

2 kW 射频板条 CO₂ 激光器输出光束整形特性研究

肖龙胜¹ 唐霞辉¹ 秦应雄¹ 周泳全² 杨卫红¹ 韩蒙蒙¹

(¹ 华中科技大学光学与电子信息学院, 激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074)

² 深圳信息职业技术学院, 广东 深圳 518000

摘要 针对 2 kW 射频板条 CO₂ 激光器离轴负支非稳波导混合腔的近场分布存在较多高空间频率分量, 导致聚焦后会产生不可忽略的旁瓣, 无法直接应用于激光加工的问题, 对谐振腔的近场分布使用特征向量法和矩形波导的解析表达式进行了数值模拟和实验研究。并结合 Collins 公式研究了输出光束整形过程中光场分布的变化和整形系统中空间滤波器的优化设计。理论和实验结果表明: 激光器输出光束在整形前为有较多高空间频率振荡的长条形的简单象散光束。通过带空间滤波器的整形系统消除旁瓣, 并将初始的长条形的简单象散光束整形成近圆形、近基模高斯分布的光束。整形后的光束非稳方向的光束质量因子 M^2 为 1.1, 波导方向 M^2 为 1.08。

关键词 激光光学; 射频板条 CO₂ 激光器; 离轴负支非稳腔; 简单象散光束; 光束整形; 空间滤波器

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0402008

Shaping Characteristics of Output Beam of 2 kW Radio Frequency Slab CO₂ Laser

Xiao Longsheng¹ Tang Xiahui¹ Qin Yingxiong¹ Zhou Yongquan²

Yang Weihong¹ Han Mengmeng¹

(¹ National Engineering Research for Laser Processing, School of Optical and Electronic information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

² Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen, Guangdong 518000, China

Abstract For side lobes caused by the high spatial frequency oscillations in the output beam of off-axis negative-branch unstable-waveguide hybrid resonator of 2 kW radio frequency slab CO₂ laser, the near-field distributions of the hybrid resonator are investigated by numerical simulation and experimental method. The eigenvector method and the analytical expression of the rectangular waveguide resonator are used for the numerical simulation. The variations of intensity profiles of the output beam in the beam shaping system and the spatial filter design of beam shaping system are also studied with Collins integral expression. The results show that the laser emits a simple astigmatic beam with a rectangular intensity distribution. The unshaped beam has severe high spatial frequency oscillations in the unstable direction. The side lobes of the unshaped beam are eliminated and the unshaped beam is changed into an approximately circular, nearly Gaussian-shaped beam beam by a beam shaping system with a spatial filter. The shaped beam propagation factor M^2 is 1.10 in the unstable direction and M^2 is 1.08 in the waveguide direction.

Key words laser optics; radio frequency slab CO₂ laser; off-axis negative-branch unstable resonator; simple astigmatic beam; beam shaping; spatial filter

OCIS codes 140.3300; 140.3295; 140.3460

1 引言

Colley 等^[1]提出了正支非稳波导混合腔(简称

正支腔), 首次报道了射频激励扩散冷却千瓦输出 CO₂ 激光器。Ehrlichmann 等^[2-4]提出了环形稳定

收稿日期: 2013-09-10; **收到修改稿日期**: 2013-10-21

基金项目: 高等学校博士学科点专项科学研基金(20110142110046)、中央高校科研业务(HUST2013TS048)、武汉市晨光计划(2013070104010006)

作者简介: 肖龙胜(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事激光传输与整形等方面的研究。

E-mail: xiaolongsheng0118@foxmail.com

导师简介: 唐霞辉(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光器和激光加工等方面的研究。

E-mail: txh1116@hust.edu.cn(通信联系人)

非稳腔结构实现高功率输出。Yelden 等^[5]采用多通道扩散冷却板条结构技术,也获得了高功率输出。Newman^[6]提出了一种板条波导阵列结构,Abramski 等^[7]将其推广到多维阵列得到了 2 kW 的输出功率。Tang 等^[8-12]研制出 1×2 层叠式板条波导阵列结构,获得了 1020 W 的输出功率。上述光腔结构虽然不是传统的单板条结构,但是光腔非稳方向的截面均采用了同样的正支非稳腔结构。2011 年 Wang 等^[13]的报告中同样使用了正支非稳波导混合腔结构,输出功率为 200 W,并通过实验研究了光束特性与光腔失调对输出功率的影响。

目前针对板条激光器谐振腔技术的研究中,普遍采用正支腔结构,针对离轴负支非稳波导混合腔结构(简称负支腔)的光场分布的数值分析较少^[14-15]。相比负支非稳腔而言,正支非稳腔抗失调性较差^[16]。但是,负支非稳腔存在近场分布有较高空间频率分量的问题,导致聚焦后光场出现不可忽略的旁瓣,无法直接用于加工生产。因此,单一的针对正支腔的柱面镜整形系统^[17-18],不能满足负支腔输出光束整形的要求。

本文通过建立离轴负支非稳波导混合腔近场分布的数值模型,分析了近场光束的传输与聚焦特性。研究了整形过程中光强分布的变化和整形系统中空间滤波器的优化设计。通过建立的数值模型,优化设计了空间滤波器参数,有效地消除了聚焦光场中的旁瓣,数值结果与实验相符。

2 实验条件

实验平台为一台输出功率为 2 kW 的射频 CO₂ 板条激光器,图 1 为离轴负支非稳波导混合腔的结构图。 x 方向为非稳腔结构, y 方向为波导结构。其

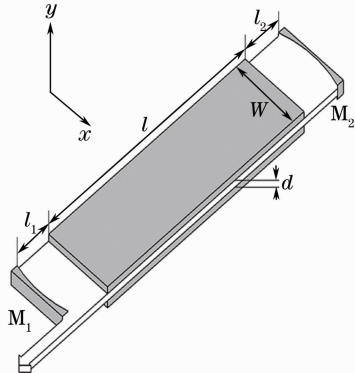


图 1 离轴负支非稳波导混合腔结构图
Fig. 1 Scheme of negative-branch off-axis unstable-waveguide hybrid resonator

中,非稳腔放大率 $M = -1.13$,菲涅耳数 $N_{ef} = 675$,波导方向两板条间距 $d = 1.5 \text{ mm}$ 。

3 理论分析

首先定义 $E(x, y)$ 为光腔里面的场分布。可以根据分离变量法 $E(x, y) = u(x)v(y)$ 分别计算非稳方向和波导方向的光场来得到光腔里面的场分布^[19-20],其中, $u(x)$ 是非稳方向上的光场, $v(y)$ 是波导方向上的光场。

3.1 腔内非稳方向

本征值和模式分布主要取决于非稳腔放大率 M 和等效菲涅耳数 N_{eq} 。可以使用有限元特征向量法来计算非稳腔的模式^[21-23]。特征向量法可以看作是 Fox-Li 迭代的推广,与迭代法不同的是,特征向量法无需进行上百次的迭代计算,一次计算就可以求出一系列的模式分布。同时,特征向量法的计算过程与初始选值无关。对于如图 1 所示的谐振腔,腔镜 M_1 上的光波场为 U_1 ,腔镜 M_2 上的光波场为 U_2 。将腔镜 M_1 上的光波场按一定的顺序划分单元,通过在各个单元上的光场采样,将场 U_1 离散为 $u_1(1), u_1(2), \dots, u_1(m)$ 。腔镜 M_2 上的光波场也进行同样的处理,离散为 $u_2(1), u_2(2), \dots, u_2(n)$ 。腔镜 M_2 上的单元光场 q 处的光场复振幅 $u_2(q)$ 可看作腔镜 M_1 上所有单元对腔镜 M_2 单元 q 处的作用叠加。根据菲涅耳-基尔霍夫定理以及 Collins 公式,有如下表达式:

$$u_2(q) = \sum_{p=1}^m \frac{ik}{4\pi S_p} \iint_{S_p} u_1(p) \frac{\exp(-k\rho)}{\rho} (1 + \cos \alpha) dx dy, \quad (1)$$

式中 $\rho = \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2 + L^2}$, L 为腔长, S_p 为被积单元面积, α 为腔镜 M_1 单元 P 处法线与 p, q 连线的夹角。

当镜面划分单元数足够大时,每个单元的复振幅变化很小,可以假设每个单元上的复振幅为均匀分布,则 $u_1(p)$ 在单元 p 处的积分区域内与 x, y 无关。由此可得到如下关系式:

$$u_2(q) = \sum_{p=1}^m A_{12}(q, p) u_1(p), \quad (2)$$

式中

$$A_{12}(q, p) = \frac{ik}{4\pi S_p} \iint_{S_p} \frac{\exp(-k\rho)}{\rho} (1 + \cos \alpha) dx dy. \quad (3)$$

在腔镜已知且单元划分明确的情况下,可求得

$A_{12}(q, p)$ 。一对 p, q 可唯一确定一个 $A_{12}(q, p)$ 。

由上述关系式可以得到腔镜 M_1 上光场 U_1 与腔镜 M_2 上光场 U_2 的简单关系式 $U_2 = A_{12}U_1$, 其中传输矩阵为

$$A_{12} = \begin{bmatrix} A_{12}(1,1) & A_{12}(1,2) & \cdots & A_{12}(1,m) \\ A_{12}(2,1) & A_{12}(2,2) & \cdots & A_{12}(2,m) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{12}(n,1) & A_{12}(n,2) & \cdots & A_{12}(n,m) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

同理, 腔镜 M_2 到腔镜 M_1 的传输矩阵 A_{21} 也可求得。

假设光波从腔镜 M_1 出发, 经过一次往返回到腔镜 M_1 。则有如下关系式:

$$U_1' = A_{21}A_{12}U_1 = A_S U_1, \quad (5)$$

式中

$$A_S = A_{21}A_{12}, \quad (6)$$

A_S 为往返一次的传输矩阵。

根据谐振腔自在现模理论, 有 $U' = \gamma U_1$, 其中 γ 为方程的本征值, 表示一个往返光场的振幅和相位的变化。与(5)式比较, 可以发现, 求解 γ 的过程就是求解传输矩阵 A_S 的过程。将传输矩阵 A_S 用 Matlab 分析, 求得该矩阵的特征向量与特征值。模值最小的特征值对应的特征向量即为最低损耗阶模^[21]。

3.2 腔内波导方向

平板波导内横电模 TEM_{0m} 可由解析式表示为^[24]

$$E_X^{(i)} = \frac{i\omega\mu}{k_y^{(i)}\zeta_3^{(i)}} \cos[k_y^{(i)}y + \varphi_y] \exp[-ik_z^{(i)}z], \quad (7)$$

式中

$$\varphi_y = 0, k_y^{(i)} \approx \frac{(m+1/2)\pi}{2d} \left[1 + i \frac{1}{k^{(i)}d \sqrt{\epsilon_a/\epsilon_0 - 1}} \right], \quad (8)$$

$$\varphi_y = \pi/2, k_y^{(i)} \approx \frac{m\pi}{2d} \left[1 + i \frac{1}{k^{(i)}d \sqrt{\epsilon_a/\epsilon_0 - 1}} \right], \quad (9)$$

$$k_z^{(i)} \approx -k^{(i)} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{2m\pi}{4dk^{(i)}} \right]^2 \right\} + i \frac{1}{d} \frac{m\pi}{2dk^{(i)}} \operatorname{Re} \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_a/\epsilon_0 - 1}} \right), \quad (10)$$

式中 $k_y^{(i)}$ 和 $k_z^{(i)}$ 分别为场在 y 方向和真空中的波数, ϵ_0 为真空的介电常数, ϵ_a 为平板波导材料的绝对介电常数, μ 为磁导率, ω 为圆频率, $\zeta_3^{(i)}$ 为常数振幅, φ_y 为初始相位常数, d 为平板间距。

当 m 为奇数, $\varphi_y = 0$; 当 m 为偶数, $\varphi_y = \pi/2$ 。本文中, 取 $m = 1$, 此时可求得平板波导内低阶模 TE_{01} ^[25]。

4 数值模拟与实验结果及分析

图 2 所示为离轴非稳波导混合腔输出光束整形前的强度分布变化。图中 x 轴是非稳方向, y 轴是波导方向。从图 2(a)中可以看到输出光束最开始传输的时候是一个长条形分布, 同时非稳方向上存在着高空间频率振荡, 这些振荡主要是由于硬边衍射造成的。随着传输距离的增加, 如图 2(b)~(d)所示, 光斑的长宽比不断变化, 这说明光束在两个方向上的发散角不一样。同时, 可以发现光束在传输过程中高空间频率振荡在慢慢消失, 这个现象产生的原因则是高空间频率的传输方向偏离于光轴方向。

根据二阶矩方法^[26], 分别计算了输出光束整形

前传输不同距离时非稳方向和波导方向上的光斑半径, 如图 3 所示, 非稳方向和波导方向的数据分别用虚线和实线表示。从 3 图中可以明显地看到, 初始光束在传输开始时非稳方向上的半径远大于波导方向上的半径。但由于非稳方向光束发散角小, 波导方向上的发散角大。当传输距离在 3 m 处时, 非稳方向上的光束半径反而小于波导方向上的光束半径。

为了更清晰地说明图 2 与图 3 中的光束特性, 选取了 400 mm 与 2400 mm 两个位置, 并通过数值计算与实验分析研究了光束的光强分布。图 4 中给出了激光器输出光束传输 400 mm 和 2400 mm 时通过数值模拟和实验研究得到的光强分布图。图 4(a)和(c)是数值模拟结果, 图 4(b)和(d)是实验中使用热感应纸和有机玻璃板烧蚀的光强分布。两者比较, 数值模拟和实验结果都表明激光器输出光束整形前的光束特性与图 2 和图 3 得到的结果是一致的, 这表明此激光器的初始输出光束是一个典型的简单象散光束。这种光束通过简单的聚焦镜聚焦不能得到一个好的激光加工用光束, 必须使用整形系统对光束进行处理。

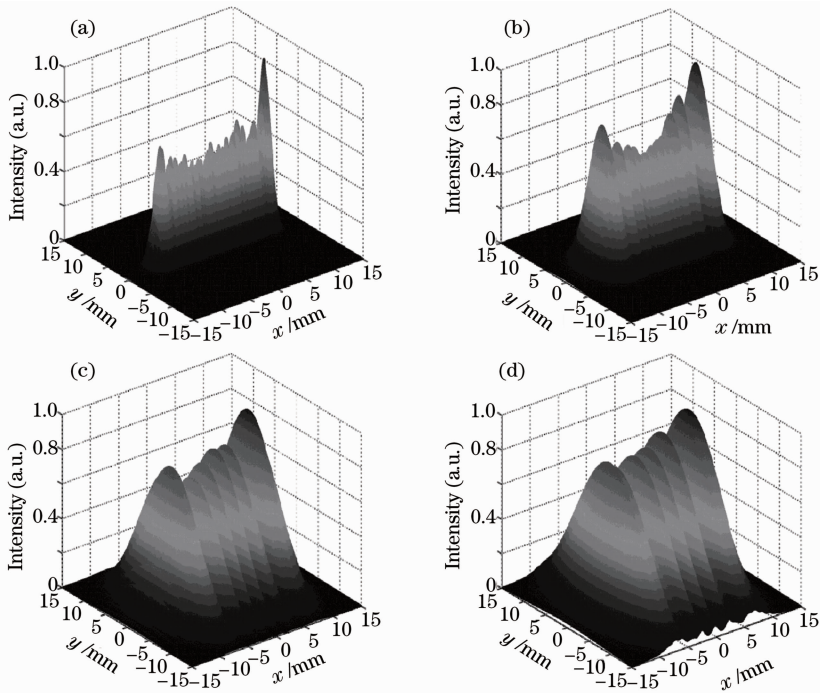


图 2 在自由空间中传输不同距离时,激光器输出光束的光强分布。(a) $z=400$ mm; (b) $z=1000$ mm;
(c) $z=2000$ mm; (d) $z=2400$ mm

Fig. 2 Normalized intensity distributions of beam through free space for different propagation distances.
(a) $z=400$ mm; (b) $z=1000$ mm; (c) $z=2000$ mm; (d) $z=2400$ mm

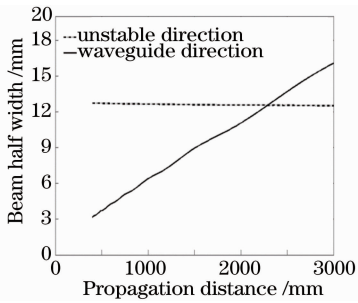


图 3 整形前的输出光束传输时两个方向上光斑半径的变化
Fig. 3 Beam half widths of unshaped output beam in unstable direction and waveguide direction

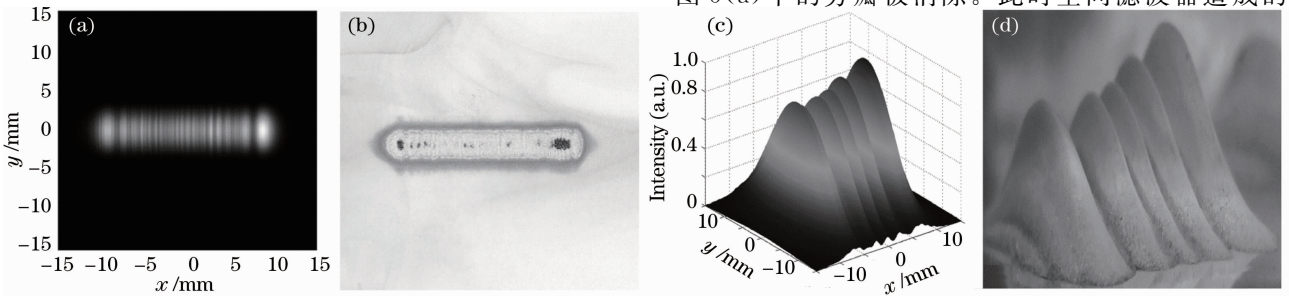


图 4 输出光束传输 400 mm 和 2400 mm 时光强分布的数值模拟和实验结果。(a) 400 mm 处数值模拟结果;
(b) 400 mm 处实验结果;(c) 2400 mm 处数值模拟结果;(d) 2400 mm 处实验结果

Fig. 4 Intensity distributions of unshaped beam for 400 mm and 2400 mm propagation distances through numerical simulation and experimental method. (a) Simulation result at 400 mm; (b) experimental result at 400 mm; (c) simulation result at 2400 mm ; (d) experimental result at 2400 mm

图 5 为近场光束聚焦后在焦点处的光强分布和实验图片,图 5(a)为非稳方向上的数值模拟结果,图 5(b)为实验得到的光束聚焦后焦点处的光强分布。从图 5 中可以发现由于负支腔近场分布在不稳方向上存在着较多的高频振荡,会导致近场光束经过聚焦后产生旁瓣。这些旁瓣的存在使得负支腔的整形系统不能使用单一的柱面镜整形系统,需引入空间滤波器来消除旁瓣进而提升光束质量。在本实验条件中,根据前面建立的负支腔光强分布的数值模型,当空间滤波器孔径宽度取 0.9 mm 时,能保证图 5(a)中的旁瓣被消除。此时空间滤波器造成的

光强损耗为 10%。

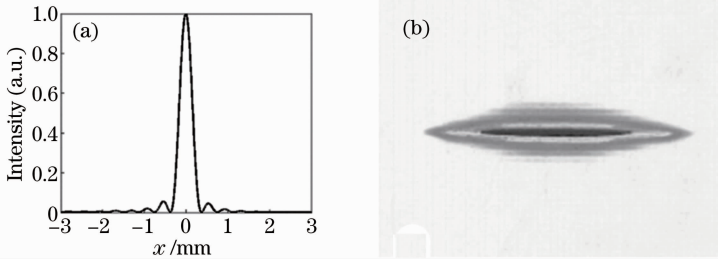


图 5 近场光束聚焦后在焦点处的光强分布图。(a)非稳方向上光强分布数值模拟图;(b)实验图

Fig. 5 Intensity distribution of focused beam at the focal plane. (a) Numerical result of focused beam in unstable direction; (b) experimental result

带空间滤波器的整形系统的原理如图 6 所示。

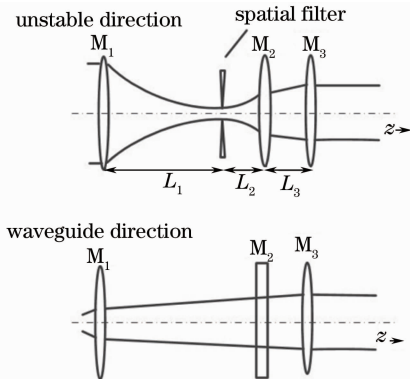


图 6 射频板条 CO₂ 激光器的外光路整形系统

Fig. 6 Beam shaping system of radio frequency slab CO₂ laser

图 6 中上方是非稳方向的整形原理图,下方是波导方向的整形原理图。镜子 M₁ 和镜子 M₃ 是两个球面镜,M₂ 是一个柱面镜。空间滤波器在 M₁ 的后焦点处。M₁ 的曲率半径 R₁=1560 mm,M₂ 的曲率半径 R₂=925 mm,M₃ 的曲率半径 R₃=4200 mm。

经过图 6 所示整形系统后,整形后光束传输 1000、2000、3000、5000 mm 后的光场强度分布如图 7 所示。比较图 7(a)~(d),可以发现,整形后的输出光束在传输过程中光场分布没有明显的变化。这与图 2 所示的整形前光束的传输有着很大的区别。光场模式变成近似基模高斯分布,高空间频率振荡也消失不见。同样通过二阶矩方法^[26],对整形后光束两个方向上的半径变化进行了数值计算。

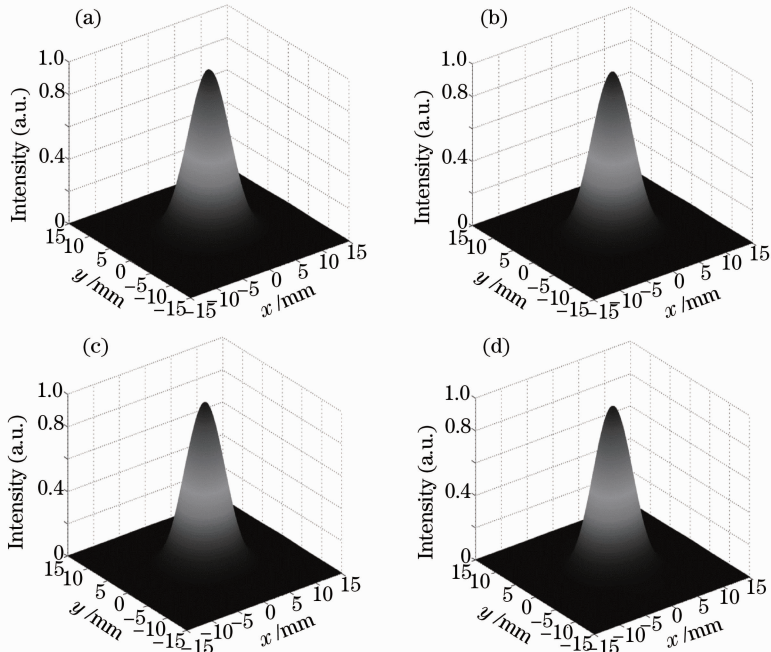


图 7 激光器整形后输出光束传输不同距离时的光强分布。(a) $z=1000$ mm;(b) $z=2000$ mm;
(c) $z=3000$ mm;(d) $z=5000$ mm

Fig. 7 Normalized intensity distributions of beam after shaping system at different propagation distances.

(a) $z=1000$ mm; (b) $z=2000$ mm; (c) $z=3000$ mm; (d) $z=5000$ mm

通过数值模拟,整形后的输出光束在非稳方向和波导方向上的光束半径变化如图 8 所示。非稳方向和波导方向的数据分别用虚线和实线表示。可以发现整形后的输出光束在不小于 8 m 范围内,两个

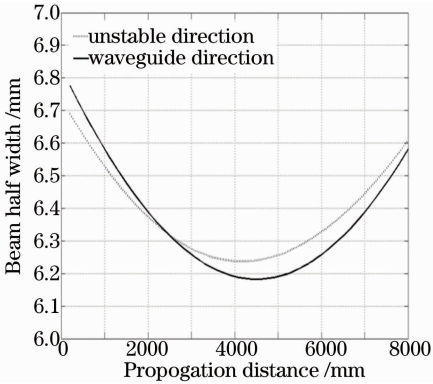


图 8 输出光束通过整形系统后两个方向上光斑半径

Fig. 8 Beam half widths after shaping system in unstable direction and waveguide direction

方向上的光束发散角较小。同时,非稳方向和波导方向上的光束半径非常接近。整形后的光束在传输距离 8 m 以内,两个方向上的光束宽度差值一直保持在 0.1 mm 左右。与图 7 和图 9 结合观察可以说明整形后的光束为近圆形、近基模高斯分布的光束。整形后光束在非稳方向上的光束质量因子 M^2 为 1.1,波导方向上的 M^2 为 1.08。

通过数值模拟和实验,图 9 给出了整形后光束传输 2000 mm 时的光强分布。图 9(a)是数值模拟结果,图 9(b)是实验结果的正视图,图 9(c)是实验结果的俯视图。图 9(c)给出了实验光束的半径为 7.5 mm。与图 8 的理论计算结果比较两者差值仅为 1 mm,理论和实验基本吻合。同时,从图 9(a)与图 9(b)可以看到,整形后光束光强分布的数值模拟结果和实验结果很吻合。可以很清楚地看到,输出光束经过整形系统后,由原来的长方形且分布不均匀的光斑变为近基模高斯分布的圆形光斑。达到了所期望的整形效果,能较好地应用于实际加工中。

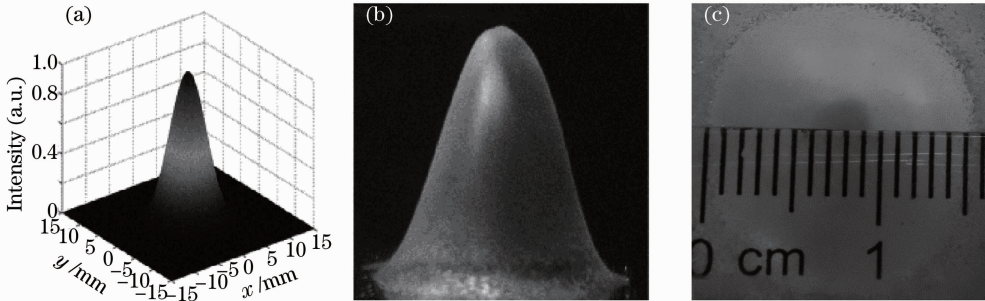


图 9 输出光束经过整形系统后 2000 mm 处光强分布的数值模拟和实验结果。(a) 数值模拟结果; (b) 实验结果主视图; (c) 实验结果俯视图

Fig. 9 Numerical and experimental intensity distributions after shaping system. (a) Simulation result; (b) front view of experimental result; (c) top view of experimental result

5 结 论

通过数值模拟和实验研究了离轴负支非稳波导混合腔($M = -1.13, N_{ef} = 675, d = 1.5 \text{ mm}$)的近场分布、输出光束整形过程中光场分布的变化和整形系统中空间滤波器的优化设计。用带有空间滤波器的腔外光路整形系统消除了旁瓣,并得到了空间滤波器的优化参数。

1) 整形前输出光束是长条形的简单像散光束。非稳方向上的发散角远小于波导方向上的发散角。传输距离增加到 2310 mm 处的时候,两个方向上的光束宽度相等。同时,非稳方向上的光强分布具有强烈的高空间频率振荡。

2) 本实验条件下,空间滤波器孔阑宽度的最优

参数是 0.9 mm。初始光束经过带有空间滤波器的整形系统后,光强分布变为近圆形的、近基模高斯分布的光束。整形后的光束在传输距离 8 m 以内,两个方向上的光束宽度差值一直保持在 0.1 mm 左右。

3) 离轴负支非稳波导混合腔输出光束经过带空间滤波器的整形系统后,消除了旁瓣。光束在非稳方向上的 M^2 为 1.1,波导方向上的 M^2 为 1.08。

参 考 文 献

- 1 A D Colley, H J Baker, D R Hall. Planar waveguide, 1 kW, carbon dioxide laser excited by a single transverse rf discharge [J]. Appl Phys Lett, 1992, 61(2): 136-138.
- 2 D Ehrlichmann, U Habich, H D Plum. Simple annular resonators with toric and helical mirrors[C]. SPIE, 1993, 1868: 77-84.
- 3 D Ehrlichmann, U Habich, H D Plum. High-power CO₂ laser

- with coaxial waveguide and diffusion cooling[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(7): 2211–2219.
- 4 D Ehrlichmann, U Habich, H D Plum, *et al.*. Azimuthally unstable resonators for high-power CO₂ lasers with annular gain media[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(6): 1441–1447.
- 5 E F Yelden, H J J Seguin, C E Capjack, *et al.*. Multichannel slab discharge for CO₂ laser excitation[J]. Appl Phys Lett, 1991, 58(7): 693–695.
- 6 L A Newman, R A Hart, J T Kennedy, *et al.*. High power coupled CO₂ waveguide laser array[J]. Appl Phys Lett, 1986, 48(25): 1701–1703.
- 7 K M Abramski, A D Colley, H J Baker, *et al.*. Phase locked CO₂ laser array using diagonal coupling of waveguide channels[J]. Appl Phys Lett, 1992, 60(5): 530–532.
- 8 X Tang, J Xin. Phase coupling of optical phase-shifting array resonator slab waveguide CO₂ lasers[C]. SPIE, 1998, 3549: 162–172.
- 9 Li Zhiming, Xin Jianguo. Power output characteristic of RF excited all metal slab waveguide CO₂ laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 230–232.
李志明, 辛建国. 射频激励金属板条波导 CO₂ 激光器的功率输出特性[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 230–232.
- 10 Xin Jianguo, Fang Gaozhan, Peng Xueyun, *et al.*. RF excited diffusively cooled packed slab waveguide kilowatt CO₂ laser[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(6): 877–880.
辛建国, 方高瞻, 彭雪云, 等. 射频激励扩散型冷却层叠式板条波导千瓦 CO₂ 激光器[J]. 光学学报, 1996, 16(6): 877–880.
- 11 Xin Jianguo, Zhang Wang, Jiao Wentao. RF excited diffusively cooled kilowatts carbon monoxide slab waveguide laser[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(5): 714–716.
辛建国, 张旺, 焦文涛. 射频激励扩散型冷却板条波导千瓦 CO₂ 激光器[J]. 光学学报, 2000, 20(5): 714–716.
- 12 Zhou Shuangquan, Wang Zhiyong, Xin Jianguo. RF-excited packed waveguide CO₂ laser[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(2): 114–117.
周双全, 王智勇, 辛建国. 射频激励层叠式波导 CO₂ 激光器[J]. 光学学报, 1996, 16(2): 114–117.
- 13 D Wang, G Li, Y Qin, *et al.*. Output beam characteristics of the radio frequency-excited slab CO₂ laser with unstable-waveguide hybrid resonator[J]. Optical Engineering, 2011, 50(9): 1–5.
- 14 T Hall, F Duschek, K M Grunewald, *et al.*. Modified negative-branch confocal unstable resonator[J]. Appl Opt, 2006, 45(34): 8777–8780.
- 15 B Wasilewski, H J Baker, D R Hall. Intracavity beam behavior in hybrid resonator planar-waveguide CO₂ lasers[J]. Appl Opt, 2000, 39(33): 6174–6187.
- 16 K Yasui, Y Takenaka. Advantages of negative-branch compared with positive-branch one-dimensional unstable resonators[J]. Appl Opt, 2001, 40(21): 3547–3551.
- 17 R R Nowack, H Opower, U Schaefer, *et al.*. High-power CO₂ waveguide laser of the 1-kW category[C]. International Society for Optics and Photonics, 1990, 1276: 18–28.
- 18 Gao Yungui, Li Xiangyang, Qin Liyong, *et al.*. Far-field circular symmetry beam of RF slab CO₂ laser[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(1): 95–96.
高允贵, 李向阳, 秦立永, 等. 射频板条 CO₂ 激光器获得远场对称光束[J]. 中国激光, 2002, 29(1): 95–96.
- 19 A Lapucci, A Labate, F Rossetti, *et al.*. Hybrid stable-unstable resonators for diffusion-cooled CO₂ slab lasers[J]. Appl Opt, 1996, 35(18): 3185–3192.
- 20 Zhang Lingling, Huang Yan, Meng Junqing, *et al.*. Mode calculations of off-axis hybrid resonator for novel slab laser[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(9): 3–7.
张玲玲, 黄燕, 孟俊清, 等. 新型板条激光器的离轴混合腔模场计算[J]. 中国激光, 2005, 32(9): 3–7.
- 21 D Wang, Y Qin, X Tang, *et al.*. Eigenvector method for unstable resonator simulations[J]. Opt Commun, 2012, 285(10–11): 2682–2687.
- 22 Cheng Yuanying, Jiang Chao, Wang Youqing, *et al.*. An eigenvector method for the mode simulation of optical resonators and beam propagation[J]. Chinese J Computational Physics, 2005, 22(5): 449–455.
程愿应, 江超, 王又青, 等. 光腔模式及光束传输的特征向量算法[J]. 计算物理, 2005, 22(5): 449–455.
- 23 Cheng Yuanying, Wang Youqing, Hu Jin, *et al.*. A novel eigenvector method for calculation of optical resonator modes and beam propagation[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(8): 2576–2582.
程愿应, 王又青, 胡进, 等. 一种新颖的用于光腔模式及光束传输模拟的特征向量法[J]. 物理学报, 2004, 53(8): 2576–2582.
- 24 K D Laakmann, W H Steier. Waveguides: characteristic modes of hollow rectangular dielectric waveguides[J]. Appl Opt, 1976, 15(5): 1334–1340.
- 25 Li Gen. Study on Characteristics of Optical Field in Off-Axis Unstable-Waveguide Hybrid Resonators[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
李根. 离轴非稳一波导混合腔腔内光场特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- 26 ISO. 11146-1. Lasers and Laser-Related Equipment—Test Methods for Laser Beam Widths, Divergence Angles and Beam Propagation Ratios—Part 1: Stigmatic and Simple Astigmatic beams[S]. 2005.

栏目编辑: 宋梅梅