

# 衍射型激光扩束器的保真度研究

龚海龙<sup>1,2</sup> 刘志辉<sup>1,2</sup> 李国俊<sup>1</sup> 方亮<sup>1</sup> 周崇喜<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 针对传统的二次非球面折射型激光扩束器存在不易加工、装调困难、体积大、重量大,特别是难以获得高填充比阵列透镜等不足,提出了一种利用衍射型台阶化面型近似二次非球面的激光扩束器方案,结果表明:对于典型的束腰半径为 2 mm 的高斯光束,衍射型激光扩束器可实现 2.8 倍的理论扩束比。为了保持扩束过程中激光模式的稳定性,提出了不同区域给定不同台阶数的两类复合结构,解决了扩束过程中保真度和二元衍射元件加工特征尺寸无法同时满足的问题,改进后的系统保真度达 95.82%,各区域最小光刻线宽均大于 2 μm,能够满足现有光刻加工技术要求。对影响系统保真度主要误差的分析结果表明:离轴误差在 -1~1 mm,目镜和物镜倾斜误差分别小于 0.1 mm 和 1.68 mm 时,系统保真度仍大于 95%,方便装调。

**关键词** 衍射; 扩束器; 二次非球面; 扩束比; 保真度

**中图分类号** TN245 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0902006

## Fidelity Study of Diffractive Laser Beam Expander

Gong Hailong<sup>1,2</sup> Liu Zhihui<sup>1,2</sup> Li Guojun<sup>1</sup> Fang Liang<sup>1</sup> Zhou Chongxi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Optical Technologies for Nano-Fabrication and Micro-Engineering,  
Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** For traditional conic refractive laser beam expanders being difficult of fabrication, hard of equipment, bulky and heavy weight, especially difficult to achieve lens array with high fill factor, an approach of laser beam expander by using stepped diffractive surface to approximate conic aspherical surface is proposed. It is shown that the incoming Gaussian beam with typical waist radius of 2 mm is enlarged to the designed expanding ratio of 2.8 times by the diffractive laser beam expander. By making the different sections of the surface with different steps to get two types of improved structure, which aims at keeping the stability of laser mode, the problem of fidelity and typical fabrication line-width of binary diffractive elements being not fulfilled at the same time is solved. The fidelity is raised to 95.82% with the minimum lithography line-width above 2 μm of each section, which meets the fabrication requirement of existing lithography technology. Analysis of the main errors affecting the system fidelity shows that the value is still above 95% when defocused error is -1~1 mm and decenter error is below 0.1 mm of eyepiece and 1.68 mm of objective lens, which make the system easy to install.

**Key words** diffraction; expander; conic aspherical surface; expanding ratio; fidelity

**OCIS codes** 050.1960; 050.1965; 050.1970; 140.3460

## 1 引言

激光具有高亮度、高单色性和高准直性,在国防、工业、医疗等领域有着广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。然而在一些

特殊的应用中,对于激光的光束特性提出了更高的要求,如激光测距、激光雷达等领域需要较宽的光束和较小的发散角<sup>[3-4]</sup>,激光扩束器可以把窄细的激光束

**收稿日期**: 2014-03-28; **收到修改稿日期**: 2014-04-24

**作者简介**: 龚海龙(1988—),男,硕士研究生,主要从事衍射光学元件方面的研究。E-mail: gong.163.gong@163.com

**导师简介**: 周崇喜(1970—),男,博士,研究员,主要从事微纳光学激光光束整形变换方面的研究。

E-mail: cxzhou@ioe.ac.cn(通信联系人,中国光学学会会员号: S040M620)

扩束成较宽的准直光束;激光加工和激光存储领域需要较小的聚焦光斑<sup>[5-7]</sup>,在聚焦镜前加入适当的激光扩束器可以获得满足要求的聚焦位置和焦斑尺寸;激光相干合成获得大功率的研究领域<sup>[8-9]</sup>,激光扩束器可以增大子光束的填充因子<sup>[10]</sup>,改善输出激光的光束质量。因此,研制消像差、易于加工、方便装调的激光扩束器具有重要的意义。

传统激光扩束器主要分为折射型和反射型两类,不易实现小体积及轻量化<sup>[11]</sup>。为了消像差,通常还将其面型做成二次非球面<sup>[12-13]</sup>。但受制作工艺的限制,二次非球面面型不易控制,且装调不便。本文提出了采用台阶化的衍射型面型近似二次非球面的方案,并对其结构做了二级和三级渐变式改进,即从中央向边缘划分成两部分或三部分,各部分台阶数依次减小,在实现较好的扩束效果的同时,降低了加工难度,具有光束传输模式稳定、设计简单、加工容易和装调方便等优点。

## 2 衍射型扩束系统设计

### 2.1 衍射透镜面型设计原理

台阶化衍射面型的设计原理如图 1 所示。将二次曲面以  $2\pi$  为周期进行厚度分割,由于相位增加  $2\pi$  的整数倍对光场复振幅无影响,因此可以将每一个周期对应的一段曲面在  $2\pi$  内进行台阶化。给定焦距  $f$  及最大外径  $2R$ ,可以计算出衍射面型的相应结构参数为<sup>[14]</sup>

$$r_m = \sqrt{2m\lambda f/L}, \quad (1)$$

$$N = (R/r_p)^2, \quad (2)$$

$$\nu = R/(2NL), \quad (3)$$

式中  $\lambda$  为入射光波长,  $L$  为衍射透镜的相位台阶数,  $r_m$  为第  $m$  个台阶距中心的距离,称为第  $m$  级环带半径,  $m = 1, 2, 3, \dots, NL$ ,  $N$  为环带周期数,即  $2R$  口径内可分割成  $2\pi$  相位的个数,当  $m = L$  时,  $r_p = \sqrt{2\lambda f}$  为环带周期,即图 1 中第一个  $2\pi$  所对应的半宽度,  $\nu$  为最小线宽,即最大环带半径与其相邻的环带半径之差。

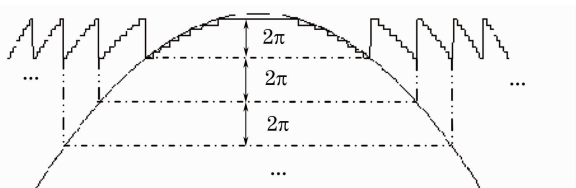


图 1 衍射透镜面型设计原理图

Fig. 1 Design schematic of diffractive lens surface

由(1)~(3)式可推导出图 1 所示衍射透镜的透射率函数,表示为

$$T(x) = \sum_{k=0}^{NL-1} \exp\left\{\frac{i2\pi[L - (k+1)]}{L}\right\} \cdot \text{rect}\left\{\frac{x^2 - [r_p^2/L(k-1/2)]}{r_p^2/L}\right\}. \quad (4)$$

### 2.2 衍射型扩束系统光路计算

为了避免实焦点造成的空气击穿,损伤光学元件,通常选用伽利略扩束系统<sup>[15]</sup>。图 2 给出了衍射型伽利略扩束系统的光路图,图中  $f_1$ 、 $f_2$  分别为目镜、物镜焦距,  $d = f_1 + f_2$  为目镜与物镜间距。

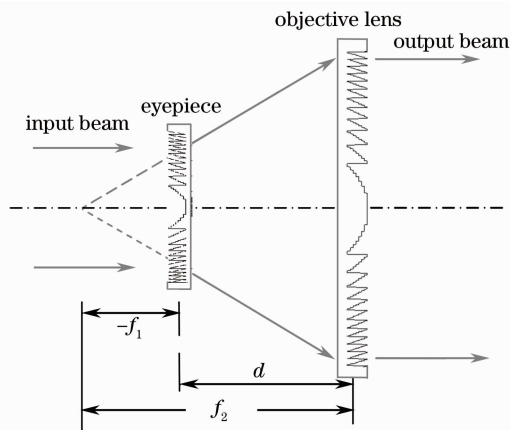


图 2 衍射型伽利略扩束系统光路图

Fig. 2 Light path diagram of Galileo diffractive expanding system

假设目镜所在平面为  $x_1 - z$ ,物镜所在平面为  $x_2 - z$ ,并给定初始入射光场复振幅为  $u_0(x_1)$ ,那么经过衍射型目镜后的光场复振幅为

$$u_1(x_1) = u_0(x_1) \cdot T_1(x_1), \quad (5)$$

式中  $T_1(x_1)$  为目镜透射率函数。到达物镜前的过程为菲涅耳衍射传输,满足菲涅耳衍射积分公式,那么物镜前的光场振幅可表示为<sup>[16]</sup>

$$E_2(x_2) = \frac{\exp(ikd)}{i\lambda d} \int_{-\infty}^{+\infty} u_1(x_1) \exp\left[\frac{ik}{2d}(x_2 - x_1)^2\right] dx_1, \quad (6)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$  为波矢。经过衍射型物镜后的光强分布为

$$I(x_2) = |E_2(x_2) \cdot T_2(x_2)|^2, \quad (7)$$

式中  $T_2(x_2)$  为物镜的透射率函数。

### 2.3 衍射型扩束系统的评价

评价衍射型扩束系统扩束效果的优劣,要看扩束后的光斑尺寸  $\omega$  与扩束前光斑尺寸  $\omega_0$  的比是否满足理论扩束比,理论扩束比可表示为

$$M = |f_2/f_1|. \quad (8)$$

另一方面,光场经过扩束系统后,光斑尺寸被扩大,发散角被压缩,但分布形式不应发生改变。因此,还要看扩束后光场的光强分布是否与扩束前光场的光强分布一致,即扩束系统对光场分布是否具有保持性。将扩束系统对入射光的保持性定义为保真度:

$$\xi = \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{m'} (I_k - I_{0k})^2}{m' - 1}} \right] \times 100\%, \quad (9)$$

式中  $I$  为物镜后的光强分布,由(7)式求得, $I_0$  为入射光光强分布, $m'$  为有效取样点数,即光强为峰值光强  $1/e^2$  的宽度内所包含的像素点数。

### 3 衍射型扩束系统的数值仿真及分析

给定目镜、物镜焦距  $f_1 = -37.5 \text{ mm}$ 、 $f_2 = 105 \text{ mm}$ ,口径  $2R_1 = 5 \text{ mm}$ 、 $2R_2 = 14 \text{ mm}$ ,入射高斯光束波长  $\lambda = 1.064 \text{ }\mu\text{m}$ ,束腰半径  $\omega_0 = 2 \text{ mm}$ 。

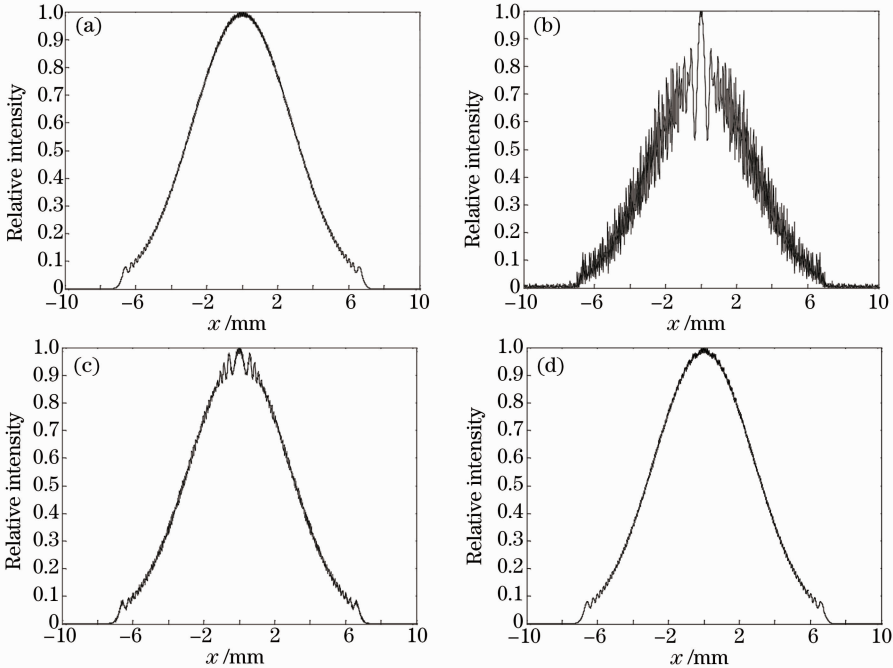


图3 各类激光扩束器扩束后的相对光强分布。(a) 二次曲面折射型扩束器;(b)  $L=8$  衍射型扩束器;(c)  $L=32$  衍射型扩束器;(d)  $L=128$  衍射型扩束器

Fig. 3 Relative intensity profiles after each laser beam expander. (a) Conic refractive expander; (b) diffractive expander with  $L=8$ ; (c) diffractive expander with  $L=32$ ; (d) diffractive expander with  $L=128$

由(1)~(9)式计算可得各类激光扩束器对应的最小光刻线宽  $\nu$  及系统扩束比  $M$  和保真度  $\xi$  等参数,如表1所示。从表1可以看出,为了获得95%以上的高保真度,衍射型扩束器的特征尺寸为  $0.5 \text{ }\mu\text{m}$ ,这样一方面标量衍射理论将带来一定的误差,另一方面,目前的光刻技术很难高效率地实现这种多台阶衍射元件的加工。

### 3.1 衍射型扩束系统扩束效果及分析

根据第2节分析,在Matlab环境下进行数值仿真,入射高斯光束经扩束系统在物镜后的光强分布如图3所示。作为比较,图3分别给出了二次曲面折射型激光扩束器和台阶数  $L$  分别为8、32、128的衍射型激光扩束器对给定高斯光束的扩束效果。由图3分析可知,衍射型扩束器的相位台阶数对扩束比的影响较小,而对扩束器的保真度影响较为明显,当台阶数  $L$  较小时,扩束后光强分布曲线中存在“毛刺”,且峰值处较为明显,如图3(b)所示;增大台阶数  $L$ ，“毛刺”明显减少,峰值处的振荡也得到抑制,如图3(c)所示;进一步增大台阶数  $L$ ,峰值处的条纹逐渐消失,系统的保真度和扩束后的光强分布都趋于折射型激光扩束器,如图3(d)所示。

### 3.2 改进衍射型扩束系统扩束效果及分析

根据3.1节分析,提出了一种衍射型激光扩束器面型结构的改进方案,称为二级渐变式衍射型扩束系统,即将中央部分(称为一级部分)的相位台阶数变大,外围部分(称为二级部分)台阶数保持不变。由于理论扩束比  $M=2.8$ ,若目镜一级部分  $n_c$  个环带内台阶数为  $L_c$ ,则物镜一级部分应有  $Mn_c$  个环带内台阶数为  $L_c$ 。因此物镜中央部分环带数不作为

表 1 各类激光扩束器的扩束比和保真度  
Table 1 Expanding ratio and fidelity of each laser beam expander

| Type                    | Phase steps $L$ | Minimum line-width $\nu / \mu\text{m}$ | Expanding ratio $M$ | Fidelity $\xi / \%$ |
|-------------------------|-----------------|--|---------------------|---------------------|
| Diffractive system      | 8               | 2                                      | 2.826               | 83.00               |
|                         | 16              | 1                                      | 2.819               | 92.67               |
|                         | 32              | 0.5                                    | 2.812               | 96.89               |
|                         | 64              | 0.25                                   | 2.805               | 98.46               |
|                         | 128             | 0.125                                  | 2.805               | 98.98               |
| Conic refractive system | —               | —                                      | 2.805               | 99.25               |

变量参与讨论。

一般性地,图 4 给出了二级渐变式衍射型扩束系统一级、二级部分台阶数分别为  $L_c=16, L=8$ ,  $L_c=32, L=8$  和  $L_c=32, L=16$  时,保真度  $\xi$  随一级环带数  $n_c$  的变化趋势,图中三条虚线从下往上依次为未改进的衍射型扩束器台阶数  $L$  为 8、16、32 时系统的保真度。可以看出,改进后的系统相对于  $L=8$  和  $L=16$  的未改进系统,保真度明显提高,且随着一级部分环带数的增加,保真度也逐渐增大。对于  $L_c=16, L=8$  的二级渐变式衍射型扩束系统,一级环带数  $n_c=34$  时,保真度趋于稳定值 92.63%,最小刻蚀线度  $\nu_{1c}=1.5 \mu\text{m}$ ;对于  $L_c=32, L=8$  的二级渐变式衍射型扩束系统,一级环带数  $n_c=50$  时,保真度趋于稳定值 96.85%,最小刻蚀线度  $\nu_{1c}=0.625 \mu\text{m}$ ;对于  $L_c=32, L=16$  的二级渐变式衍射型扩束系统,一级环带数  $n_c=22$  时,保真度趋于稳定值 96.80%,最小刻蚀线度  $\nu_{1c}=0.941 \mu\text{m}$ 。

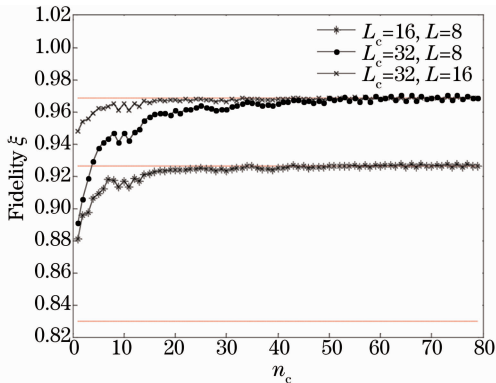


图 4 二级渐变式衍射型扩束器保真度随  $n_c$  的变化趋势  
Fig. 4 Fidelity curves of two-level gradational diffractive expander versus  $n_c$

工程应用中,加工线度在  $2 \mu\text{m}$  以下的大面积刻蚀通常是困难的,因此,需在满足加工线宽为  $2 \mu\text{m}$  的前提下,适当地降低保真度。对于  $L_c=16, L=8$  和  $L_c=32, L=8$  的两类衍射型激光扩束器,满足最小刻蚀线宽  $2 \mu\text{m}$  时的一级环带数和保真度

分别为  $n_c=20, \xi=92.4\%$  和  $n_c=5, \xi=93.78\%$ 。

改进后的二级渐变式衍射型扩束系统在满足加工线宽的情况下,对保真度的提高仍然有限,均低于 95%。因此,需在二级改进的基础上进行三级改进,即对  $L_c=32, L=8$  的二级渐变式衍射型激光扩束器的二级部分再次划分,形成一级台阶数  $L_c=32$ 、二级台阶数  $L_m=16$ 、三级台阶数  $L=8$  的三级渐变式衍射型激光扩束器,其一级、二级部分环带数分别为  $n_c=5, n_m=15$ 。此时各级的最小刻蚀线宽均大于  $2 \mu\text{m}$ 。计算可得三级改进下系统的保真度达 95.82%,扩束效果如图 5 所示,曲线中出现的两处“弯折”是由于在台阶数的过渡区域产生了衍射效应所致,图中虚线为折射型激光扩束器的扩束效果。

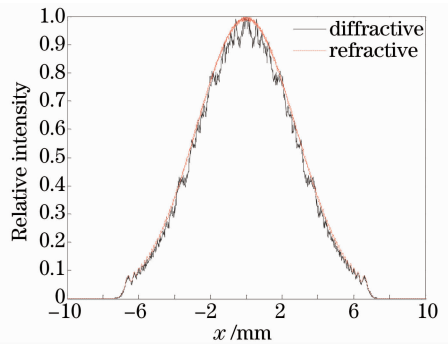


图 5 三级渐变式衍射型扩束器扩束后的相对光强分布  
Fig. 5 Relative intensity profile after three-level gradational diffractive expander

### 3.3 误差分析

扩束系统的误差主要分为两大类:加工误差和装调误差。加工误差又包括刻蚀深度误差、线宽误差和对准误差。文献[17-19]已分析了加工误差对衍射元件性能的影响,主要影响其衍射效率(目标衍射级次的能量与输入能量之比,一般目标衍射级为一级衍射)。具体来讲,刻蚀深度误差将使刻蚀深度变深或变浅,从而使总体深度不再为  $\lambda$ ,部分能量转移到其他衍射级次上去,导致一级衍射效率降低,从而使一级衍射总体能量降低,光场分布形式不变;同

样地,线宽误差和对准误差会使得台阶上出现一些宽度远小于最小台阶宽度的“尖峰”结构,这些细小的“尖峰”经光波衍射后形成高频分量,会使高衍射级次能量增加,降低一级衍射效率,也不影响光场的分布。因此,本文着重分析装调误差对系统保真度的影响。

装调误差,主要有:1) 离焦误差,目镜和物镜间距满足  $d=f_1+f_2$ ,当日镜或物镜位置前后移动时,其间距发生改变,改变量  $\Delta d$  称为离焦误差;2) 离轴误差,即将目镜或物镜的中心位置偏离光轴的大小,由于目镜和物镜的口径不同,文中用离轴误差率(离轴误差与透镜口径的比)来表征离轴误差的大小;3) 倾斜误差,即为目镜或物镜偏离垂直方向的角度。

处理离轴误差和倾斜误差时,均采用固定目镜

和物镜其中一个,单独考虑另一个的方法。图 6 给出了离焦误差、离轴误差、倾斜误差对改进后的系统保真度的影响,图中虚线为无误差时系统的保真度。由图 6 分析可知,离焦误差和离轴误差对系统保真度的影响较大:离焦误差在  $-1\sim 1$  mm 内变化时,系统保真度仍在 95% 以上,超出这一范围,系统保真度将迅速下降;目镜和物镜离轴误差率分别小于 2% 和 12% 时,系统保真度仍在 95% 以上,当离轴误差率大于这一值时,系统保真度迅速下降,因此目镜、物镜离轴误差应分别小于 0.1 mm 和 1.68 mm。倾斜误差对系统保真度的影响较小,目镜或物镜的倾斜角在  $-5^\circ\sim 5^\circ$  内变化时,系统保真度均大于 95%,因此,可忽略倾斜角对系统保真度的影响。

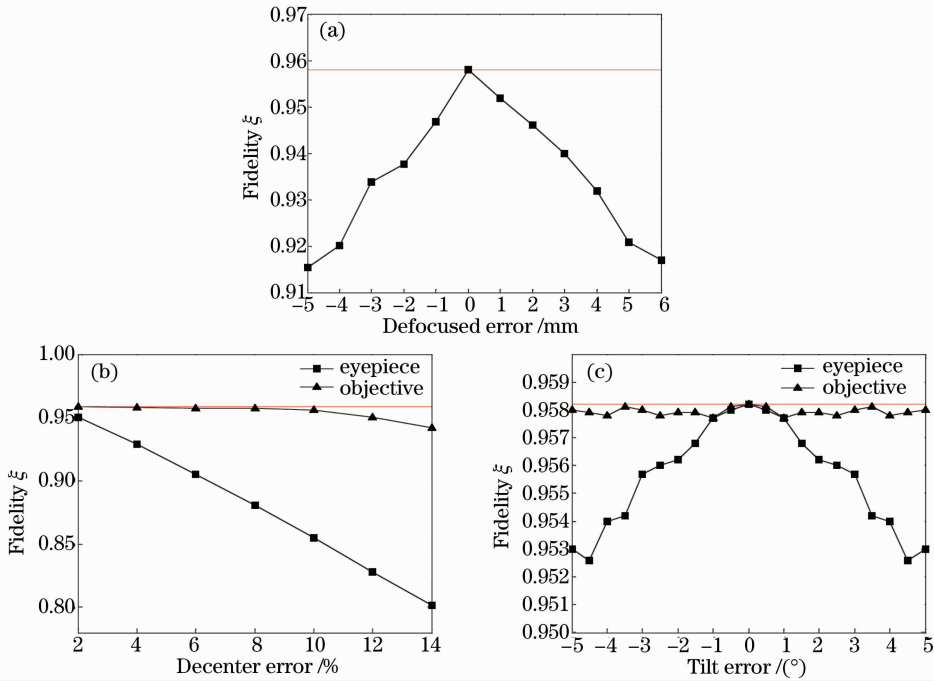


图 6 保真度与三类误差的关系。(a) 离焦误差; (b) 离轴误差; (c) 倾斜误差

Fig. 6 Relations between fidelity and three installation errors. (a) Defocused error; (b) decenter error; (c) tilt error

## 4 结 论

基于二次曲面折射型激光扩束器存在的不足,提出了用台阶化衍射型面型近似二次非球面的方案,并对这种衍射型面型结构做了二级和三级改进,结果表明:衍射型扩束器可以很好地实现理论设计的扩束比,且对于改进后的三级渐变式衍射型扩束器,在一级台阶数和环带数  $L_c=32, n_c=5$ , 二级台阶数和环带数  $L_m=16, n_m=15$ , 三级台阶数  $L=8$  时,系统保真度达 95.82%, 各级光刻线宽均大于  $2\ \mu\text{m}$ , 很好地解决了加工线宽与保真度无法同时满

足的问题。同时,对影响保真度的系统装调误差的分析结果表明:为了保证 95% 以上的系统保真度,离焦误差应控制在  $-1\sim 1$  mm 以内,目镜和物镜的离轴误差应分别控制在 0.1 mm 和 1.68 mm 以内。该研究结果对于解决阵列化扩束时的透镜拼接难题具有一定的意义,尤其对于激光相干合成,提高阵列化子光束的填充因子具有重要的意义。

## 参 考 文 献

1 Zong Siguang, Wu Ronghua, Cao Jing, *et al.*. Development and trends of high energy laser weapons[J]. Laser & Optoelectronics

- Progress, 2013, 50(8): 080016.
- 宗思光, 吴荣华, 曹 静, 等. 高能激光武器技术与应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080016.
- 2 Xia Bo, Jiang Lan, Wang Sumei, *et al.*. Femtosecond laser drilling of micro-holes[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0201001.
- 夏 博, 姜 澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0201001.
- 3 Lin Zhaoheng, Gong Xiuming, Wu Shibin, *et al.*. Design and development of 24 times high-power laser beam expander[C]. SPIE, 2013, 8904: 89040Y.
- 4 Zhang Haifeng, Meng Wendong, Wu Zhibo, *et al.*. One way laser ranging and its measuring experiment[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308005.
- 张海峰, 孟文东, 吴志波, 等. 单向激光测距及其测量试验[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308005.
- 5 I Powell. Design of a laser beam line expander[J]. Appl Opt, 1987, 26(17): 3705-3709.
- 6 Sun Wensheng, Liu Kundi, Pan Juiwen, *et al.*. Laser expander design of highly efficient blu-ray disc pickup head[J]. Opt Express, 2009, 17(4): 2235-2246.
- 7 Georg Nadorff, Frank DeWitt IV, Sten Lindau, *et al.*. Variable *xy*-UV beam expander for high-power laser beam shaping[C]. SPIE, 2012, 8490: 84900I.
- 8 Li Bing, Yan Aimin, Lv Xiaoyu, *et al.*. Improvement of combining efficiency of coherent beam combination from phase-locked laser array by Dammann grating[C]. SPIE, 2011, 8130: 81300U.
- 9 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun, *et al.*. High power coherent beam combination from two fiber lasers[J]. Opt Express, 2008, 14(7): 2721-2726.
- 10 Cao Jianqiu, Lu Qisheng, Hou Jing, *et al.*. Influence of combining errors in the system for coherent combining of fiber laser on the far field of output[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(3): 351-358.
- 曹涧秋, 陆启生, 侯 静, 等. 光纤激光器相干合成系统中组束误差对远场光场的影响[J]. 中国激光, 2008, 35(3): 351-358.
- 11 Jia Yong, Gao Yunguo. A switch zoom design for reflective laser beam expander[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022003.
- 贾 勇, 高云国. 反射式激光扩束器的切变换频技术[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022003.
- 12 Hao Peiming, Wang Peng, Wang Zhanshan, *et al.*. Lens design for high power and wide-aperture beam expander[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(6): 494-496.
- 郝沛明, 王 鹏, 王占山, 等. 高倍率及大孔径扩束器的光学系统设计[J]. 中国激光, 2003, 30(6): 494-496.
- 13 Patrice Hello, Catherine Nary Man. Design of a low-loss off-axis beam expander[J]. Appl Opt, 1996, 35(15): 2534-2536.
- 14 Jin Guofan, Wu Minxian. Binary Optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. 89-95.
- 金国藩, 邬敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 89-95.
- 15 Li Liangyu, Li Changchun, Li Yinzhu, *et al.*. Design of laser expanding system for multi-wave length[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(8): 714-716.
- 李良钰, 李常春, 李银柱, 等. 多波长激光扩束系统的设计[J]. 中国激光, 2001, 28(8): 714-716.
- 16 Liang Quanting. Physical Optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 171-173.
- 梁铨廷. 物理光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 171-173.
- 17 Li Sitao, Ye Jiaxiong, Ruan Yu, *et al.*. Fabrication and error analysis of binary optical elements[J]. Optoelectronic Technology & Information, 2000, 13(5): 24-29.
- 李思涛, 叶嘉雄, 阮 玉, 等. 二元光学元件的制作及其误差分析[J]. 光电子技术与信息, 2000, 13(5): 24-29.
- 18 Li Hongjun, Zhao Jingli, Lu Zhenwu, *et al.*. Linewidth error in fabrication of binary optical element [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2000, 11(3): 279-281.
- 李红军, 赵晶丽, 卢振武, 等. 二元光学元件制作过程中的线宽误差[J]. 光电子 • 激光, 2000, 11(3): 279-281.
- 19 Thomas Hessler, Markus Rossi, Rino E Kunz, *et al.*. Analysis and optimization of fabrication of continuous-relief diffractive optical elements[J]. Appl Opt, 1998, 37(19): 4069-4078.

栏目编辑: 史 敏