

腔镜面型对射频板条 CO₂激光器输出模式的影响

王 炜¹ 唐霞辉¹ 秦应雄¹ 肖龙胜² 吴 超¹ 王 振¹ 万 文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湖北第二师范学院物理与机电工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要 采用非稳腔结构的激光器,当系统的菲涅耳数较大时,球面腔镜尺寸随之增大,尽管可以获得高输出功率,但由于不满足傍轴条件,球面腔镜的球差对输出模式的影响变大。采用 Fox-Li 迭代算法,分析了腔镜类型不同时谐振腔有效菲涅耳数为 675 的 2 kW 射频板条 CO₂ 激光器的输出模式,并进行了实验研究。结果表明,当腔镜采用双球面镜时球差的影响显著,输出光束近似为球面波,输出平面上光束质量因子 $M^2=14.48$,光束质量差,聚焦后光束偏离光轴,难以实现高功率、高光束质量的激光输出;当腔镜均采用抛物面镜时球差的影响得以消除,输出光束近似为平面波,此时输出平面上光束质量得到改善, $M^2=3.96$,实验结果与数值模拟结果一致。

关键词 激光器;大菲涅耳数非稳腔;Fox-Li 迭代算法;球差;抛物面镜;球面镜

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0402004

Influence of Resonator Mirror Surfaces on Output Mode of Radio Frequency Slab CO₂ Lasers

Wang Wei¹ Tang Xiaohui¹ Qin Yingxiong¹ Xiao Longsheng² Wu Chao¹

Wang Zhen¹ Wan Wen¹

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

²School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Hubei University of Education, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract For lasers with unstable resonator structure, the dimension of the spherical cavity mirrors increases dramatically when the Fresnel number of the system is large. Although it is possible to obtain high output power, the aberration of the resonator mirror has great influence on the output beam quality as the paraxial condition is not satisfied. The output mode of a 2 kW radio frequency slab CO₂ laser with an effective cavity Fresnel number of 675 and different types of cavity mirrors is analyzed by the Fox-Li iteration algorithm. Furthermore, experimental investigations are conducted. The results show that the spherical aberration affects the laser output mode seriously when two spherical mirrors are used, the output beam wavefront is approximately spherical, the M^2 factor of the beam is 14.48 at the output plane, the beam quality is poor, and the beam is off the optical axis through the focusing lens, which makes it difficult to achieve a high power and high beam quality laser output. When two parabolic mirrors are used, the output beam wavefront is approximately planar, the beam quality is improved with an M^2 factor of 3.96, and the simulation results are in good agreement with the experimental results.

Key words lasers; unstable resonator with large Fresnel number; Fox-Li iteration algorithm; spherical aberration; parabolic mirror; spherical mirror

OCIS codes 140.3460; 140.3470; 140.3410; 140.3295

收稿日期: 2015-10-28; 收到修改稿日期: 2015-12-15

基金项目: 湖北省重大科技创新计划(ZDG2014000102)、湖北省科技厅青年基金(2015CFB502)

作者简介: 王 炜(1988—),男,博士研究生,主要从事激光谐振腔与光束整形等方面的研究。

E-mail: wangwei050413@126.com

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

E-mail: txh1116@hust.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

在激光准直系统、聚焦系统以及其他光学系统中都可能存在球差、彗差、像散等基本像差,导致传输激光光束质量恶化,因此像差一直受到研究人员的广泛关注^[1-10]。Siegman等^[11]理论分析了球差导致光束质量恶化的情况;Hodgson等^[12]对Nd:YAG激光器的增益介质热效应所产生的球差进行了分析;通过对像差的分析,Buske等^[13]指出在严重像差影响下同时获得高功率、高光束质量的激光输出是不可能的;Zhao等^[14]则利用球差影响来获得光束质量较好的激光输出。

非稳-波导混合腔由于其良好的冷却特性、结构紧凑等优点已成功应用于射频板条CO₂激光器^[15-21]、半导体抽运的陶瓷Nd:YAG板条激光器等激光器中^[22-24]。但这类激光器在高功率输出时,由于谐振腔非稳方向的非涅耳数很大,不满足傍轴条件,腔镜的球差对输出光束的影响开始显现,因此大菲涅耳数非稳-波导混合腔中腔镜球差的分析研究对于激光器的设计尤为必要。

本文以射频板条CO₂激光器为模型,理论分析了球差对大菲涅耳数非稳腔输出平面上光束 M^2 因子的影响,采用Fox-Li迭代算法数值模拟了腔镜类型不同时球差对输出平面上光束的能量分布、相对相位分布及输出光束远场分布的影响,并通过二阶矩方法计算了输出平面上光束的 M^2 因子^[25],最后在2 kW射频板条CO₂激光器上进行了实验验证。

2 谐振腔球差理论分析

激光器谐振腔为稳定腔结构时,由于谐振腔的非涅耳数较小,腔内光束的传输满足傍轴条件,此时除去腔内各种元件的热透镜效应,由腔镜产生的球差对输出光束的影响可以忽略。而在大菲涅耳数非稳腔中,腔镜球差的影响不可忽略。

2.1 非稳-波导混合腔结构

以射频板条CO₂激光器为模型分析球差的影响,谐振腔结构为负支离轴非稳-波导混合腔,如图1所示。 x 方向为非稳腔结构, y 方向为波导结构,其中,腔长 $L=(R_1+R_2)/2$,非稳腔放大率 $M=-(R_2/R_1)$, R_1 和 R_2 分别为腔镜M1和M2的曲率半径,取值均大于0,等效菲涅耳数 $N_{eq}=-\frac{(M-1)a^2}{2L\lambda}$,其中 a 为输出镜的半宽, d 为波导结构中两板条间距, β 为谐振腔输出光束所在平面。

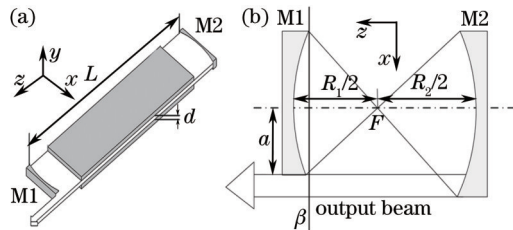


图1 负支离轴非稳-波导混合腔结构示意图。(a)整体结构图;(b)非稳方向示意图

Fig.1 Schematic diagram of negative-branch off-axis unstable-waveguide resonator. (a) Overall structure; (b) schematic view in unstable direction

2.2 球差对非稳方向输出光束的影响

基于非稳腔的特性,为了方便处理,如图1(b)所示,假设非稳腔中光束在经过M2镜准直输出前是从F点发出的曲率半径为 $R_2/2$ 且不含像差的理想球面波,没有像差影响时,光束经过M2后以平面波输出。实际上像差会对输出光束产生影响,设 x 方向上光束未经过M2镜反射时振幅分布为 $E_0(x)$,经过M2镜反射后光束振幅分布 $E_1(x)$ 为^[11]

$$E_1(x) = E_0(x) \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2}{R_2} - C_4 x^4 \right) \right], \quad (1)$$

式中 λ 是真空中波长, C_4 是基本像差系数。根据Siegman的分析,此时非稳方向上整体光束的 M^2 因子为^[11]

$$M_x^2 = \left[\left(M_{x0}^2 \right)^2 + \left(M_{xa}^2 \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

式中 $M_{x_0}^2$ 是 x 方向上光束最初或者不受像差影响时的光束质量因子, M_{xa}^2 则是来源于像差影响的部分, 其值同 C_4 的大小成正比。

当谐振腔菲涅耳数增大时, 若此时 M1、M2 镜均为球面镜, M_{xa}^2 的值增大, 严重影响大菲涅耳数非稳腔输出平面光束的质量, 进而对输出光束产生影响。而当 M1、M2 镜均为抛物面镜时, 非稳腔中 M2 镜像差系数 $C_4 = 0$, 则 $M_{xa}^2 = 0$, 由(2)式可知输出平面光束的光束质量不会受像差的影响。第3节将会结合实例具体分析像差对输出光束的影响。

3 非稳方向输出模式的数值模拟

3.1 球差数值模拟方法

常见的非稳腔数值模拟方式如虚源法、特征向量法没有考虑像差对输出光束的影响, 当非稳腔的菲涅耳数较大时, 可能不满足傍轴条件, 此时应使用基尔霍夫衍射积分公式进行模拟, 积分时不采用任何近似。具体方法如下: 非稳-波导混合腔中非稳方向示意图如图2所示, 各参数意义与图1相同, 坐标原点为图中 O 点, θ 是线段 P_1P_2 同 M1 镜上 P_1 点处法向量的夹角, ρ 是线段 P_1P_2 的长度, β 为谐振腔输出光束所在平面。

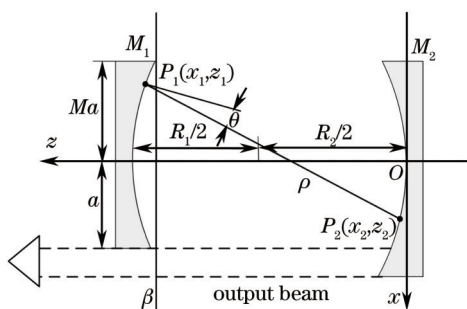


图2 负支离轴非稳-波导混合腔中非稳方向示意图

Fig.2 Schematic diagram of unstable direction in negative-branch off-axis unstable-waveguide resonator

此时光束从 M1 传输到 M2 的衍射积分方程为

$$E_2(x_2) = \sqrt{\frac{i}{\lambda}} \int_{M_1}^a E_1(x_1) \frac{\exp(-ik\rho)}{\sqrt{\rho}} \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right) dx_1, \quad (3)$$

$$\rho = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}, \quad (4)$$

$$z_1 = \frac{R_1 + R_2}{2} - \frac{x_1^2/R_1}{1 + [1 - (1 - e^2)x_1^2/R_1^2]^{1/2}}, \quad (5)$$

$$z_2 = \frac{x_2^2/R_2}{1 + [1 - (1 - e^2)x_2^2/R_2^2]^{1/2}}, \quad (6)$$

(3)式中 k 为真空中的波数。(5)式和(6)式由文献[1]给出, 其中 e 是圆锥曲面的离心率^[1]。 $e = 0$ 时表示镜面为球面, $e = 1$ 时表示抛物面。光束从 M2 传输到 M1 的衍射积分方程与(3)式类似:

$$E_1(x_1) = \sqrt{\frac{i}{\lambda}} \int_{M_2}^{M_1^2} E_2(x_2) \frac{\exp(-ik\rho)}{\sqrt{\rho}} \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right) dx_2. \quad (7)$$

运用 Fox-Li 迭代法, 采用(3)~(7)式即可分析腔镜 M1 和 M2 面型不同时, 球差对谐振腔输出模式的影响。

3.2 激光器的数值模拟

选定的 2 kW 射频 CO₂ 激光器具体参数如下: 谐振腔放大率 $M = -1.13$, 有效菲涅耳数 $N_{eq} = 675$, 腔长 $L = 980$ mm, 选取不同面型的 M1 和 M2 分别进行模拟。

当 M1、M2 镜均为球面镜时, 谐振腔稳定输出后平面 β 上光束的能量分布、相对相位分布以及谐振腔输出光束的远场分布如图3所示。图3(a)为归一化后平面 β 上光束的能量分布, 图中红色虚线右侧表示谐振腔的实际输出光束; 如图3(b)所示, 从平面 β 上光束的相对相位分布可以看出光束近似为球面波而非平面

波;图3(c)表示用 $f=800\text{ mm}$ 的聚焦镜聚焦后所得远场分布,图中红色虚线表示输出光束光轴位置,此时光束严重偏离光轴,且聚焦光斑较大,能量分布不均匀,这是由于谐振腔输出光束波阵面处于球面波波阵面的一侧。激光器输出光束质量恶劣,根据二阶矩方法计算平面 β 上光束 $M^2=14.48^{[25]}$ 。

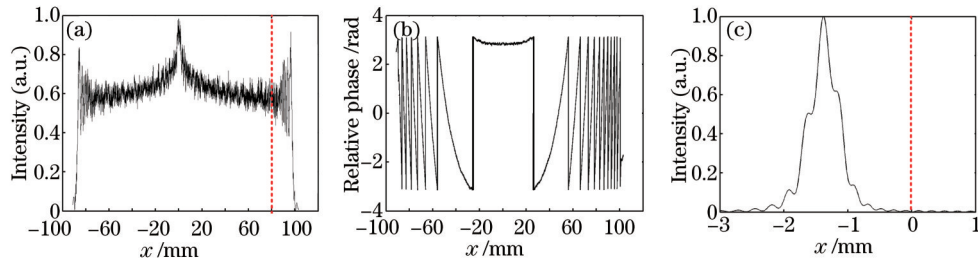


图3 双球面腔镜谐振腔非稳方向输出光束特性。(a)平面 β 上归一化光束能量分布;(b)平面 β 上相对相位分布;
(c)输出光束远场能量分布

Fig.3 Beam characteristics in unstable direction of resonator with two spherical mirrors. (a) Normalized beam intensity distribution on plane β ; (b) relative phase distribution on plane β ; (c) far-field intensity distribution of output beam

当M1为球面镜,M2为抛物面镜时,谐振腔稳定输出后平面 β 上光束的能量分布、相对相位分布以及谐振腔输出光束的远场分布如图4所示。图4(a)与图3(a)相比平面 β 上光束的能量分布发生了变化;如图4(b)所示,相对相位分布表明此时输出光束仍类似球面波,与图3(b)相比球面波前曲率半径增大;如图4(c)所示,此时输出光束的远场分布比图3(c)更加平滑而集中。平面 β 上光束 $M^2=11.39$ 。

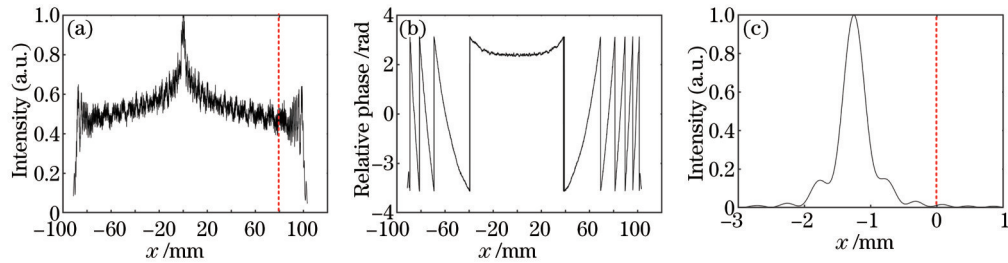


图4 球面镜和抛物面腔镜谐振腔非稳方向输出光束特性。(a)平面 β 上归一化光束能量分布;(b)平面 β 上相对相位分布;
(c)输出光束远场分布

Fig.4 Beam characteristics in unstable direction of resonator with a spherical mirror and a parabolic mirror. (a) Normalized beam intensity distribution on plane β ; (b) relative phase distribution on plane β ; (c) far-field intensity distribution of output beam

当M1、M2镜均为抛物面镜时,谐振腔稳定振荡后,平面 β 上光束的能量分布、相对相位分布以及输出光束的远场分布如图5所示。如图5(a)所示,此时输出平面 β 上光束的能量分布发生了变化;通过比较图5(b)、图4(b)及图3(b)可以看出,平面 β 上光束近似为平面波而非球面波;如图5(c)所示,输出光束远场分布关于光轴基本对称,能量分布更加平滑而集中,且光斑最小。此时平面 β 上光束 $M^2=3.96$,光束质量远好于其他两种腔镜组合时的情况。

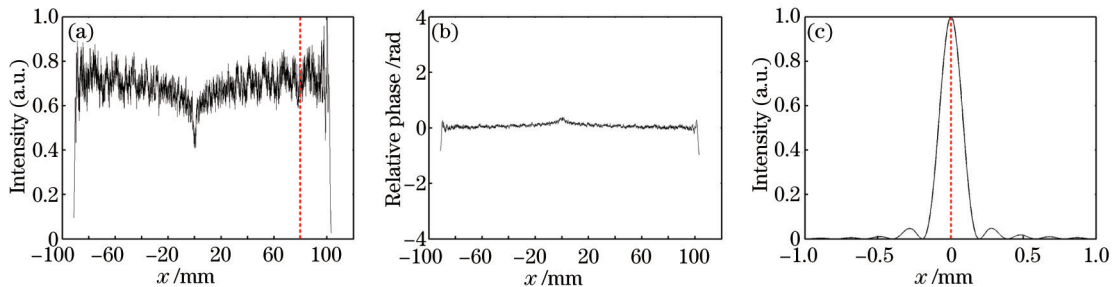


图5 双抛物面腔镜谐振腔非稳方向输出光束特性。(a)平面 β 上归一化光束能量分布;(b)平面 β 上相对相位分布;
(c)输出光束远场分布

Fig.5 Beam characteristics in unstable direction of resonator with two parabolic mirrors. (a) Normalized beam intensity distribution on plane β ; (b) relative phase distribution on plane β ; (c) far-field intensity distribution of output beam

通过数值模拟的结果可以发现,在大菲涅耳数非稳腔中,当腔镜 M1 和 M2 均为球面镜时,由于球差的影响,输出平面光束的光束质量太差,影响激光器高效工作,且对腔外光路的设计不利(图 3);当 M1 镜为球面镜而 M2 为抛物面镜时,由于 M2 镜不能消除 M1 镜带来的球差影响,故输出平面光束质量有所改善,但仍不理想(图 4);当腔镜均为抛物面镜时,系统球差为零,输出光束接近衍射极限输出,光束质量理想(图 5),充分说明抛物面镜是大菲涅耳数非稳腔腔镜的最佳选择。

图 5 所示模拟结果同虚源法以及采用基于菲涅耳衍射积分的 Fox-Li 迭代法时所得结果基本一致,因为在以上两种方法中都采用了傍轴近似,将球面镜近似为抛物面镜,因而在计算大菲涅耳数非稳腔时没有考虑球差对输出光束的影响。本文所采用的模拟方式分析了球差对输出光束的影响,说明大菲涅耳数非稳腔采用抛物面腔镜的必要性。

4 抛物面腔镜非稳腔实验研究

4.1 实验平台

实验设备是一台射频板条 CO₂ 激光器,激光器谐振腔的具体参数与数值模拟的模型相同,腔镜均采用抛物面镜。由于非稳-波导混合腔自身特性,激光器的非稳方向(图 1 中的 x 方向)上为接近衍射极限的光束输出,由于硬边衍射影响,非稳方向输出光束存在高频振荡分量;波导方向(图 1 中的 y 方向)上输出最低阶模。通过 $f=800$ mm 的聚焦镜聚焦获得的两个方向远场光强分布的数值模拟结果如图 6 所示,从图 6(a)可以看出非稳方向由于高频振荡分量的影响,聚焦后有不可忽视的旁瓣,且两个方向的束腰相差较大,这样的光束在工业加工中无法直接应用,需要外光路整形系统对输出光束进行整形^[26-27]。

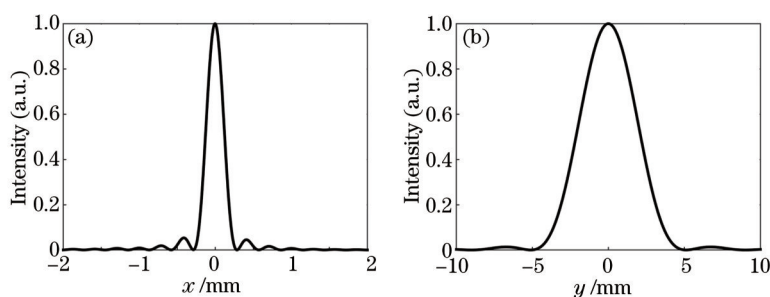


图 6 输出光束远场能量分布。(a) 非稳方向归一化能量分布;(b) 波导方向归一化能量分布

Fig.6 Far-field intensity distribution of output beam. (a) Normalized intensity distribution in unstable direction; (b) normalized intensity distribution in waveguide direction

4.2 实验结果

为了观察抛物面腔镜谐振腔实际输出光束的特性,分别使用有机玻璃板和热感应纸获取不同位置光束的能量分布。输出光束自由传输 800 mm(即距离 β 平面 800 mm 的位置)以及经过 $f=800$ mm 聚焦镜后数值模拟及实验研究的能量分布如图 7 所示。图 7(a)、(b)为数值模拟结果,图 7(c)、(d)为通过烧蚀有机玻璃板和热

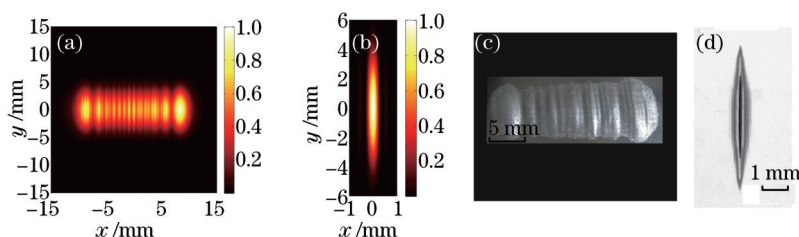


图 7 输出光束近场与远场能量分布。(a) 输出光束传输 800 mm 数值模拟能量分布俯视图;(b) 输出光束远场数值模拟能量分布俯视图;(c) 800 mm 处实验结果俯视图;(d) 远场能量分布实验结果

Fig.7 Near-field and far-field intensity distribution of output beam. (a) Top view of intensity distribution of output beam after 800 mm of propagation, generated by numerical simulation; (b) top view of far-field intensity distribution of output beam, generated by numerical simulation; (c) top view of experimental result of output beam after 800 mm of propagation; (d) experimental result for far-field intensity distribution of output beam

感应纸得到的光强分布。

从图7可以看出实验结果同数值模拟结果一致,在近场和远场条件下输出光束均没有偏离光轴的现象,证明激光器输出光束为平面波,且实验结果中光斑的形貌和尺寸同数值模拟结果相吻合。图7(a)、(b)说明输出光束的非稳和波导方向发散角不同,且非稳方向上确实存在许多高频振荡分量。

输出光束经过整形系统传输 2000 mm 后的能量分布如图 8 所示,图 8(a)为数值模拟结果,图 8(b)为实验结果俯视图,图 8(c)为实验结果正视图。从图中可以看出,实验结果同数值模拟结果相吻合,且经过整形后输出光束能量分布近似基模高斯分布,非稳方向和波导方向光束发散角和束腰基本一致。说明抛物面镜谐振腔能够消除球差对输出光束的影响,保证激光器在高效、高光束质量状态下稳定地工作。

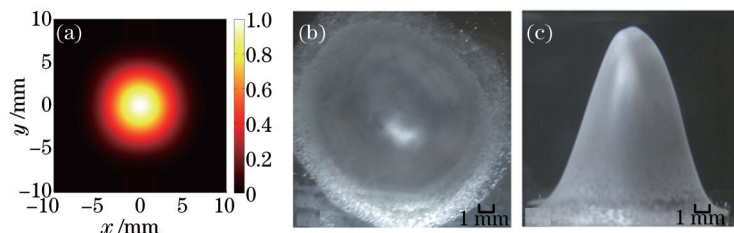


图8 输出光束经过整形传输 2000 mm 后能量分布的数值模拟和实验结果。(a) 数值模拟能量分布俯视图;
(b) 实验结果俯视图; (c) 实验结果正视图

Fig.8 Numerical simulation result and experimental results of output beam intensity distribution after 2000 mm of propagation in shaping system. (a) Top view of numerical simulation result; (b) top view of experimental result; (c) front view of experimental result

5 结 论

以 2 kW 射频板条 CO₂ 激光器为模型,研究了球差对激光器输出模式的影响。

1) 理论上分析得出,当非稳腔的非涅耳数增大时,受球差的影响输出光束 M^2 因子急剧恶化。

2) 采用数值模拟方式研究了 $N_{eq} = 675$ 、腔镜为球面镜或抛物面镜时射频板条 CO₂ 激光器非稳方向的输出光束特性,当腔镜均为抛物面镜时输出平面上光束的 M^2 因子仅为腔镜均为球面镜时的 3/10。球面腔镜的球差会对输出光束的能量分布、相对相位分布及 M^2 因子产生不利影响。而抛物面镜由于球差为零,谐振腔输出光束不受球差影响,光束质量高。

3) 通过实验研究发现,在大非涅耳数非稳腔中抛物面腔镜能消除球差的影响,输出光束没有偏离光轴的现象,有利于整形系统的设计,经过整形后得到近似基模的分布。这些对于非稳腔的设计具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Mahajan V N. Aberration theory made simple[C]. Bellingham: SPIE Press, 1991.
- 2 Klein C A. Optical distortion coefficients of high-power laser windows[J]. Optical Engineering, 1990, 29(4): 343-350.
- 3 Hauck R, Hodgson N, Weber H. Misalignment sensitivity of unstable resonators with spherical mirrors[J]. Journal of Modern Optics, 1988, 35(2): 165-176.
- 4 Liu C, Riesbeck T, Wang X, et al.. Influence of spherical aberrations on the performance of dynamically stable resonators[J]. Optics Communications, 2008, 281(20): 5222-5228.
- 5 Liu C. A birefringence-compensated two-rod Nd:YAG laser operating in TEM₀₀ mode with a CW 61 W output power[J]. Laser Physics, 2009, 19(12): 2155-2158.
- 6 Lumer Y, Moshe I, Jackel S, et al.. Use of phase corrector plates to increase the power of radially polarized oscillators[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(7): 1337-1342.
- 7 Liu Jianfeng, Wang Huijun, Sun Dewei, et al.. On-orbit adjustment and compensation for large aperture optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0322005.
刘剑峰, 王慧军, 孙德伟, 等. 大口径光学系统在轨调整补偿能力[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0322005.
- 8 Xue Qingsheng. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316003.

- 薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316003.
- 9 Zhou Liansheng, Yu Xinfeng, Wu Zhihui, *et al.*. Analysis of influence factors of thermal aberrations based on the small lens system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 092204.
- 周连生, 于新峰, 吴志会, 等. 基于小物镜系统的热像差影响因素分析[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 092204.
- 10 Gilbert M, Thro P Y. Near-diffraction-limited high power cw Nd:YAG laser using the spherical aberration of laser rods[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, Munich, Germany, 2005.
- 11 Siegman A E. Analysis of laser beam quality degradation caused by quartic phase aberrations[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(30): 5893-5901.
- 12 Hodgson N, Weber H. Influence of spherical aberration of the active medium on the performance of Nd:YAG lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(9): 2497-2507.
- 13 Buske I, Wittrock U. Diffraction analysis of aberrated laser resonators[J]. *Applied Physics B*, 2006, 83(2): 229-233.
- 14 Zhao Z, Pan S, Xiang Z, *et al.*. Influences of spherical aberration on resonator's stable zones and fundamental mode output power scaling of solid state laser oscillators[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10605-10616.
- 15 Jackson P E, Baker H J, Hall D R. CO₂ large-area discharge laser using an unstable-waveguide hybrid resonator[J]. *Applied Physics Letters*, 1989, 54(20): 1950-1952.
- 16 Colley A D, Baker H J, Hall D R. Planar waveguide, 1 kW cw, carbon dioxide laser excited by a single transverse rf discharge[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 61(2): 136-138.
- 17 Lapucci A, Labate A, Rossetti F, *et al.*. Hybrid stable-unstable resonators for diffusion-cooled CO₂ slab lasers[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(18): 3185-3192.
- 18 Lapucci A, Ciofini M. Numerical analysis of non-confocal configurations of a hybrid stable-unstable resonator[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(4): 999-1003.
- 19 Nowack R R, Opower H, Schaefer U, *et al.*. High-power CO₂ waveguide laser of the 1-kW category[C]. SPIE, 1990, 1276: 18-28.
- 20 Xin Jianguo, Zhang Wang. RF excited diffusively cooled kilowatts carbon monoxide slab waveguide laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(5): 714-716.
- 辛建国, 张 旺. 射频激励扩散型冷却板条波导千瓦 CO 激光器[J]. 光学学报, 2000, 20(5): 714-716.
- 21 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.
- 22 Du K, Wu N, Xu J, *et al.*. Partially end-pumped Nd:YAG slab laser with a hybrid resonator[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(5): 370-372.
- 23 Ciofini M, Favilla E, Lapucci A, *et al.*. Propagation parameters of the beam extracted from a diode pumped Nd:YAG ceramic slab laser with a hybrid stable-unstable resonator[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(7): 1380-1388.
- 24 Lapucci A, Ciofini M, Vannoni M, *et al.*. High efficiency, diode pumped Nd:YAG ceramics slab laser with 230 W continuous-wave output power[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(18): 4224-4231.
- 25 International Standardization Organization. 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.
- 26 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.
- 27 Xiao Longsheng, Tang Xiahui, Qin Yingxiong, *et al.*. Shaping characteristics of output beam of 2 kW RF slab CO₂ laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0402008.
- 肖龙胜, 唐霞辉, 秦应雄, 等. 2 kW 射频板条 CO₂激光器输出光束整形特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402008.

栏目编辑: 张 雁