

文章编号: 1001-3806(2006)01-0096-03

## 内光路中大气吸收对远场光束质量的影响

张恩涛<sup>1</sup>, 季小玲<sup>2</sup>, 吕百达<sup>1\*</sup>

(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)

**摘要:** 采用桶中功率、 $\beta$ 参数、像散参数、Strehl比和光束重心位置等参数描述远场光束质量, 研究了在内光路中进行气体吸收对远场激光光束质量的影响, 并与内光路中有横向吹风存在情况作了比较。用自编四维仿真程序进行了数值计算和物理分析。研究表明, 随着吸收系数的减小或风速的增大, 远场光束的峰值光强明显增强, 可聚焦能力大大提高。但横向吹风会引起像散。

**关键词:** 高功率激光; 热效应; 光束控制系统; 光束质量

**中图分类号:** TN012 **文献标识码:** A

### Influence of atmospheric absorption in the inner optical system on the laser beam quality

ZHANG En-tao<sup>1</sup>, JI Xiao-ling<sup>2</sup>, LYU Bai-da<sup>1</sup>

(1. Institute of Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. College of Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China)

**Abstract:** The power in the bucket (PB),  $\beta$  parameter, astigmatic parameter, Strehl ratio and the center of beam gravity are regarded as the characteristic parameters of the laser beam quality in the far field, the influence of absorption in the inner optical system on the laser beam quality is studied. Results are compared with and without the presence of the transversal wind. By using a four-dimension simulation code, a large number of numerical calculations are performed and the results are analyzed physically. It is shown that the peak intensity and focus ability of laser beams increase with decreasing absorption coefficient and increasing wind velocity. However the transversal wind results in an astigmatism.

**Key words:** high-power laser; thermal effect; beam control system; beam quality

## 引 言

激光通过大气传输时, 非线性热效应会影响远场光束质量, 对此已经有许多研究<sup>[1~4]</sup>。由于高功率激光的功率密度很高, 高功率密度细光束在光束控制系统(内光路)中的热效应(热晕)会对激光传输和远场光束质量产生很大的影响<sup>[5]</sup>。此外, 激光束的像差和非均匀分布对远场光束特性也会产生影响<sup>[6,7]</sup>。文中用桶中功率(power in bucket, PB)、 $\beta$ 参数、像散参数( $w_x/w_y$ )、Strehl比( $S_r$ )和光束重心位置等参数评价远场光束质量, 用自编的四维光束传输程序, 对内光路大气吸收对远场光束质量的影响作了计算模拟和分析, 并与内光路有横向风存在情况进行了比较, 所得结果对高功率激光远程能量输运之类问题的研究有实际意义。

## 1 理论模型

编制的四维( $x, y, z, t$ )仿真程序中使用的的基本方程有近轴近似下激光束的传输方程<sup>[3,4]</sup>:

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

式中,  $k$ 为波数,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$ 为波长,  $E$ 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:

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

式中,  $\alpha$ 为吸收系数。

对理想气体, 等压近似下的流体力学方程为<sup>[3,4]</sup>:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \cdot \nabla \rho = -\frac{(\gamma - 1)\alpha}{c_s^2} I \quad (3)$$

式中,  $\gamma = c_p/c_v$ ,  $c_p$ ,  $c_v$ 分别为定压比热容和定容比热容,  $\rho$ 为流体密度,  $v$ 为流体速度,  $c_s$ 为声速。

设光束初始场为高斯分布, 即:

$$E = \exp \left[ i \frac{k(x^2 + y^2)}{2\bar{q}} - \frac{x^2 + y^2}{2w_0^2} \right] \quad (4)$$

式中,  $\bar{q}$ 为聚焦光学系统的焦距。文中采用桶中功率、 $\beta$ 参数、像散参数、Strehl比和光束重心位置等参数<sup>[4]</sup>

基金项目: 国家高技术 863-802 资助项目 (A823070)

作者简介: 张恩涛 (1978-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光传输与变换的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: badalu@scu.edu.cn

收稿日期: 2004-10-19; 收到修改稿日期: 2004-12-06

评价远场光束质量,其定义分别见下。

(1) 桶中功率 (PB):

$$PB = \frac{\int_0^a \int_0^{2\pi} I(r, \varphi) r dr d\varphi}{\int_0^a \int_0^{2\pi} I(r, \varphi) r dr d\varphi} \quad (5)$$

式中,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $a$  为桶的半径,  $PB$  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, 表征光束的可聚焦能力。

(2)  $\beta$  参数:  $\beta = \sqrt{A_m / A_0}$  (6)

式中,  $A_m, A_0$  分别表示实际光束和理想光束在远场当  $PB = 63\%$  时所对应的光斑面积。

(3) 光束重心位置  $x, y$ ; 像散参数  $w_x / w_y$ , 按二阶矩定义的束宽  $w_x, w_y$  为:

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

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

式中,  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别为按一阶矩定义的光束重心位置:

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

(4) Strehl 比 ( $S_r$ ):

$$S_r = \frac{\text{实际光束峰值光强}}{\text{理想光束衍射极限峰值光强}} \quad (9)$$

$S_r \leq 1$ ,  $S_r$  越大, 则峰值光强越大, 光束质量越高。

用 MATHEMATICA 编制了一套计算高功率激光经内光路传输至远场的四维  $(x, y, z, t)$  仿真程序, 对方程组 (1) 式 ~ (3) 式联立求解<sup>[3,4]</sup>。对激光传输方程 (1) 式采用相屏法, 并用快速傅里叶变换 (FFT) 计算, 对流体力学方程 (3) 式用差分法处理。

## 2 数值计算结果和分析

研究内光路的热效应对远场光束质量的影响, 激光在内光路以外设为经真空传输至远场。计算参数为:  $\gamma = 1.4$ ,  $n_0 = 1.0035$ , 大气密度 (标准大气下)  $\rho_0 = 1.30 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_s = 340 \text{ m/s}$ ,  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ,  $w_0 = 5 \text{ cm}$ ,  $z_f = 2 \times 10^3 \text{ m}$ , 发射功率  $P = 200 \text{ kW}$ , 光束在内光路中传输距离  $d = 10 \text{ m}$ 。文中各图均按照网格数标识, 图 1、图 2 和图 3 的网格中间值对应于远场的中心。图 1 是光束经自由空间传输至远场的光强分布图和等光强线图,

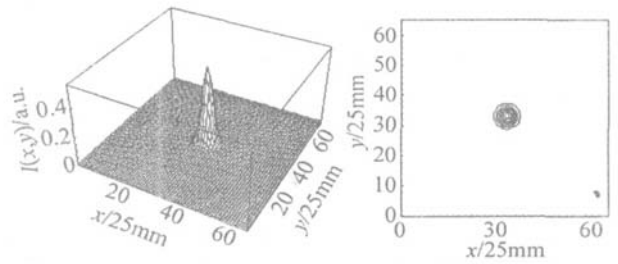


Fig 1 Intensity distribution and contour lines of a Gaussian beam in vacuum

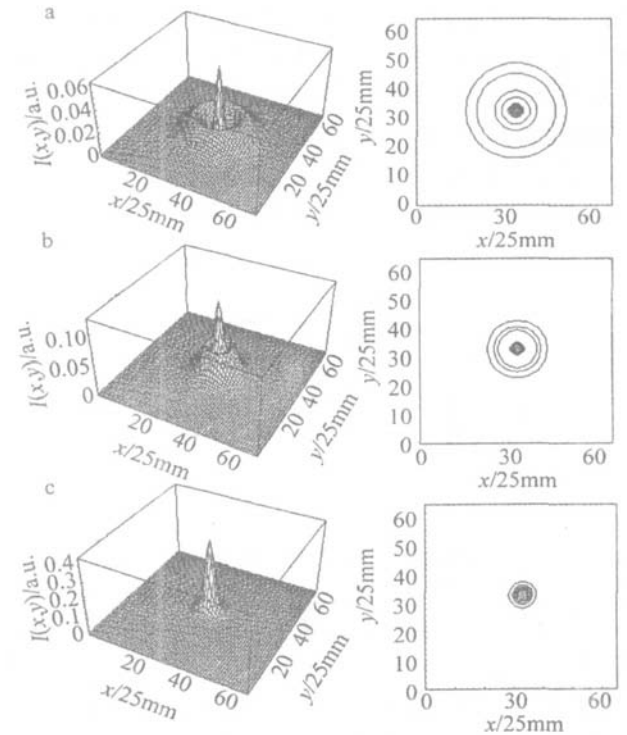


Fig 2 Intensity distributions and contour lines of a Gaussian beam for different values of the absorption coefficient  $\nu=0$   
 a— $\alpha = 6.5 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  b— $\alpha = 3.5 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  c— $\alpha = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$

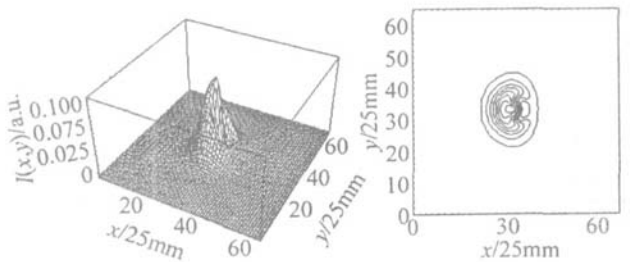


Fig 3 Intensity distribution and contour lines of a Gaussian beam,  $\nu = 0.1 \text{ m/s}$  and  $\alpha = 6.5 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$

可以看出, 光强呈现出良好的高斯分布。图 2 为不同吸收系数下光束在  $z = 2 \times 10^3 \text{ m}$  处的光强分布和等光强线图。表 1 为远场光束质量参数随吸收系数  $\alpha$  减小的数值计算结果。从图 2a 可以看出, 由于内光路中强激光热效应的作用, 使得远场光束的中心光强显著降低, 光斑明显扩散, 严重影响了光束质量。当减小内光路中气体的吸收系数时, 由图 2 以及表 1 的结果比较可知, 随着  $\alpha$  的减小, 远场光束  $\beta$  参数减小, Strehl 比

Table 1 Numerical calculation results of a Gaussian beam for different values of  $\alpha = 0, \nu = 0$

parameter	$\alpha / \text{m}^{-1}$					
	$6.5 \times 10^{-5}$	$3.5 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-5}$	$6.5 \times 10^{-6}$	$6.5 \times 10^{-7}$	0
$S_r$	0.111	0.223	0.766	0.951	0.999	1
$\beta$	4.35	2.50	1.28	1.05	1.01	1
$w_y, w_x / \text{mm}$	462.06	268.64	145.50	107.26	96.03	95.91

增大,束宽减小,对应于峰值光强得到明显提高,光束聚焦能力增强,光束质量显著改善。图4为不同吸收系数下光束在远场的PB曲线,随着 $\alpha$ 的减小,PB明显的增大,且当 $\alpha = 6.5 \times 10^{-7}$ 时,其PB已经非常接近于自由空间传输( $\alpha = 0$ )的理想情况了。由此可知,减小内光路中气体吸收系数是可以显著改善远场的光束质量,且不引起像散。

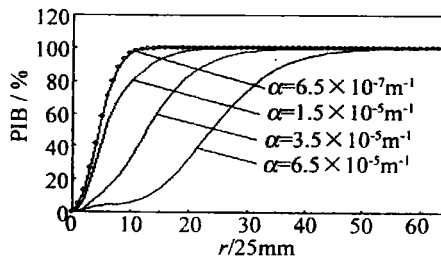


Fig 4 PB curves of a Gaussian beam for different values of the absorption coefficient,  $\nu = 0, \dots$  — PB curve of a Gaussian beam in vacuum

图3为沿x轴方向、风速 $\nu = 0.5 \text{ m/s}$ 时,高斯光束在远场的光强分布和等高线图;表2是远场光束质量参数随横向风速 $\nu$ 不同的数值计算结果。与减小内光路吸收比较,增大风速也可以使峰值光强显著提高,束

Table 2 Numerical calculation results of a Gaussian beam for different values of the wind velocity  $\alpha = 6.5 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$

parameter	$\nu / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$				
	0.1	0.2	0.5	1	2
$S_r$	0.185	0.533	0.878	0.969	0.987
$\beta$	2.59	1.71	1.15	1.05	1.02
$w_x / w_y$	0.76	0.70	0.82	0.94	0.98
$\bar{x} / \text{mm}$	-67.81	-55.99	-29.57	-15.35	-7.69

宽明显变小,可聚焦性显著增强。不同的是,横向风会引起像散和光束重心位置的偏移,但是像散和光束重心位置偏移量都会随着风速的增大而减小。

减小吸收和横向风对远场光束质量的影响,可从热晕产生的物理机制来得到解释。当减小吸收系数时,大气吸收的能量减少,热晕效应减弱,光束发散度降低,光束质量得到改善。有横向风时,未被加热大气不断取代已被激光加热大气,热晕效应也随之减弱,因此,可改善光束质量。

### 3 结论

采用PB,  $\beta$ 参数、像散参数、Strehl比和光束重心位置等参数描述远场光束质量,详细研究了内光路大气吸收对远场光束质量的影响,并与有横向风存在情况作了比较。研究表明,随着吸收系数的减小或风速的增大,远场光束的峰值光强显著增强,可聚焦能力大大提高,光束质量得到显著改善。因此,在实际工作中可用内光路管道密封后抽真空,或者充以对激光波长吸收很小的气体,以及吹风等方法来减小内光路热效应,提高远场光束质量。

### 参考文献

- [1] SMITH D C. High-power laser propagation: thermal blooming [J]. Proc IEEE, 1977, 65 (12): 1679 ~ 1714.
- [2] GEBHARDT F G. Twenty-five years of thermal blooming: an overview [J]. SPIE, 1990, 1221: 2 ~ 25.
- [3] FLECK J A, MORRIS J R, FEIT M D. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere [J]. Appl Phys, 1976, 10 (2): 129 ~ 160.
- [4] CHEN D Q, LI Y K, XU X S *et al* Numerical simulation of thermal blooming in atmospheric laser propagation [J], High Power Laser and Particle Beams, 1993, 5 (2): 243 ~ 252 (in Chinese).
- [5] JIN G, LU S F, LI S M. Laser thermal effects in beam control system on the emitted laser quality [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, A29 (10): 895 ~ 899 (in Chinese).
- [6] JIX L, TAO X Y, LÜB D. The influence of thermal effects in a beam control system and spherical aberration on the laser beam quality [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53 (3): 952 ~ 960 (in Chinese).
- [7] JIX L, TAO X Y, LÜB D. Far-field characteristics of high-power laser beams [J]. Laser Technology, 2004, 28 (3): 251 ~ 254 (in Chinese).