

文章编号: 0253-2239(2006)01-0086-5

## 猫眼激光谐振腔横模选择特性研究\*

许志广 张书练 梁 栋 杜文华 李 岩 朱 钧

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

**摘要:** 将猫眼逆向器作为激光谐振腔的一个腔镜组成猫眼谐振腔。介绍了猫眼逆向器的结构, 阐述了猫眼逆向器中凸透镜和凹面镜的间距改变时猫眼曲率半径的相应变化, 并通过有效地控制该间距来选择激光横模, 从而保证基横模输出。在激光谐振腔衍射积分方程的基础上, 运用牛顿-柯特斯数学方法, 对不同参量下的猫眼激光谐振腔的横模状况进行分析, 得出了各阶横模对应的特征值和功率损耗, 计算出保证基横模输出的参量, 并与实验对比, 得到了一致的结论, 为激光器的横模选择和控制提供了一种简便易行的新方法。

**关键词:** 激光器; 氦氖气体激光器; 猫眼谐振腔; 横模选择; 猫眼逆向器

中图分类号: TN248.2 文献标识码: A

## Research of the Laser Transverse Mode Modulated by the Cat's Eye Resonator

Xu Zhiguang Zhang Shulian Liang Dong Du Wenhua Li Yan Zhu Jun

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** The cat's eye resonator is designed with a cat's eye reflector as the resonator mirror. The configuration of the cat's eye reflector is described. The relation between the focal length of the cat's eye reflector and the distance between the convex lens and the concave mirror of the cat's eye reflector is indicated. Through controlling that distance in the cat's eye reflector, laser transverse mode is selected to ensure fundamental transverse mode output. In Newton-Cotes method based on the diffractive integral equation of the cavity, laser transverse mode of the cat's eye cavity laser under variable parameters is analyzed. The eigenvalue  $\eta_{mn}$  and power loss which every transverse mode corresponds with are calculated. The parameter assuring fundamental transverse mode output obtained is well accordant to the experimental results. Therefore, a new convenient on-line means for the control and selection of the laser transverse mode is discovered.

**Key words:** lasers; He-Ne gas laser; cat's eye resonator; transverse mode selection; cat's eye reflector

### 1 引 言

激光横模选择的方法较多, 可以使用专门的选模器件如小孔光阑<sup>[1]</sup>、高斯选择器、法布里-珀罗干涉型选择器、理想选择器等, 也可以采用新型激光谐振腔如非稳腔<sup>[2]</sup>、直角棱镜腔、半共心腔以及非均匀反射腔等。

激光谐振腔由两个反射镜组成, 自激光诞生以来, 激光器大都选用平面镜或凹面镜作为反射镜, 猫眼逆向器作为激光腔镜是近来激光器结构的一个较大变革。Dimakov 等<sup>[3,4]</sup>在 CO<sub>2</sub> 激光器领域里应用猫

眼谐振腔, 显著提高了激光的稳定性, 并使得功率漂移和角度漂移大大减小。Fermigie 等<sup>[5]</sup>曾在半导体激光器里面使用猫眼逆向器, 取得了良好的效果。Li 等<sup>[6]</sup>在 1965 年曾介绍过在氦氖激光器中搭建猫眼谐振腔选择激光横模输出的设想, 其原理是在激光谐振腔中设置两个小孔光阑, 通过改变光阑的位置和孔径来选择横模输出。由于他们是使用小孔光阑选择横模输出的一个办法, 光阑的位置和孔径均需要精确控制, 所以难以应用于实际用的氦氖激光器中。

与 Li 等的构思不同, 我们将猫眼逆向器作为一

\* 国家自然科学基金(50127501, 60178010)资助课题。

作者简介: 许志广(1977~), 山东滨州人, 清华大学精密仪器系博士研究生, 主要从事光学工程方面的研究。

E-mail: xuzhiguang99@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2005-03-04; 收到修改稿日期: 2005-05-23

个完整的光学器件,装配于一个机械结构中,用作激光谐振腔的一个腔镜。当构成猫眼的凸透镜与凹面镜间距变化时,猫眼逆向器的参量会变化,从而导致激光输出横模状态不同,也就是说,通过有效地控制猫眼的凸透镜与凹面镜间距选择激光横模,而保证基横模输出。这种方法简便易行,必要时可以在线、及时、有效地调整猫眼逆向器的参量而达到选择横模的目的。

常用的猫眼逆向器有两种:一种是由两个半球组成<sup>[7,8]</sup>,另一种是由一个凸透镜与一个凹面镜组成<sup>[9]</sup>,它们都可以大大提高激光器的稳定性,本文讨论的逆向器是指后者。对于各种类型的激光谐振腔,其横模的准确计算已有很多研究,而猫眼逆向器这一全新光学结构在激光器内使用后的横模计算较少人涉及,我们用牛顿-柯特斯数值计算方法解决了这个问题。

## 2 猫眼逆向器的参量变化

图 1 所示的是猫眼逆向器作为一个谐振腔镜的半外腔氦氖激光器简图。其中 T 为激光增益管,其一端为激光输出境  $S_1$  (平面或凹面镜),另一端为增透窗片 W。 $S_2$  为猫眼逆向器,由一个凸透镜(两面镀膜增透膜)和一个凹面反射镜(镀高反射膜)组成。在轴对称的光学系统中,仅研究近轴光线正入射的情况下,可以把猫眼逆向器简化为一个反射镜。在当凸透镜和凹面镜的间距连续变化时,该反射镜的曲率半径会连续变化。例如:实验中凸透镜焦距为 18.80 mm,凹面镜曲率半径为 18.80 mm,当凸透镜和凹面镜间距变化时逆向器的曲率半径的变化规律(理论的和实验测的两条曲线)如图 2 所示。从图中

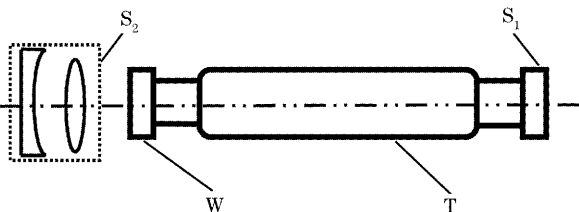


图 1 猫眼逆向器做腔镜的新型半外腔激光器

Fig. 1 Novel half-external He-Ne laser with a cat's eye reflector as the resonator mirror

可见,两者间距的较小变化就会带来猫眼曲率半径的巨大变化,这是用它来选择横模状态的基础。

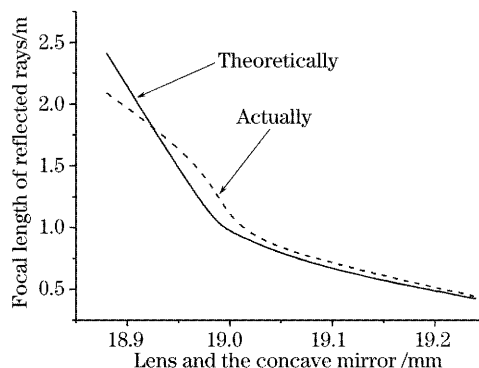


图 2 凸透镜与凹面镜间距的变化引起的猫眼曲率半径的相应改变

Fig. 2 Relation between the focal length of the cat's eye reflector and the distance between the convex lens and the concave mirror

## 3 猫眼逆向器激光谐振腔二维衍射积分方程

要获得功率密度分布较好的激光光束,主要的方法是进行横模的选择。横模指垂直于光轴截面上的光场分布  $F(x, y)$ 。在实际使用中,大多数情况都希望激光器能保证基横模输出。在激光腔形成稳定场分布的情况下,一个光场分布经过两个反射镜后,实现光场分布的“自再现”,即各点的振幅按同样的比例衰减,相位发生同样大小的滞后。

激光功率密度分布的传统分析方法有多次衍射积分迭代法、变分法、积分核展开法、微扰法、等价微分方程法等。多次衍射积分迭代法只适用于小菲涅耳数情况下低阶模的分析,其他几种方法只能对某些特殊开腔进行分析且会导致不同程度的误差。而我们采用的牛顿-柯特斯的数值积分计算方法更具普适性。

假设两反射镜的几何尺寸分别为  $2a_1 \times 2b_1, 2a_2 \times 2b_2$ , 曲率半径分别为  $R_1, R_2$ 。两反射镜轴上间距为  $L$ , 当反射镜  $S_1$  上的光场分布为  $F_m(x_1, y_1)$ , 当  $F_m(x_1, y_1) = f_m(x_1)g_n(y_1)$  时, 反射镜  $S_2$  上的光场分布  $F'_m(x_2, y_2)$  [ $F'_m(x_2, y_2) = f'_m(x_2)g'_n(y_2)$ ] 满足二维腔的衍射积分方程<sup>[10]</sup>:

$$\lambda'_m \lambda'_n f'_m(x_2) g'_n(y_2) = \int_{-a_1}^{a_1} \int_{-b_1}^{b_1} \frac{ik}{2\pi R} \exp(-ikR) f_m(x_1) g_n(y_1) dx_1 dy_1, \quad (1)$$

其中  $k = 2\pi/\lambda$  为波矢的模;  $R$  为反射面  $S_1$  上点  $(x_1, y_1)$  到  $S_2$  上点  $(x_2, y_2)$  的距离,  $\lambda'_m$  为  $\lambda'_n$  复特征值. 将衍射积分方程(1)沿  $x$  和  $y$  方向分解, 可以得到以下的特征方程

$$\lambda'_m f'_m(x_2) = \sqrt{\frac{i}{2\pi}} \exp(-ikL/2) \int_{-\sqrt{C_x}}^{\sqrt{C_x}} \exp(ix_1 x_2) \exp[-i(G_{1x} x_1^2 + G_{2x} x_2^2)/2] f_m(x_1) dx_1, \quad (2)$$

$$\lambda'_n f'_n(y_2) = \sqrt{\frac{i}{2\pi}} \exp(-ikL/2) \int_{-\sqrt{C_y}}^{\sqrt{C_y}} \exp(iy_1 y_2) \exp[-i(G_{1y} y_1^2 + G_{2y} y_2^2)/2] g_n(y_1) dy_1, \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad C_x = 2\pi F_x, \quad F_x = a_1 a_2 / (\lambda L), \quad G_{1x} = (a_1/a_2) g_1, \quad G_{2x} = (a_2/a_1) g_2, \quad (4)$$

$$C_y = 2\pi F_y, \quad F_y = b_1 b_2 / (\lambda L), \quad G_{1y} = (b_1/b_2) g_1, \quad G_{2y} = (b_2/b_1) g_2, \quad (5)$$

(4) 式、(5) 式中,  $F_x$ 、 $F_y$  分别表示  $x$ 、 $y$  方向的菲涅耳数,  $\lambda$  为激光波长,  $g_1$  和  $g_2$  为球面腔的特征参量, 其定义为

$$g_1 = 1 - L/R_1, \quad g_2 = 1 - L/R_2. \quad (6)$$

同理有

$$\lambda_m f_m(x_1) = \sqrt{\frac{i}{2\pi}} \exp(-ikL/2) \int_{-\sqrt{C_x}}^{\sqrt{C_x}} \exp(ix_1 x_2) \exp[-i(G_{1x} x_1^2 + G_{2x} x_2^2)/2] f'_m(x_2) dx_2, \quad (7)$$

$$\lambda_n g_n(y_1) = \sqrt{\frac{i}{2\pi}} \exp(-ikL/2) \int_{-\sqrt{C_y}}^{\sqrt{C_y}} \exp(iy_1 y_2) \exp[-i(G_{1y} y_1^2 + G_{2y} y_2^2)/2] g'_n(y_2) dy_2. \quad (8)$$

#### 4 二维衍射积分方程的有限矩阵形式<sup>[11]</sup>

以  $x$  方向为例, 将(2)式积分区间  $N$  等分, 令  $x_i = -\sqrt{C_x} + ih_x$ ,  $x_j = -\sqrt{C_x} + jh_x$ ,  $h_x = 2\sqrt{C_x}/N$ ,  $i, j = 0, \dots, N$ .

则(2)式可写成

$$\lambda'_m f'_m(x_i) = \sum_{j=0}^N C_j \frac{h_x f_m(x_j)}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[i\left(\frac{\pi}{4} - \frac{kL}{2} + x_i x_j - \frac{G_{1x}}{2} x_j^2 - \frac{G_{2x}}{2} x_i^2\right)\right], \quad (9)$$

同理, (7)式可写成:

$$\lambda_m f_m(x_j) = \sum_{i=0}^N C_i \frac{h_x f'_m(x_i)}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[i\left(\frac{\pi}{4} - \frac{kL}{2} + x_i x_j - \frac{G_{1x}}{2} x_j^2 - \frac{G_{2x}}{2} x_i^2\right)\right], \quad (10)$$

其中,  $C_j$  和  $C_i$  为柯特斯系数. 令

$$M_{xij} = \frac{h_x C_j}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[i\left(\frac{\pi}{4} - \frac{kL}{2} + x_i x_j - \frac{G_{1x}}{2} x_j^2 - \frac{G_{2x}}{2} x_i^2\right)\right], \quad (11)$$

$$N_{xij} = \frac{h_x C_i}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[i\left(\frac{\pi}{4} - \frac{kL}{2} + x_i x_j - \frac{G_{1x}}{2} x_j^2 - \frac{G_{2x}}{2} x_i^2\right)\right], \quad (12)$$

$$W_{xij} = \sum_{p=0}^N N_{xip} M_{xpj}, \quad (13)$$

记  $\alpha_m = \lambda_m \lambda'_m$ , 由(9)式 ~ (13)式可知激光由反射面  $S_1$  传输到  $S_2$ , 再回到  $S_1$  时的光场分布为

$$\alpha_m f_{m,q+1}(x_i) = \sum_{k=0}^N W_{ik} f_{m,q}(x_k),$$

简记为

$$\alpha_m f_{m,q+1} = W_x f_{m,q}, \quad (14)$$

其中  $q$  表示传输次数. 当  $q$  足够大时, 激光光场分布

在反射面  $S_1$  上自在现, 即

$$f_{m,q+1} = \delta f_{m,q} \quad (15)$$

将(15)式代入(14)式可得

$$\alpha_m \delta f_{m,q} = W_x f_{m,q}. \quad (16)$$

令  $\beta_m = \alpha_m \delta$ , 则

$$\beta_m f_{m,q} = W_x f_{m,q}, \quad (17)$$

该式就是此激光谐振腔沿  $x$  方向的特征方程. 其中

$W_x$  为复矩阵,  $\beta_m$  为激光模沿  $x$  方向的复特征值,  $f_{m,q}$  为对应的特征向量。

同理, 可得  $y$  方向的特征方程

$$\mu_m g_{n,q} = W_y g_{n,q}. \quad (18)$$

只要求出(17)式、(18)式的特征值  $\beta_m$ 、 $\mu_n$  和特征向量  $f_{m,q}$ 、 $g_{n,q}$ , 就知道了激光横模特征值  $\eta_{nm} = \beta_m \mu_n$ 、激光腔的功率损耗  $1 - |\eta_{nm}|^2$  及其场分布  $F_{nm} = f_{m,q} g_{n,q}$ 。

## 5 计算结果

当猫眼逆向器中的凹面反射镜与凸透镜间距变化时, 复矩阵  $W_x$ 、 $W_y$  的值也相应发生变化。我们使用 Matlab 编程, 将计算过程在计算机中实现。

第一组实验: 对于我们使用的 He-Ne 激光器而言, 反射镜是足够大的, 对光束起限制作用的是增益物质的孔径, 即毛细管直径, 取:  $a_1 = b_1 = a_2 = b_2 = 0.50$  mm, 猫眼中凸透镜和凹面镜间距为 18.80 mm 时激光腔长  $L = 200.00$  mm (凸透镜和凹面镜间距变化  $\Delta$ , 腔长随之变化  $\Delta$ ), 毛细管长度  $l = 100$  mm, 输出镜  $R_1 = 1000$  mm。猫眼逆向器中的凹面反射镜与凸透镜间距变化时, 求出的各种高阶横模对应的特征值  $\eta_{nm}$  和对应横模的激光腔的功率损耗  $1 - |\eta_{nm}|^2$ 。表 1 列出了当间距分别为 19.15 mm、19.49 mm 和 19.51 mm 时的结果。

表 1 第一组猫眼选择横模输出计算结果

Table 1 Calculated results for selecting laser transverse mode by the first cat's eye reflector

| Distance between the convex lens and the concave mirror /mm | 19.15 | 19.49 | 19.51 |
|---|-------|-------|-------|
| $\eta_{00}$   | 0.996 | 0.998 | 0.998 |
| $\eta_{01}$   | 0.855 | 0.981 | 0.986 |
| $\eta_{10}$   | 0.855 | 0.981 | 0.986 |
| $\eta_{11}$   | 0.700 | 0.944 | 0.981 |
| $\eta_{02}$   | 0.524 | 0.554 | 0.569 |
| $\eta_{20}$   | 0.524 | 0.554 | 0.569 |
| $1 -  \eta_{00} ^2$   | 0.8%  | 0.6%  | 0.4%  |
| $1 -  \eta_{01} ^2$   | 26.9% | 3.8%  | 2.8%  |
| $1 -  \eta_{10} ^2$   | 26.9% | 3.8%  | 2.8%  |
| $1 -  \eta_{11} ^2$   | 51.0% | 10.9% | 3.8%  |
| $1 -  \eta_{02} ^2$   | 72.5% | 69.3% | 67.6% |
| $1 -  \eta_{20} ^2$   | 72.5% | 69.3% | 67.6% |

第二组实验:  $a_1 = b_1 = a_2 = b_2 = 0.59$  mm, 猫眼中凸透镜和凹面镜间距为 18.80 mm 时激光腔长  $L = 295.5$  mm, 毛细管长度  $l = 170$  mm, 输出镜  $R_1 = 1000$  mm。猫眼逆向器中的凹面反射镜与凸透

镜间距变化时, 求出各种高阶横模对应的特征值  $\eta_{nm}$  和对应横模的激光腔的功率损耗  $1 - |\eta_{nm}|^2$ 。表 2 列出了当间距分别为 19.08 mm、19.36 mm 和 19.39 mm 时的结果。

表 2 第二组猫眼选择横模输出计算结果

Table 2 Calculated results for selecting laser transverse mode by the second cat's eye reflector

| Distance between the convex lens and the concave mirror /mm | 19.08 | 19.36 | 19.39 |
|---|-------|-------|-------|
| $\eta_{00}$   | 0.997 | 0.998 | 0.999 |
| $\eta_{01}$   | 0.852 | 0.981 | 0.998 |
| $\eta_{10}$   | 0.852 | 0.981 | 0.998 |
| $\eta_{11}$   | 0.749 | 0.943 | 0.975 |
| $\eta_{02}$   | 0.679 | 0.710 | 0.723 |
| $\eta_{20}$   | 0.679 | 0.710 | 0.723 |
| $1 -  \eta_{00} ^2$   | 0.6%  | 0.4%  | 0.2%  |
| $1 -  \eta_{01} ^2$   | 27.4% | 3.8%  | 0.4%  |
| $1 -  \eta_{10} ^2$   | 27.4% | 3.8%  | 0.4%  |
| $1 -  \eta_{11} ^2$   | 43.9% | 11.1% | 4.9%  |
| $1 -  \eta_{02} ^2$   | 53.9% | 49.6% | 47.7% |
| $1 -  \eta_{20} ^2$   | 53.9% | 49.6% | 47.7% |

## 6 结果分析

不同的激光横模对应不同的特征值  $\eta_{nm}$  和光场分布  $F_{nm}$ , 它们都满足特征方程。也就是说, 如果不考虑激光增益和损耗的关系, 各种横模都满足振荡条件; 但是实际工作中激光的增益介质是有限的, 对于某阶横模, 获得的增益必须大于损耗才能振荡起来。

对于第一组实验, 从表 1 结果可看出, 随着猫眼中凸透镜和凹面镜间距的增大, 高阶横模的损耗变小, 从而更容易振荡, 这和我们实验现象完全吻合。激光往返增益为

$$G = 2 \times \frac{3 \times 10^{-4} l}{d} = 2 \times \frac{3 \times 10^{-4} \times 100}{1.0} = 6\%,$$

增透窗片、猫眼和输出镜的往返总损耗为 2.1%, 横模振荡必须满足条件  $1 - |\eta_{nm}|^2 < (6\% - 2.1\% = 3.9\%)$ , 即  $\eta_{nm} > 0.980$ 。当间距为 19.49 mm 时, TEM<sub>01</sub> 模的功率损耗  $1 - |\eta_{nm}|^2 \approx 3.9\%$ , 我们认为这是临界点, 当间距小于 19.49 mm 时基横模以外的高阶横模都不满足振荡条件, 可以保证基横模 [图 3(a) 所示] 输出。当间距大于 19.49 mm 时, TEM<sub>01</sub> 模 [图 3(b) 所示] 开始满足振荡条件; 间距大于 19.51 mm 时, TEM<sub>11</sub> [图 3(c) 所示] 开始满足振荡条件。

从计算结果可以看出: 基模的功率损耗一般要

小于高阶模,所以基模总是能够起振。当高阶横模满足振荡条件时,往往是两种或几种横模状态的叠加。为了清晰地记录下各阶横模,我们在激光器外运用另外的办法(对猫眼谐振腔激光器的工作特性没有任何影响),将不想记录的横模滤掉,拍到了三

种横模状态的照片如图 3 所示。

对于第二组实验,从表 2 结果可看出,规律同第一组一样,随着猫眼中凸透镜和凹面镜间距的增大,高阶横模的损耗变小,从而更容易振荡,同样和我们实验现象完全吻合。

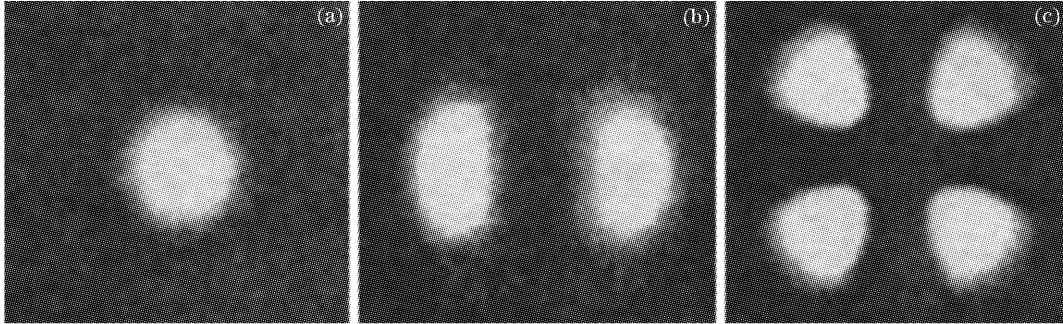


图 3 凸透镜和凹面镜间距不同时的横模状态

Fig. 3 Laser intensity pattern with different distance between the convex lens and the concave mirror

激光往返增益为

$$G = 2 \times \frac{3 \times 10^{-4} l}{d} = 2 \times \frac{3 \times 10^{-4} \times 170}{1.18} = 8.64\%$$

增透窗片、猫眼和输出镜的往返总损耗为 2.1%,振荡的横模必须满足  $1 - |\eta_{mn}|^2 < (8.64\% - 2.1\% = 6.54\%)$ , 即  $\eta_{mn} > 0.967$ 。当间距为 19.35 mm 时,  $TEM_{01}$  模的功率损耗  $1 - |\eta_{mn}|^2 \approx 6.54\%$ , 我们认为这是临界点,当间距小于 19.35 mm 时基横模以外的高阶横模都不满足振荡条件,可以保证基横模[图 3(a)所示]输出。当间距大于 19.35 mm 时,  $TEM_{01}$  模[图 3(b)所示]开始振荡;间距大于 19.39 mm 时,  $TEM_{11}$  模[图 3(c)所示]开始振荡。

由于猫眼逆向器结构简单,仅由一个凹面镜和一个凸透镜组成,用简易的机械装置夹持就可以方便、及时地调整两者间距,在实验中,我们可以观察横模输出状态的同时调整此间距而获得基横模输出,所以这种选择横模输出状态的方法要比其他方法方便得多。

## 7 结 论

用牛顿-柯特斯的数值计算方法,求解了激光谐振腔中使用猫眼逆向器后的横模输出状态,得出了以下结论:激光谐振腔中猫眼逆向器的参量改变,可以方便、及时、有效地实现对横模状况的选择,这与我们的实验现象相符。加之猫眼谐振腔对提高激光器稳定性方面的显著优势,使之必然成为新型的主流激光谐振腔之一。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Aifen, Bu Yinghua, Chen Dedong *et al.*. Characteristic of liner LDs side-pumped Nd:YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 633~640 (in Chinese)
- 2 杨爱粉,卜英华,陈德东等. 线阵激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 激光器特性研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 633~640
- 3 Wang Ning, Lu Yutian, Kong Yong. Analysing the light intensity distribution of super-Gaussian mirror resonator by fast Fourier transform[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1317~1322 (in Chinese)
- 4 王宁,陆雨田,孔勇. 用快速傅里叶变换法分析超高斯反射镜腔的光场分布[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1317~1322
- 5 S. A. Dimakov, S. I. Kliment'ev, I. V. Khloponina. Cavity with a cat's-eye reflector based on elements of conical optics[J]. *J. Optical Technol.*, 2002, **69**(8): 536~540
- 6 S. A. Dimakov, S. I. Kliment'ev, V. I. Kyprenyu *et al.*. Low-sensitive to misalignments resonator[C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2257**: 187~192
- 7 B. Fermigier, G. Lucas-Leclin, J. Dupont *et al.*. Self-aligned external-cavity semiconductor lasers for high resolution spectroscopy [J]. *Opt. Communications*, 1998, **153**(1~3): 73~77
- 8 T. Li, P. W. Smith. Mode selection and mode volume enhancement in a gas laser with internal lens[C]. *Proc. IEEE*, 1965, **53**: 399~400
- 9 Toshiyuki Takatsuji, Mitsuo Goto, Sonko Osawa *et al.*. Whole-viewing-angle cat's-eye retroreflector as a target of laser trackers [J]. *Measurement Science & Technology*, 1999, **10**(7): 87~90
- 10 Lin Yongbing, Zhang Guoxiong, Li Zhen. An improved cat's-eye retroreflector used in a laser tracking interferometer system[J]. *Measurement Science & Technology*, 2003, **14**(6): 36~40
- 11 V. E. Sherstobitov, A. A. Ageichik, V. D. Bulaev *et al.*. Phase conjugation in a high-power E-beam sustained CO<sub>2</sub> laser [C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1841**: 135~145
- 12 Xuanhui Lu, Kaikai Huang, Dajian Xue *et al.*. Laser beam characteristic for laser resonators with diffraction optical elements [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(3): 153~156
- 13 Ling Dongxiang, Ren Enyang. The finite-order matrix analysis of choosing property for transverse modes of the Gauss reflective two-dimension resonator with plane and concave spherical reflectors[J]. *Laser J.*, 1999, **20**(4): 67~73 (in Chinese)
- 14 凌东雄,任恩扬. 高斯反射平凹二维腔横模选择特性的有限阶矩阵分析[J]. *激光杂志*, 1999, **20**(4): 67~73