

高功率 TEA CO₂ 激光器的光学谐振腔

徐东东^{1,2}, 耿玉民¹, 郭 劲¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 激光与物质相互作用国家重点实验室, 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 根据 TEA CO₂ 激光器工作的实际情况, 以高功率激光器的光束发散角、模体积、模式结构和输出功率为依据, 设计了几组不同曲率半径的全反射镜和不同透射率的输出反射镜, 并对激光工作物质的不同总气压和分气压进行实验研究. 结果表明, 经优化设计各项参数, TEA CO₂ 激光器可达到数千瓦的高功率激光输出, 并将激光光束发散角控制在最小范围.

关键词: TEA CO₂ 激光器; 光束发散角; 光学谐振腔

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5489(2011)02-0309-06

Optical Resonator of High-Power TEA CO₂ Laser

XU Dong-dong^{1,2}, GENG Yu-min¹, GUO Jin¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In the light of the physical circumstances of working of a TEA CO₂ laser, taking beam divergence angle, mode volume, mode configuration and output power as design parameters, the authors designed several groups of holophotes with different radii of curvature, output mirrors with different transmissivity and different general air pressure and partial air pressure of working-laser material. The results indicate that the TEA CO₂ laser could not only obtain a laser output up to several kilowatts, but also control beam divergence angle to be a minimum via optimizing parameters.

Key words: TEA CO₂ laser; beam divergence angle; optical resonator

光学谐振腔是产生激光的两个必要条件之一, 即产生激光需要具有能实现激光能级间粒子反转的工作物质^[1]和能形成激光的光学谐振腔.

随着高功率 TEA CO₂ 激光器在工业、军事和科研等领域的广泛应用, 激光器的输出功率、激光光束发散角和激光光束模式结构等问题在光学谐振腔设计过程中均需考虑. 采用非稳腔^[2]、折叠腔^[3]和设置光阑^[4]的方法可有效压缩光束发散角, 提高激光光束质量, 但光电子损耗较大, 激光器的输出功率损失约为 30%.

为改善激光光束质量^[5]且输出功率不产生较大的损耗, 本文采用改变“平-凹”腔全反射镜曲率半径的方法压缩发散角. 由于谐振腔的输出反射镜调节精度受实验室条件限制, 因此当发散角较小时, 输出功率不能达到最大值. 为找到全反射镜的最佳曲率半径, 在一定的注入能量条件下, 本文设计了

收稿日期: 2010-05-05.

作者简介: 徐东东(1986—), 男, 汉族, 硕士研究生, 从事激光技术的研究, E-mail: xdd198537@126.com. 通讯作者: 耿玉民(1954—), 男, 汉族, 高级工程师, 从事气体激光器及其应用的研究, E-mail: cegjs8188@yahoo.cn.

基金项目: 国家重点实验室项目基金(批准号: SKLLIM0902-01)和吉林省科技厅科技支撑计划项目基金(批准号: 20090358).

几组不同曲率半径的全反射镜. 由于输出窗口的透射率、激光气体总气压以及气体配比对输出功率的影响较大, 因此结合激光器的工作环境和具体要求, 通过分析实验数据, 在一定的总气压、气体配比和输出窗口透射率条件下给出了全反射镜的最佳曲率半径.

1 光学谐振腔的设计计算

研究表明, 通过合理的设计和选模可减少谐振腔内激光振荡的纵模模式数目, 使激光光束具有较好的相干性. 调节或设计谐振腔的几何参数, 可获得低阶横模以控制激光光束的光斑大小、谐振频率和光束发散角. 设两片反射镜的曲率半径分别为 R_1 和 R_2 , 反射镜间的距离为 L , 则光学谐振腔的稳定性条件^[6]为

$$0 < g_1 g_2 < 1, \quad g_1 = 1 - \frac{L}{r_1}, \quad g_2 = 1 - \frac{L}{r_2}.$$

本文激光器采用“平-凹”稳定腔, 利用基尔霍夫-菲涅公式近似求解谐振腔内的光束模式. 由文献[7-8]可知, 任何一个满足稳定性条件的球面腔唯一等价于某个共焦腔, 如图1所示, 其中: 1和2为实际的稳定球面腔; C 和 C' 为其等价共焦腔; L 为实际稳定腔的腔长; R_1 和 R_2 为实际稳定腔球面镜的曲率半径; f 为等价共焦腔的焦距; o 为等价共焦腔的中心; 实际稳定腔两个反射镜面中心的坐标分别为 Z_1 和 Z_2 . 在实际谐振腔的几何参数确定后, 即可求出其等价共焦腔的各个参数:

$$Z_1 = \frac{L(R_2 - L)}{(L - R_1) + (L - R_2)}, \quad (1)$$

$$Z_2 = \frac{-L(R_1 - L)}{(L - R_1) + (L - R_2)}, \quad (2)$$

$$f^2 = \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{[(L - R_1) + (L - R_2)]^2}. \quad (3)$$

由式(1)~(3)可知, 当 R_1 , R_2 和 L 满足稳定性条件时, $f^2 > 0$. 即若实际谐振腔稳定, 则总存在一个唯一的等价共焦腔. 当 Z_1 , Z_2 和 f 确定后, 即可使用共焦腔理论计算实际谐振腔的各种参数, 如镜面上的光斑尺寸、模体积、等相位面的分布、谐振频率、衍射损耗和基模远场发散角等.

本文的实验装置可近似认为谐振腔的菲涅耳数 $N \rightarrow \infty$. 在拉盖尔-高斯近似下, 光学谐振腔内的行波场为

$$E_{mn}(r, \varphi, z) = A_{mn} E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \left(\sqrt{2} \frac{r}{\omega(z)} \right)^m \cdot L_n^m \left(2 \frac{r^2}{\omega^2(z)} \right) e^{-r^2/\omega^2(z)} e^{-im\varphi} e^{-i\Phi(r, \varphi, z)}, \quad (4)$$

$$\omega(z) = \frac{\omega_0}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f} \right)^2} = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f} \right)^2}, \quad (5)$$

$$\Phi(r, \varphi, z) = k \left[f(1 + \xi) + \frac{\xi}{1 + \xi^2} \frac{r^2}{2f} \right] - (m + 2n + 1) \left(\frac{\pi}{2} - \psi \right), \quad (6)$$

其中: (r, φ, z) 表示光轴为 z 轴的柱坐标; $\psi = \arctan[(1 - \xi)/(1 + \xi)]$; $\xi = 2z/L = z/f$; $L = 2f\omega_0$ 为共焦腔长; $\omega_0 = \omega_0/\sqrt{2} = \sqrt{L\lambda/2\pi}$; $\omega(z)$ 为共焦腔基模光斑; f 为焦距; $L_n^m(\xi)$ 为缔合拉盖尔多项式. 设本文实验装置的“平-凹”光学谐振腔腔长为 L , 全反射镜曲率半径为 R , 平面镜曲率半径为 ∞ , 且 $R > L > 0$. 通过计算可得 $z_1 = -L$, $z_2 = 0$, $f^2 = L(R - L)$, 如图2所示, 其中 o 为等价共焦腔的中心. 实际稳定腔的全反射镜和输出窗口坐标分别为 Z_1 和 Z_2 , f 为等价共焦腔的焦距. 将 $f^2 = L(R - L)$ 代入式(5)可得“平-凹”腔的基模光斑尺寸, 再将 $z_1 = -L$ 和 $z_2 = 0$ 代入式(5)可得“平-凹”腔全反射镜和输出窗口上的光斑半径分别为 $\omega_{s1} = \{(\lambda LR)^2 / [\pi^2 L(R - L)]\}^{1/4}$ 和 $\omega_{s2} = [(\lambda L)^2 (R - L) / (\pi^2 L)]^{1/4}$. 按照讨论共焦腔的方法可知“平-凹”腔的基模模体积

$$V_{00} = \frac{1}{2} \cdot L\pi \left(\frac{\omega_{s1} + \omega_{s2}}{2} \right)^2. \quad (7)$$

将 ω_{s1} 和 ω_{s2} 代入式(7)可得谐振腔的模体积

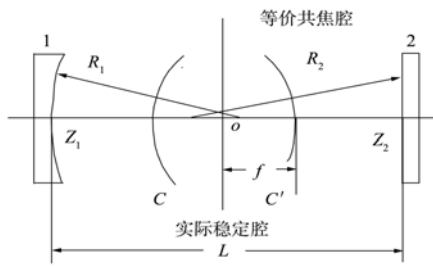


图1 稳定球面腔及其等价共焦腔

Fig.1 Stable spherical resonator and its equivalent confocal cavity

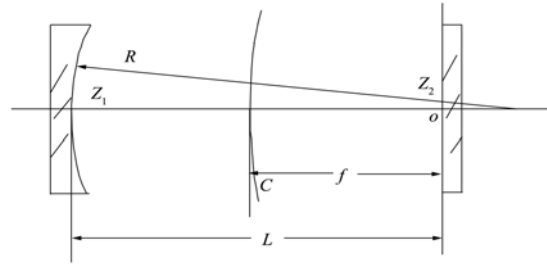


图2 等价共焦腔的位置

Fig.2 Position of equivalent confocal cavity

$$V_{00} = \frac{1}{8}L^2\lambda \left(2\sqrt{\frac{R}{L}} + \frac{R}{\sqrt{L(R-L)}} + \sqrt{\frac{R-L}{L}} \right).$$

在球面腔中, TEM_{mn} 模的模体积 V_{mn} 与基模的模体积 V₀₀ 之比为 V_{mn}/V₀₀ = √((2m+1)(2n+1)), 由此可求出高阶模的模体积.

在共焦腔中, 基模光束依双曲线规律由腔的中心向外扩展, 可以定义基模的远场发散角为双曲线两条渐近线间的夹角^[8]:

$$\theta_0 = \lim_{x \rightarrow \infty} [2\omega(z)/z], \tag{8}$$

其中 2ω(z) 为光斑直径. 将式(5)代入式(8)可得

$$\theta_0 = 2\sqrt{\frac{\lambda}{f\pi}}. \tag{9}$$

由相应的计算表明, 包含在 θ₀ 内的功率占高斯基模光束总功率的 86.5%. 将 f² = L(R-L) 代入式(9) 可得谐振腔的基模远场发散角 θ₀ = [16λ²/Lπ²(R-L)]^{1/4}, 当激光器以 TEM₀₀ 模单模运转时, 光束有良好的方向性. 当多模运转时, 由于 TEM_{mn} 模在 x 和 y 方向上的发散角近似表示为 θ_{xm} = 2√((2m+1)λ/(fπ)) 和 θ_{ym} = 2√((2n+1)λ/(fπ)), 因此激光光束模式越高, 则发散角越大, 方向性越差. 本文设计了 3 种曲率半径的全反射镜, 曲率半径分别 18, 23, 27 m, 谐振腔腔长 L = 1 500 mm, 输出波长 λ = 10.6 μm. 通过计算可知, 当凹面镜的曲率半径从 R = 18 m 变为 R = 27 m 时, 激光器以 TEM₀₀ 模式或 TEM_{mn} 模式运转, 发散角减小和模体积增大均较明显. 因此, 当 R = 27 m 时, 激光光束质量和输出功率为最佳状态. 对于稳定腔气体激光器, 镜面面积远大于激光光束在镜面上的光斑面积. 通过计算可得本文激光器谐振腔镜上的基模光斑半径, 结果列于表 1.

表 1 腔镜上的光斑半径 (mm)

Table 1 Spot radii on mirror surface (mm)

| 曲率半径/m | 凹面镜 | 平面镜 |
|--------|------|------|
| 18 | 4.03 | 3.89 |
| 23 | 4.27 | 4.15 |
| 27 | 4.43 | 4.33 |

由表 1 可见, 当 R = 27 m 时, 在全反射镜上的光斑直径最大, φ = 8.86 mm. 由于激光器的全反射镜和输出反射镜直径分别为 φ = 76 mm 和 φ = 95 mm, 远大于 φ = 8.86 mm, 因此假设菲涅耳数 N → ∞ 是较为合理的.

2 实验结果

本文激光器的工作电压为数十千伏, 脉冲工作频率为数百赫兹. 光学谐振腔采用“平-凹”腔, 其光学系统结构如图 3 所示, 其中包括高稳定的光学支架和储能放电腔^[9]. 采用紫外预电离^[10] 技术, 设计 3 种输出反射镜(平面镜)的透过率 T 分别为 60%, 70%, 80%. 激光器气体总气压分别为 p = 3 × 10⁴,

$4 \times 10^4, 5 \times 10^4$ Pa, 工作气体 CO_2, N_2 和 He 的分压比分别为 $p_{\text{CO}_2} : p_{\text{N}_2} : p_{\text{He}} = 1 : 1 : 3$ 和 $p_{\text{CO}_2} : p_{\text{N}_2} : p_{\text{He}} = 1 : 2 : 3$. 当输出反射镜的透过率分别为 70%, 60%, 80% 时, 输出功率测量值分别列于表 2 ~ 表 4.

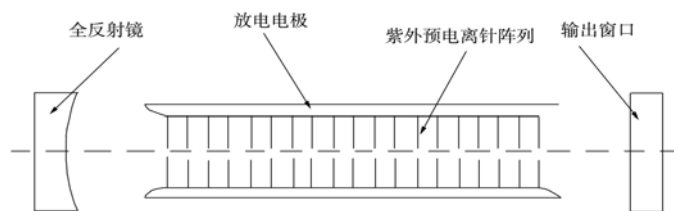


图3 光学谐振腔的结构

Fig. 3 Optical resonator structure scheme

表2 当输出反射镜透过率为70%时输出功率的测量值(kW)

Table 2 Output power measured value of output mirror's transmissivity $T=70\%$ (kW)

| 总气压/Pa | 分压比 | R/m | | |
|-----------------|-----------|------------------|------------------|------------------|
| | | 18 | 23 | 27 |
| 3×10^4 | 1 : 1 : 3 | 5.2 ~ 5.8 | 4.9 ~ 5.6 | 4.4 ~ 5.0 |
| | 1 : 2 : 3 | 5.0 ~ 5.5 | 4.8 ~ 5.3 | 4.0 ~ 4.8 |
| 4×10^4 | 1 : 1 : 3 | 5.6 ~ 6.5 | 5.4 ~ 5.9 | 4.8 ~ 5.6 |
| | 1 : 2 : 3 | 5.3 ~ 5.8 | 5.1 ~ 5.4 | 4.3 ~ 4.9 |
| 5×10^4 | 1 : 1 : 3 | 4.6 ~ 5.1 | 3.8 ~ 4.6 | 3.6 ~ 5.0 |
| | 1 : 2 : 3 | 4.2 ~ 5.0 | 3.6 ~ 4.5 | 3.5 ~ 4.7 |
| 发散角测量值/mrad | | 2.6×1.5 | 2.0×1.2 | 1.6×1.2 |

表3 当输出反射镜透过率为60%时输出功率的测量值(kW)

Table 3 Output power measured value of output mirror's transmissivity $T=60\%$ (kW)

| 总气压/Pa | 分压比 | R/m | | |
|-----------------|-----------|------------------|------------------|------------------|
| | | 18 | 23 | 27 |
| 3×10^4 | 1 : 1 : 3 | 4.5 ~ 5.4 | 3.9 ~ 4.9 | 3.7 ~ 5.0 |
| | 1 : 2 : 3 | 4.4 ~ 5.5 | 4.0 ~ 4.6 | 3.3 ~ 4.7 |
| 4×10^4 | 1 : 1 : 3 | 4.3 ~ 5.8 | 4.1 ~ 5.3 | 3.8 ~ 5.3 |
| | 1 : 2 : 3 | 4.4 ~ 5.8 | 3.9 ~ 5.4 | 3.6 ~ 5.1 |
| 5×10^4 | 1 : 1 : 3 | 3.8 ~ 5.2 | 3.7 ~ 4.7 | 3.3 ~ 4.2 |
| | 1 : 2 : 3 | 3.8 ~ 5.0 | 3.6 ~ 4.4 | 3.6 ~ 3.9 |
| 发散角测量值/mrad | | 1.6×2.4 | 1.4×1.2 | 1.2×1.2 |

表4 当输出反射镜透过率为80%时输出功率的测量值(kW)

Table 4 Output power measured value of output mirror's transmissivity $T=80\%$ (kW)

| 总气压/Pa | 分压比 | R/m | | |
|-----------------|-----------|------------------|------------------|------------------|
| | | 18 | 23 | 27 |
| 3×10^4 | 1 : 1 : 3 | 3.9 ~ 5.0 | 3.7 ~ 4.8 | 3.6 ~ 4.5 |
| | 1 : 2 : 3 | 3.8 ~ 4.8 | 3.5 ~ 4.5 | 3.5 ~ 4.4 |
| 4×10^4 | 1 : 1 : 3 | 3.9 ~ 5.3 | 3.8 ~ 4.9 | 3.2 ~ 4.7 |
| | 1 : 2 : 3 | 3.7 ~ 5.2 | 3.8 ~ 4.2 | 3.3 ~ 4.0 |
| 5×10^4 | 1 : 1 : 3 | 3.4 ~ 4.9 | 3.3 ~ 4.2 | 3.0 ~ 4.2 |
| | 1 : 2 : 3 | 3.4 ~ 4.4 | 3.4 ~ 4.0 | 3.1 ~ 4.3 |
| 发散角测量值/mrad | | 2.8×1.9 | 2.5×2.0 | 1.8×1.0 |

当曲率半径取某个值时, 激光器在不同的气体总气压以及配气比例条件下的输出功率不同. 表 2 ~ 表 4 中的发散角为输出功率最大时所测. 为比较放置光阑选模方法对激光器输出功率的影响, 在激光器输出窗口和放电电极间放置光阑, 尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 在总气压和配气比分别为 4×10^4 Pa 和 $p_{\text{CO}_2} : p_{\text{N}_2} : p_{\text{He}} = 1 : 1 : 3$, 曲率半径为 18 m 时, 激光器的输出功率最大, 为 4 003 W, 发散角

$\theta_{xy} = 1.5 \text{ mrad} \times 1.9 \text{ mrad}$. 由表2~表4可见,当气体总气压 $p = 4 \times 10^4 \text{ Pa}$, $p_{\text{CO}_2} : p_{\text{N}_2} : p_{\text{He}} = 1 : 1 : 3$ 时,曲率半径 $R = 18, 23, 27 \text{ m}$ 激光器的输出功率均达到最大,如图4所示. 在实验中,当总气压 $p = 3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时,激光器运行及光束质量最稳定;当气压 $p = 5 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时,产生弧光放电,导致激光输出功率及光束质量明显下降;当激光器总气压 $p = 4 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时,激光器运行较稳定,不会发生明显的弧光放电,光束质量与 $p = 3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时的光束质量基本相同. 在保证光束质量的条件下,为得到较高的激光输出功率,应选择总气压 $p = 4 \times 10^4 \text{ Pa}$ 和配气比 $p_{\text{CO}_2} : p_{\text{N}_2} : p_{\text{He}} = 1 : 1 : 3$.

由理论计算可知,光束的模体积随曲率半径的增大而增加,即输出功率随曲率半径的增大而增加. 与实验结果相反,如图5所示. 这是由于:1) 镜面上的光斑面积随曲率半径的增大而变大,导致产生的衍射损耗增加;2) 凹面镜随曲率半径的增大而趋近于平面镜,由于谐振腔不易调节,导致谐振腔镜面失配度较大,所产生的损耗高于小曲率半径产生的损耗. 因此从输出功率、工作稳定性及调节难易方面考虑,应选择 $R = 18 \text{ m}$. 由表2~表4可知,发散角随曲率半径的变大而减小,与理论计算结果一致. 若输出功率和调节精度满足要求,则可选择较大的曲率半径,以便得到较高的光束质量.

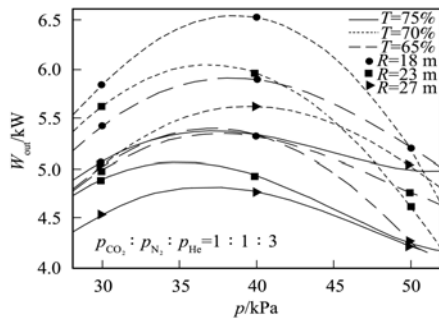


图4 不同气压和全反射镜曲率半径条件下的输出功率

Fig. 4 Output power at different general air pressures and radii of curvature of total reflection mirror

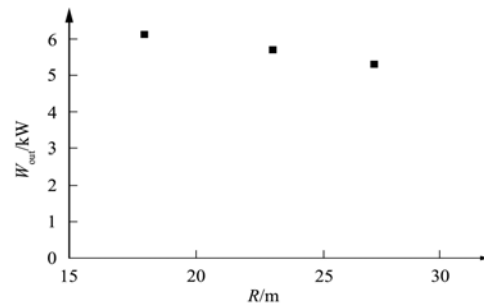


图5 不同曲率半径条件下的输出功率

Fig. 5 Output power at different radii of curvature

本文实验设计的3种透过率输出窗口(见表2~表4),当透过率 $T = 70\%$ 时,输出功率最大,3种透过率的光束质量相近. 通过计算可知激光光束较细,如当距离出射窗口 $L = 5 \text{ m}$ 时, TEM_{22} 光束模式的光斑直径 $\phi = 18.5 \text{ mm}$,但实验观测为 $41 \text{ mm} \times 42 \text{ mm}$ 的矩形光斑,大于高阶光束模式的光斑尺寸. 由测量的光束发散角可知,此时激光器在低阶光束模式下运行. 产生该现象是由于激光器工作物质具有饱和效应所致. 由谐振腔理论可知,若增益介质均匀,则由菲涅尔-基尔霍夫衍射公式和边界条件可知垂直于光轴横截面上的激光光强分布一般为高斯型. 由于激光光轴附近的光强较大,因此光轴附近的激发态 CO_2 分子消耗较多. 在一定的气体放电注入能量下,若输出反射镜的反射率较大,则会出现饱和效应. 此时反射光和谐振后的光电子会消耗光轴附近的激发态 CO_2 分子,并使离光轴较远的激发态 CO_2 分子发生受激辐射,产生平顶型光束. 由于激光光强分布不再是高斯型,而且激光光束也不仅局限于理论计算的模体积内,因此光斑尺寸的测量值大于计算值. 虽然光斑尺寸变大,但光束发散角较小,表明饱和效应对光束发散角影响较小. 与文献[3]结果相符. 由在光学谐振腔的输出反射镜和放电电极间放置光阑测得的输出功率可见,光束发散角的减小较少,但激光输出功率减小较多. 因此需要同时获得高的激光能量和光束质量的情况下,不采用放置光阑压缩发散角的方法.

3 讨论

综上,本文分析并讨论了光学谐振腔的设计. 通过不同条件下的实验获得了最佳的激光光束发散角和激光输出功率. 实验结果表明,设计的光学谐振腔可使高功率 TEA CO_2 激光器在数百赫兹高重复频率脉冲条件下能连续长时间稳定工作. TEA CO_2 激光器较好的工作条件为:全反射镜曲率半径 $R = 18 \text{ m}$; 输出反射镜透过率 $T = 70\%$; 工作物质总气压 $p = 4 \times 10^4 \text{ Pa}$; 各工作物质的分气压比 $p_{\text{CO}_2} : p_{\text{N}_2} : p_{\text{He}} = 1 : 1 : 3$. 通过光学谐振腔激励后的强光电子谐振辐射,可使激光器在长时间稳定工作

的情况下同时获得高功率激光输出和最小的光束发散角,通过放电过程验证了设计分析结果正确.可得如下结论:

1) 当选择曲率半径 $R = 18\text{ m}$ 的全反射镜时,激光输出功率较大且光束发散角较小.曲率半径 $R = 23\text{ m}$ 和 $R = 27\text{ m}$ 的谐振腔状态不稳定导致输出功率减小,这是由于全反射镜曲率半径较大时的精度不易调节,镜面失配度高,损耗加大所致;

2) 激光工作物质的饱和效应使受激辐射的光电子经谐振输出平顶型光束,由于激光光强不再是高斯型分布,而且激光光束也超出理论计算的模体积范围,因此光斑尺寸测量值大于计算值,但光束发散角较小,表明饱和效应对光束发散角影响较小;

3) 腔总工作气压比值越小激光器工作辉光放电越稳定,调整各气体比值,可改善光学谐振腔模体积结构的工作状态.对于激光放电的模体积,激光脉冲的能量输出与气压成正比,脉冲的峰值功率与气压的平方成正比,当 $p \geq 5 \times 10^4\text{ Pa}$ 时,弧光放电非常明显,导致激光输出功率急剧下降;

4) 将设计的光学谐振腔应用到实际系统中,使 TEA CO_2 激光器获得了高脉冲能量和低发散角的高质量激光光束.

参 考 文 献

- [1] JIANG Yun, WANG Tie-jun, ZHANG Hong-zhi, et al. Analysis of Kinetics of a Mechanical Q-Switched CO_2 Laser with Longitudinal DC Discharge [J]. Journal of Jilin University: Science Edition, 2008, 46(1): 115-119. (姜云, 王铁军, 张洪志, 等. 直流电纵向激励机械调 Q CO_2 激光器的动力学分析 [J]. 吉林大学学报: 理学版, 2008, 46(1): 115-119.)
- [2] GUO Ru-hai, LI Dian-jun, YANG Gui-long, et al. Design and Experiment of Unstable Resonator for High-Power TEA- CO_2 Laser [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(3): 253-257. (郭汝海, 李殿军, 杨贵龙, 等. 大功率 TEA CO_2 激光器非稳腔的设计与实验 [J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(3): 253-257.)
- [3] LU Hong, CHEN Qing-ming. A Study on a Transverse-Flow CO_2 Laser of Kilowatt Level and Excellent Beam Quality [J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 1997, 25(1): 51-52. (卢宏, 陈清明. kW 级高光束质量横流 CO_2 激光器的研究 [J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(1): 51-52.)
- [4] TAN Rong-qing. Investigation on High Power High Repetition Rate TEA- CO_2 Laser [D]: [Ph D Thesis]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2001. (谭荣清. 高功率高重复率 TEA CO_2 激光器研究 [D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2001.)
- [5] DUAN Jin, WU Jun, DUANMU Fan-yi, et al. Method for Measuring Laser Energy Density Distribution [J]. Journal of Jilin University: Science Edition, 2009, 47(2): 311-316. (段锦, 吴君, 端木繁一, 等. 激光能量密度分布的测量方法 [J]. 吉林大学学报: 理学版, 2009, 47(2): 311-316.)
- [6] Weber H. 激光谐振腔 [M]. 丘军林, 孙荫才, 译. 武汉: 华中工学院出版社, 1983: 141-148.
- [7] 雷仕湛. 激光技术手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1992: 399-401.
- [8] 周炳琨. 激光原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 50-69.
- [9] GENG Yu-min, LI Dian-jun. Design of Electrodes with Uniform Electric Fields in TEA CO_2 Lasers [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(3): 258-262. (耿玉民, 李殿军. TEA CO_2 激光器均匀场电极的设计 [J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(3): 258-262.)
- [10] CHEN Bing. Some Representative Preionization Technologies of TEA- CO_2 Laser [J]. Laser Journal, 2003, 24(5): 33-35. (陈冰. TEA CO_2 激光器的几种典型的预电离技术 [J]. 激光杂志, 2003, 24(5): 33-35.)