

文章编号: 1001-3806(2004)03-0251-04

高功率激光束的远场特性研究

季小玲^{1,2}, 陶向阳^{2,3}, 吕百达¹

(1. 四川大学 激光物理与化学研究所, 成都 610064; 2. 四川师范大学 电子工程学院, 成都 610066; 3. 江西师范大学 物理与通信电子学院, 南昌 330027)

摘要: 采用场振幅沿 x 方向呈线性变化的非均匀光束模型, 研究了非均匀场分布和内光路非线性热效应对远场特性的影响。研究表明, 初始光束的非均匀分布会影响可聚焦能力, 并引起像散。内光路的热效应会进一步减小可聚焦能力和加剧像散。此外, 由于热效应, 远场峰值光强要降低, 且位置发生移动。

关键词: 高功率激光; 非均匀性; 内光路; 热效应; 远场特性

中图分类号: TN012 **文献标识码:** A

Far-field characteristics of high-power laser beams

Ji Xiaoling^{1,2}, Tao Xiangyang^{2,3}, Lü Baida¹

(1. Institute of Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. College of Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China; 3. College of Physics & Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027, China)

Abstract: By using a beam model with linear non-uniform field profile in the x direction, the effect of beam non-uniformity and nonlinear thermal blooming in the optical beam control system on the far-field characteristics of high-power laser beams is studied. It is found that the non-uniformity of the initial beam affects the focusability and results in the astigmatism. The thermal blooming gives rise to a further decrease of the focusability and a further increase of the astigmatism. In addition, the peak intensity in the far-field is reduced and its position shifts away owing to the thermal blooming.

Key words: high-power laser; non-uniformity; inner optical system; thermal effect; far-field characteristics

引言

实际高功率激光需要通过一个有多种功能的光束控制系统(简称为内光路)发射出去。发射激光的振幅、相位分布、内光路中的热效应^[1], 以及长程大气传输(简称为外光路)^[2,3]对高功率激光的远场特性都有影响。本文中采用场振幅沿 x 方向呈线性变化的非均匀光束模型, 对激光束本身的非均匀分布和内光路非线性热效应对远场特性的影响作了计算模拟和分析, 并与非均匀分布光束在真空中传输至远场和均匀分布光束通过内光路后的远场特性作了比较, 所得结果对高功率激光系统的光束控制问

题有实际意义。

1 计算模型

平顶高斯光束是描述均匀分布激光的重要物理模型, 平顶光束的场分布为^[4]:

$$E'(x, y, 0) = E_0 \exp\left[-\frac{(N+1)(x^2+y^2)}{w_0}\right] \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)(x^2+y^2)}{w_0}\right]^n \quad (1)$$

式中, N 和 w_0 分别为平顶光束的阶数和束宽, $N=0$ 为高斯光束。

设非均匀分布光束沿 x 方向呈线性非均匀分布, 见图 1, 在 y 方向为均匀分布, 其初始场可表示为: $E(x, y, 0) = (1 - x/s) E'(x, y, 0)$ (2) 式中, s 为光束在 x 方向的截距, 它描述分布的不均匀程度, $s \rightarrow \infty$ 时光束为平顶分布。

基金项目: 国家高技术发展计划资助项目(A823072); 四川省教育厅自然科学基金资助项目(2002A089)

作者简介: 季小玲(1963-), 女, 教授, 博士研究生, 现从事激光传输与变换的研究。

E-mail: jixl100@163.com

收稿日期: 2003-06-17; 收到修改稿日期: 2003-08-11

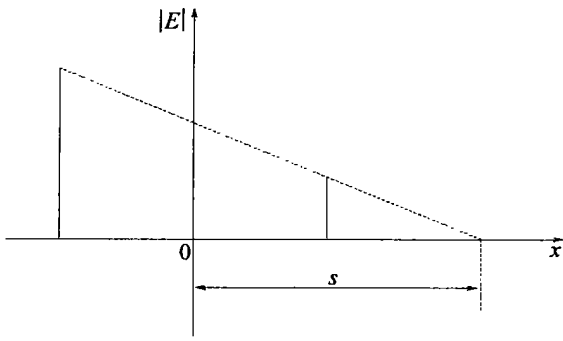


Fig. 1 Simulation model for a non-uniform beam

由广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式^[5], (2)式

表征的光束通过变换矩阵为 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 的光学系统后的场分布为:

$$E(x, y, z) = \frac{i}{\lambda B} \exp\left\{-\frac{ikD}{2B}(x^2 + y^2)\right\} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x_0, y_0, 0) \exp\left\{-\frac{ik}{2B}[A(x_0^2 + y_0^2) - 2(xx_0 - yy_0)]\right\} dx_0 dy_0 \quad (3)$$

式中, 波数 $k = 2\pi/\lambda$ (λ 为波长), A, B, C, D 为光学系统的变换矩阵元, 对文中讨论情况有:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/z_f & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - z/z_f & z \\ -1/z_f & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, z_f 为光学系统的焦距。

当 $N=0$ 时, 即对于非均匀高斯光束, 将(1)式、(2)式代入(3)式, 积分得到:

$$E(x, y, z) = -\frac{kw_0^2 / kw_0^2 (x - As) + i2Bs}{s[Akw_0^2 - i2B]} \times \exp\left\{-\left(\frac{k}{2B}\right)^2 \frac{x^2 + y^2}{1/w_0^2 + i kA/2B}\right\} \quad (5)$$

光强分布为:

$$I(x, y, z) = |E(x, y, z)|^2 = \frac{k^2 w_0^4 / k^2 w_0^4 (x - As)^2 + (2Bs)^2}{s^2 [(Akw_0^2)^2 + (2B)^2]} \times$$

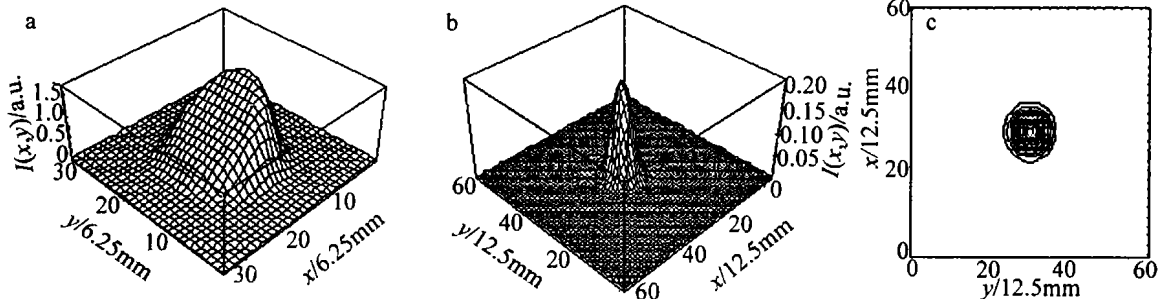


Fig. 2 Intensity distributions of a non-uniform beam with $s = 2$ in vacuum
a—at the input plane b—in the far field c—counter lines in the far field

$$\exp\left\{-\frac{k^2(x^2 + y^2)}{2w_0^2 B^2 [(1/w_0^2)^2 + (kA/2B)^2]}\right\} \quad (6)$$

当 $z = z_f (A = 0)$, 即几何焦点处, (6)式简化为:

$$I(x, y, z_f) = -\frac{k^2 w_0^4 (k^2 w_0^4 x^2 + 4B^2 s^2)}{16B^4 s^2} \times \exp\left\{-[k^2 w_0^2 (x^2 + y^2)]/2B^2\right\} \quad (7)$$

(6)式、(7)式表明, 振幅在 x 方向上呈线性变化的高斯光束, 光强在 yOz 面仍为高斯分布, 当 $z \neq z_f$ (非几何焦点上), 光强在 xOz 面为关于 x 的非对称分布; 当 $z = z_f$ (几何焦点上), 光强在 xOz 面为关于 x 的对称分布, 其等光强线为椭圆分布, 即出现像散。

高功率激光在内光路中的传输由下述方程来描述^[1,31]:

(1) 近轴近似下的波动方程

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \nabla_{\perp}^2 E + k^2 \left(\frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) E \quad (8)$$

(2) 等压近似下的流体力学方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \cdot \nabla \rho = -\frac{(\gamma - 1)\alpha}{c_s^2} I \quad (9)$$

式中, $\gamma = c_p/c_v$, c_p, c_v 分别为比定压热容和比定容热容, ρ 为流体密度, v 为流体速度, c_s 为声速。

2 计算结果和分析

由(8)式、(9)式出发, 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。计算参数为: $\gamma = 1.4$, $n_0 = 1.00035$, 大气密度 (标准大气下), $\rho_0 = 1.302461 \text{ kg/m}^3$, $c_s = 340 \text{ m/s}$, $\alpha = 6.5 \times 10^{-5} \text{ /m}$, $v = 0$, $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, $w_0 = 5 \text{ cm}$, $N = 6$, $z_f = 2 \times 10^3 \text{ m}$, 光束在光束控制系统中传输的距离 $d = 10 \text{ m}$ 。

图2至图5中, 坐标均按网格数标识, 网格中间值对应于光场中心。图2为真空中非均匀分布光束

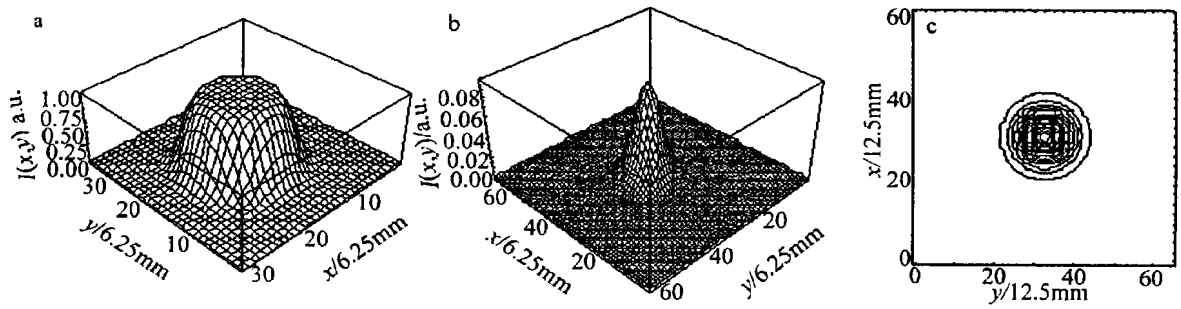


Fig. 3 Intensity distributions of a flat-topped beam with $P = 70\text{kW}$
 a—at the exit of the inner optical system b—in the far field c—counter lines in the far field

(a) 入射场、(b) 远场 $z = 2 \times 10^3\text{m}$ 的光强分布和 (c) 远场等光强线分布。由图 2 可知, 峰值光强不在中心的非均匀光束 (见图 2a) 经真空传输至远场后在中心出现一峰值 (见图 2b), 光束出现像散, 其等光强线为椭圆 (见图 2c)。

图 3 至图 6 中, 激光通过内光路后再经真空传输至远场。图 3 为平顶光束在 (a) 内光路出口处、(b) 远场的光强分布和 (c) 远场等光强线分布。由图知, 光强在内光路出口处仍为平顶分布, 光束无像散, 远场峰值光强位于中心, 峰值光强下降, 光斑扩大。图 4 为非均匀分布光束在 (a) 内光路出口处和

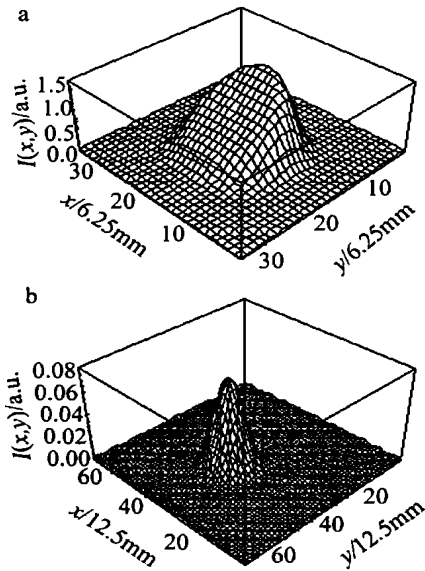


Fig. 4 Intensity distributions of a non-uniform beam with $P = 70\text{kW}$, $s = 2$
 a—at the exit of the inner optical system b—in the far field

(b) 远场的光强分布。图 5 为不同发射功率下情况下, 内光路出口和远场的等光强线分布。图 4 和图 5 表明, 在内光路出口处光强分布无明显变化, 仍为非均匀分布光束, 但内光路的热效应对远场光强分布有很大的影响。与无热效应情况 (见图 2b, 见图 2c) 和平顶光束有热效应情况 (见图 3b、见图 3c) 相比较, 远场峰值光强的位置发生偏移, 不再位于中心, 发射功率越大, 峰值光强的位移量越大, 光斑越大, 像散越

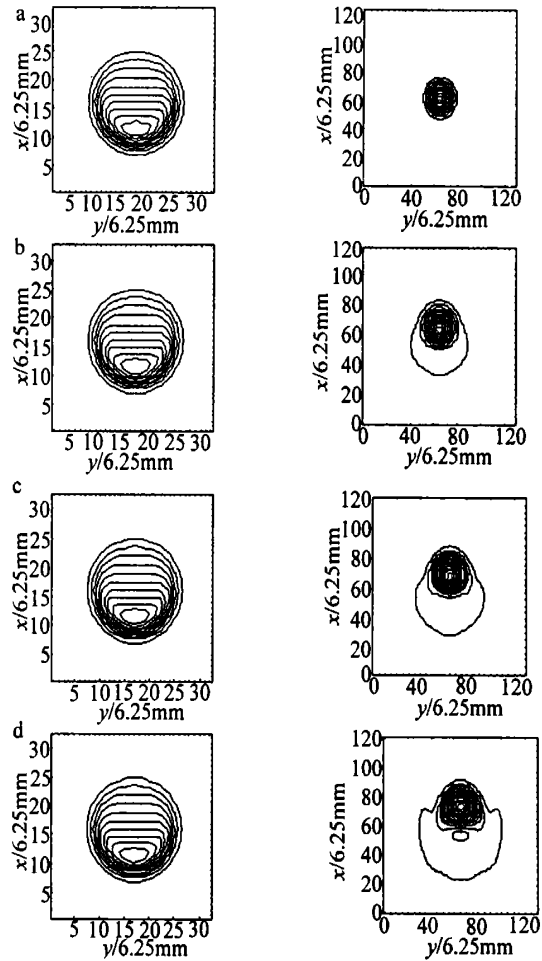


Fig. 5 Counter lines of non-uniform beams with $s = 2$ for different values of P
 a— $P = 1\text{kW}$ b— $P = 50\text{kW}$ c— $P = 60\text{kW}$ d— $P = 80\text{kW}$

厉害。当发射功率减小到一定值时, 例如 $P = 1\text{kW}$, 其远场光强分布 (见图 5a) 与光束在真空中传输的相同 (见图 2c)。图 6 为不同发射功率下光束的桶中功率 (PIB)^[6] 曲线。由图 6 可知, 与非均匀分布光束在真空中传输 (图中用 $\circ\circ$ 表示) 相比较, 内光路热效应使光束 PIB 值减小, 光束可聚焦能力降低。光束的 PIB 随发射功率减小而增大, 光束可聚焦能力提高。随着发射功率的减小, 非线性热效应减弱, 当发射功率为 1kW 时, 其 PIB 曲线与光束在真空中传输的 PIB

曲线相重合。

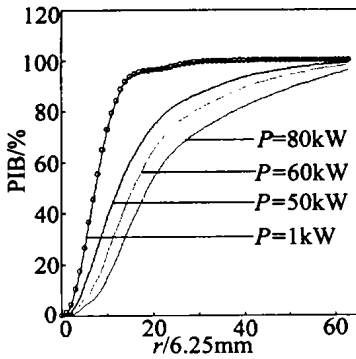


Fig. 6 PIB curves of annular beams with $s = 2$ for different values of P “...” PIB curve of a non-uniform beam propagating in vacuum

热晕对远场光束质量影响的数值计算结果见表1。当峰值光强很大,且峰值光强与光束重心位置不重合时,峰值光强位置可作为描述远场光束质量的一个参数。表中 x_{01}, x_{01}' 分别为光束经真空和大气在内光路出口处峰值光强位置, x_{02}, x_{02}' 分别为光束经真空传输至远场和光束在内光路经大气在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。由表1知:(1) Strehl比^[7] $S_r < 1$, 即热效应的作用使得远场光强峰值下降, 且发射功率越大, S_r 越小, 热效应越严重, 峰值光强越小;(2) $x_{01} = x_{01}', x_{02} = 0, x_{02}' \neq 0$, 即内光路的热效应不改变内光路出口峰值光强位置, 光束经真空传输至远场,

Table 1 Numerical results for the beam quality parameters ($s = 2$)

P / kW	80	60	50	1
S_r	0.353	0.419	0.516	0.996
x_{01} / mm	37.5	-37.5	-37.5	-37.5
x_{01}' / mm	-37.5	-37.5	-37.5	-37.5
$ x_{01}' - x_{01} / \text{mm}$	0	0	0	0
x_{02} / mm	0	0	0	0
x_{02}' / mm	175.0	100.0	50.0	0
$ x_{02}' - x_{02} / \text{mm}$	175.0	100.0	50.0	0
$ x_{02}' - x_{01}' / \text{mm}$	212.5	137.5	87.5	37.5

峰值光强位于中心, 而内光路的热效应使得远场峰值光强位置发生偏移。其物理原因是激光在大气中传输时, 大气中的分子和粒子会吸收激光而加热膨胀, 密度减小, 导致局部折射率减小。对于非均匀分布的光束, 在光强最大处局部折射率最小, 导致远场峰值光强向相反方向移动, 并越过中心而位于另一侧 ($x_{02}' > 0, x_{01}' < 0$)。发射功率 P 越大, 热效应越厉害, 位移量 $|x_{02}' - x_{01}'|$ 越大。当发射功率减小到 $P = 1\text{kW}$ 时, x_{02}' (与真空传输情况相同), 即非线性热效应可忽略。

3 小结

从近轴波动方程和等压近似下的流体力学方程出发, 研究了光束分布的非均匀性和内光路中的非线性热效应对远场光束特性的影响, 并与光束通过真空的传输作了比较。研究表明, 非均匀分布会影响光束的可聚焦能力, 并引起像散。内光路的热效应会进一步减小 PIB 值和加剧像散, 并使远场峰值光强降低, 位置移动。为提高远场光束质量, 应采取有效措施使激光空间分布均匀化和减小内光路热效应。此外, 外光路长程大气传输对高功率激光远场特性有重要影响, 对此应另作研究。

参考文献

- [1] 金钢, 刘顺发, 李树民 *et al.* 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.
- [2] HLECK J A, MORRIS J R, FEIT M D. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere [J]. Appl Phys, 1976, 10: 129~160.
- [3] 陈栋泉, 李有宽, 徐锡申 *et al.* 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.
- [4] L'EB D, LUO Sh R, ZHANG B. Propagation of three-dimensional flattened Gaussian beams [J]. J Mod Opt, 1999, 46: 1753~1762.
- [5] COLLINS S A. Lens-system diffraction integral written terms of matrix optics [J]. J O S A, 1970, 60(7): 1168~1177.
- [6] GARAY A. Continuous wave deuterium fluoride laser beam diagnostic system [J]. SPIE, 1998, 888: 17~22.
- [7] 吕百达. 强激光的传输与控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 66.
- [9] 江剑平. 半导体激光器 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 333.
- [10] 黄章勇. 光电子器件和组件 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001. 7.
- [11] Bellcore-GR-468-CORE-1998, Generic Requirements [S]: 4-1~4-34; 8-1~8-19.

(上接第 230 页)

- [7] 中国科学技术情报研究所重庆分所《半导体器件的可靠性》编写组. 半导体器件的可靠性 [M]. 重庆: 重庆科学技术文献出版社, 1977. 59.
- [8] 黄德修, 刘雪峰. 半导体激光器及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 5.