

# 激光引信非球面光学准直透镜设计

张祥金 甘霖 冯颖

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

**摘要** 激光近炸引信中由于半导体激光器发射的激光束具有较大不对称的发散角,会导致光束能量发散和作用距离偏近。通过分析半导体激光器的光场特性,结合半导体激光器的远场发散角特点,采用单级非球面透镜对光束进行准直和整形,并利用非球面光学设计理论和 Zemax 光学设计软件,设计出了激光定距系统单级非球面发射准直透镜。仿真结果表明,设计出的发射系统单级非球面准直透镜,两个方向的发散角分别被压缩至 5 mrad 和 2 mrad,有效提高了半导体激光器发射光束整形质量,减小了发射光束发散角,并增加了系统作用距离。

**关键词** 激光光学;准直系统;非球面光学设计;发散角

**中图分类号** TJ43 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s216002

## A Single Aspheric Collimating Lens of the Laser Proximity Fuze

Zhang Xiangjin Gan Lin Feng Ying

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** This paper investigates the problems of the large beam divergence angle and the short detection range in the launch system of laser proximity fuze. By analyzing the semiconductor lasers' characteristics of the optical field and the characteristics of laser's far-field divergence angle, according to aspheric optical design theory, single aspheric collimation lens is designed by using Zemax. The simulation results indicate that the laser beam divergences are compressed to 5 mrad and 2 mrad respectively. The quality of the beam shaping increases effectively, and the emission beam divergence angle is reduced as well as the system range is improved.

**Key words** laser optics; collimation system; aspheric optical design; divergence angle

**OCIS codes** 140.3300; 140.5960; 140.329

## 1 引言

激光引信是一种利用激光束主动探测目标的光学引信。相对于传统的光电引信,激光引信具有主动性好、方向性强和不易受电子干扰等优点。半导体激光器由于具有体积小、质量轻、功耗低、可直接调制等优点,广泛应用于激光制导、激光雷达和激光通信等方面。1980 年以来,美国 AGM-88 型高速反雷达导弹、美国和瑞士联合研制的 ADATS 防空-反坦克导弹,美国 M16 步枪发射的枪榴弹,以及瑞典 RDS-70 导弹,法国“马特拉导弹”都采用了半导体激光引信<sup>[1~3]</sup>。

然而,半导体激光器出射光束并非严格意义上

的高斯光束,在垂直和平行结平面方向的发散角差别较大(垂直结平面方向发散角  $\theta_{\perp}$  为  $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ,平行结平面方向的发散角  $\theta_{\parallel}$  为  $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ),光束的不对称性严重限制了作用距离,因此需对其进行准直。本文提出了采用非球面光学系统对引信发射光束进行准直和整形。

## 2 半导体激光器光场特性

一般半导体激光器有源区为  $100\sim 400\ \mu\text{m}$  和  $10\sim 50\ \mu\text{m}$ ,由于夫琅禾费衍射效应导致发散角增大,其光场分布如图 1 所示。

各点的光强可表示为

收稿日期: 2012-05-20; 收到修改稿日期: 2012-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(60908037)和国家部委基金(9140A05070508BQ0245)资助课题。

作者简介: 张祥金(1970—),男,博士,讲师,主要从事激光近炸引信方面的研究。E-mail: z\_x\_j888@163.com

$$E(x, y, z) = E_0 \left( \frac{w_{0x}}{w_x} \times \frac{w_{0y}}{w_y} \right)^{1/2} \exp \left\{ - \left[ \frac{x^2}{w_x^2(z)} + \frac{y^2}{w_y^2(z)} \right] - \frac{iM}{2} \left[ \frac{x^2}{\rho_x(z)} + \frac{y^2}{\rho_y(z)} \right] - i[Mz - \gamma(z)] \right\}, \quad (1)$$

式中,  $w_{0x}$  为光束在  $x$ - $z$  平面上的束腰;  $w_{0y}$  为光束在  $y$ - $z$  平面上的束腰;  $\rho_x(z)$  为  $x$ - $z$  平面上光束的等相面曲率半径;  $\rho_y(z)$  为  $y$ - $z$  平面上光束的等相面曲率半径;  $M$  为波数。

$$w_j^2 = w_{0j}^2 \left\{ 1 + \left[ \frac{\lambda(z - z_{0j})}{\pi w_{0j}^2} \right]^2 \right\}, \quad (j = x, y), \quad (2)$$

$$\rho_j = (z - z_{0j}) \left\{ 1 + \left[ \frac{\pi w_{0j}^2}{\lambda(z - z_{0j})} \right]^2 \right\}, \quad (j = x, y), \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \left\{ \arctan \left[ \frac{\lambda(z - z_{0x})}{\pi w_{0x}^2} \right] + \arctan \left[ \frac{\lambda(z - z_{0y})}{\pi w_{0y}^2} \right] \right\}, \quad (j = x, y), \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为半导体激光器波长。

仿椭圆形高斯光束, 定义光斑是由所有满足

$$|E(x, y, z)| = \frac{1}{e} |E(0, 0, z)|, \quad (5)$$

的光点组成, 则光斑方程为

$$\frac{x^2}{w_x^2(z)} + \frac{y^2}{w_y^2(z)} = 1. \quad (6)$$

即在每个垂直于  $z$  轴的界面上, 光斑形状为椭圆, 椭圆的长、短半轴分别为  $w_x(z)$ 、 $w_y(z)$ 。椭圆高斯光束在  $x$ - $z$  平面和  $y$ - $z$  平面上的远场发散角分别为

$$\begin{cases} \Phi_x = \frac{\lambda}{\pi w_{0x}} \\ \Phi_y = \frac{\lambda}{\pi w_{0y}} \end{cases}. \quad (7)$$

该发散角为半导体激光器半峰全宽(FWHM)发散角, 即所定义的光束能量分布占总能量的 50%, 而按  $1/e^2$  光强分布处定义的光束能量占总能量的 86%。因此, 一般为充分利用能量, 在设计准直整形系统时将高斯光束光强  $1/e^2$  处定义为发散角。

假设半导体激光器的 FWHM 发散角为  $\Phi_{x,y}$ ,  $1/e^2$  光强处对应的发散角为  $\theta_{x,y}$ , 二者间转换关系

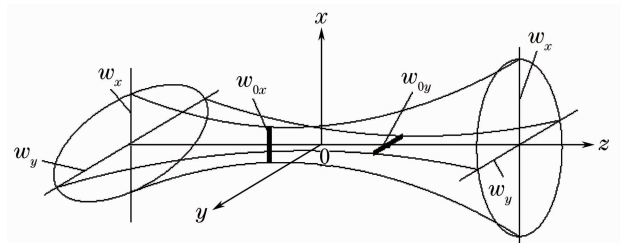


图 1 半导体激光器椭圆高斯光束光场分布

Fig. 1 Light field distribution of elliptical Gaussian beam from semiconductor laser

为<sup>[4]</sup>

$$\tan \frac{\theta_{x,y}}{2} = \sqrt{\frac{2}{\ln 2}} \tan \frac{\Phi_{x,y}}{2} = 1.6986 \tan \frac{\Phi_{x,y}}{2}. \quad (8)$$

通常,  $w_{0x} \neq w_{0y}$ 、 $\Phi_{0x} \neq \Phi_{0y}$ 、 $\theta_{0x} \neq \theta_{0y}$ , 即半导体激光器的远场发散角各向异性。椭圆的长、短半轴分别对应于弧矢方向(平行于结平面)和子午方向(垂直于结平面)。弧矢方向光束发散角一般为  $10^\circ \sim 20^\circ$ , 子午方向光束发散角一般为  $30^\circ \sim 40^\circ$ 。两个方向上光束质量的不均衡性使半导体激光器应用起来较为困难, 也降低了激光器与光学镜片的耦合效率。

光学耦合系统的主要作用是对半导体激光器输出的大发散角椭圆高斯光束进行准直和整形, 压缩光束发散角或束腰半径, 改善远场对称性和光斑形状<sup>[5]</sup>。图 2 为水平方向和垂直方向远场光斑辐射能量随角度变化的分布图, 其代表了激光模式的角发散情况<sup>[6]</sup>。

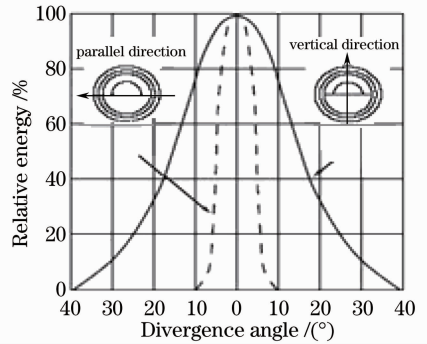


图 2 辐射能量随角度分布图

Fig. 2 Radiation energy distribution with angle

由于这里主要要求光学系统的耦合效率高, 以获得更远的激光传输距离; 高耦合效率的系统必须具有良好的工艺特性, 制作方便、结构简单、微型化、强度高。虽然正交柱面透镜具有较好的准直效果, 但在体积严格受限的引信中不可取。非球面曲面由于曲率半径不同, 可有效矫正球面像差。采用非球面透镜进行准直, 与传统球面镜相比, 不但能有效改善像质, 还能有效减少透镜数量, 减小系统体积和重量, 实现光路的轻量化、小型化<sup>[7~9]</sup>。因此拟采用单级非球面透镜对光束进行准直和整形。

### 3 非球面光学方程和像差

设光轴为  $z$  轴, 即非球面的对称轴, 坐标原点取

在顶点。非球面的标准方程为

$$Z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+K)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N A_{2i}r^{2i}, \quad (9)$$

式中,  $r^2 = x^2 + y^2$ ;  $Z$  为镜面的凹陷度;  $r$  为镜面的孔径半径;  $c$  为曲率半径的倒数;  $A$  为  $r$  的各阶系数;  $K$  为曲面的圆锥系数。

当  $A=0$  时, (9) 式转化为二次曲面方程

$$Z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+K)c^2r^2}}. \quad (10)$$

非球面像差系数可看作是在球面系数上增加非球面像差系数的增量, 将光学系统中的部分球面修改为非球面后, 初级像差系数的表达式为

$$\begin{cases} \sum S_1 = \sum h_p + \sum h^4 K, \\ \sum S_2 = \sum h_p P - J \sum W + \sum h^3 h_p K, \\ \sum S_3 = \sum \frac{h_p^2}{h} P - 2J \sum_h \frac{h_p}{h} W + J^2 \sum \phi + h^2 h_p^2 K, \\ \sum S_4 = J^2 \sum \frac{\phi}{h}, \\ \sum S_5 = \frac{h_p^2}{h^2} P - 3J \sum \frac{h_p}{h} W + \\ J^2 \sum \frac{h_p \phi}{h} \left(3 + \frac{1}{n}\right) + \sum h h_p^3 K, \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $h$  与  $h_p$  分别为轴上光线和主光线在非球面上的入射高度;  $P$ 、 $W$  为基本像差参量;  $\phi$  为光焦度;  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$  分别为初级球差、彗差、像散、场曲、畸变系数。

非球面的像差校正量为

$$\begin{cases} \Delta S_1 = h^4 L, \\ \Delta S_2 = h^3 h_p L, \\ \Delta S_3 = h^2 h_p^2 L, \\ \Delta S_4 = 0, \\ \Delta S_5 = h h_p^3 L. \end{cases} \quad (12)$$

式中  $L = (n - n')e^2/r_0^3$ ;  $e^2$  为二次曲面的离心率;  $r_0$  为非球面顶点曲率半径;  $n$ 、 $n'$  分别为光线入射前、后的折射率。适当调整非球面透镜与光阑距离, 可控制多种像差。若非球面设置于光阑处, 只能单独控制像差; 若距光阑一定距离, 能控制彗差、像散、畸变等<sup>[10~13]</sup>。

#### 4 基于 Zemax 光学设计软件的非球面准直整形透镜设计

采用的半导体激光器波长为 910 nm, 发光面积为  $40 \mu\text{m} \times 320 \mu\text{m}$ , 发散角为  $25^\circ \times 8^\circ$ 。使用 Zemax 光学设计软件针对该半导体激光器设计准直光学系统, 透镜材料为聚碳酸酯 (PC), 设计出的准直透镜焦距为 16 mm, 通光孔径为  $\phi 10 \text{ mm}$ , 透射率为 0.82。发射模块结构如图 3 所示。



图 3 接收透镜结构图

Fig. 3 Transmitter module structure

点列图、发射模块横向像差曲线分别如图 4、图 5 所示, 准直前、后二维远场光斑和远场光斑截面分别如图 6、7 所示。非球面像差如表 1 所示。

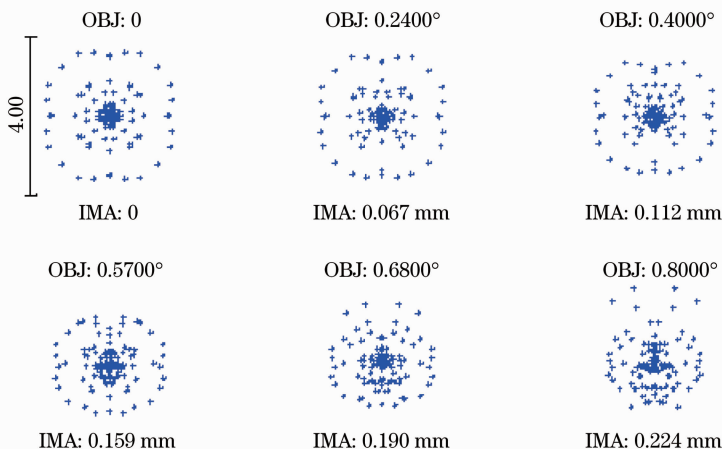


图 4 发射模块点列图

Fig. 4 Spot diagrams of the transmitter module

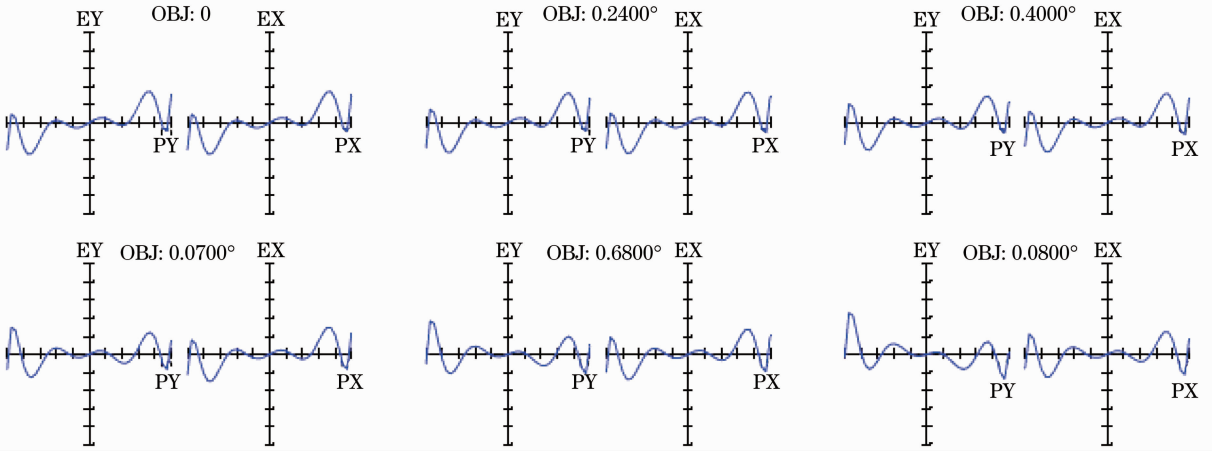


图 5 发射模块像差图

Fig. 5 Aberration maps of the transmitter module

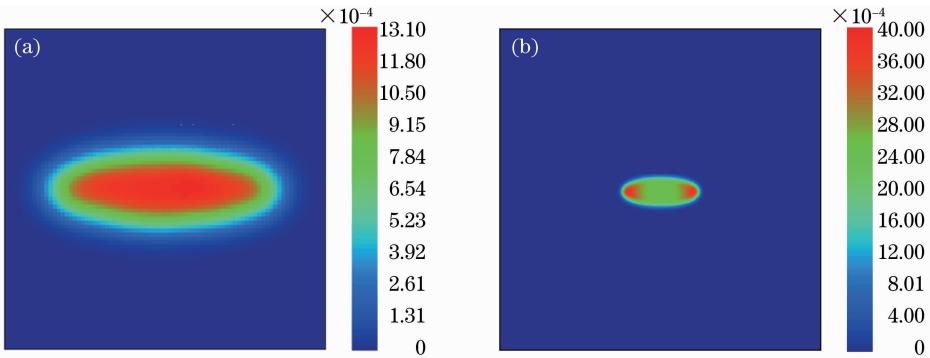


图 6 二维远场光斑。(a)准直前;(b)准直后

Fig. 6 Two-dimensional far-field spot. (a) Before collimating; (b) after collimating

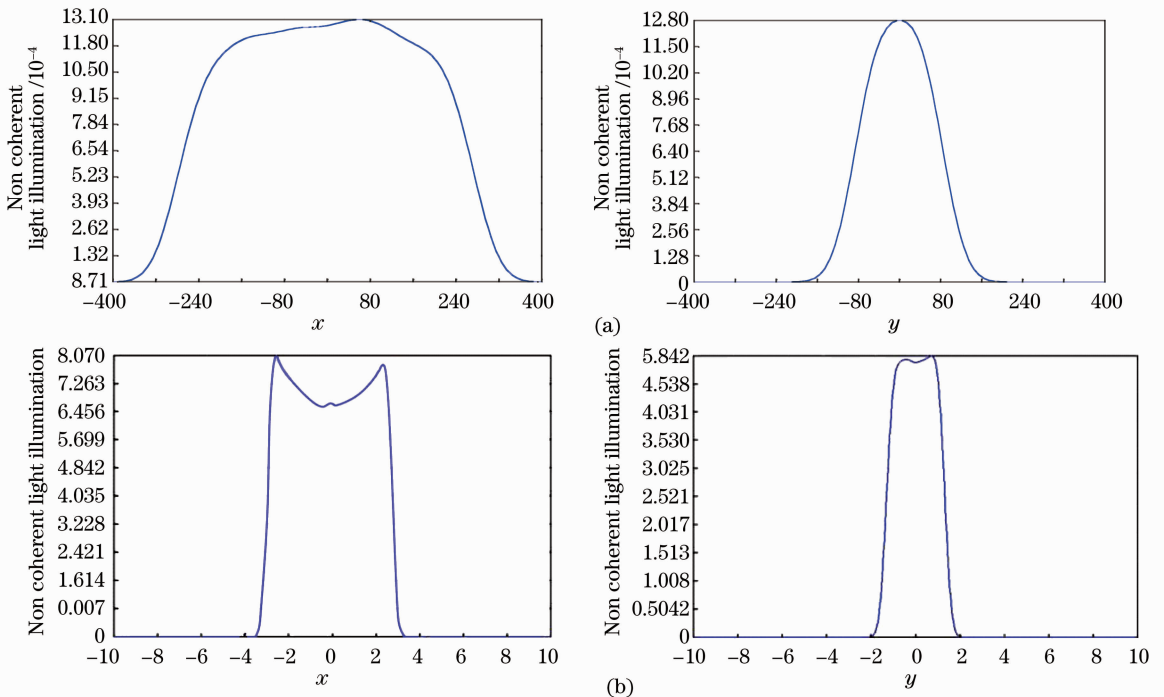


图 7 远场光斑截面图。(a)准直前;(b)准直后

Fig. 7 Cross section diagram of the far field spot. (a) Before collimating; (b) after collimating

表1 非球面准直透镜像差

Table 1 Aberration of the aspheric collimation lens

| Surface | Spherically aberrated | Coma      | Astigmatism | Field curvature | Distortion | Axial chromatic aberration | Transverse chromatic aberration |
|---------|-----------------------|-----------|-------------|-----------------|------------|----------------------------|---------------------------------|
| 1       | -0.040840             | 0.003484  | -0.000006   | 0.000141        | 0.000003   | 0.000000                   | 0.000000                        |
| STO     | 0.068940              | -0.003705 | 0.000199    | 0.000020        | -0.000012  | 0                          | 0                               |
| IMA     | 0                     | 0         | 0           | 0               | 0          | 0                          | 0                               |
| TOT     | 0.028100              | -0.000221 | 0.000193    | 0.000162        | -0.000009  | 0                          | 0                               |

由计算结果可知,系统像质得到有效改善,光斑更均匀。

发射模块弧矢方向和子午方向的发散角分别为

$$\begin{cases} 2\theta_{//} = 2 \text{ mrad} \\ 2\theta_{\perp} = 5 \text{ mrad} \end{cases} \quad (13)$$

## 5 结 论

光学软件仿真结果表明,根据非球面光学设计理论结合半导体激光器远场光斑特性设计出的发射系统单级非球面准直透镜,它的光束发散角分别被压缩至5 mrad和2 mrad,系统像质得到有效改善,光斑更均匀,同时减少了传统球面镜片数量,发射模块结构更加紧凑,尺寸减小,重量减轻,有效提高了能量利用率、系统作用距离和探测精度。

## 参 考 文 献

- Guo Jing, Zhang He, Zhang Xiangjin *et al.*. Avalanche photodiode detecting technology for laser fuze[J]. *Journal of Detection and Control*, 2010, **32**(1): 77~79  
郭靖,张河,张祥金等.激光引信雪崩二极管光电探测[J].探测与控制学报,2010, **32**(1): 77~79
- Wang De, Li Xueqian. New progress in semiconductor lasers and their applications[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(3): 279~283  
王德,李学千.半导体激光器的最新进展及其应用现状[J].光学精密工程,2001, **9**(3): 279~283
- Ding Zhizhong, Wang Keyi, Zhan Zhenxian. Application of aspherical liquid lens in laser diode beam shaping[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(4): 623~626  
丁志忠,王克逸,詹珍贤.非球面液滴透镜在LD光束整形中的应用[J].红外与激光工程,2010, **39**(4): 623~626
- Zhang Le. Study on Emitting and Receiving Optical Systems of Lidar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004  
张乐.激光雷达发射和接收光学系统研究[D].长沙:国防科学技术大学,2004

- Li Ji, Zhang Yi, Qi Jun *et al.*. Application of DDS technology in the digital phase range finder[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2003, **20**(2): 213~217  
李季,张毅,戚俊等. DDS技术在数字激光相位测距仪中的应用[J].量子电子学报,2003, **20**(2): 213~217
- Ji Tiegang. Penetrators with Cross-Linking Based on Laser Information Given Fuzing Control Technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005  
纪铁刚.基于激光信息交联的穿甲弹用定距起爆控制技术研究[D].南京:南京理工大学,2005
- Lü Xiaoling. Study on the Receiver of Semiconductor Laser Range Finder[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006  
吕晓玲.半导体激光测距接收系统研究[D].长春:长春理工大学,2006
- Yang Shengjie. Design of object lens for helmet-mounted night vision goggles with high-order plastic aspherical surfaces [J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, **16**(1): 80~83  
杨胜杰.含高次塑料非球面的头盔微光夜视物镜设计[J].电光与控制,2009, **16**(1): 80~83
- X. Q. Zhou, N. K. Bryan, K. S. Seong. Single aspherical lens for deastigmatism, collimation, and circularization of a laser beam [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(7): 1148~1151
- Yu Xiuying, Wang Jiang, Jiang Yong *et al.*. Aspheric collimating and shaping element design for diode laser range finders [J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, **16**(5): 71~73  
喻秀英,王江,姜勇等.半导体激光测距机非球面准直整形元件的设计[J].电光与控制,2009, **16**(5): 71~73
- Gou Zhiyong, Wang Jiang, Wang Chu. The summary of aspheric optical design technology[J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(3): 1~2  
勾志勇,王江,王楚.非球面光学设计技术综述[J].激光杂志,2006, **27**(3): 1~2
- Gou Zhiyong, Wang Jiang, Wang Lei. Diffraction-limited aspheric collimation lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, **27**(6): 528~530  
勾志勇,王江,王磊.衍射极限非球面准直透镜[J].应用光学,2006, **27**(6): 528~530
- Hao Peiming, Yuan Liyin, Li Kexin. The design and development of pairs of non-spherical lens [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, **28**(4): 111~114  
郝沛明,袁立银,李可新.双非球面透镜的设计与研制[J].应用光学,2007, **28**(4): 111~114