缘的点其与 DOE 的点 r 越大从而该点的强度越高.

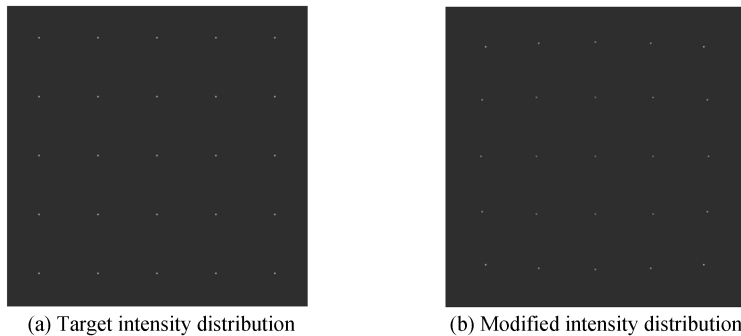


图 4 目标图和修整后的目标图
Fig.4 Target and modified intensity distribution

对目标光场进行修整之后,重复步骤(3)、(4),完成多次迭代,最后得到输入面的相位分布即为所设计分束器 DOE 的相位分布,如图 5(a).

另外作为对比,同时采用原有的方法设计分束器,原有的设计方法是采用夫琅禾费衍射积分来计算分束器与输出面之间的衍射,将图直接作为输出面的理想分布不作修整,然后根据步骤(2)~(4)的进行设计,得到分束器 DOE 的相位分布如图 5(b).

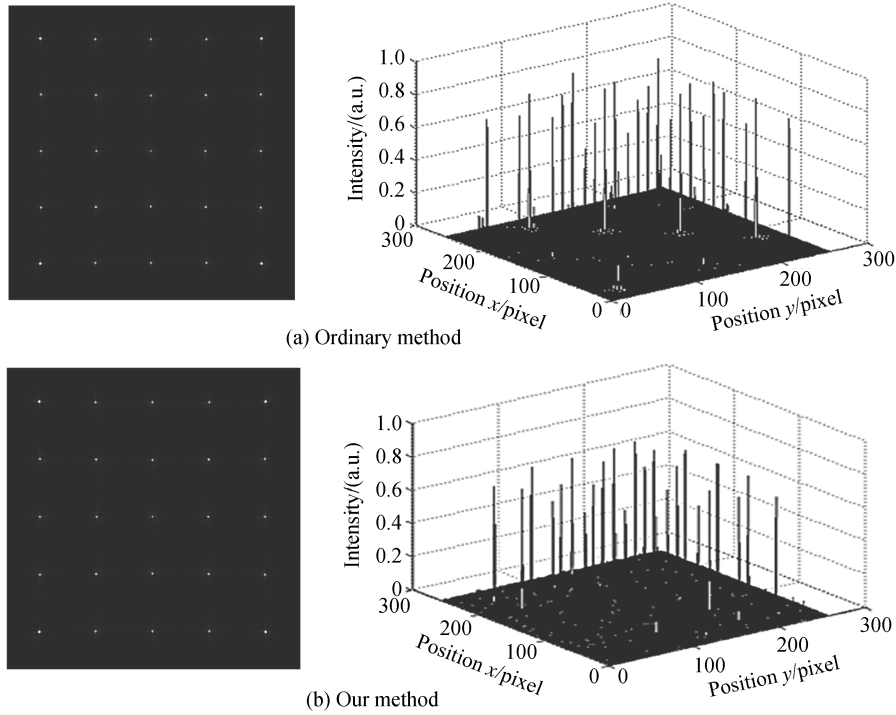


图 5 仿真结果

Fig.5 Simulation result

最终两种方法设计的分束器重构出的光强分布如图 6,通过将两张仿真图对比可以发现,没有经过提前坐标和强度修整而使用原有方法设计的仿真图存在明显的枕形畸变,严重偏离了原来的设计目标 $40^\circ \times 40^\circ$,

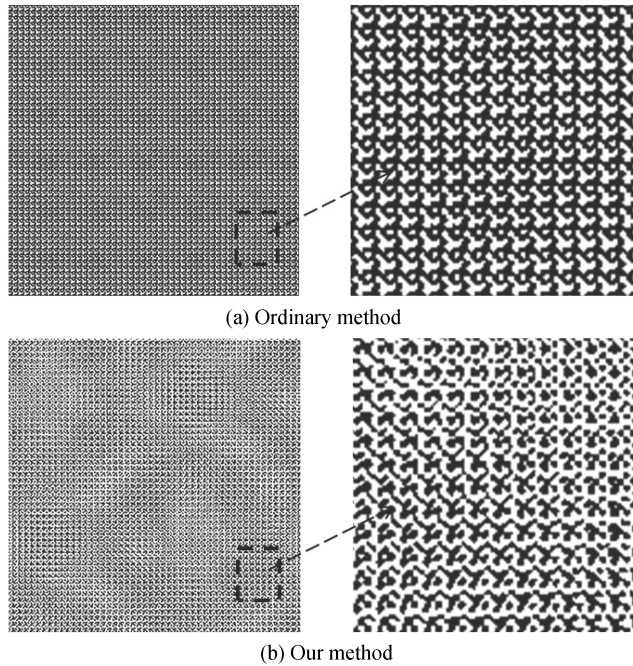


图 6 分束器 DOE 的相位分布

Fig.6 The phase distribution of the beam splitter DOE

图6(b)为本文设计方法的仿真结果,可以看到在形状方面,所有的点呈正方形排布,整体尺寸与目标一致,且在整体光强方面,相比于原有方法设计仿真结果光强更加均匀。

为了更直观的对比本文方法与原有方法设计的 5×5 分束器,分别根据原有方法和本文的设计方法制作对应的分束器 DOE,对比仿真结果进行进一步的分析。

采用纳米压印技术制作分束器 DOE,首先利用传统的微纳加工工艺制备衍射元件作为压印母板,其次基于纳米压印工艺过程将母板结构复制到紫外光固化压印胶上,最后利用刻蚀传递工艺将结构转移到二氧化硅材料基底上,完成衍射光学元件的制备.具体的制作过程如图 7.其中(a)-(f)对应过程依次为(a)涂覆压印胶,(b)压印模板对准压印,(c)紫外光固化,(d)脱模,(e)压印胶复制品,(f)结构刻蚀传递,石英基底衍射元件制备完成.另外图 8(a)(b)分别为原有方法和本文方法制作的激光分束器 DOE 在显微镜下的结构图。

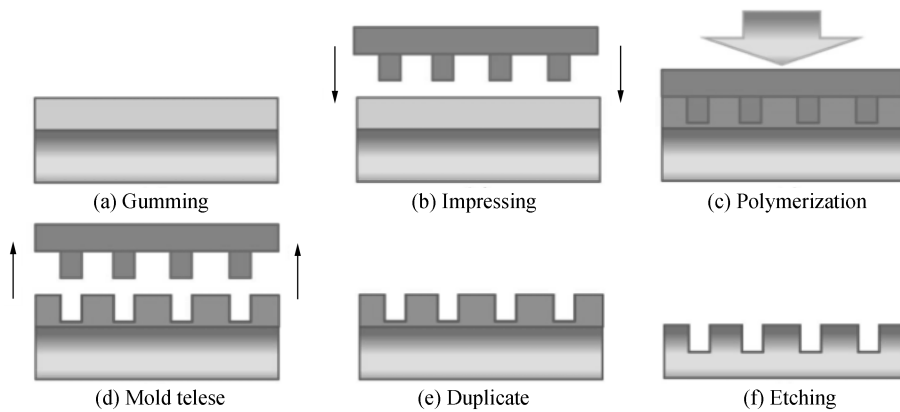


图 7 分束器衍射元件制备过程

Fig.7 The process of making the beam splitter DOE

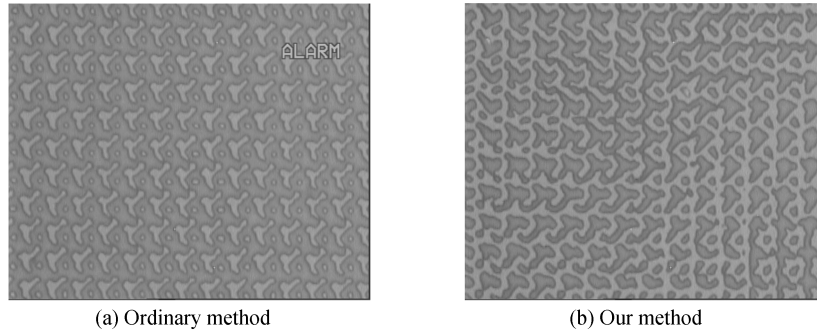


图 8 激光分束器衍射元件显微镜结构图

Fig.8 The microstructure diagram of the beam splitter DOE

选择波长 650 nm 的激光为入射光,入射光功率为 1.9 mW.将入射光垂直于分束器表面投射并搭建光路.将原有方法设计的分束器和本文设计方法设计的分束器分别放入光路中可以在工作距离为 1 m 的工作面上分别得到相对应的分束结果如图 9.可以看出原有设计方法存在明显的畸变,而本文设计方法得到的形

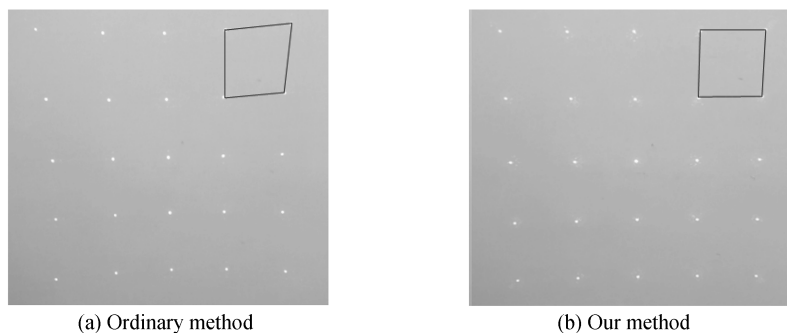


图 9 实验结果

Fig.9 The experiment result

状分布为矩形,各点之间的间隔近似一致,两个结果均与仿真结果一致.

再对实验结果的光强均匀性进行对比,表 1、2 分别为原有方法和本文方法设计分束器经入射光投射后分束的各个点的光功率.可以看到两个方法得到的光强分布其中心点的光强都要明显强于其他点,这是因为实际加工的误差所致,因此在分析两个结果光强分布的均匀性时均选择非中心点的对应点进行分析.

表 1 原有方法分束各点的光功率(单位:mW)

Table 1 The ordinary method luminous power of every point (unit: mW)

Splitting points	Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5
Line 1	0.291	0.395	0.344	0.543	0.350
Line 2	0.21	0.351	0.95	0.542	0.599
Line 3	0.594	0.702	1.42	0.666	0.384
Line 4	0.54	0.686	0.62	0.503	0.16
Line 5	0.226	0.37	0.362	0.582	0.352

表 2 本文方法分束各点的光功率

Table 2 Our method luminous power of every point

Splitting points	Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5
Line 1	0.303	0.368	0.363	0.332	0.291
Line 2	0.372	0.408	0.447	0.383	0.377
Line 3	0.389	0.429	1.282	0.470	0.401
Line 4	0.374	0.398	0.441	0.372	0.389
Line 5	0.293	0.322	0.356	0.337	0.307

图 10 中(a)(b)分别为原有方法和本文方法设计的分束器分束点阵的光功率分布图,对比两种方法的光功率分布图可以明显发现原有方法的光功率变化跨度较大且不均匀,与之相对比本文设计方法的光功率变化更为平缓,因此光强分布更为稳定.此外根据公式计算出两个分束器的衍射效率可以得到,原方法的衍射效率为 69.25%,本文方法设计分束器的衍射效率为 55.47%.衍射效率 η 是指所需衍射级次光强之和占总的出射光强的百分比,即

$$\eta = \frac{I_{\text{need}}}{I_{\text{all}}} \quad (6)$$

I_{need} 为所需衍射级次光强之和, I_{all} 为经 DOE 出射的总光强.

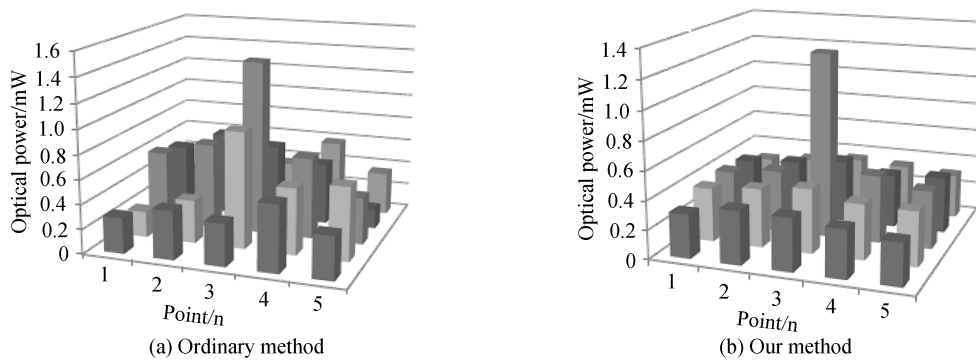


图 10 实验结果光功率对比图

Fig.10 The intensity comparison between ordinary method and our method

3 结论

本文将一种基于瑞利-索墨非积分的大角度衍射光学元件设计方法应用于大角度分束器的设计当中.先对分束器的目标强度分布进行坐标和强度修整,再将修整后的强度分布作为迭代过程中输出面的理想分布,利用本文方法设计得到的分束器与原有基于夫琅禾费衍射积分设计得到的分束器相比,本文方法设计的分束器的衍射角更为准确,光强分布也更为均匀而原有方法则会产生畸变,强度分布跨度较大.本文所述的设计方法与原有方法相比更适用于大角度分束器的设计.

参考文献

- [1] HERRERA-FERNANDEZ J M, SANCHEZ-BREA L M. Double diffractive optical element system for near-field shaping [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(23): 4587-4593.
- [2] PANG Hui, YIN Shao-yun, DENG Qi-ling, *et al.* Design method of diffractive optical element with large diffraction angle[C]. International Society for Optics and Photonics, 2014, **9271**: 92711M.
- [3] LI Bing, YAN Ai-min, DAI En-wen, *et al.* Simulations of conjugate dammann grating based on coherent beam combination of two-dimensional solid state laser array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **32**(11): 173-179.
李兵, 闫爱民, 戴恩文, 等. 二维固体激光阵列逆达曼光栅相干合束技术模拟研究[J]. 光学学报, 2016, **32**(11): 286-291.
- [4] TURUNEN N J, VASARA A, WESTTHOLM, *et al.* Optimization and fabrication of beam splitters[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 1988, **21**(10): 92-96.
- [5] KILLAT U, RABE G, RAVE W, *et al.* Binary phase grating for star couples with a high splitting ratio[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2006, **4**(2): 159-167.
- [6] NAKAYA T, QIU Jian-rong, *et al.* Fabrication of dammann gratings inside glasses by femtosecond laser[J]. *Chinese Physics Letters*, 2004, **21**(6): 1061-1063.
- [7] ZHOU Chang-he, LIU Li-ren, *et al.* Numerical study of dammann array illuminators[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(26): 5961-5959.
- [8] CHEN Qi, LI Guo-jun, FANG Liang, *et al.* Design of wide-angle laser beam splitter with sub-wavelength multi-level structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(2): 0205006.
陈琪, 李国俊, 方亮, 等. 亚波长多台阶结构大角度激光分束器设计[J]. 中国激光, 2016, **43**(2): 0205006.
- [9] PANG Hui, YIN Shao-yun, DENG Qi-ling, *et al.* A novel method for the design of diffractive optical elements based on the Rayleigh-Sommerfeld integral[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2015, **70**: 38-44.
- [10] CHANG Yan-shuo, HSU Wei-fang, HSU Ku-hui, *et al.* Full-frame projection displays using aliquid crystal on-silicon spatial light modulator for beam shaping and speckle suppression[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(27): 214-221.
- [11] ESACHER A, BERNET S, RITSCH-MARTE M. Colour hologram projection with an SLM by exploiting its full phase modulation range[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(17): 20530-20541.
- [12] LIU Xin, ZHANG Man, PANG Hu, *et al.* Fabrication of large-angle diffractive optical element based on nanoimprint lithography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(6): 0605001.
刘鑫, 张满, 庞辉, 等. 基于纳米压印的大角度衍射光学元件批量化制备方法[J]. 光子学报, 2016, **45**(6): 0605001.
- [13] YING Chao-fu, PANG Hui, FAN Chang-jiang, *et al.* New method for the design of a phase-only computer hologram for multiplane reconstruction[J]. *Optics Engineering*, 2011, **50**(5): 055802.
- [14] YOO S, SONG H Y, LEE J, *et al.* Cost-effective large-scale fabrication of diffractive optical elements by using conventional semiconducting processes[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(33): 8052-8056.
- [15] JESACHER A, BERNET S, RITSCH M, *et al.* Colour hologram projection with an SLM by exploiting its full phase modulation range[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(17): 20530-20541.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos.61505214,61605211), the Applied Basic Research Programs of Department of Science and Technology of Sichuan Province (Nos.2016JY0175,2016RZ0067), the National Defense Foundation of China (No.CXJJ-16M116), the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences (CAS), the CAS "Light of West China" Program