

# 猫眼谐振腔氦氖激光器理论分析\*

许志广† 张书练 李 岩 杜文华

(清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

(2005 年 11 月 11 日收到, 2005 年 12 月 16 日收到修改稿)

猫眼逆向器作为谐振腔镜与一个凹面镜构成猫眼激光谐振腔. 精确计算了三种猫眼逆向器(即理想猫眼逆向器和两种存在误差的猫眼逆向器)的逆向平行反射性, 并对应用这三种猫眼逆向器的谐振腔中高斯光束的各项参数进行了深入分析, 得出结论: 对于高斯光束, 凸透镜的焦距、凹面镜曲率半径、凸透镜与凹面镜间距三者相等的猫眼逆向器为理想逆向器, 其逆向平行反射性最好, 此时猫眼谐振腔处于理想状态, 基模模体积最大, 远场发散角最小, 稳定性最好. 在猫眼谐振腔的设计中, 要尽量减小猫眼逆向器中凸透镜的焦距, 增大凹面输出镜的曲率半径. 猫眼逆向器存在误差时谐振腔的各项性能将受到影响. 为猫眼谐振腔激光器的设计提供了理论依据.

关键词: 猫眼谐振腔, 猫眼逆向器, 氦氖激光器

PACC: 4255F

## 1. 引 言

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. 猫眼逆向器作为谐振腔镜是近来激光器结构的一个较大变革. Li 和 Smith 在 1965 年曾介绍过在激光器中搭建猫眼谐振腔选择激光横模输出的设想<sup>[1]</sup>, Dimakov 将猫眼谐振腔应用于 CO<sub>2</sub> 激光器中, 显著提高了激光器的稳定性, 并使功率漂移和角度漂移大大减小<sup>[2,3]</sup>. Fermigie 曾在半导体激光器中使用猫眼谐振腔, 取得了良好的效果<sup>[4]</sup>. 最近我们在氦氖激光器中应用猫眼谐振腔, 使全外腔长氦氖激光器的稳定性提高了 60 倍, 半外腔氦氖激光器的稳定性提高了 10 倍, 完成了免调氦氖激光器的研制<sup>[5-7]</sup>, 并通过调节猫眼逆向器中凸透镜和凹面镜的间距实现横模状态的输出.

尽管猫眼谐振腔已逐渐在激光领域得到应用, 但其本身的理论分析还不成熟, 本文将用等价共焦腔的方法对猫眼谐振腔的特性进行深入研究, 为猫眼谐振腔的进一步应用提供理论基础.

## 2. 猫眼谐振腔

典型的猫眼谐振腔半外腔氦氖激光器的结构如图 1 所示, 激光增益管  $T$  一端为增透窗片  $W$ , 另一端为凹面输出镜  $S_1$  (曲率半径为  $R_1$ ); 猫眼逆向器  $S_2$  作为另一个腔镜与  $S_1$  共同组成激光谐振腔. 猫眼逆向器由一个凸透镜(两面镀增透膜)和一个凹面镜(镀高反射膜)组成, 其中凸透镜的焦距  $f$ 、凹面镜曲率半径  $r$  和凸透镜与凹面镜间距  $l$  三者相等. 由于氦氖激光器的毛细管直径非常小, 像差的因素可以忽略, 所以选择一个单透镜做凸透镜. 猫眼逆向器作为一个完整的关学器件, 装配于一个机械结构中, 用作激光谐振腔的一个腔镜.

猫眼逆向器具有良好的逆向平行反射性, 一束平行光正入射到逆向器时会沿同方向出射; 当一束平行光以较小角度斜入射到猫眼逆向器时, 仍然会沿原方向平行射出. 这是传统的激光谐振腔镜(平面镜或凹面镜)所不具备的, 如图 2 所示. 这是猫眼逆向器作为激光谐振腔反射镜能提高激光器稳定性的基础.

\* 国家自然科学基金(批准号: 50127501, 60178010)资助的课题.

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

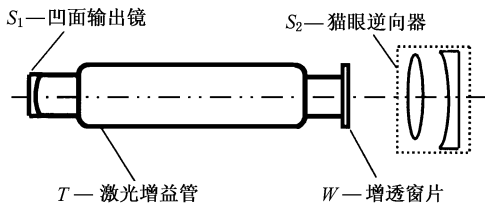


图 1 猫眼谐振腔半外腔氦氖激光器

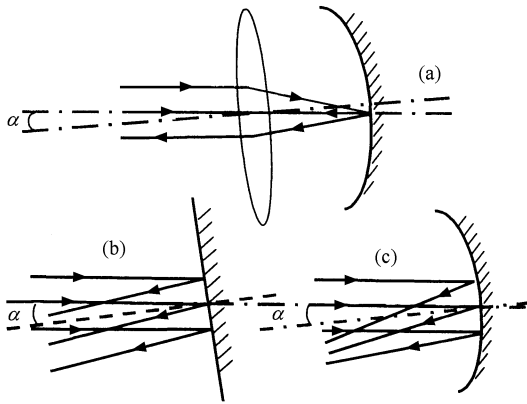


图 2 平行光束以较小角度  $\alpha$  斜入射到三种反射镜 (a) 猫眼逆向器 (b) 平面镜 (c) 凹面镜

### 3. 等价共焦腔方法分析猫眼谐振腔的高斯光束特性

#### 3.1. 理想情况——猫眼逆向器中凸透镜的焦距 $f$ 、凹面镜曲率半径 $r$ 、凸透镜与凹面镜间距 $l$ 三者相等

用矩阵光学的方法进行分析. 当光线  $\begin{pmatrix} x \\ \theta \end{pmatrix}$  入射到猫眼逆向器再出射时, 猫眼逆向器的变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/r & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/r & 1 \end{pmatrix} \stackrel{f=r=l}{=} \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

平面镜的变换矩阵为  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ , 形式与猫眼逆向器相似, 所以可以将猫眼逆向器等价为一个平面反射镜来研究. 此时, 激光谐振腔等效为由凹面镜  $S'_1$  (曲率半径为  $R_1$ ) 和平面镜  $S'_2$  (曲率半径为  $R_2 = \infty$ ) 组成, 两镜间距为  $L$ . 以等价共焦腔的中心为原点建立坐标系, 则两个腔镜  $S'_1$  和  $S'_2$  的坐标分别为

$$z_1 = \frac{l(R_2 - L)}{(L - R_1) + (L - R_2)} = -L, \quad (2)$$

$$z_2 = \frac{-l(R_1 - L)}{(L - R_1) + (L - R_2)} = 0. \quad (3)$$

由 (3) 式可知, 基模的束腰正好位于猫眼逆向器等效的平面镜上, 也就是说, 位于猫眼逆向器凸透镜的位置.

两镜上的基模光斑尺寸为

$$\begin{aligned} \omega_{s1} &= \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} \left[ \frac{R_1^2(R_2 - L)}{l(R_1 - L)(R_1 + R_2 - L)} \right]^{1/4} \\ &= \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} \left[ \frac{R_1^2}{l(R_1 - L)} \right]^{1/4}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \omega_{s2} &= \omega_{0s} = \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} \left[ \frac{R_2^2(R_1 - L)}{l(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)} \right]^{1/4} \\ &= \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} \left( \frac{R_1 - L}{L} \right)^{1/4}. \end{aligned} \quad (5)$$

需要指出的是, 根据几何光学原理, 此时的猫眼逆向器对于入射的平行光束具有最佳的逆向平行反射性. 入射光通过凸透镜恰好汇聚在凹面镜的顶点上, 可以完全保证出射光线沿与入射光线平行的方向出射, 如图 2(a) 所示. 但对高斯光束, 根据薄透镜对高斯光束的成像原理, 当高斯光束的束腰位于透镜入射面上时, 所成的像位于透镜后距离为

$$\begin{aligned} d &= f - \frac{f^3}{f^2 + \left(\frac{\pi\omega_{0s}^2}{\lambda}\right)^2} \\ &= f - \frac{f^3}{f^2 + l(R_1 - L)} \end{aligned} \quad (6)$$

处, 如图 2(b) 所示. 显然  $d < f$ ; 只有当  $f \ll \left(\frac{\pi\omega_{0s}^2}{\lambda}\right)^2 = l(R_1 - L)$  时,  $d \approx f$ . 一般这个条件都是满足的, 以我们实验中应用的猫眼谐振腔为例, 腔长  $L = 300\text{mm}$ , 凹面输出镜的曲率半径为  $R_1 = 3000\text{mm}$ , 猫眼逆向器凸透镜焦距  $f$ 、凹面镜曲率半径  $r$  和凸透镜与凹面镜的间距  $l$  均为  $19.000\text{mm}$ , 此时  $d = 18.992\text{mm}$ , 非常接近凹面镜顶点, 猫眼逆向器的逆向平行反射性非常理想.

由 (6) 式可得出一个重要结论: 在猫眼谐振腔的设计中要尽量减小凸透镜的焦距  $f$ , 增大凹面输出镜的曲率半径  $R_1$ , 才能使束腰成的像越接近凹面镜顶点, 更理想地保证其逆向平行反射性.

基模模体积为

$$\begin{aligned} V_{00} &= \frac{1}{2} L \pi \left( \frac{\omega_{s1} + \omega_{s2}}{2} \right)^2 \\ &= \frac{1}{8} \lambda L^2 \left( 1 + \left[ \frac{R_1^2}{l(R_1 - L)} \right]^{1/4} \right)^2. \end{aligned} \quad (7)$$

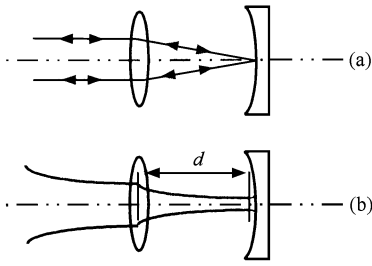


图3 平行光束和高斯光束分别入射到猫眼逆向器时的情况

基模远场发散角为

$$\theta_{00} = \left[ \frac{\lambda^2 (2L - R_1 - R_2)^2}{\pi^2 L (R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)} \right]^{1/4}$$

$$= \left[ \frac{\lambda^2}{\pi^2 L (R_1 - L)} \right]^{1/4} \quad (8)$$

在氦氖激光器中,增益管中的毛细管为圆柱状,因此猫眼谐振腔等价的共焦腔为圆形孔径共焦腔,各高阶横模的模体积、束腰尺寸和远场发散角可以由以下公式得到:

$$V_{mn} = V_{00} \sqrt{(2m+1)(2n+1)}, \quad (9)$$

$$\omega_{mn} = \omega_{00} \sqrt{m+2n+1}, \quad (10)$$

$$\theta_{mn} = \theta_{00} \sqrt{m+2n+1}, \quad (11)$$

其中  $m, n$  为阶次。

以上的诸多分析在固体激光器、 $\text{CO}_2$  激光器中也是成立的。有一种猫眼谐振腔尤其值得注意,就是两个谐振腔镜都采用理想猫眼逆向器的猫眼谐振腔,此时的谐振腔可以等价为平行平面腔。平行平面

腔在中等功率以上的固体激光器和气体激光器中常被采用<sup>[8,9]</sup>,它具有许多优点,例如可以增大基横模模体积,提高基横模的功率,并抑制高阶横模的产生,但两个谐振腔镜的调整精度要求极高,微小的平行度误差都会导致激光输出功率的明显下降,所以谐振腔的稳定性问题尤为突出。而两个谐振腔镜都采用理想猫眼逆向器的猫眼谐振腔可以很好地解决这个问题,它不仅具有平行平面腔的诸多优点,而且由于猫眼逆向器的良好逆向平行反射性使得谐振腔的稳定性得到了根本的改善,为平行平面腔的应用拓宽了领域。

在猫眼逆向器的实际加工制作中,不可避免的存在误差。下面将分析猫眼逆向器偏离理想状态时给猫眼谐振腔带来的影响。

3.2. 凸透镜的焦距存在误差,即猫眼逆向器中凹面镜曲率半径  $r$  等于凸透镜与凹面镜间距  $l$ ,但不等于凸透镜的焦距  $f$

在猫眼逆向器的实际加工中,凸透镜的焦距是最容易引人误差的环节。因为要保证凸透镜的焦距恰好符合设计要求,必须对三个因素进行严格控制,即凸透镜两个面的曲率半径以及两面的间距,但是在实际的加工过程中总会存在误差。下面分析此时谐振腔的特性以及误差对猫眼逆向器的逆向平行反射性的影响。

当光线  $\begin{pmatrix} x \\ \theta \end{pmatrix}$  入射到猫眼逆向器再出射时,猫眼逆向器的变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/r & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \left(1 - \frac{2l}{r}\right) \left(1 - \frac{l}{f}\right) - \frac{l}{f} & 2l - \frac{2l^2}{r} \\ -\left(1 - \frac{l}{f}\right) \left[\frac{2}{f} + \frac{1}{r} \left(1 - \frac{l}{f}\right)\right] & \left(1 - \frac{l}{f}\right) \left(1 - \frac{2l}{r}\right) - \frac{l}{f} \end{pmatrix}$$

$$\stackrel{r=l}{=} (-1) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_{\text{eq}} & 1 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

其中

$$R_{\text{eq}} = \frac{f \times l}{l - f}. \quad (13)$$

此时,猫眼逆向器等效为一个曲率半径为  $R_{\text{eq}}$  的球面反射镜,可以作为凹面镜( $R_{\text{eq}} < l$ )或平面镜( $f = l$ )或

者凸面镜( $f > l$ )使用,上述分析的理想猫眼逆向器是其中的一种特殊情况。当猫眼逆向器中凸透镜的焦距变化时,猫眼逆向器的参数也随之变化,从而带来等效谐振腔结构的变化。

同样运用等价共焦腔的办法,将激光谐振腔等

效为由凹面镜  $S_1'$  (曲率半径为  $R_1$ ) 和球面镜 (曲率半径为  $R_2 = R_{eq}$ )  $S_2'$  组成, 两镜间距为  $L$ . 以等价共焦腔的中心为原点建立坐标系, 则两个腔镜  $S_1'$  和  $S_2'$  的坐标分别为

$$z_1 = \frac{L(R_2 - L)}{(L - R_1) + (L - R_2)}$$

$$= \frac{L(R_{eq} - L)}{(L - R_1) + (L - R_{eq})}, \quad (14)$$

$$z_2 = \frac{-L(R_2 - L)}{(L - R_1) + (L - R_2)}$$

$$= \frac{L(R_1 - L)}{(R_1 - L) + (R_{eq} - L)}. \quad (15)$$

两镜上的基模光斑尺寸为

$$\omega_{s1} = \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} \left[ \frac{R_1^2(R_2 - L)}{L(R_1 - L)(R_1 + R_2 - L)} \right]^{1/4}$$

$$= \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} \left[ \frac{R_1^2(R_{eq} - L)}{L(R_1 - L)(R_1 + R_{eq} - L)} \right]^{1/4}, \quad (16)$$

$$\omega_{s2} = \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} \left[ \frac{R_2^2(R_1 - L)}{L(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)} \right]^{1/4}$$

$$= \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} \left[ \frac{R_{eq}^2(R_1 - L)}{L(R_{eq} - L)(R_1 + R_{eq} - L)} \right]^{1/4}. \quad (17)$$

基模模体积为

$$V_{00} = \frac{1}{2} L \pi \left( \frac{\omega_{s1} + \omega_{s2}}{2} \right)^2$$

$$= \frac{1}{8} \lambda L^2 \left( \left[ \frac{R_1^2(R_{eq} - L)}{L(R_1 - L)(R_1 + R_{eq} - L)} \right]^{1/4} + \left[ \frac{R_{eq}^2(R_1 - L)}{L(R_{eq} - L)(R_1 + R_{eq} - L)} \right]^{1/4} \right)^2. \quad (18)$$

基模远场发散角为

$$\theta_{00} = \left[ \frac{\lambda^2(2L - R_1 - R_2)^2}{\pi^2 L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)} \right]^{1/4}$$

$$= \left[ \frac{\lambda^2(2L - R_1 - R_{eq})^2}{\pi^2 L(R_1 - L)(R_{eq} - L)(R_1 + R_{eq} - L)} \right]^{1/4}. \quad (19)$$

高阶模的情况仍可以由(9)(10)(11)式求得.

以我们实验中应用的猫眼谐振腔为例, 腔长  $L = 300\text{mm}$ , 凹面输出镜的曲率半径为  $R_1 = 3000\text{mm}$ , 猫眼逆向器中凹面镜曲率半径  $r$  和凸透镜与凹面镜间距  $l$  均为  $19\text{mm}$ , 根据谐振腔的稳定条件

$$0 < \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) = \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_{eq}}\right) < 1, \quad (20)$$

可得  $R_{eq} > 300\text{mm}$  或者  $R_{eq} < -2700\text{mm}$ , 但是当  $R_{eq} < 0$  时, 猫眼逆向器等效为一个凸面镜, 会带来损耗

的迅速增大, 因此不予考虑. 所以  $f$  的变化范围为  $17.868\text{mm} < f \leq 19\text{mm}$ . 我们取  $f$  较接近理想值  $19\text{mm}$  的一段  $18.5\text{mm} < f \leq 19\text{mm}$  来分析.

猫眼逆向器的等效半径  $R_{eq}$ 、基模模体积  $V_{00}$ 、基模远场发散角  $\theta_{00}$ 、基模束腰与猫眼逆向器凸透镜入射面的间距  $z_2$  随凸透镜焦距  $f$  的变化关系分别如图 4 5 6 7 所示.

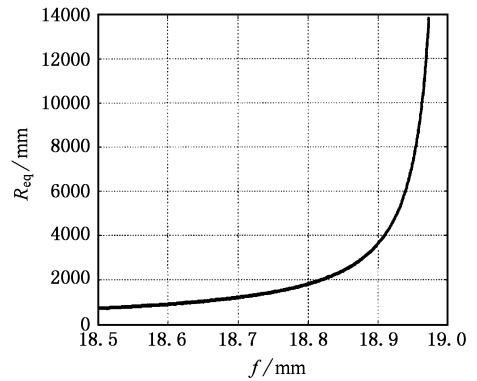


图 4 猫眼逆向器等效曲率半径  $R_{eq}$  随猫眼逆向器中凸透镜焦距  $f$  的变化

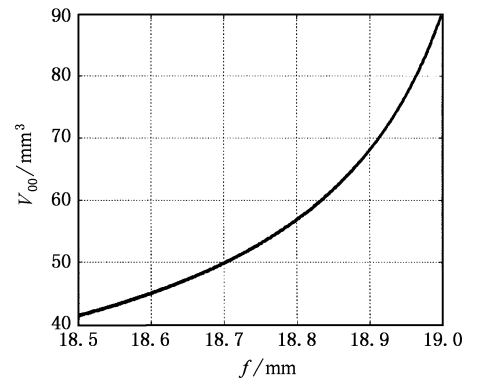


图 5 基模模体积  $V_{00}$  随猫眼逆向器中凸透镜焦距  $f$  的变化

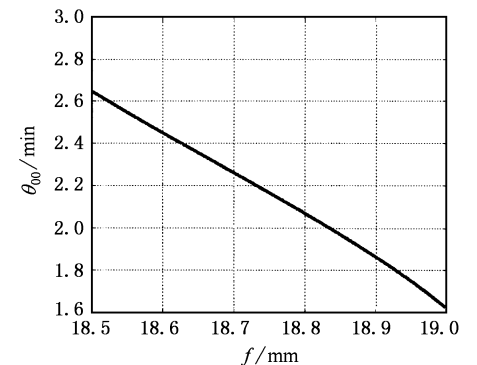


图 6 基模远场发散角  $\theta_{00}$  随猫眼逆向器中凸透镜焦距  $f$  的变化

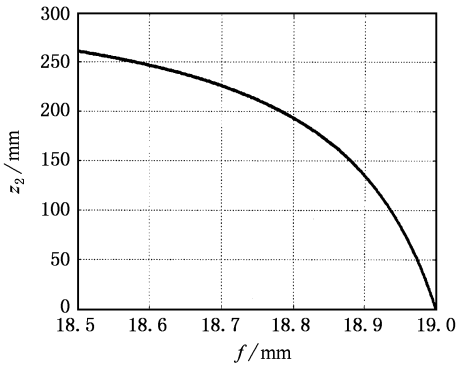


图 7 基横模束腰与猫眼逆向器凸透镜入射面的间距  $z_2$  随凸透镜焦距  $f$  的变化

下面分析此时猫眼逆向器的逆向平行反射性，仍然用基模束腰经猫眼逆向器凸透镜成的像(称为像方束腰)距离猫眼逆向器中凹面镜顶点的距离来反映。

束腰位于猫眼逆向器凸透镜入射面前  $z_2$  处，根据薄透镜对高斯光束的成像原理，所成的像(称为像方束腰)位于透镜后距离为

$$d = f + \frac{(z_2 - f)f^2}{(f - z_2) + \frac{L(R_1 - L)(R_{eq} - L)(R_1 + R_{eq} - L)}{[(R_1 - L) + (R_{eq} - L)]}} \quad (21)$$

处，则像方束腰与猫眼逆向器凹面镜顶点的间距为

$$t = l - d. \quad (22)$$

间距  $t$  与猫眼逆向器中凸透镜焦距  $f$  的关系如图 8 所示。

由图 4—8 可见，随着凸透镜焦距  $f$  远离 19mm 逐渐减小，猫眼逆向器的等效曲率半径逐渐减小，基模的模体积逐渐减小，基模的远场发散角逐渐增大，基模的束腰位置逐渐向远离猫眼逆向器的方向移动，像方束腰的位置越来越远离猫眼逆向器的凹面镜顶点，即逆向平行反射性变差。

值得注意的是，在  $f$  远离 19mm 减小时，虽然逆

向平行反射性相对理想猫眼逆向器的情况要差，但图 8 中  $f$  的整个变化范围内，像方束腰都非常接近凹面镜顶点，最大间距小于 0.024mm，这说明猫眼逆向器始终保持一定的逆向平行反射性，相比传统的激光谐振腔镜凹面镜或平面镜仍具有较大优势。

结合图 5, 6, 8，综合考虑猫眼逆向器的逆向平行反射性、高斯光束的基模体积和远场发散角，可以得出结论：猫眼逆向器中凸透镜的焦距  $f$ 、凹面镜的曲率半径  $r$ 、凸透镜与凹面镜间距  $l$  三者相等的理想猫眼逆向器具有最佳性能，此时的猫眼谐振腔处于理想状态，具有最好的稳定性。

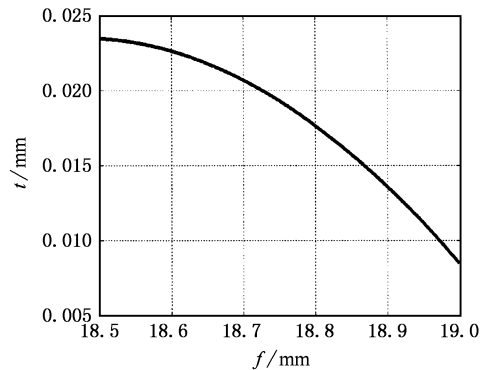


图 8 像方束腰与猫眼逆向器凹面镜顶点的间距  $t$  随凸透镜焦距  $f$  的变化

### 3.3. 凸透镜与凹面镜间距存在误差，即猫眼逆向器中凸透镜的焦距 $f$ 等于凹面镜曲率半径 $r$ ，但不等于凸透镜与凹面镜间距 $l$

猫眼逆向器在装配过程中存在的误差会导致凸透镜与凹面镜的间距  $l$  偏离理想状态，下面分析这种误差给猫眼谐振腔带来的影响。

这种情况比较复杂，我们仍把猫眼逆向器简化近似为凹面镜处理。由(13)式可知猫眼逆向器的变换矩阵的一般格式为

$$\begin{pmatrix} \left(1 - \frac{2l}{r}\right)\left(1 - \frac{l}{f}\right) - \frac{l}{f} & 2l - \frac{2l^2}{r} \\ -\left(1 - \frac{l}{f}\right)\left[\frac{2}{f} + \frac{1}{r}\left(1 - \frac{l}{f}\right)\right] & \left(1 - \frac{l}{f}\right)\left(1 - \frac{2l}{r}\right) - \frac{l}{f} \end{pmatrix},$$

平行光轴入射的傍轴光线可以表示为  $\begin{pmatrix} x \\ 0 \end{pmatrix}$  经过猫眼逆向器后成为



$$\begin{pmatrix} \left(1 - \frac{2l}{r}\right)\left(1 - \frac{l}{f}\right) - \frac{l}{f} & 2l - \frac{2l^2}{r} \\ -\left(1 - \frac{l}{f}\right)\left[\frac{2}{f} + \frac{1}{r}\left(1 - \frac{l}{f}\right)\right] & \left(1 - \frac{l}{f}\right)\left(1 - \frac{2l}{r}\right) - \frac{l}{f} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left[\left(1 - \frac{2l}{r}\right)\left(1 - \frac{l}{f}\right) - \frac{l}{f}\right]x \\ \left\{-\left(1 - \frac{l}{f}\right)\left[\frac{2}{f} + \frac{1}{r}\left(1 - \frac{l}{f}\right)\right]\right\}x \end{pmatrix}$$

此时猫眼逆向器的等效曲率半径为

$$R_{eq} = 2 \times \frac{\left(1 - \frac{2l}{r}\right)(f - l) - l}{\left(1 - \frac{l}{f}\right)\left(2 + \frac{f}{r} - \frac{l}{r}\right)} \quad (23)$$

凸透镜的焦距  $f$  和凹面镜曲率半径  $r$  均为 19mm, 此时猫眼逆向器等效曲率半径可以写成

$$R_{eq} = 38 \times \frac{2l^2 - 76l + 361}{l^2 - 76l + 1083} \quad (24)$$

以我们实验中应用的猫眼谐振腔为例, 腔长  $L = 300\text{mm}$ , 凹面输出镜的曲率半径为  $R_1 = 3000\text{mm}$ , 根据谐振腔的稳定条件(20)式得出:  $R_{eq} > 300\text{mm}$ , 凹面镜间距  $l$  的变化范围为  $19\text{mm} \leq l \leq 20.23\text{mm}$ . 取  $l$  接近理想值 19mm 附近的一段  $19\text{mm} \leq l \leq 19.4\text{mm}$  分析.

猫眼逆向器的等效半径  $R_{eq}$ 、基模模体积  $V_{00}$ 、基模远场发散角  $\theta_{00}$ 、基模束腰与猫眼逆向器凸透镜入射面的间距  $z_2$ 、像方束腰与猫眼逆向器凹面镜顶点的距离  $t$  与猫眼逆向器中凸透镜与凹面镜间距  $l$  的关系分别如图 9, 10, 11, 12, 13 所示.

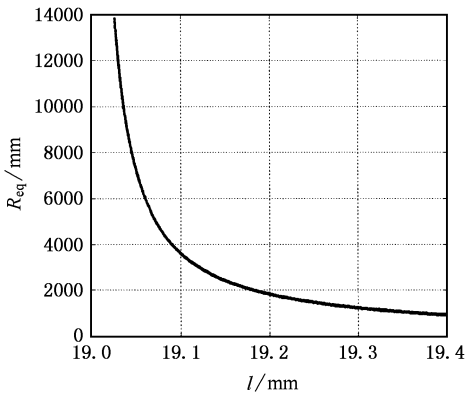


图 9 猫眼逆向器等效曲率半径  $R_{eq}$  随猫眼逆向器中凸透镜与凹面镜间距  $l$  的变化

从图 9—13 可以得出结论: 随着凸透镜与凹面镜间距  $l$  远离 19mm 逐渐增大, 猫眼逆向器的等效曲率半径逐渐减小, 基模的模体积逐渐减小, 基模的远场发散角逐渐增大, 基模的束腰位置逐渐向远离猫眼逆向器的方向移动, 像方束腰的位置越来越远离猫眼逆向器的凹面镜顶点, 即逆向平行反射性

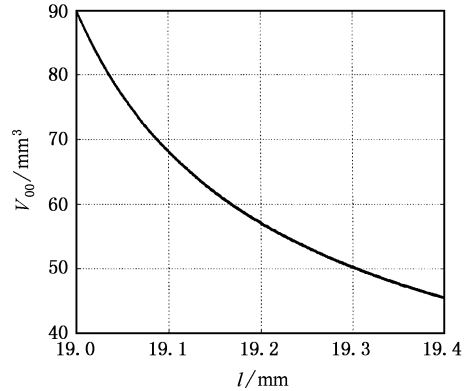


图 10 基模模体积  $V_{00}$  随猫眼逆向器中凸透镜与凹面镜间距  $l$  的变化

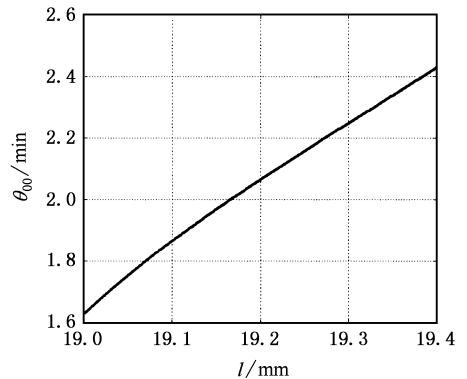


图 11 基模远场发散角  $\theta_{00}$  随猫眼逆向器中凸透镜与凹面镜间距  $l$  的变化

变差.

同样值得注意的是, 在  $l$  的增大远离 19mm 时, 虽然逆向平行反射性相对理想猫眼逆向器的情况要差, 但图 13 中  $l$  的整个变化范围内, 像方束腰都非常接近凹面镜顶点, 最大间距小于 0.02mm, 这说明猫眼逆向器始终保持一定的逆向平行反射性, 相比传统的激光谐振腔镜凹面镜或平面镜仍具有较大优势.

结合图 10, 11, 13 综合考虑猫眼逆向器的逆向平行反射性、基模体积和远场发散角, 可以得出同样的结论: 猫眼逆向器中凸透镜的焦距  $f$ 、凹面镜的曲率半径  $r$ 、凸透镜与凹面镜间距  $l$  三者相等的理想

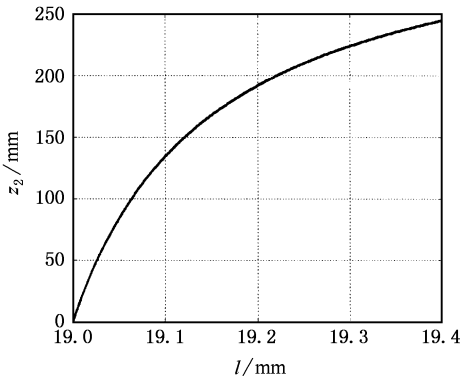


图 12 基横模束腰与猫眼逆向器凸透镜入射面的间距  $z_2$  随凸透镜与凹面镜间距  $l$  的变化

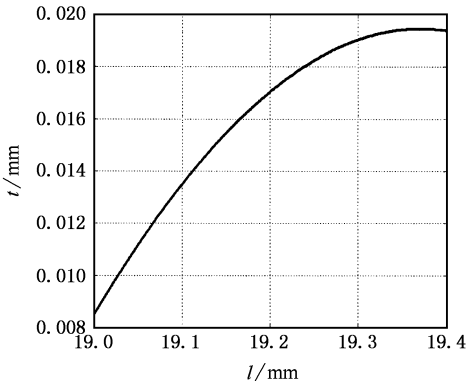


图 13 像方束腰与猫眼逆向器凹面镜顶点的间距  $t$  随凸透镜与凹面镜间距  $l$  的变化

猫眼逆向器具有最佳性能,此时的猫眼谐振腔处于理想状态,具有最好的稳定性.

## 4. 结 论

本文对使用理想的猫眼逆向器(凸透镜的焦距、凹面镜的曲率半径、凸透镜与凹面镜间距三者相等)和存在误差的猫眼逆向器(凸透镜的焦距存在误差和凸透镜与凹面镜间距存在误差两种情况)的谐振腔分别进行了深入分析和计算,并对谐振腔中高斯光束的各项基本参数及逆向平行反射性进行了研究.对于高斯光束,猫眼逆向器中凸透镜的焦距、凹面镜曲率半径、凸透镜与凹面镜间距三者相等的猫眼逆向器是理想的猫眼逆向器,此时猫眼谐振腔基模模体积最大,远场发散角最小,稳定性最好;在猫眼谐振腔的设计中,要尽量减小猫眼逆向器中凸透镜的焦距,增大凹面输出镜的曲率半径.猫眼逆向器存在误差时,谐振腔的基模模体积、远场发散角、稳定性都受到一定的不利影响.本文将有助于猫眼谐振腔的进一步推广和应用.

- [ 1 ] Li T, Smith P W 1965 *Proc. IEEE* **53** 399
- [ 2 ] Dimakov S A, Kliment 'ev S I, Khloponina V 2002 *J. Opt. Technol.* **69** 536
- [ 3 ] Dimakov S A, Kliment 'ev S I, Kyprenyu V I, Orlova I B, Sergeev V V, Sherstobitov V E 1994 *Proc. SPIE* **2257** 187
- [ 4 ] Fermigier B, Lucas-Leclin G, Dupont J, Plumelle F, Houssin M 1998 *Opt. Commun.* **153** 73
- [ 5 ] Xu Z G, Zhang S L, Li Y, Du W H 2005 *Opt. Express* **14** 5565
- [ 6 ] Xu Z G, Zhang S L, Du W H, Li Y, Zhu J 2006 *Laser Technol.* **30** 133 (in Chinese) [ 许志广、张书练、杜文华、李 岩、朱 钧 2006 激光技术 **30** 133 ]
- [ 7 ] Xu Z G, Zhang S L, Du W H, Li Y, Zhu J, 2005 *Chin. J. Lasers* **32** 12 (in Chinese) [ 许志广、张书练、杜文华、李 岩、朱 钧 2005 中国激光 **32** 12 ]
- [ 8 ] Zhang C B, Song F, Meng F Z, Ding X, Zhang G Y, Shang M R 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1517 (in Chinese) [ 张潮波、宋 峰、孟凡臻、丁 欣、张光寅、商美茹 2002 物理学报 **51** 1517 ]
- [ 9 ] Zhang Z X, Lü B L 1986 *Acta Phys Sin.* **35** 523 (in Chinese) [ 张镇西、吕宝岭 1986 物理学报 **35** 523 ]



# Theoretic analysis of the cat 's eye cavity He-Ne laser<sup>\*</sup>

Xu Zhi-Guang<sup>†</sup> Zhang Shu-Lian Li Yan Du Wen-Hua

( *The State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments , Tsinghua University , Beijing 100084 , China* )

( Received 11 November 2005 ; revised manuscript received 16 December 2005 )

## Abstract

A concave mirror and a cat 's eye reflector acting as a resonator mirror constitute a cat 's eye cavity. The parallelism of the incident and the reflected beams achieved by using three kinds of cat 's eye reflectors ( one ideal cat 's eye reflector and two reflectors with errors ), and the parameters of Gaussian beam in resonators which respectively use the three kinds of cat 's eye reflectors are accurately calculated. We arrive at the conclusion that for the Gaussian beam the cat 's eye reflector is ideal and gives best parallelism of the incident and the reflected beam when the focal length of the convex lens , the radius of curvature of the concave mirror and the distance between them are equal. In this case the cat 's eye cavity has the highest stability along with the largest fundamental mode volume and the least far-field divergence angle of fundamental mode. In the cavity design , one should strive to decrease the focal length of the convex lens in the cat 's eye reflector and increase the radius of curvature of the output mirror. The influence on resonator performance when there are errors in the cat 's eye reflector is also discussed. This paper gives a theoretical basis for the design of cat 's eye cavity lasers.

**Keywords :** cat 's eye cavity , cat 's eye reflector , He-Ne laser

**PACC :** 4255F

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 50127501 , 60178010 ).

<sup>†</sup> E-mail : xuzhiguang99@mails.tsinghua.edu.cn