

文章编号: 1001-4322(2006)03-0385-04

# 高斯反射镜及其倾斜对平凹腔激光场分布的影响\*

彭玉峰, 李阔湖, 陈 靖, 吕珍龙, 彭爱莲, 魏要丽, 张永涛

(河南师范大学 物理与信息工程学院, 河南 新乡 453007)

摘 要: 从菲涅尔-基尔霍夫衍射积分公式出发, 运用边界元法数值计算了平凹腔平面镜均匀反射率时倾斜和未倾斜情况下基模的场强分布、相位分布和本征值, 同时与高斯反射率平面镜在腔镜倾斜时的情况做了比较。研究表明, 腔镜倾斜使激光场模式分布沿发生倾斜的方向向镜边缘偏移, 而且在腔镜倾斜较严重时模式分布发生畸变, 不再是对称的高斯分布, 基模本征值随倾斜角增大而变小, 光束远场分布变差。同等条件下, 高斯反射率平凹腔腔镜倾斜对谐振腔引起的模畸变小于均匀反射率平凹腔, 且基模光场及本征值随镜倾斜的变化关系稍不同于均匀反射率平凹腔。

关键词: 平凹腔; 高斯反射镜; 边界元法; 腔镜倾斜; 远场分布

中图分类号: TN242 文献标识码: A

高功率横流 CO<sub>2</sub> 激光器在工业中的应用十分广泛, 如激光热处理、激光切割、激光焊接等。激光切割或焊接要求激光束聚焦后焦点功率密度达到 10<sup>6</sup>~10<sup>7</sup> W/cm<sup>2</sup>, 即要求光束质量好、发散角小。但一般横流 CO<sub>2</sub> 激光器的光束质量较差, 难以满足切割和焊接的要求。因此在横流 CO<sub>2</sub> 激光器中多采用折叠式谐振腔, 不仅能改善光束质量, 而且能提高转换效率。研究表明<sup>[1]</sup>, 在折叠式横流 CO<sub>2</sub> 激光谐振腔中采用稳定的平-凹腔优于凹-凸稳腔和介稳平-平腔。为了进一步获得高质量的激光光束, R. Van Neste 等<sup>[2]</sup>采用梯度相位镜腔加以改良。M. R. Perrone 等<sup>[3]</sup>研究了高斯反射率平面平行腔的光束质量, 并与传统平面平行腔进行了比较。凌东雄等<sup>[4]</sup>针对方形平凹腔, 讨论了平面反射镜反射率呈高斯分布时激光光场的模式分布。最近, D. Deng 等<sup>[5]</sup>基于标量衍射理论分析了高斯谐振腔的远场光强分布。

本文将采用边界有限元法, 着重研究高斯反射率平凹谐振腔腔镜倾斜对光场分布(场强、相位)和模式本征值的影响, 并在同等条件下和传统平凹腔的激光场分布进行了比较与分析讨论。

## 1 数值计算方法

对谐振腔中激光场模式分布的常见分析方法有 Fox-Li 迭代法、等价微分方程法、微扰法、积分核展开法和变分法等。我们采用的边界有限元法<sup>[4,6]</sup>基本思路是: 把方形平凹腔模的自再现积分方程转化为矩阵方程进行求解。如图 1 所示为方形平凹腔的结构简图。

不失一般性, 设平面镜沿  $x$  方向顺时针倾斜, 这时倾斜引入的光程可表示为  $x_1 \sin\theta$ ,  $\theta$  为倾斜角。假定平面镜反射率为  $F = F_0 \exp[-H(x^2 + y^2)]$ , 在本文中  $F_0$  取为 1, 即镜中心完全反射。图 1 中  $x_1, y_1$  表示平面镜  $M_1$  上点的坐标;  $x_2, y_2$  表示凹镜  $M_2$  上的点的坐标。  $E_1(x_1, y_1)$  表示平面镜  $M_1$  上的光场,  $E_2(x_2, y_2)$  表示凹镜  $M_2$  上的光场,  $E_3(x_1, y_1)$  表示一次往返后平面镜  $M_1$  上的光场。根据方形平凹腔具有对称性的特点将光场沿  $x, y$  方向进行分离变量, 令  $E_1(x_1, y_1) = E_1(x_1)E_1(y_1)$ ,  $E_2(x_2, y_2) = E_2(x_2)E_2(y_2)$  和  $E_3(x_1, y_1) = E_3(x_1)E_3(y_1)$ , 由光学谐振腔衍射积分方程可得

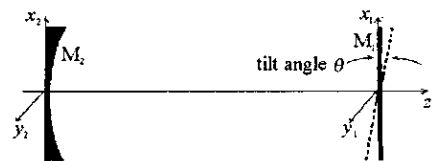


Fig. 1 Scheme of the square plano-concave resonator

图 1 方形平凹腔计算示意图

$$E_2(x_2) = \sqrt{ik/2\pi L} \int_{x_1} E_1(x_1) \sqrt{F_0} \exp(-Hx_1^2) \exp(-ikL/2) \times \exp\{-ik[(x_2 - x_1)^2/2L - x_2^2/2R + x_1 \sin\theta]\} dx_1 \quad (1)$$

$$E_2(y_2) = \sqrt{ik/2\pi L} \int_{y_1} E_1(y_1) \sqrt{F_0} \exp(-Hy_1^2) \exp(-ikL/2) \times \exp\{-ik[(y_2 - y_1)^2/2L - y_2^2/2R]\} dy_1 \quad (2)$$

\* 收稿日期: 2005-06-01; 修订日期: 2005-12-05

基金项目: 国家 973 项目资助课题

作者简介: 彭玉峰(1963—), 男, 河南夏邑县人, 博士, 教授, 主要从事激光与物质相互作用研究; yufengp@henannu.edu.cn.

$$E_3(x_1) = \sqrt{ik/2\pi L} \int_{x_2} E_2(x_2) \exp(-ikL/2) \exp\{-ik[(x_1 - x_2)^2/2L - x_2^2/2R + x_1 \sin\theta]\} dx_2 \quad (3)$$

$$E_3(y_1) = \sqrt{ik/2\pi L} \int_{y_2} E_2(y_2) \exp(-ikL/2) \exp\{-ik[(y_1 - y_2)^2/2L - y_2^2/2R]\} dy_2 \quad (4)$$

式中:  $R$  为凹面反射镜的曲率半径;  $L$  为腔长。

按边界元法, 将方形反射镜所在平面分割为  $M \times M$  个微元, 微元上的光场值用微元所在点即节点上的值代替, 把积分方程变为有限阶矩阵方程进行数值求解<sup>[4]</sup>。这样, (1)~(4)式可以分别表示为

$$E_2(x_2)_n = \sum_{m=1}^M K_1 x_{mm} E_1(x_1)_m \quad (5)$$

$$E_2(y_2)_n = \sum_{m=1}^M K_1 y_{mm} E_1(y_1)_m \quad (6)$$

$$E_3(x_1)_n = \sum_{m=1}^M K_2 x_{mm} E_2(x_2)_m \quad (7)$$

$$E_3(y_1)_n = \sum_{m=1}^M K_2 y_{mm} E_2(y_2)_m \quad (8)$$

式中:  $K_1 x_{mm}, K_1 y_{mm}, K_2 x_{mm}, K_2 y_{mm}$  分别为刚度矩阵(也就是光学变换矩阵)元素;  $n$  表示平面耦合输出镜上的节点编号;  $m$  表示全反射凹镜上的节点编号。

对于稳定腔的模式分布, 光场在谐振腔中经过 1 次往返后实现自再现, 于是利用(5)~(8)式得到

$$\gamma_x E(x_1) = K_x E(x_1) \quad (9)$$

$$\gamma_y E(y_1) = K_y E(y_1) \quad (10)$$

式中:  $\gamma_x, \gamma_y$  是常数相位因子,  $\gamma = \gamma_x \gamma_y, K_x = K_2 x K_1 x, K_y = K_2 y K_1 y$ 。很明显,  $E(x_1), E(y_1)$  就是谐振腔中光场模式在反射镜镜面上的分布, 它们是刚度矩阵  $K_x, K_y$  的本征矢量,  $|\gamma| = |\gamma_x \gamma_y|$  就是光场的本征值, 本征值越大损耗越小, 反之损耗越大。

对矩阵方程(9), (10)式求解, 就可求得光场模式在  $x, y$  方向的分布情况, 进而得到总的光场分布。

## 2 结果及分析

为方便起见, 选取谐振腔参数为  $R=5.0 \text{ m}, L=2.0 \text{ m}, a=1.0 \text{ cm}, \lambda=10.6 \text{ }\mu\text{m}$ , 对方形平凹腔在均匀反射率平面镜倾斜、高斯反射率平面镜倾斜情况下激光场模式进行了数值计算, 并考察了不同  $H$  值(不同的高斯分布系数)情况下的光场分布。

### 2.1 未倾斜情况下的平凹腔

图 2 是  $H=0, \theta=0$ (即反射率均匀分布, 腔镜未倾斜)时平凹腔光场模式在平面耦合输出镜上的相对强度分布、相位分布和远场分布情况。可以看到基模幅度呈高斯分布<sup>[7-8]</sup>, 等相面在镜上是平面, 远场分布很集中, 也呈高斯形分布。

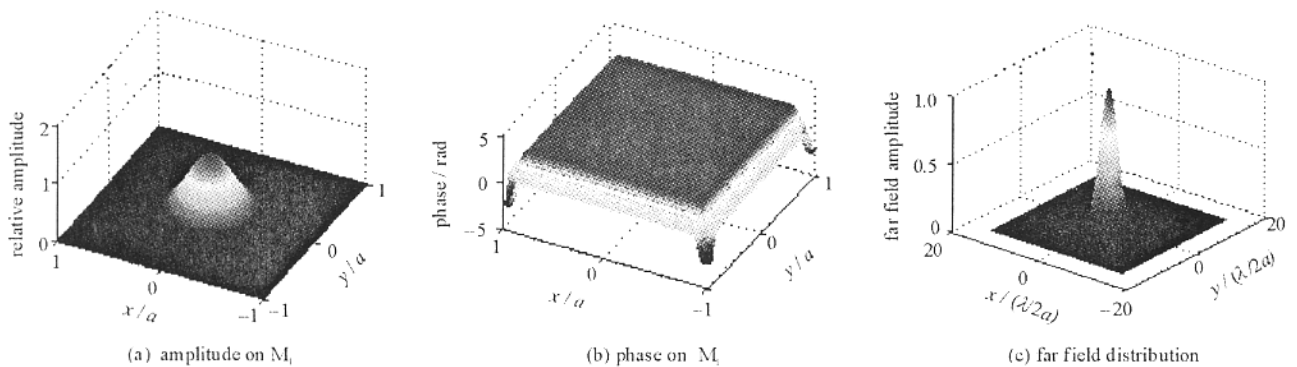


Fig. 2 Field and phase distribution ( $H=0, \theta=0$ )

图 2 未倾斜时光场强度分布及相位分布 ( $H=0, \theta=0$ )

### 2.2 倾斜情况下的平凹腔

图 3 所示是平面镜倾斜  $1.75 \text{ mrad}$  时平凹腔光场模式在平面耦合输出镜上的相对强度分布、相位分布和远场分布情况。可以看出腔镜的倾斜使光场模式分布产生畸变, 在主光斑以外的地方也出现小光斑的分布, 这

将导致光束质量变差。从相位分布上可以看出,在镜倾斜方向发生较大扰动。

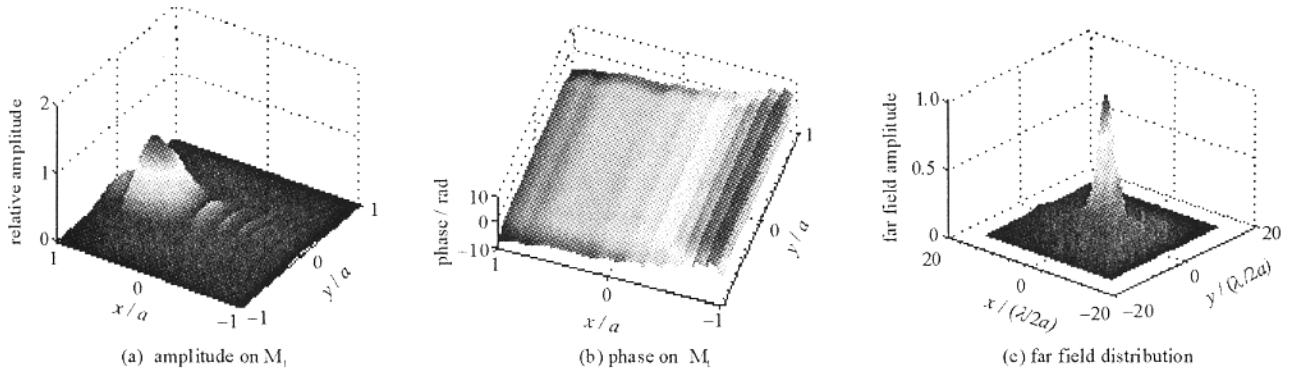


Fig. 3 Field and phase distribution ( $H=0, \theta=1.75$  mrad)

图 3 倾斜时光场强度分布及相位分布( $H=0, \theta=1.75$  mrad)

图 4 所示为倾斜角一定( $\theta=1.40$  mrad)情况下高斯分布系数分别为  $H=0$  和  $H=6.1$  时光场分布对比的情形。可以看到,相比之下,在其它参数(腔长,镜宽,倾斜角)相同情况下,镜面反射率呈一定高斯分布时光场分布畸变较小。

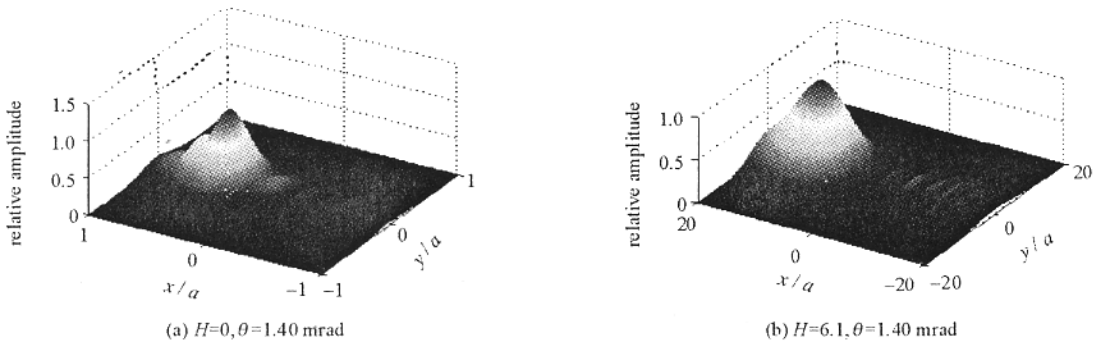


Fig. 4 Near field distribution on  $M_1$

图. 4 平面输出镜  $M_1$  上光场分布

### 2.3 光场参数与腔镜倾斜角度的关系

在高斯分布系数  $H$  不同的情况下,光场的本征值随倾斜角度的变化如图 5 所示,开始基本不变,但在某一倾斜角度后急剧下降,这将导致激光振荡损耗加大,难以起振和形成稳定的激光场。

光场模式中心位置随倾斜角度的变化如图 6 所示,均匀反射率时和反射率呈高斯分布时不同,可以看出在开始时区别不大,但在某一角度(在本文条件下是  $\theta=0.96$  mrad)后,在均匀反射率情况下( $H=0$ ),光场中心基本随偏移角呈线性移动;在反射率呈高斯分布情况下,光场中心基本不再随偏移角移动,直到另一较大偏移角(在本文条件下是  $\theta=1.57$  mrad)后才又开始移动,这一特性有利于在失调时增加光场的稳定性。

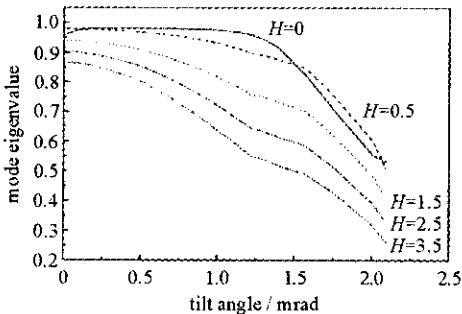


Fig. 5 Mode eigenvalue vs tilt angle

图 5 光场的本征值随倾斜角度的变化

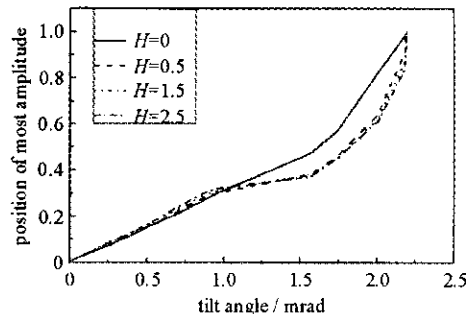


Fig. 6 Position of most amplitude vs tilt angle

图 6 光场模式中心位置随倾斜角度的变化

### 3 总 结

腔镜倾斜引起模式偏移和模式畸变,光束远场分布变差,相位出现扰动。在高斯分布反射率情况下出现类似特点,但模式畸变程度和场分布有所不同。在均匀反射率情况下,本征值开始基本上不随倾斜角的增大而变

化,但在某一倾斜角后,本征值急剧下降。在反射率呈高斯分布时,本征值下降较快,这主要是透射损失引起的,但不像均匀反射率情况下有明显分界点。如果以不能引起振荡作为允许的最大倾斜角的判断标准的话(光场中心移至镜边缘),最大允许倾斜角却随  $H$  值变化,并基本呈线性。

### 参考文献:

- [1] 卢宏,陈清明,李晓平,等. 横流  $\text{CO}_2$  激光器的折叠式谐振腔研究[J]. 激光杂志, 1999, **20**(1):31-34. (Lu H, Chen Q M, Li X P, et al. Study on folded resonator for transverse-flow  $\text{CO}_2$  laser. *Laser Journal*, 1999, **20**(1):31-34)
- [2] Neste R V, Pare C, Lachance R L, et al. Graded-phase mirror resonator with a super-gaussian output in a CW  $\text{CO}_2$  laser[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1994, **30**:2663-2669.
- [3] Perrone M R, Tundo S, Panzera C, et al. Beam-divergence control of excimers with plane-parallel Gaussian cavities[J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(33):8574-8581.
- [4] 凌东雄,李俊昌,管一弘. 高斯反射率方形凹腔激光模场的有限元分析[J]. 光电子·激光, 2002, **13**(6):617-621. (Ling D X, Li J C, Guan Y H. The boundary finite-element analysis of mode-fields of the square plano-concave resonator with a Gaussian-reflectivity mirror. *J of Optoelectronics Laser*, 2002, **13**(6):617-621)
- [5] Deng D, Fu X, Tian Y, et al. Far-field intensity distribution of beam generated by Gaussian mirror resonator[J]. *Opt Commun*, 2005, **248**: 185-189.
- [6] 刘建宏,王筠华,刘祖平,等. 边界元素法在 NSRL 束测系统调试中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2000, **12**(2): 254-256. (Liu J M, Wang J H, Liu Z P, et al. Boundary element method and its application in the test of NSRL BPM system. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(2): 254-256)
- [7] 库耕,程祖海,朱松林,等. 腔镜变形对平凹稳腔激光振荡模式影响的数值研究[J]. 强激光与粒子束, 1997, **9**(3):447-450. (Ku G, Cheng Z H, Zu S L, et al. Numerical study of effect of the mirror distortion on the oscillatory mode variation of stable resonator. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, **9**(3):447-450)
- [8] 阮双琛,龙井华,张帆,等. 高效 LD 端面泵浦 CW  $\text{Cr}:\text{LiSAF}$  激光器的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, **11**(5):521-526. (Ruan S C, Long J H, Zhang F, et al. High efficiency end-pump CW  $\text{Cr}:\text{LiSAF}$  laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(5):521-526)

## Influence of Gaussian reflectivity mirror and its tilt on the laser field distribution of plano-concave resonator

PENG Yu-feng, LI Kuo-hu, CHEN Jing, LÜ Zhen-long, PENG Ai-lian, WEI Yao-li, ZHANG Yong-tao

(College of Physics and Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** In this paper, by means of boundary finite-element method, the field distributions and eigenvalues of the fundamental mode of the plano-concave resonator with a tilted even-reflectivity plane mirror or a tilted Gaussian-reflectivity plane mirror are calculated and discussed. The results show that when the plane mirror tilts, the center of the mode distribution on it will move towards its edge along the tilting direction. When the tilt angle of the mirror is big enough, the mode will be distorted, the symmetry Gaussian distribution will disappear. Furthermore, with the increasing of the tilt angle the far field distributions become bad, and the eigenvalues decrease. Under the same conditions, the mode distortions induced by the tilted mirror are smaller for the plano-concave resonator with the Gaussian-reflectivity, and the relations of the field distributions with Gaussian-reflectivity to the tilt angles are different from those with even-reflectivity.

**Key words:** Plano-concave resonator; Gaussian reflectivity mirror; Boundary finite-element method; Mirror tilt; Far field distribution