

文章编号: 1001-3806(2008)04-0402-04

二维轴对称 折叠组合腔 CO₂ 激光器近场失调分析

闫廷光, 李育德*, 肖丰霞, 刘现魁, 高 柯, 封 涛
(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘要: 为了研究小角度失调对二维轴对称-折叠组合腔 CO₂ 激光器输出光束的近场分布的影响, 在利用矩阵理论确定平凹谐振腔和凹-平-凹谐振腔失调后的光轴的基础上, 采用光束并和思想, 对输出光束进行了理论分析和模拟。取得的数据表明, 小角度失调对 4cm 以内的近场强度影响不大, 光强仍具有高斯状分布; 对 4cm 以外的近场强度影响较大, 光强分布轮廓发生相应的变形, 且随着失调角度变大而变大。研究结果表明, 在 4cm 以内的近场具有实用价值。

关键词: 激光器; 轴对称-折叠组合腔; 失调; 高斯光束; 并和

中图分类号: TN284.2⁺2 文献标识码: A

Near-field analysis of misaligned CO₂ laser of two-dimensional axisymmetric-fold combination cavity

YAN Ting-guang, LI Yu-de, XIAO Feng-xia, LIU Xian-kui, GAO Ke, FENG Tao
(School of Electronic and Information Science, Sichuan University, Chengdu 610064 China)

Abstract Under the condition of small angle misalignment, the effect on output beam's near field distribution of CO₂ lasers with two-dimensional axisymmetric-fold combination cavity was ascertained after analyzing and simulating beams combination output based on the axis determination of misaligned plano-concave and concave-plano-concave cavity resonator. The results showed that at small angle misalignment, the effect on near field within 4cm was unobvious and the light intensity was still at Gaussian distribution, and that out of the 4cm area, the effect became obvious with the misalignment angle. These results showed that the effect on near field within 4cm was more practically.

Key words lasers; axisymmetric-fold combination cavity; misalignment; Gaussian beam; combination

引 言

自从 1964 年 PATEL 成功研制第一台 CO₂ 激光器以来, 已出现多种形式的激光器, 如直管型、折叠封离型、平板型、波导列阵型、轴流型、横流型、气动型等。有着高功率输出的轴流型和横流型 CO₂ 激光器的工业应用领域很广, 主要应用于现代制造业中的切割、焊接、表面处理等。轴流型 CO₂ 激光器更因其光束质量占有优势而特别受到工业界的欢迎^[1]。然而对于高功率输出 CO₂ 激光器来说, 采用扩散冷却技术可抛弃用于气体快速流动冷却的风机或罗茨泵及其附件, 使激光器的体积大为减小, 并可降低激光器成本, 提高激光器总效率, 实现激光器无噪声运行。因此, 扩散冷却高功率 CO₂ 激光技术具有广阔应用前景。扩散冷却

高功率激光器的研制在国际上受到高度重视。扩散冷却圆筒形激光器^[2-5]已在米长级器件获得千瓦级输出, 例如, 一个直径约 55mm、长 1.8m 的器件已获得 2kW 输出^[5]。扩散冷却平板波导 CO₂ 激光器也能达到千瓦级输出, 例如, 在电极面积 95mm × 770mm、电极间距 2mm, 采用非稳波导混合腔, 输出达到 1060W^[6,7]。原则上可以安装在机械臂的末端应用^[8]。扩散冷却多通道板条径向阵列型 CO₂ 激光器^[9-11]是平板结构按轴对称安排的一个极其紧凑的阵列结构, 原则上可以在较小的体积实现兆瓦级输出^[11]。但是, 圆筒形器件的谐振腔采用复曲面镜和螺旋反射镜, 技术很复杂, 器件功率也受限制, 而且往往采取开孔输出而影响光束质量; 平板型器件面积较大时易变形, 其复杂的波导谐振腔也使输出受到限制, 放大技术复杂使光束质量受到影响; 而板条多通道径向阵列器件其谐振腔采用极大尺寸的复曲面镜, 这样的腔镜加工难度很大, 而且注入功率受射频电源限制, 十余年的研究才达到 3.5kW 的输出^[11]。具有轴对称-折叠组合腔的扩散冷却 CO₂ 激光器^[12-13], 利用多个凹-平-凹折叠腔和一个平凹腔

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60278020)

作者简介: 闫廷光 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光器件和技术、高功率激光和光电子技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: liyude15@yahoo.com.cn

收稿日期: 2007-05-08; 收到修改稿日期: 2007-10-22

共用一个平面输出镜的方法,产生并和光束,具有装置体积小、高功率的输出和出射光束具有一个公共出射点等优点,且注入功率不受电源限制。已经对轴对称结构的谐振腔构建及谐振腔确定的输出光束的基本特性^[12]和输出光束的近场分布^[13]给予了初步的研究。二维轴对称结构较之平板波导结构而言则更容易获得高功率输出,而且谐振腔较为简单。其近场光斑具有窄条形状,在设计较佳的条件下可方便地用于材料切割、焊接、表面处理等加工,也可以通过会聚镜会聚后使用。轴对称-折叠组合腔的失调会影响输出光束的近场强度分布,这问题还无人研究。引起激光器失调的原因有很多,角度失调是主要的。作者就针对 5 根激光管的二维轴对称结构小角度失调运行进行了分析讨论。

1 腔镜失调分析

如图 1 所示, R₁-R₆-R₂ 和 R₃-R₆-R₄ 分别为含 1, 2

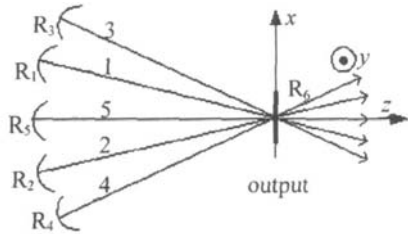


Fig 1 Two dimensional axisymmetric folded combined cavity

放电管和 3, 4 放电管的凹-平-凹折叠腔, R₅-R₆ 为含 5 号放电管的平凹腔。R₁, R₂, R₃, R₄, R₅ 为曲率半径相同的全反凹面镜, R₆ 为共用的平面输出镜。作者将在 R₁ 失调运行时,对输出近场做相干并和的分析,并对输出光束的近场强度分布进行计算机模拟,可为近场使用提供参考依据。而 R₂, R₃ 或 R₄ 的失调分析和结果与 R₁ 失调的情况相似。

1.1 平凹腔镜失调分析

如图 2a 所示,当光学系统中光学元件(其变换矩

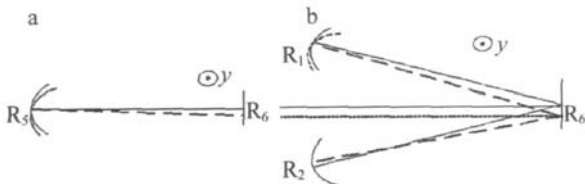


Fig 2 a—misaligned R₅-R₆ planar-concave cavity b—misaligned R₁-R₆-R₂ concave-planar-concave cavity

阵为 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$), 相对于系统的理想光轴失调,其线位移为 ε 角位移为 ε' 。若仍用 2×2 矩阵来描述它对坐标和方向余弦为 (X_1, θ_1) 的入射光线的变换则不方便。经证明,若用一个 4×4 矩阵来描述该光学元件对入射光线的坐标和方向余弦的变换则较为方便。即有:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ \theta_2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & \alpha\varepsilon & \beta\varepsilon' \\ C & D & \gamma\varepsilon & \delta\varepsilon' \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ \theta_1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中的 4×4 矩阵为增广矩阵, $\alpha = 1 - A$, $\beta = -B$, $\gamma = -C$, $\delta = -1 - D$ 。整个系统增广矩阵则由各元件(包括自由空间的长为 L 的介质)的增广矩阵依次相乘而得,未失调的元件则其增广矩阵中的 $\varepsilon = 0$ $\varepsilon' = 0$

凹面镜 R₅ 的曲率半径为 R , 平凹腔腔长为 L 。R₅ 光轴在 $x-z$ 面内对 z 轴倾斜 ε_1 角, 线位移为 Q 。由此引起腔轴在 R₅ 处的失调线位移和角位移为 X_{55} , θ_{55} 。引起 R₆ 处的失调线位移和角位移为 X_{65} , θ_{65} 。同样 R₆ 轴倾斜 ε_2 角, 由此引起 R₆ 和 R₅ 处的失调线位移和角位移为 X_{66} , θ_{66} , X_{56} , θ_{56} 。当 R₅ 失调角为 ε_1 , 以 R₆ 为参考面, 利用增广矩阵往返一周后有 ($\varepsilon_2 = 0$):

$$\begin{bmatrix} X_{65} \\ \theta_{65} \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 & 0 & -2\varepsilon_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{65} \\ \theta_{65} \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

求得:

$$X_{65} = -R\varepsilon_1, \theta_{65} = 0 \quad (3)$$

同理可求得:

$$\begin{aligned} X_{55} &= -R\varepsilon_1, \theta_{55} = 0 \\ X_{66} &= (L - R)\varepsilon_2, \\ \theta_{66} &= -\varepsilon_2 X_{56} = -R\varepsilon_2, \theta_{56} = -\varepsilon_2 \end{aligned} \quad (4)$$

1.2 凹-平-凹折叠腔镜失调分析

如图 2b 所示, 凹面镜 R₁, R₂ 的曲率半径为 R , 折叠腔腔长为 $2L$ 。该折叠腔的理想光轴位于 $x-z$ 面内, 沿理想光轴可将其展开为直腔。R₁ 光轴对系统理想光轴倾斜 ε_3 角, 线位移为 Q 。由此引起腔轴在 R₁ 处的失调线位移和角位移为 X_{11} , θ_{11} 。引起 R₆ 处的失调线位移和角位移为 X_{61} , θ_{61} 。同样 R₆ 倾斜 ε_4 角, 由此引起 R₆ 和 R₁ 处的失调线位移和角位移为 X_{66} , θ_{66} , X_{16} , θ_{16} 。当 R₁ 失调角为 ε_3 , 以 R₆ 为参考面, 利用增广矩阵^[14-15], 往返一周后有 ($\varepsilon_4 = 0$):

$$\begin{bmatrix} X_{61} \\ \theta_{61} \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 & 0 & -2\epsilon_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{61} \\ \theta_{61} \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

求得:

$$X_{61} = -\frac{R\epsilon_3}{2}, \theta_{61} = -\epsilon_3 \quad (6)$$

同理可求得:

$$X_{11} = -\frac{(2L-R)R\epsilon_3}{2(L-R)}, \theta_{11} = \frac{R\epsilon_3}{2(L-R)}, X_{66}' = (L-R)\epsilon_4, \theta_{66}' = -\epsilon_4, X_{16} = -R\epsilon_4, \theta_{16} = -\epsilon_4 \quad (7)$$

2 模型建立

2.1 多束基模高斯光束的场分布及光强分布

基模高斯光束光场^[14]:

$$\epsilon_n(x_n, y_n, z_n) = \frac{A_0 w_0}{w_n(z_n)} \exp\left[-\frac{x_n^2 + y_n^2}{w_n^2(z_n)}\right] \cdot \exp[-i\phi_n(x_n, y_n, z_n)] \quad (8)$$

式中, $w_0 = \sqrt{\frac{\lambda_n Z_0}{\pi}}$; $w_n(z_n) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z_n}{Z_0}\right)^2}$; $R_n(z_n) = Z_0 \left(\frac{z_n}{Z_0} + \frac{Z_0}{z_n}\right)$; $A_0 = \frac{\sqrt{2}}{w_0}$; $\phi_n(x_n, y_n, z_n) = k_n \left[\frac{x_n^2 + y_n^2}{2R_n(z_n)} + z_n \right] - \Psi_n$; $\Psi_n = \tan^{-1} \frac{z_n}{Z_0}$; $n = 1, 2, 3, 4, 5$ 分别表示 5 束基模高斯光束的光场表达式。

基模高斯光束相对光强:

$$I_n(x_n, y_n, z_n) = |\epsilon_n(x_n, y_n, z_n)|^2 \quad (9)$$

2.2 多束高斯光束的分布

对如图 1 分布的 5 束基模高斯光束分布, 光束 5 的出射方向为 z 轴。每束高斯光束的束腰中心与 z 轴交于 $(0, 0, 0)$ 点, 建立如图 3 所示的坐标系, 其余 4 束光的出射方向分别为 $z_n (n = 1, 2, 3, 4)$, $y_n (n = 1, 2, 3, 4)$, 其中 y_n 轴与 y 轴重合。 z_1, z_2 轴与 z 轴夹角为 θ_1 ,

z_3, z_4 轴与 z 轴夹角为 θ_2 。

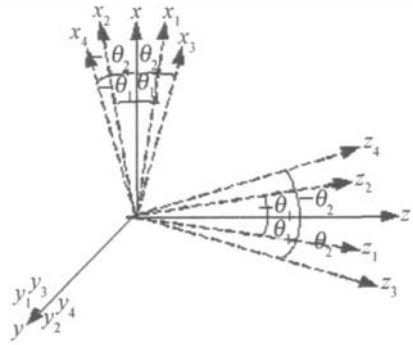


Fig 3 Coordinates of beams

2.3 光束并和

由于所选模型基于的激光器采用内腔结构, 其基模高斯光束一般为椭圆偏振光。设波矢 k_n 沿各光束相应坐标系的 z_n 轴正向传播。在各坐标系中与传播方向垂直平面上, 其光强可分解为 x_n, y_n 方向上的两个偏振分量 A_{nx}, A_{ny} 。

在如图 1 所示轴对称折叠组合腔中, 由于光束 1, 光束 2 和光束 3 光束 4 分别来自于同一个谐振腔中, 因此, 具有相同的频率和固定的相位关系。为计算方便, 假设在各子坐标系 (x_n, y_n, z_n) 中光束 1, 2 或光束 3, 4 在 $(0, 0, 0)$ 点垂直于 z_n 轴的平面上且相位相等, 则光束 1, 2 和光束 3, 4 分别满足相干并和。两对相干光束和光束 5 满足非相干并和。波矢 k_n 沿各光束相应坐标系的 z_n 轴正向。在 $x-y-z$ 系中 z 平面设置接收屏, 则屏上光强没有 z 分量, 光强表示式为:

$$I = I_{12} + I_{34} + I_5 = (A_{1x} + A_{2x})(A_{1x} + A_{2x})^* + (A_{1y} + A_{2y})(A_{1y} + A_{2y})^* + (A_{3x} + A_{4x})(A_{3x} + A_{4x})^* + (A_{3y} + A_{4y})(A_{3y} + A_{4y})^* + A_{5x}A_{5x}^* + A_{5y}A_{5y}^* \quad (10)$$

式中, * 表示复共轭。

3 计算和模拟

假设 5 束基模高斯光束均为右旋正椭圆偏振光, 在 x_n 方向光强有极大值, y_n 方向上有极小值, 并且 y_n 方向振动相位比 x_n 方向超前 $\pi/2$ 偏振度为 70%。在数值计算中, CO_2 激光器波长 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, 平凹腔腔长 $L = 140 \text{cm}$, 凹-平-凹折叠腔长为 \mathcal{L} , 凹面镜的曲率半径 $R = 500 \text{cm}$, $R_1-R_6-R_2$ 折叠腔中凹面镜中心间距为 8cm, 则 $\theta_1 = \arcsin(4/140)$, $R_3-R_6-R_4$ 折叠腔中凹面镜中心间距为 16cm, 则 $\theta_2 = \arcsin(8/140)$ 。束腰半径 $w_0 = 0.2752 \text{cm}$, 瑞利长度 $Z_0 = 2.245 \text{m}$ 。当凹面镜 R_1 失调时, 根据上述对腔镜失调的分析, 由 (5) 式 ~ (7) 式得到不同倾斜角引起失调线位移计算值, 如表 1 所示。

Table 1 Calculation results where unity length is in centimeters, $R = 500\text{ cm}$ and $L = 140\text{ cm}$

ε_3	X_{61}	X_{11}	θ_{61}	θ_{11}
24''	0.02909	0.01778	0.0001164	0.000808
36''	0.04363	0.02666	0.0001745	0.001212

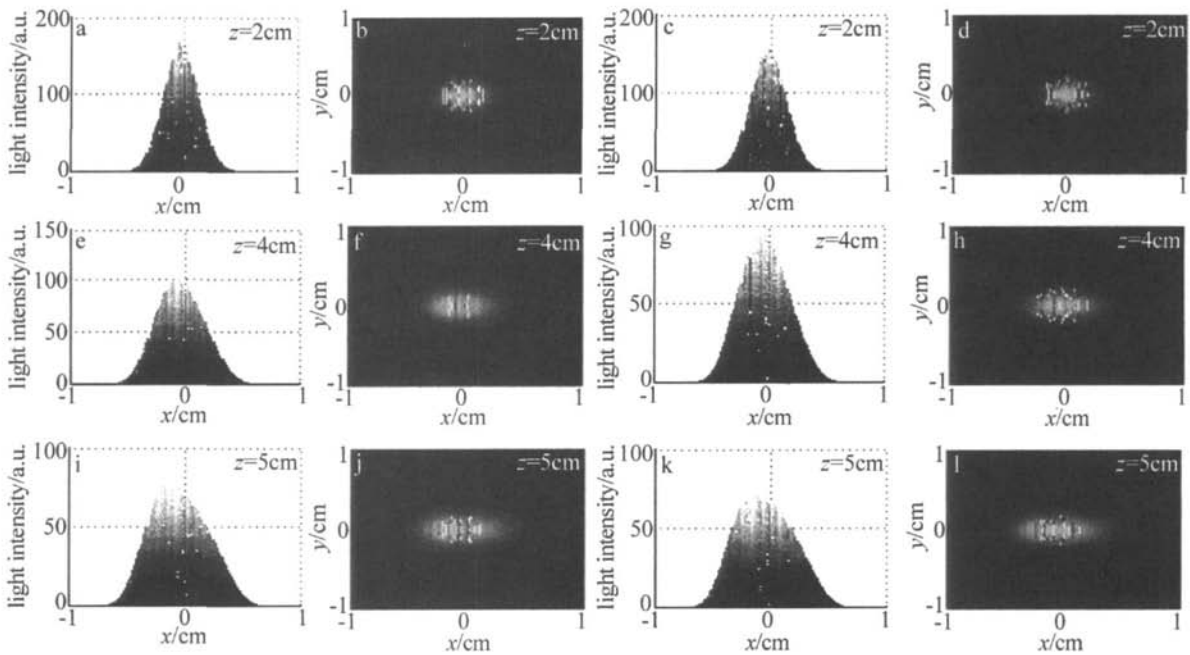


Fig. 4 Light intensity and facet of output beams

光斑,其中图 4a 图 4b 为 $\varepsilon_3 = 24''$ 时的光强分布和光斑,图 4c 图 4d 为 $\varepsilon_3 = 36''$ 时的光强分布和光斑。图 4e~ 图 4h 为 $z = 4\text{ cm}$ 平面上输出光束的光强分布和光斑,其中图 4e 图 4f 为 $\varepsilon_3 = 24''$ 时的光强分布和光斑,图 4g 图 4h 为 $\varepsilon_3 = 36''$ 时的光强分布和光斑。图 4i~ 图 4l 为 $z = 5\text{ cm}$ 平面上输出光束的光强分布和光斑,其中图 4j 图 4k 为 $\varepsilon_3 = 24''$ 时的光强分布和光斑,图 4l 图 4l 为 $\varepsilon_3 = 36''$ 时的光强分布和光斑。从光斑图中看到,二维轴对称-折叠组合腔 CO₂ 激光器产生的光束是窄而宽的“扁平”光束。从光强分布图中可以明显地看出由光束相干并和产生的干涉加强区。比较图 4a 图 4c 图 4e 图 4g 图 4i 和图 4k 可以得到,在距输出镜相同的平面上,随着失调的角度增大,光束在平面上光强分布的形状变化就越严重。通过图 4a~ 图 4l 可以得到,在失调角度很小的情况下,在越靠近输出镜的平面上,光束的光斑尺寸越小,光强越强,且光强分布越具有明显的高斯分布,其变形程度越小。

对于其它凹面镜失调时,也可以采用类似的方法分析。但是,随着失调的凹面镜的数目增多时,光束形变将会越严重,光束质量将会越差,可使用的近场距离将会变短。

4 结 论

从以上的计算和模拟得知,二维轴对称-折叠组合

利用坐标变换^[13]和(8)式~(10)式,在 $z = 2\text{ cm}$, $z = 4\text{ cm}$ 和 $z = 5\text{ cm}$ 平面上,输出光束光强和光斑分别见图 4。

图 4 中的 3 组数据是经过大量计算后选取的。图 4a~ 图 4d 为 $z = 2\text{ cm}$ 平面上输出光束的光强分布和

腔 CO₂ 激光器在小角度失调运行时,在 4cm 以内的近场光强分布仍具有高斯状分布,距输出镜越近,光强越强,光束尺寸越小,受失调角度变化的影响越小。随着失调角度的增加和传输距离的增加,光束形变就越来越严重。因此,本着高输出光强和好的光束质量原则,在 4cm 以内的近场可以得到实际的应用。

二维轴对称-折叠组合腔 CO₂ 激光器产生的光束是窄而宽的“扁平”光束,该光束具有轴对称立体结构、近场高光强分布集中、光斑尺寸很小等特点,因此在激光加工方面,尤其是激光切割和激光焊接方面的应用将十分的便利。

参 考 文 献

- [1] XU Q Y, WANG X B. Continuous wave high power CO₂ lasers [M]. Beijing National Defense Industry Press 2000. 48-122 (in Chinese).
- [2] DEITMAR C, VWEH, HEINE-DIETER P. High-power CO₂ laser with coaxial waveguide and diffusion cooling [J]. IEEE J Q E, 1993, 29 (7): 2211-2219.
- [3] DEITMAR C, VWEH, HEINE-DIETER P. Ring resonator for lasers with annular gain media [J]. Appl Opt, 1994, 33 (30): 6919-6924.
- [4] DEITMAR C, VWEH, HEINE-DIETER P, et al. A zimuthally unstable resonators for high-power CO₂ laser with annular gain media [J]. IEEE J Q E, 1994, 30 (6): 1440-1447.
- [5] ANTONIO L, MARCO C. Extraction of high-quality beams from narrow annular laser sources [J]. Appl Opt, 1999, 38 (21): 4552-4557.

变效应是限制系统性能的关键因素,因此,需要大量的数值模拟计算来实现系统参数的设计与优化,此算法可望用于这方面的研究。

参 考 文 献

- [1] ZHANG H, FAN D Y. Optimization of the design of high power Nd: glass laser amplifiers [J]. *Physics* 1999, 28(2): 79-84(in Chinese).
- [2] LÜ B D, ZHANG B. Theory of the high-power laser propagation through amplifiers [J]. *Laser Technology* 1997, 21(5): 288-292(in Chinese).
- [3] LÜ B D. Beam characterization propagation transformation resonator technology and physics [M]. Beijing High Education Press 2003 10-12(in Chinese).
- [4] LIU Sh L, DAI J H, MA X X. Effect of inhomogeneity medium on high intensity laser propagation [J]. *Acta Optica Sinica* 1995, 15(6): 721-727(in Chinese).
- [5] HUANG Zh H, CHENG H F. A Study on universal ray tracing algorithm in the medium of variable refractive index [J]. *Acta Optica Sinica* 2005, 25(5): 589-592(in Chinese).
- [6] ZHANG W J. A new method to study optical ray propagations in media with ununiform refractivity [J]. *Acta Optica Sinica* 1986, 6(11): 1026-1031(in Chinese).
- [7] GUO P. A numerical analysis of Gaussian beam propagate in gradient index nonlinear medium [J]. *Laser Technology* 1990, 14(5): 37-43(in Chinese).
- [8] AN J Z, LI Y K, DU X W. Influence of laser windows thermal lensing effect on beam quality [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2004, 16(4): 429-433(in Chinese).
- [9] YU J, TAN H M. Theoretical study on the thermal beam focusing in longitudinally-pumped solid state laser rods [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2000, 12(1): 27-31(in Chinese).
- [10] SUTTON S, ERLANDSON A, LONDON R, *et al*. Thermal recovery of the NF amplifiers solid-state laser for application to inertial confinement fusion [J]. *SPIE*, 1998, 3492 665-671.
- [11] LI Z H, GUO Q. Numerical research on the self focusing of optical beams [J]. *Chinese Journal of Lasers* 1999, 26(8): 711-716(in Chinese).
- [12] FEI M D, FLECK K A. Beam nonparaxiality, filament formation, and beam breakup in the self focusing of optical beams [J]. *J O S A*, 1998, 88(5): 633-636.
- [6] COLLEY A D, BAKER H J, HALL D R. Planar waveguide 1kW CW carbon dioxide laser excited by a single transverse RF discharge [J]. *A P L*, 1993, 61(2): 136.
- [7] WU G L, WANG Y Q, AN Ch W. The analysis of resonators for RF excited diffusion-cooled CO₂ planar laser [J]. *Laser Technology*, 1998, 22(2): 121-123(in Chinese).
- [8] ZHANG Y Ch. Chinese laser industry last ten years [J]. *Laser & Infrared* 2000, 30(3): 136-140(in Chinese).
- [9] YELDON E F, SEGUIN H J J, CAPACK C E, *et al*. Multichannel slab discharge for CO₂ laser excitation [J]. *A P L*, 1991, 85(7): 693-695.
- [10] YELDEN E F, SCOTT S W, STROHSCHEN J D, *et al*. Symmetry enhancement and spot size reduction through radial beam stacking in a multichannel CO₂ laser array [J]. *IEEE J Q E*, 1994, 30(8): 1868-1875.
- [11] SEGUIN H J J. Power scaling of diffusion-cooled lasers [J]. *Opt & Laser Technol* 1998, 30(9): 331-336.
- [12] LI Y D, LIU J L, CHEN M, *et al*. Axisymmetric-fold combination laser resonator [J]. *Opt Engng* 2005, 44(6): 064204.
- [13] LU J L, LI Y D, GUO J P, *et al*. Research on near-field distributions of axisymmetric folded combined CO₂ laser [J]. *Opt Engng* 2006, 45(7): 074201.
- [14] LÜ B D. *Laser optics* [M]. Chengdu: Sichuan University Press 1992: 60-65, 68-171, 335-360(in Chinese).
- [15] LU Y X. Variation of misalignment sensitivity of a three-mirror cavity [J]. *Laser Technology*, 1991, 15(3): 154-157(in Chinese).

(上接第 405页)

编辑部

《激光技术》

版权所有