

文章编号: 0258-7025(2004)10-1193-05

激光非均匀性和内光路热效应对 远场特性的影响

季小玲^{1,2}, 陶向阳^{1,3}, 吕百达^{1,3}

¹ 四川大学激光物理与化学研究所, 四川 成都 610064

(² 四川师范大学电子工程学院, 四川 成都 610066; ³ 江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330027)

摘要 高功率高能激光在光束控制系统(或称为内光路)中的传输距离比长程大气传输要短得多,但高功率密度的激光束在通过内光路时的热效应对远场光束质量会有显著影响。采用自编的四维仿真程序,详细计算了沿 x 方向呈线性变化的环状高功率激光束通过内光路的传输。用像散参数、桶中功率(PIB)和峰值光强位置描述了远场光束质量。研究表明,内光路的热效应(热晕)使得光束的峰值光强和可聚焦能力下降,降低了远场的光束质量,初始光束的非均匀性会影响光束的可聚焦能力并引起像散。值得指出的是,热晕是一种非线性效应,会影响光强分布和引起远场峰值光强位置的移动,对此给出了物理诠释,并用数值计算证实了物理分析。

关键词 激光技术;激光非均匀性;高功率激光;热效应;内光路;远场光束质量

中图分类号 TN 012 **文献标识码** A

Influence of Laser Non-Uniformity and Thermal Effects in an Inner Optical System on the Far-Field Behavior

JI Xiao-ling^{1,2}, TAO Xiang-yang^{1,3}, LÜ Bai-da^{1,3}

¹ Institute of Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

² College of Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610066, China

³ College of Physics & Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330027, China

Abstract Although for a real high-power and high-energy laser the propagation distance of lasers in the beam control system (or called the inner optical system) is much shorter than that in the long-distance atmosphere, the thermal effect of a high-power-density laser beam passing through the inner optical system remarkably affects the far-field beam quality. By using a four-dimensional simulation code, detailed numerical calculations are performed for the high-power laser propagation in the inner optical system, where an annular profile with linear non-uniformity in the x direction is used to model the high-power laser. The astigmatic parameter, power in the bucket (PIB) and position of the peak intensity are chosen as the parameters for characterizing beam quality in the far-field. It is found that the thermal effect in the inner optical system reduces the peak intensity and beam focusability, thus degrades the far-field beam quality. In addition, the non-uniformity of the initial beam affects the focusability and gives rise to the astigmatism. It is worth noting that the thermal blooming is a nonlinear effect, which affects the intensity distribution and results in a shift of the position of peak intensity in the far-field. The physical interpretation is given and confirmed by numerical results.

Key words laser technique; laser non-uniformity; high-power laser; thermal effect; inner optical system; far-field beam quality

收稿日期:2003-05-13; 收到修改稿日期:2003-08-26

基金项目:国家 863 计划(A823072)资助项目。

作者简介:季小玲(1963—),女,四川大学激光物理与化学研究所教授,博士,现主要从事激光传输与变换的研究。

E-mail:jiXL100@163.com

1 引 言

实际的高功率、高能量激光系统,在光束控制系统内(通常称为内光路)的热效应(热晕)会对远场光束质量有很大的影响。虽然对激光大气传输已作了许多深入的研究^[1~3],但迄今仅有很少的文献报道了内光路中的热效应对光束质量的影响^[4,5]。实际的高功率激光常由非稳腔产生,近场为环状光束,且重心偏向一侧。本文采用像散参数、桶中功率(PIB)和峰值光强位置描述远场光束质量,用自编的四维仿真程序作了详细的数值计算,研究激光非均匀性和内光路中热晕对远场光束质量的影响,得出了一些有意义的结果,并对这些结果作了物理解释。

2 理论模型

由非稳腔输出的近场环状平顶分布光束采用以下数学-物理模型来描述

$$E'_0 = \left\{ \exp\left[-\frac{(N+1)(x^2+y^2)}{a^2}\right] \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)(x^2+y^2)}{a^2}\right]^n - \exp\left[-\frac{(N+1)(x^2+y^2)}{b^2}\right] \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)(x^2+y^2)}{b^2}\right]^n \right\} \times \exp\left[i\frac{k(x^2+y^2)}{2z_f}\right] \quad (1)$$

式中 N 为平顶高斯光束的阶数, a 和 b 分别为环状光束的内外半径, z_f 为聚焦光学系统的焦距, 波数 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长。

设非均匀分布的环状光束沿 x 方向呈线性非均匀分布, 见图 1, 其初始场可表示为

$$E_0 = \left(1 - \frac{x}{s}\right) E'_0 \quad (2)$$

式中 s 为光束在 x 方向的截距, 它反映光束分布的不

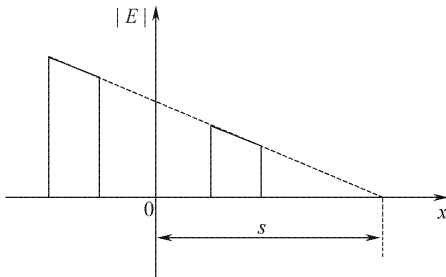


图 1 环状非均匀光束模型

Fig. 1 Simulation model for a non-uniform annular beam

均匀程度。 s 越小, 空心环状光束沿 x 方向倾斜越大, $s \rightarrow \infty$ 为平顶分布。

近轴近似下激光束的传输方程为^[1]

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \nabla_{\perp}^2 E + k^2 \left(\frac{n^2}{n_0^2} - 1\right) E \quad (3)$$

式中 E 为慢变场振幅, n_0 为未扰动时的折射率, n 为折射率。

光强为

$$I = |E|^2 \exp(-\alpha z) \quad (4)$$

式中 α 为衰减系数, z 为激光传输距离。

等压近似下的流体力学方程为^[1]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \cdot \nabla \rho = -\frac{(\gamma - 1)\alpha I}{c_s^2} \quad (5)$$

式中 $\gamma = C_p/C_v$, C_p, C_v 分别为定压比热和定容比热, ρ 为流体密度, v 为流体速度, c_s 为声速。我们用 Mathematica 编制了一套计算高功率激光在内光路中传输的四维 (x, y, z, t) 仿真程序, 对方程组(3)~(5)进行联立求解^[1~3]。(2)式为微分方程组的初值条件, 其中对(3)式采用相屏法, 并用快速傅里叶变换(FFT)计算, 对(5)式采用差分法处理。

按所用光束模型, 采用以下参数定量评价远场光束质量:

1) 像散参数

像散参数由 w_y/w_x 给出, 其中 w_x, w_y 分别为按二阶矩定义的 x 和 y 方向的束宽^[6]

$$w_x^2 = \frac{4 \iint (x - \bar{x})^2 |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y)|^2 dx dy} \quad (6)$$

$$w_y^2 = \frac{4 \iint (y - \bar{y})^2 |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y)|^2 dx dy} \quad (7)$$

\bar{x} 和 \bar{y} 分别为按一阶矩定义的光束重心位置

$$\bar{x} = \frac{\iint x |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y)|^2 dx dy} \quad (8)$$

$$\bar{y} = \frac{\iint y |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y)|^2 dx dy} \quad (9)$$

2) 桶中功率^[7,8]

$$PIB = \frac{\int_0^a I(r, z_f) r dr}{\int_0^{\infty} I(r, z_f) r dr} \quad (10)$$

式中 $r = \sqrt{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2}$, a 为桶的半径。桶中功率定义为在远场(几何焦面)某一给定尺寸的“桶”中所围住的激光功率占总功率的份额, 物理上, 桶中功率表征了光束的可聚焦能力。

3) 峰值光强位置

当峰值光强很大,且峰值光强与光束重心位置不重合时,可用峰值光强位置作为描述远场光束质量的一个参数,因为在激光与靶相互作用中,峰值光强位置是比光束重心位置更为重要的一个参数。

3 数值计算结果和分析

计算参数为: $\gamma = 1.4$, $n_0 = 1.00035$, 大气密度 (101.325 kPa 下) $\rho_0 = 1.302461 \text{ kg/m}^3$, $c_s = 340 \text{ m/s}$, $\lambda = 1.06 \text{ }\mu\text{m}$, $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} / \text{m}$, $\omega_0 = 5 \text{ cm}$, $N = 6$, $z_f = 2 \times 10^3 \text{ m}$, $a/b = 0.3$, 光束在内光路中传输的距离 $d = 10 \text{ m}$, 图 2~6 中的发射功率 $P = 100 \text{ kW}$ 。在计算中,令 $v = 0$, 即无横向风,这会使

得计算机时增加,但较为合乎实际情况。

图 2~5 中,坐标均按网格数标识,网格中间值对于光场中心。图 2 为非均匀分布环状光束在入射场和经真空传输至远场 $z = 2 \times 10^3 \text{ m}$ 的光强分布。由图 2 可知,环状光束经真空传输至远场后不再为空心光束,在中心出现一峰值。图 3 为平顶环状光束在内光路出口处和经真空传至远场的光强分布。由图知,光强在内光路出口处仍为平顶环状分布,但内光路中的热晕使得远场光强出现多个旁瓣;峰值光强仍位于中心,但峰值光强下降了许多。图 4 为非均匀分布的环状光束在内光路出口处和经真空传至远场的光强分布。图 4 表明,在内光路出口处光强分布无明显变化,仍为非均匀分布的环状光束,

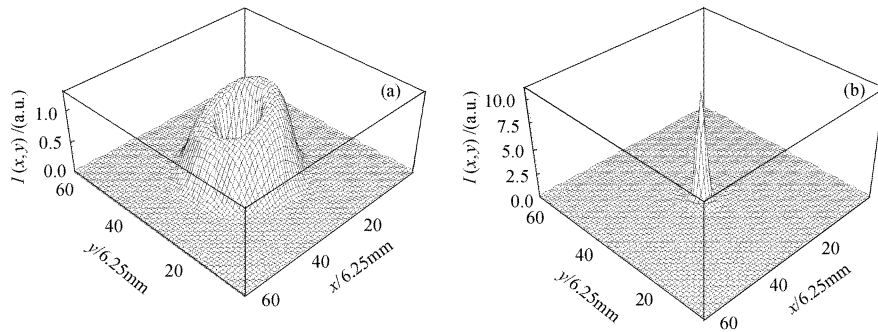


图 2 真空中 $s = 4$ 时环状光束在(a)入射场和(b)远场的光强分布

Fig. 2 Intensity distributions of a non-uniform annular beam with $s = 4$ in vacuum
(a) at the input plane; (b) in the far field

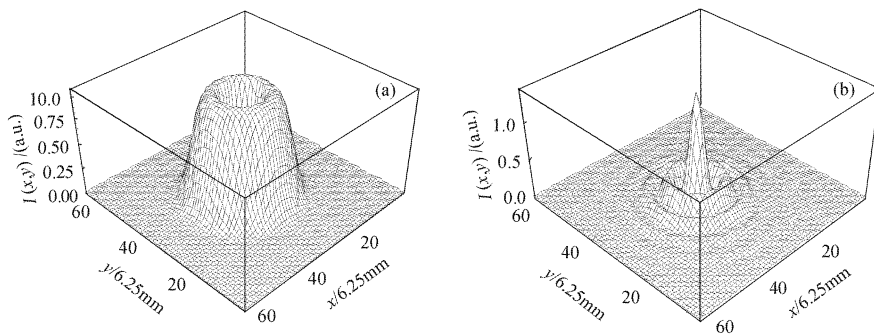


图 3 平顶环状光束在(a)内光路出口处和(b)远场的光强分布

Fig. 3 Intensity distributions of a flat-topped annular beam
(a) at the exit of the inner optical system; (b) in the far field

但内光路的热晕和入射激光的非均匀分布对远场光强分布有很大的影响。与无热晕情况(图 2(b))相比,热晕导致多旁瓣出现;与平顶环状光束有热晕情况(图 3(b))相比,由于入射激光的非均匀分布使得峰值光强的位置发生偏移,不再位于中心。图 5 为不同 s 情况下,内光路出口和远场的等光强线分布。

从图 5 看出, s 值不同,即入射光束分布的不均匀程度不同,内光路出口处和远场的光强分布是不同的。当 $s \rightarrow \infty$,即平顶环状光束,其内光路出口处和远场的光强分布均为轴对称分布。由于热晕作用,远场光强分布出现多个旁瓣。当 s 取有限值时,即非均匀分布的环状光束,其内光路出口处和远场的光强分布

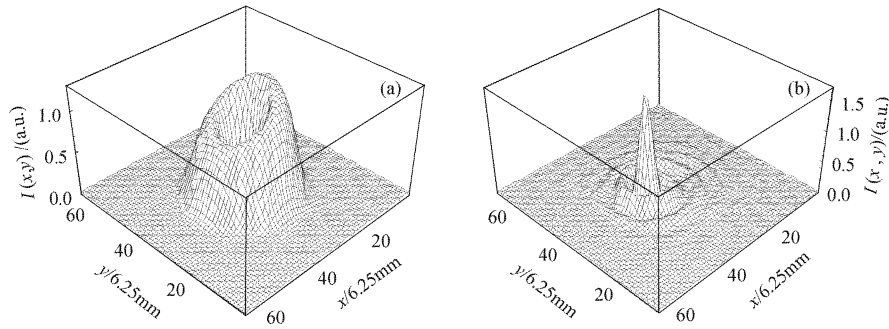


图 4 $s=4$ 环状光束在(a)内光路出口处和(b)远场的光强分布
 Fig. 4 Intensity distributions of a non-uniform annular beam with $s=4$
 (a) at the exit of the inner optical system; (b) in the far field

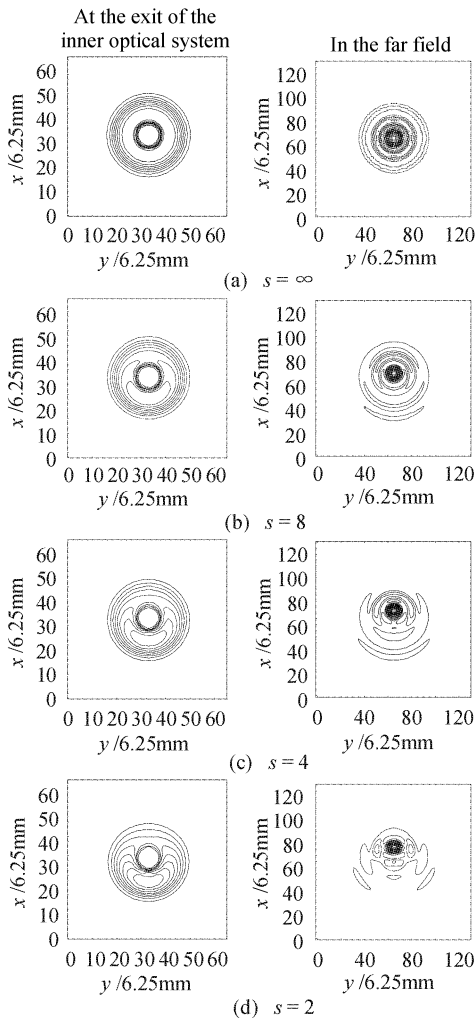


图 5 s 值不同时环状光束在内光路出口处和远场的等光强线
 Fig. 5 Counter lines of non-uniform annular beams with different values of s

均为非轴对称分布。相对于内光路出口处,远场峰值光强向相反方向移动,且 s 越小(非均匀性越大),位移越大。图 6 为不同 s 情况下远场光束的桶中功率曲

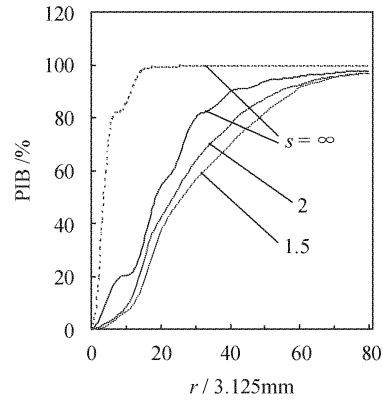


图 6 不同 s 值时环状光束的桶中功率曲线
 其中虚线对应于平顶环状光束在真空传输时的桶中功率曲线

Fig. 6 PIB curves of annular beams with different values of s
 where the dotted line corresponds to the PIB curve of a flat-topped annular beam propagating in vacuum

线。由图知,与环状平顶光束在真空中传输(图中虚线)相比,内光路热晕使光束桶中功率值减小,远场可聚焦能力降低,平顶环状光束的桶中功率大于非均匀分布的环状光束的桶中功率,随 s 减小,光束的桶中功率减小,光束可聚焦能力降低。

热晕和激光非均匀分布对远场光束质量影响的数值计算结果列于表 1,表中 x_{01}, x'_{01} 分别为光束经真空和大气后在内光路出口处的峰值光强位置, x_{02}, x'_{02} 分别为光束在内、外光路经真空和在大气、外光路经真空传输至远场的峰值光强位置(峰值光强的 y 坐标为 0),计算参数与前同。由图 3(a)知, $s \rightarrow \infty$ 时,内光路出口处光强为平顶环状分布,而不是一点,表 1 中没有给出峰值光强位置。由表 1 知:1) $s \rightarrow \infty$ (仅有热晕影响)时, $x_{02} = x'_{02} = 0$,远场峰值光强位置在中心; $w_x/w_y = 1$,光束不会

出现像散,即为轴对称光束。2) s 为有限值(既有热晕又有激光非均匀分布影响)时,与 $s \rightarrow \infty$ 时相比, w_x, w_y 和 w_y/w_x 增大,且 s 越小, w_x, w_y 和 w_y/w_x 越大,光束可聚焦能力越低,像散也越明显。光束经真空和大气后在内光路出口处的峰值光强位置相同 $x_{01} = x'_{01}$;光束经真空传输至远场,峰值光强位置 $x_{02} = 0$,即峰值光强位置位于中心,但光束在内光路经大气传输再在外光路经真空传输至远场,峰值光强位置发生偏移($x'_{02} \neq 0$)。值得注意的是,远场峰值光强相对于内光路出口处的峰值光强向相反方向移动,并越过中心而位于另一侧($x'_{02} > 0, x'_{01} < 0$)。 s 越小,位移量 $|x'_{02} - x'_{01}|$ 越大。远场峰值光强位置偏移的物理原因是由于热晕是一种非线性效应,它会反过来影响光强。对初始场分布为非均匀环状光束, s 越小,环状光束在 x 方向倾斜越明显。激光与大气相互作用的结果会使初始峰值光强处的折射率减小最大,散焦最明显,导致远场峰值光强向相反方向移动。表 2 给出了 s 为常数($s = 4$)时,不同发射功率 P 的远场峰值光强位置数值计算结果。由表 2 可知,随着 P 的减小, x'_{02} 减小,位移量 $|x'_{02} - x'_{01}|$ 减小。当发射功率 $P = 20$ kW 时, $x'_{02} = 0$,即在远场峰值光强已位于中心。这是因为随着发射功率的减小,非线性热晕效应减弱,当 $P = 20$ kW 时热晕对峰值光强位置影响已可忽略,其结果就与非均匀分布的环状光束经真空传输至远场情况相同。

表 1 远场光束质量参数的数值计算结果

Table 1 Numerical results for the beam quality parameters in the far field

s	∞	8	4	2
w_x /mm	115.81	117.01	119.90	132.17
w_y /mm	115.81	118.33	124.78	149.42
w_y/w_x	1	1.01	1.05	1.13
x_{01} /mm		-28.13	-28.13	-31.25
x'_{01} /mm		-28.13	-28.13	-31.25
$ x'_{01} - x_{01} $ /mm		0	0	0
x_{02} /mm	0	0	0	0
x'_{02} /mm	0	12.50	25.00	37.50
$ x'_{02} - x_{02} $ /mm	0	12.50	25.00	37.50
$ x'_{02} - x'_{01} $ /mm		40.63	53.13	68.75

表 2 远场峰值光强位置的数值计算结果($s=4$)Table 2 Numerical results for the position of peak intensity in the far field, $s=4$

P /kW	100	80	60	40	20
x'_{02} /mm	25.00	18.75	12.50	6.25	0
$ x'_{02} - x'_{01} $ /mm	53.13	46.88	40.63	34.38	28.13

4 结 论

研究表明,光束在内光路出口处光强分布无明显变化,仍为非均匀环状光束。但由于内光路中激光的功率密度很高,内光路的热晕对远场光强分布有很大的影响。热晕的作用使得远场光强峰值下降,光束可聚焦能力降低,对无风情况光束无像散,远场峰值光强仍位于中心。非线性热效应要引起远场光强峰值位置发生偏移,且相对于内光路出口处峰值光强位置向相反方向移动,并越过中心而位于另一侧。随着激光分布非均匀性增加,光束可聚焦能力降低,像散程度加重,峰值光强偏移量增加。所用非均匀环状光束模型是对高功率激光分布的一种近似描述,比用平面波或高斯光束模型更合乎实际情况。虽然实际高功率激光的近场光强分布更为复杂,但本文所用方法和所得结论在定性上是适用的,对高功率激光远程能量输运之类问题的研究有实际意义。

致谢 作者曾就仿真程序有关问题与中国科学院光电技术研究所金钢研究员和刘顺发博士进行了有益的讨论,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 J. A. Fleck, Jr., J. R. Morris, M. D. Feit. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere [J]. *Appl. Phys.*, 1976, **10**:129~160
- 2 Chen Dongquan, Li Youkuan, Xu Xishen *et al.*. Numerical simulation of thermal blooming in atmospheric laser propagation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1993, **5**(2):243~252
陈栋泉,李有宽,徐锡申等. 激光大气传输中热晕的数值模拟 [J]. *强激光与粒子束*, 1993, **5**(2):243~252
- 3 Wan Min, Su Yi, Zhang Kai *et al.*. Numerical computation and experiment of laser thermal blooming and compensation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1996, **25**(1):51~59
万敏,苏毅,张凯等. 激光热晕补偿数值模拟计算与实验 [J]. *红外与激光工程*, 1996, **25**(1):51~59
- 4 Jin Gang, Liu Shunfa, Li Shumin *et al.*. Laser thermal effects in beams control system on the emitted laser quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):895~899
金钢,刘顺发,李树民等. 激光热效应对光束控制系统发射光束质量的影响 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):895~899
- 5 Liu Shunfa, Jin Gang, Chen Hongbin *et al.*. Thermal effect simulation for laser channel transmission [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **28**(6):14~16
刘顺发,金钢,陈洪斌等. 激光通道传输效应仿真 [J]. *光电工程*, 2001, **28**(6):14~16
- 6 A. E. Siegman. New developments in laser resonators [C]. *SPIE*, 1990, **1224**:2~14
- 7 A. E. Siegman. How to (maybe) measure laser beam quality [J]. *OSA. TOPS*, 1998, **17**:184~199
- 8 A. Garay. Continuous wave deuterium fluoride laser beam diagnostic system [C]. *SPIE*, 1998, **888**:17~22