

## 非球面整形镜在空间激光通信终端中的应用

宋志化<sup>1,2\*</sup>, 江伦<sup>2</sup>, 曹海帅<sup>1,2</sup>, 佟首峰<sup>2</sup><sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup>长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 在同轴两片反射镜光学天线的空间激光通信终端中,入射高斯光束的中心最高能量部分被次镜及次镜支架遮挡,导致部分能量损失。为了减小能量损失,提高系统发射效率,将非球面整形镜应用在发射端准直扩束系统中,实现高斯光束到平顶光束的整形,以减小次镜及次镜支架遮挡损失的能量,同时对光束进行准直扩束。所设计的非球面整形系统入射面直径 $d=3\text{ mm}$ ,出射面直径 $D=12\text{ mm}$ ,波长 $\lambda=1550\text{ nm}$ ,玻璃材料为BK7,输出面上的光强分布接近均匀,发散角 $\theta=1.216\text{ mrad}$ 。对比分析传统球面扩束镜与非球面整形扩束镜可知:同等参数条件下,采用非球面整形扩束镜的发射端的发射效率提高了11.1%。

**关键词** 光通信; 空间激光通信; 非球面; 光束整形; 扩束准直

**中图分类号** TN929.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP55.100601

## Aspheric Homogenizer Applying in Space Laser Communication Terminal

Song Zhihua<sup>1,2\*</sup>, Jiang Lun<sup>2</sup>, Cao Haishuai<sup>1,2</sup>, Tong Shoufeng<sup>2</sup><sup>1</sup>School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;<sup>2</sup>Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aero and Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** In space laser communication terminal with coaxial two pieces of reflective mirror of optical antenna, the highest energy part of the incident Gaussian beam can be obscured by the secondary mirror and its bracket, which leads to the loss of energy. In order to reduce loss of energy and improve the transmitting efficiency of terminal, we use an aspheric homogenizer in beam collimation system. The aspheric homogenizer can convert a Gaussian beam to a flattop beam, reduce the loss of energy led by the obscure of the secondary mirror and its bracket and collimate the beam. In the designed aspheric homogenizer system, incidence diameter  $d$  is 3 mm, exit diameter  $D$  is 12 mm, wavelength  $\lambda$  is 1550 nm, the glass material is BK7, the light intensity distribution is close to uniform on the output surface, and the divergence angle  $\theta$  is 1.216 mrad. Finally, the spherical beam expander is contrasted with aspheric homogenizer, and the transmitting efficiency of terminal with aspheric homogenizer can be improved by 11.1% under the same condition.

**Key words** optical communications; space laser communication; aspheric surface; beam shaping; beam collimation

**OCIS codes** 060.4510; 060.2605; 060.1155

## 1 引言

空间激光通信是指利用激光束作为载波在空间(陆地或外太空)直接进行数据、语音、图像信息传送的一种技术,具有抗干扰能力强、通信速率高、体积

小、质量小和功耗低等优点<sup>[1-4]</sup>。空间激光通信系统由光机分系统、通信分系统、APT分系统和总控分系统组成。发射端是光机分系统的重要组成部分,对空间激光通信系统的通信距离和通信质量有重要影响。

**收稿日期:** 2018-03-15; **修回日期:** 2018-04-20; **录用日期:** 2018-04-25

**基金项目:** 国家自然科学基金(61701045)、吉林省优秀青年人才基金(20170520163JH)、长春理工大学创新基金(2016·[03])

\* **E-mail:** zhihuamail@foxmail.com

发射端光学天线通常采用同轴两镜反射式望远镜结构,这种结构可以压缩通信束散角,保障远距离通信,同时具有结构简单、体积小等优点。进入光学天线前的光束光强分布服从高斯分布,而望远镜的次镜恰恰将较大部分的中心能量遮挡掉,造成光能大量损失,致使发射端的发射效率较低。为解决这一问题,前人提出了许多办法,包括旋转三棱镜<sup>[5]</sup>、双次镜<sup>[6]</sup>、锥面反射镜<sup>[7]</sup>、离轴三反镜<sup>[8]</sup>、衍射光学元件<sup>[9-10]</sup>及双透镜系统<sup>[11]</sup>等。但这些方法大多存在整形效率不高、系统体积庞大、装调困难或加工复杂等缺点,不能很好地解决这一问题。因此,如何在不断增加终端功耗和体积等前提下,消除次镜遮挡导致的能量损失已成为该领域的研究热点之一<sup>[9]</sup>。随着磁流变抛光法(MRF)技术<sup>[12]</sup>的不断发展,人们可轻易获得精度很高且费用可接受的非球面透镜,从而进行激光光束整形<sup>[13]</sup>。

本文采用两片非球面镜<sup>[14]</sup>替代原有扩束准直系统的球面镜,将入射的高斯光束整形为平顶光束后再输入望远镜,使次镜及其支架遮挡的能量大大降低,从而有效提高发射效率,同时也对光束进行扩束准直。

## 2 基本装置

基于非球面整形镜的空间激光通信终端提高发射效率的基本装置主要包括:激光光源、准直透镜、非球面整形器件和反射式光学天线。该装置的基本工作原理如图1所示。

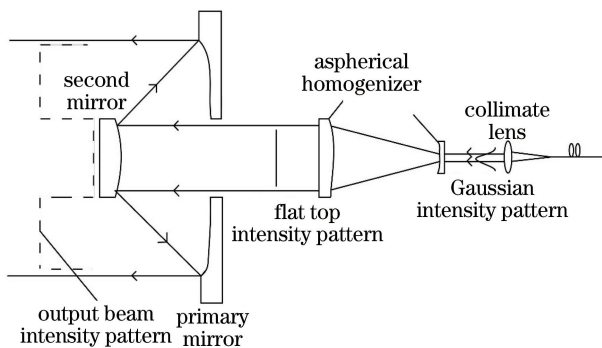


图1 非球面整形镜提高发射效率的工作原理图

Fig. 1 Schematic of aspherical homogenizer used to improve emission efficiency

如图1所示,激光光源从单模光纤输出经过准直透镜准直后,以平行光入射到非球面整形镜上,此时的能量呈圆形高斯分布。该光束经过特殊设计的非球面整形镜后能量分布变为圆形平顶光束,其光强分布均匀。圆形平顶光束经过反射式望远单元放

大后,输出光束仍为圆形平顶光束。次镜及其支架遮挡损失的能量大大减小,系统的发射效率得以提高。在设计非球面整形镜时,需同时考虑整形后的光束能量分布与相位分布,相位分布决定通信发射光束束散角,这是空间激光通信中的重要指标之一。

## 3 非球面镜整形原理

设输入光束在垂直于光轴截面上 $r$ 处的光强分布服从函数 $f(r)$ ,输出 $R$ 处的光强分布服从函数 $g(R)$ 。根据能量守恒定律,输入光束与输出光束能量相等,可得归一化等式

$$2\pi \int_0^{\infty} f(r)r dr = 2\pi \int_0^{\infty} g(R)R dR = 1. \quad (1)$$

输入高斯光束的光强分布为

$$f_G(r) = \frac{2}{\pi\omega_0^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (2)$$

式中: $\omega_0$ 为束腰半径。

假设输出面光强均匀分布为

$$g(R) = a, \quad (3)$$

式中: $a$ 为常数,其值依输出面口径而定。

如图2所示,引入的坐标 $(r, z)$ 与 $(R, Z)$ 分别为两非球面镜上的坐标,其中 $r, R$ 分别为光线在两个面上的投射高度, $z(r), Z(R)$ 分别为两非球面的矢高。对于输入面与输出面,根据能量守恒定律,有

$$\int_0^r f(x)x dx = \int_0^R g(x)x dx. \quad (4)$$

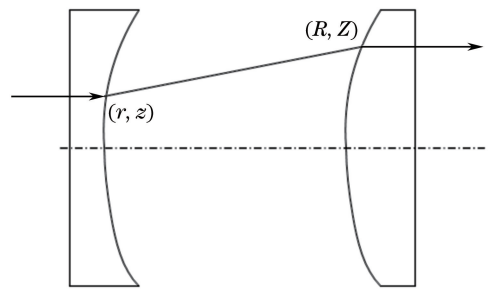


图2 非球面整形镜结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of aspherical homogenizer

根据(4)式,可以求得在两个面上投射高度的关系式 $R=h(r)$ ,该式直接关系到输出面上的能量分布情况,也是求非球面镜的截面曲线函数表达式的输入参数。

$R=h(r)$ 只能给出数值解,由于等式两边都是单调的连续递增函数,对于任意 $r$ 值,只能得到唯一数值解 $R$ ,进而可以得到 $h(r)$ 。对于 $r=h^{-1}(R)$ ,将(2)式代入(4)式后对等式左边进行积分,再整理得

$$r = h^{-1}(R) =$$

$$\sqrt{-\frac{\omega_0^2}{2} \ln[1 - 2\pi \int_0^R g(x) x dx]}. \quad (5)$$

根据光线追踪函数<sup>[15]</sup>,可以得到两个非球面镜的截面曲线的函数表达式,即

$$z(r) = \int_0^r \left[ (n^2 - 1) + \left| \frac{(n-1)d}{h(x) - x} \right| \right]^{-1/2} dx, \quad (6)$$

$$Z(R) = \int_0^R \left[ (n^2 - 1) + \left| \frac{(n-1)d}{h^{-1}(x) - x} \right| \right]^{-1/2} dx, \quad (7)$$

式中: $n$ 为镜片折射率; $d$ 为镜片间距。分别将 $R=h(r)$ , $r=h^{-1}(R)$ 的数值关系代入(6)式、(7)式,即可得到 $z(r)$ , $Z(R)$ 的数值解。

## 4 设计实例

因为系统为无焦系统,且需利于球差校正,故选取倒置两片式伽利略型结构。入射光束直径为3 mm,出射光束直径为12 mm,激光波长为1550 nm,两片透镜间的空气间隔 $d=40$  mm,两片透镜的玻璃材料均选用BK7。输入高斯光束的束腰半径为1 mm,可以计算出输入的总功率 $P_{in}=0.9889$  W,进而求得输出面上的平均光强值 $a=0.008744$  W·mm<sup>-2</sup>。输入面和输出面上的光强分布已知,利用MATLAB数学软件求得数值解 $R=h(r)$ 及 $r=h^{-1}(R)$ ,分别代入(6)式及(7)式即可得到 $z(r)$ , $Z(R)$ 的数值解。

两个表面都采用高阶偶次非球面<sup>[16]</sup>,表达式为

$$z(r) = \frac{c_1 r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K_1) c_1^2 r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_3 r^4 + \alpha_5 r^6 + \alpha_7 r^8 + \alpha_9 r^{10} + \alpha_{11} r^{12} + \alpha_{13} r^{14} + \alpha_{15} r^{16}, \quad (8)$$

$$Z(R) = \frac{c_2 R^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K_2) c_2^2 R^2}} + \beta_1 R^2 + \beta_3 R^4 + \beta_5 R^6 + \beta_7 R^8 + \beta_9 R^{10} + \beta_{11} R^{12} + \beta_{13} R^{14} + \beta_{15} R^{16}, \quad (9)$$

式中: $c_1, K_1$ 为第一片非球面二次曲面参数; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8$ 分别为第一片非球面二次曲面参数的高次项系数,取值分别为0.1858, -0.06069, 0.02407,  $-1.03 \times 10^{-2}$ ,  $4.17 \times 10^{-3}$ ,  $-1.31 \times 10^{-3}$ ,  $2.58 \times 10^{-4}$ ,  $-2.28 \times 10^{-5}$ ;  $c_2, K_2$ 为第二片非球面二次曲面参数; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8$ 分别为第二片非球面二次曲面参数的高次项系数,取值分别为0.02175,  $-1.26 \times 10^{-5}$ ,  $-1.21 \times 10^{-6}$ ,  $4.87 \times 10^{-8}$ ,  $-7.82 \times 10^{-10}$ , 0, 0, 0。为了降低拟合难度,置 $c_1=0, K_1=0, c_2=0, K_2=0$ ,利用MATLAB将(8)式、(9)式拟合为 $z(r)$ , $Z(R)$ 的数

值解,求得两个非球面的高次项系数值。

图3为光学系统的结构图,第一片平凹透镜将直径为3 mm的入射圆形高斯光束平摊到输出透镜上,第二片正光焦度的平凸透镜将光束准直以12 mm的口径出射。在图中可以明显看出,入射面中心光线密集、边缘稀疏,输出面上的光线分布均匀,基本上达到了光束整形的目的。

图4为出射光束在输出面上 $x$ 轴方向的光强分布。横轴为光斑尺寸,纵轴为光照度。可以看出,经过整形的光强分布近似为均匀分布。

图5为光学系统点列图,单位是毫弧度。从图中可以看出,光束大部分都在艾里斑以内,经过非球面镜整形后有很好的准直效果,均方根(RMS)半径值为1.216 mrad,几何半径值为2.293 mrad。

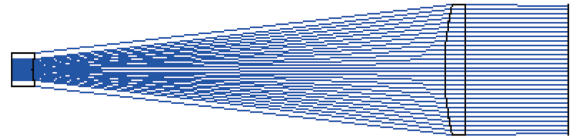


图3 光学系统结构图

Fig. 3 Optical system structure diagram

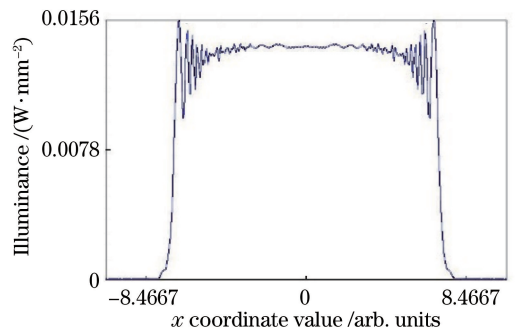


图4 出射光束

Fig. 4 Exit beam

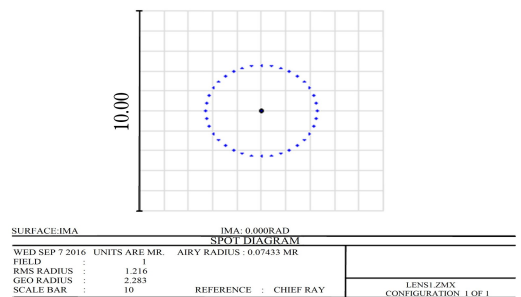


图5 光学系统点列图

Fig. 5 Spot diagram of optical system

## 5 对比分析

为了更好地看出非球面整形镜对发射效率的提

高效果,将非球面整形镜与球面的扩束镜作对比。图6为传统的准直扩束镜的结构图,图7为输出面沿 $x$ 轴方向的光强分布,可以看出,激光束经过准直扩束之后的光强分布仍为高斯分布。

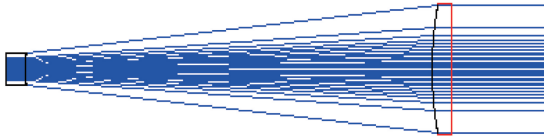


图6 球面准直扩束系统结构图

Fig. 6 Structure diagram of spherical collimating system

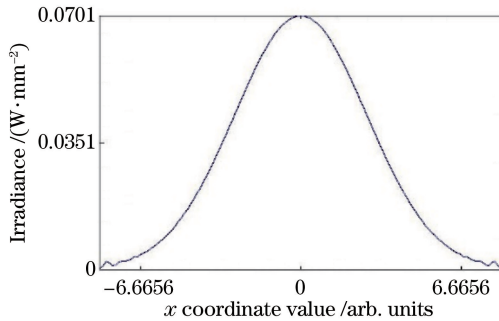


图7 输出面 $x$ 轴方向光强分布

Fig. 7 Intensity distribution on the  $x$  axis

图8为采用球面扩束镜的发射端光学天线结构图,扩束镜后面为正透镜和卡塞格林次镜,正透镜的直径为12 mm,卡塞格林次镜口径20 mm,主镜口径为120 mm。图9为像面沿 $x$ 轴方向的光强分布图,从图中清楚地看出,在次镜直径长度范围内光强为零,这是由次镜遮挡了中心光强较强的部分造成的。

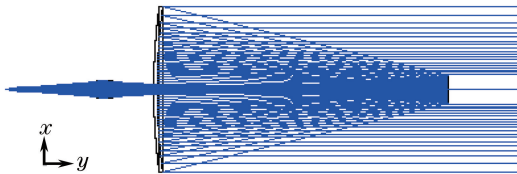


图8 球面扩束镜发射端结构图

Fig. 8 Structure diagram of spherical transmitter terminal

图10为采用非球面扩束镜的完整发射端的光学系统结构图,其他结构与球面扩束镜的发射端一样。图11为像面上沿 $x$ 轴方向的光强分布图,从图中可以看出,除次镜遮挡部分光强为零外,其他部分的光强分布近似均匀。

下面对采用非球面整形镜的空间光通信系统发射效率的提高程度进行仿真分析,采用 TracePro 光学软件分别对两个系统进行仿真分析,得到两个系

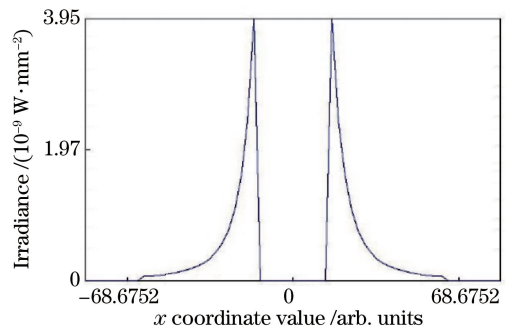


图9 输出面 $x$ 轴方向光强分布

Fig. 9 Intensity distribution on the  $x$  axis

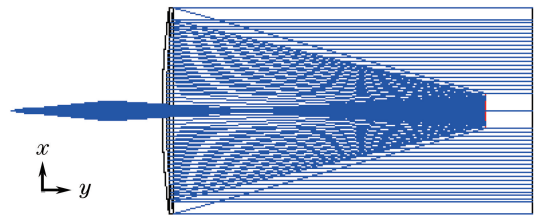


图10 非球面整形镜发射端结构图

Fig. 10 Structure diagram of aspherical transmitter terminal

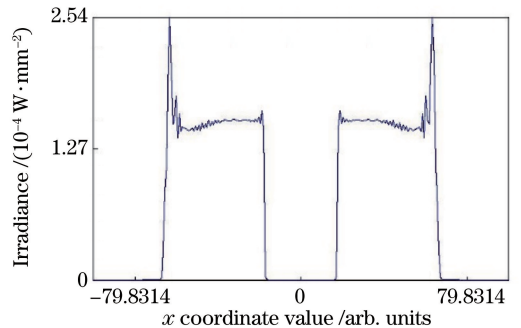


图11 输出面 $x$ 轴方向光强分布

Fig. 11 Intensity distribution on the  $x$  axis

统的输出面处能量分布如图12、图13所示。两个系统的输入总光通量都设置为80 W,从图12可知,采用球面扩束镜的发射端的输出总光通量为64.931 W,可求得发射效率为

$$\eta_s = \frac{64.931}{80} = 81.2\%$$

从图13可知,采用非球面整形镜的发射端的输出总光通量为73.879 W,可以求得发射效率为

$$\eta_{as} = \frac{73.879}{80} = 92.3\%$$

采用非球面整形镜对系统的发射效率提高了11.1%。

## 6 结 论

采用两片非球面整形镜对入射的高斯光束进行



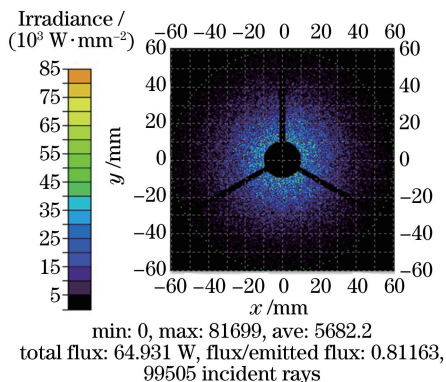


图 12 传统系统输出面上光强分布

Fig. 12 Intensity distribution in image with spherical system

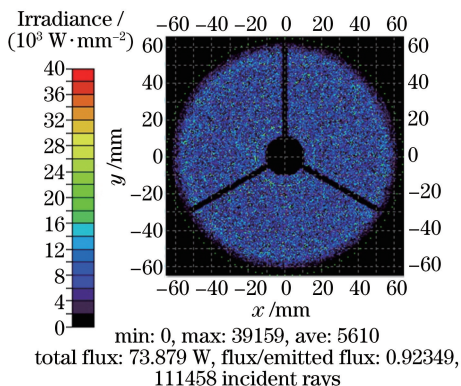


图 13 采用非球面的系统输出面光强分布

Fig. 13 Intensity distribution in image with aspherical system

整形扩束准直,输出面上的光强分布近似均匀,极大地降低了次镜遮挡的能量,提高了发射端的发射效率;同时对光束进行了扩束准直,发散角 $\theta=1.216$  mrad。对比分析了球面镜扩束发射端与非球面整形扩束镜发射端的发射效率,球面镜扩束镜发射端在输出面上的光强分布近似为被遮挡的高斯分布,能量最高部分被遮挡掉;非球面整形扩束镜发射端在输出面上的光强分布近似为被遮挡的均匀分布,极大地降低了次镜遮挡的能量,实现了预期的设计目标,对系统发射效率有 11.1% 的提升。随着磁流变抛光法等非球面加工技术的不断发展,非球面镜应用越来越广泛,在空间激光通信系统中应用非球面镜提高发射效率切实可行。

### 参 考 文 献

[1] Ke X Z, Xi X L. Introduction to wireless laser communication [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2004: 1-12.  
柯熙政, 席晓莉. 无线激光通信概论 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004: 1-12.

[2] Jiang H L, Tong S F. Space laser communication technology and system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 1-22.  
姜会林, 佟首峰. 空间激光通信技术与系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 1-22.

[3] Li X F. Star laser communication principle and technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 1-46.  
李晓峰. 星地激光通信原理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 1-46.

[4] Tan L Y, Ma J. Satellite optical communication technology [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-30.  
谭丽英, 马晶. 卫星光通信技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-30.

[5] Peters W N, Ledger A M. Techniques for matching laser TEM(00) mode to obscured circular aperture [J]. Applied Optics, 1970, 9(6): 1435-1442.

[6] Christy O D. Dual-secondary mirror Cassegrain optical system: US4439012 [P]. 1984-03-27.

[7] Kong X L, Hao P M. New method to remove central shade for reflecting laser beam expander [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2002, 19(3): 205-209.  
孔祥蕾, 郝沛明. 消除中心遮拦的反射式激光扩束新方案 [J]. 量子电子学报, 2002, 19(3): 205-209.

[8] Chen C W. Re-imaging optical system including refractive and diffractive optical elements: US5287218 [P]. 1994-02-15.

[9] Yu J J, Tan L Y, Ma J, *et al.* A novel method to improve the emission efficiency of satellite optical communication terminal [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(3): 581-586.  
俞建杰, 谭立英, 马晶, 等. 一种提高卫星光通信终端发射效率的新方法 [J]. 中国激光, 2009, 36(3): 581-586.

[10] Lin Y, Hu J S, Wu K N. Algorithm for the design of diffractive optical elements for laser beam shaping [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(9): 1682-1683.  
林勇, 胡家升, 吴克难. 一种用于光束整形的衍射光学元件设计算法 [J]. 光学学报, 2007, 27(9): 1682-1683.

[11] Li K, Shi P, Zhang X B, *et al.* Design and preparation of diffraction optical element in dual lens system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 1972-1977.  
李珂, 石鹏, 张晓波, 等. 双透镜系统光束整形元件的设计制作 [J]. 中国激光, 2010, 37(8): 1972-1977.

- [12] Golini D, Kordonski W I, Dumas P, *et al.* Magnetorheological finishing (MRF) in commercial precision optics manufacturing [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3782: 80-91.
- [13] Peng Y M, Su Z P. Design of freeform surface lens for shaping divergent laser beam [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0522003.  
彭亚蒙, 苏宙平. 用于发散激光光束整形的自由曲面透镜设计[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0522003.
- [14] Chen K, Li P X, Chen M, *et al.* Design and analysis of surface parameters of aspheric lenses system converting Gaussian beam to flattop beam [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(3): 032201.  
陈凯, 李平雪, 陈檬, 等. 高斯光束整形为平顶光束的非球面镜系统设计和面形参数分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(3): 032201.
- [15] Gong H P, Lü Z W, Lin D Y. Present status of laser beam spatial shaping [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(9): 2-5.  
龚华平, 吕志伟, 林殿阳. 激光束空间整形的研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(9): 2-5.
- [16] Pan J H. Optical aspheric design, processing and inspection [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004: 3-9.  
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 3-9.