

光束控制系统热效应与球差对激光 光束质量的影响*

季小玲^{1,2)} 陶向阳^{1,3)} 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)

(2003 年 4 月 9 日收到, 2003 年 5 月 4 日收到修改稿)

采用 Strehl 比、桶中功率、 β 参数和束宽描述远场光束质量, 研究了光束控制系统热效应和球差对远场激光光束质量的影响. 用四维仿真程序作了详细计算, 给出了数值计算结果并进行了物理分析. 研究表明, 传输通道热效应和正球差会使远场光强分布扩展, 可聚焦能力下降, 光束质量变差. 有意义的是, 当激光发射功率达到一定值时, 合适选取负球差会在几何焦面得到比无球差时更高的峰值光强和更好的可聚焦能力. 但在以前的工作中, 由于焦移, 类似的结论是在实际焦面上得出的. 非线性热晕的存在是其物理原因, 对此用数值计算例子作了说明.

关键词: 高功率激光, 热效应, 光束控制系统, 球差

PACC: 9265R

1. 引 言

当高功率激光通过大气时, 大气湍流、热晕等线性和非线性效应对激光传输和远场光束质量会产生影响, 对此已进行了许多理论和实验研究, 并采用了自适应光学技术来有效补偿波前畸变^[1-7]. 然而, 对实际的高功率激光系统, 从主激光器输出的高功率激光还要经过发射光学系统和捕获跟踪瞄准系统(统称光束控制系统)后再经大气传输. 虽然激光在光束控制系统中的传输距离比起后续长程大气传输距离是非常短的, 但是, 高功率密度细光束在光束控制系统中的热效应(包括热晕和光学元件在激光辐照下的热应力和热应变)会对激光传输和远场光束质量产生影响, 对此所做的研究工作报道甚少^[8,9]. 与激光大气传输相比, 对光束控制系统中光束传输和相关问题计算模拟的主要物理特点和难点是(1)在激光经发射光学系统扩束前, 光斑尺寸较小, 功率密度很高, 即应处理高功率密度细光束的大气传输;(2)在光束控制系统中, 特别是采用管道结构时, 横向风速为零或很小;(3)大气热晕和光束控制系统中

光学元件(反射镜、转向镜窗口等)在激光辐照下的热效应对高功率激光传输都会产生影响(4)当对从主激光器到靶面做全程光传输的计算模拟时, 还应考虑光束控制系统(内光路)和后续大气传输(外光路)间的“接口”和内、外光路不同物理因素对激光传输的影响等问题. 此外, 因抽运非均匀性或光学元件加工误差, 实际激光会出现像差. 例如球差^[10,11]. 已有的研究工作说明, 正、负球差对激光束传输变换的影响不同. 特别是, 采用合理选取的负球差可在实际焦面上实现“超衍射极限”的聚焦^[12-14], 一个十分有意义的问题是: 当有热晕存在时, 球差会对激光传输行为产生什么样的影响? 本文采用 Strehl 比、桶中功率(PIB)、 β 参数和束宽评价远场光束质量. 用自编的四维光束大气传输仿真程序, 研究光束控制系统热效应和球差对远场激光光束质量的影响. 用详细的数值计算例子和物理分析说明当有非线性热晕效应存在时, 正负球差对几何焦面上光束质量影响也不同. 光束控制系统热效应和正球差会使远场光束扩展, 峰值光强减小, 可聚焦能力下降. 但由于非线性热晕的影响, 与无球差情况相比较, 当激光发射功率达到一定值时, 合适选取的负球差会在几何

* 国家高技术研究发展计划(批准号 2003A823070)资助的课题.

焦面上得到较高峰值光强和更好的可聚焦能力,为此与已有工作做了比较,对所得新结果作了合理的物理诠释.本文所用方法和所得结论对高功率激光远程能量输运问题研究有实际意义.

2. 理论模型

在所编制的四维(x, y, z, t)仿真程序中使用的方程如下:

近轴近似下激光束的传输方程为

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

式中 k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 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

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

α 为衰减系数.

对理想气体,等压近似下的流体力学方程为

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

式中 $\gamma = C_p/C_v$, C_p 和 C_v 分别为定压比热和定容比热, ρ 为流体密度, \mathbf{v} 为流体速度, c_s 为声速.

球差造成的相位畸变可表示为^[15]

$$\varphi(x, y) = \exp\left[-iC\left(\frac{x^2 + y^2}{2w_0^2}\right)^2\right], \quad (4)$$

式中 C 为像差系数, w_0 为光束孔径.

具有球差的高斯光束初始场分布为

$$E = \exp\left(i\frac{k(x^2 + y^2)}{2z_f} - \frac{x^2 + y^2}{2w_0^2}\right) \times \exp\left[-iC\left(\frac{x^2 + y^2}{2w_0^2}\right)^2\right], \quad (5)$$

式中 z_f 为聚焦光学系统的焦距.

本文采用以下参数评价远场激光光束质量:

(1) Strehl 比 (S_R)

$$S_R = \frac{\text{实际光束峰值光强}}{\text{理想光束衍射极限峰值光强}}. \quad (6)$$

(2) PIB^[16, 17]

$$\text{PIB} = \frac{\int_0^a K(r, z_f) r dr}{\int_0^{\infty} K(r, z_f) r dr}, \quad (7)$$

式中 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, a 为桶的半径. PIB 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 PIB 表征了光束的可聚焦能力.

(3) β 参数^[16]

$$\beta = \sqrt{\frac{A_m}{A_0}}, \quad (8)$$

式中 A_m 和 A_0 分别为实际光束和理想光束在远场当 PIB = 63% 时所对应的光斑面积.

(4) 束宽 w_x 和 w_y

按二阶矩定义的束宽 w_x 和 w_y 为^[18]

$$w_x^2 = \frac{4 \iint (x - \bar{x})^2 |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y)|^2 dx dy}, \quad (9)$$

$$w_y^2 = \frac{4 \iint (y - \bar{y})^2 |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y)|^2 dx dy}, \quad (10)$$

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

$$\bar{x} = \frac{\iint x |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y)|^2 dx dy}, \quad (11)$$

$$\bar{y} = \frac{\iint y |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y)|^2 dx dy}. \quad (12)$$

本文编制的程序主要特点是对激光大气传输用相屏法处理,其中衍射问题采用快速傅里叶变换法.对流体力学方程用差分法,为提高计算精度,还对位移量用加权平均.采用了 Mathematica 相应的函数,能兼容多种光束模型和用于内、外光路中高功率激光传输的计算模拟.为检验这一程序的正确性,还用该程序与他人激光大气传输的相关计算结果作了校核,得到了一致的结果.

3. 数值计算结果与分析

本文限于研究光束控制系统热效应(热晕)和球差对远场光束质量的影响,激光在光束控制系统以外设为经真空传输至远场.计算参数为: $\gamma = 1.4$, $n_0 = 1.00035$, 大气密度(标准大气下) $\rho_0 = 1.302461 \text{ kg/m}^3$, $c_s = 340 \text{ m/s}$, $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, $\alpha = 6.5 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$, $w_0 = 5 \text{ cm}$, $z_f = 2 \times 10^3 \text{ m}$, 光束在光束控制系统中传输的距离 $d = 10 \text{ m}$, 图 1 至图 5 中发射功率 $P = 200 \text{ kW}$. 在计算中,令 $\mathbf{v} = 0$ 即无横向风,这较为合乎实际情况,但会使计算时间增加,可用优化程序方法解决.

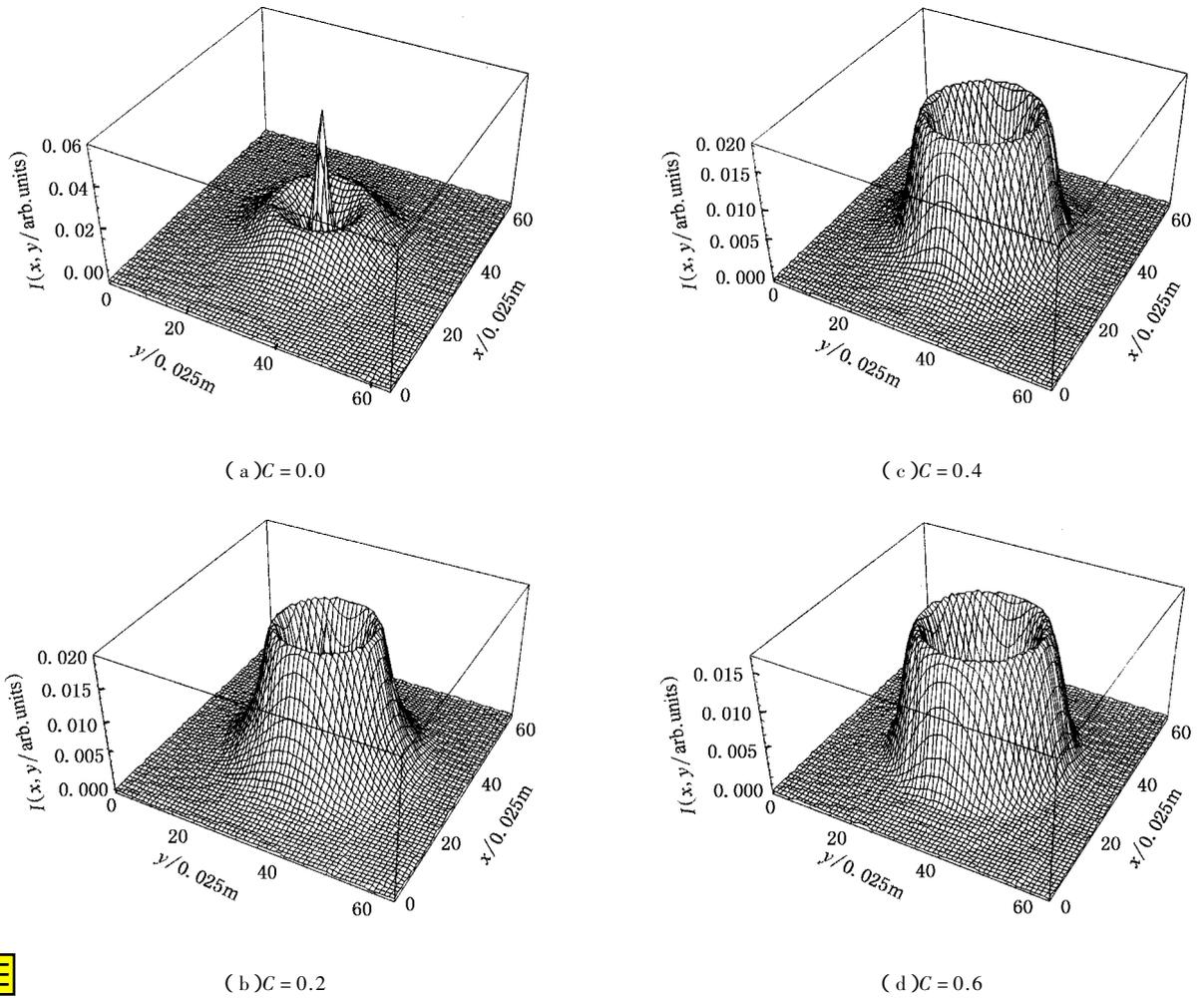


图 1 不同正球差系数高斯光束在几何焦面上的光强分布



图 1 为不同球差系数下正球差高斯光束在远场 (几何焦面) $z = 2 \times 10^3 \text{m}$ 处的光强分布. 图 2 为与图 1 对应的光束控制系统出口处 ($z = 0$) 和几何焦面上的等光强线. 由图 1 和图 2 知, 尽管在光束控制系统出口处光强分布无明显变化, 仍呈现良好的高斯分布, 但光束控制系统的热效应和球差对几何焦面上光强分布有很大影响. 与无球差高斯光束的传输相比较 (图 1(a) 和图 2(a)), 随正球差系数的增加, 中心光强迅速降低, 峰值光强不再位于中心, 且随正球差系数的增大而减小, 光斑显著扩散. 图 3 和图 4 分别为不同球差系数下负球差高斯光束在几何焦面上的光强分布以及在光束控制系统出口处和几何焦面上的等光强线. 负球差也不会使光束控制系统出口处光强分布发生变化, 但几何焦面上峰值光强仍然在中心. 与无球差高斯光束情况相比较, 负球差使光强分布出现了多层状. 此外, 由图 1 至图 4 可以看

出, 当 $v = 0$ 时, 球差和光束控制系统中的热效应不会导致光束像散, 其光束重心仍然在中心位置. 图 5 为几何焦面上不同球差系数高斯光束的 PIB 曲线. 显然, 对于正球差, 随球差系数的增大, 光束的 PIB 减小 (图 5(a)). 对于负球差, 不同的球差系数其对应 PIB 比较接近 (图 5(b)), 且 PIB 曲线出现交叉. 从图 5(c) 可看出, 在几何焦面上, 负球差高斯光束对应的 PIB 最大, 无球差高斯光束的 PIB 次之, 正球差高斯光束的 PIB 最小. 热晕和球差对远场光束质量影响的数值计算结果列于表 1. 由表 1 知 (1) $C = 0.0$ 时 (仅有热效应), $S_R = 0.111$, 实际光束光强峰值为理想高斯光束的 0.111 倍, 即热效应的作用使得远场光强峰值下降很多; $\beta = 4.35$, 可聚焦能力大为降低; $w_x = w_y = 462 \text{mm}$, 远场光斑扩展, 但不会出现像散. (2) $C > 0.0$ 时, 与 $C = 0.0$ 相比较, S_R 减小, β 和 w_x, w_y 增大, 且 C 越大, 峰值光强越小, 光

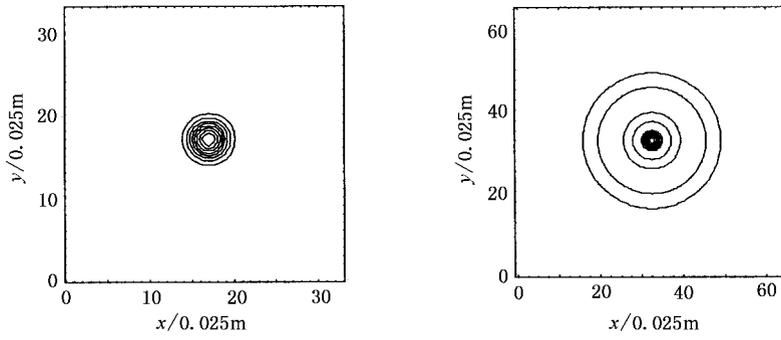
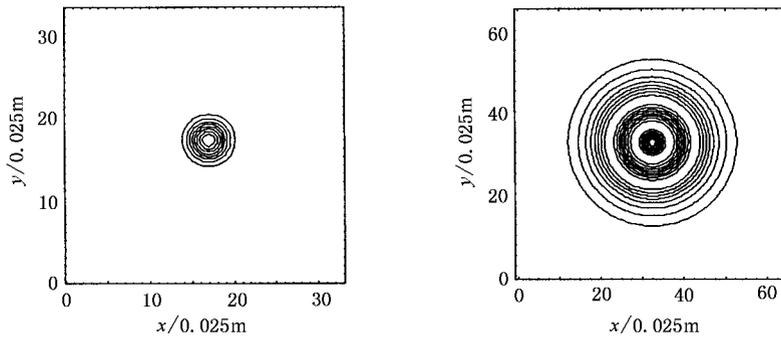
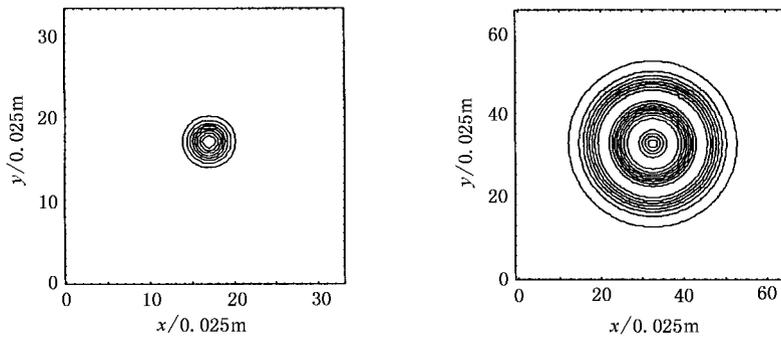
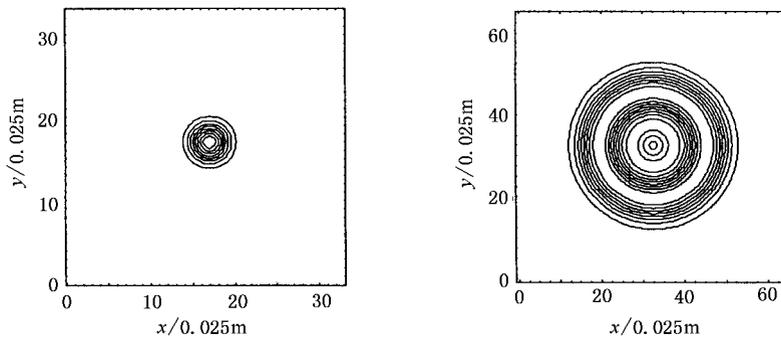
(a) $C = 0.0$ (b) $C = 0.2$ (c) $C = 0.4$ (d) $C = 0.6$

图 2 不同正球差系数高斯光束在光束控制系统出口处和几何焦面上的等光强线

束聚焦能力越低,光束质量变差.(3) $C < 0.0$ 时,相对于 $C = 0.0$ 而言, w_x, w_y 减小;当 $C = -0.2$ 时, S_R 最大,即峰值光强最大;当 $C = -0.4$ 时, β 最小,即光束可聚焦能力最强.因此,与无球差高斯光束相比,正球差降低了光束的可聚焦能力,但合理选取负球差系数,则可在几何焦面上获得更大的峰值光强和更好的光束可聚焦能力.值得注意的是,文献 [12—14] 中得出负球差可提高光束可聚焦度的结论是在实际焦面上(由于焦移的影响^[19]),而不是在几何焦面上;在几何焦面上,正、负球差对 PIB 的影响相同,都会降低光束的可聚焦度(例如见文献 [14] 中图 $\chi(b)(c)$).本文得出这一新结论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.因此,当同时有热晕和球差与仅有球差对光束传输影响是不同的.为了说明这一问题,图 6 给出在相同

光束孔径下不同发射功率时有、无球差高斯光束的 PIB 曲线.由图 $\alpha(a)$ 知,当发射功率 $P = 50\text{kW}$ 时,无球差和负球差高斯光束对应的 PIB 大于正球差的 PIB,但无球差和负球差高斯光束的 PIB 相接近,并且两者的 PIB 曲线出现交叉.由图 $\alpha(b)$ 知,当发射功率 $P = 5\text{kW}$ 时,无球差高斯光束对应的 PIB 最大,负球差高斯光束的次之,正球差高斯光束的最小.由图 $\alpha(c)$ 可知,当发射功率 $P = 1\text{kW}$ 时,无球差高斯光束对应的 PIB 最大,而这时正、负球差高斯光束在几何焦面上的 PIB 曲线已重合.这是因为随发射功率的减小,非线性热晕效应减弱.当 $P = 1\text{kW}$ 时,热晕已可忽略,球差系数绝对值相同的正、负球差高斯光束在几何焦面上的 PIB 曲线重合,回到文献 [14] 中的结果.

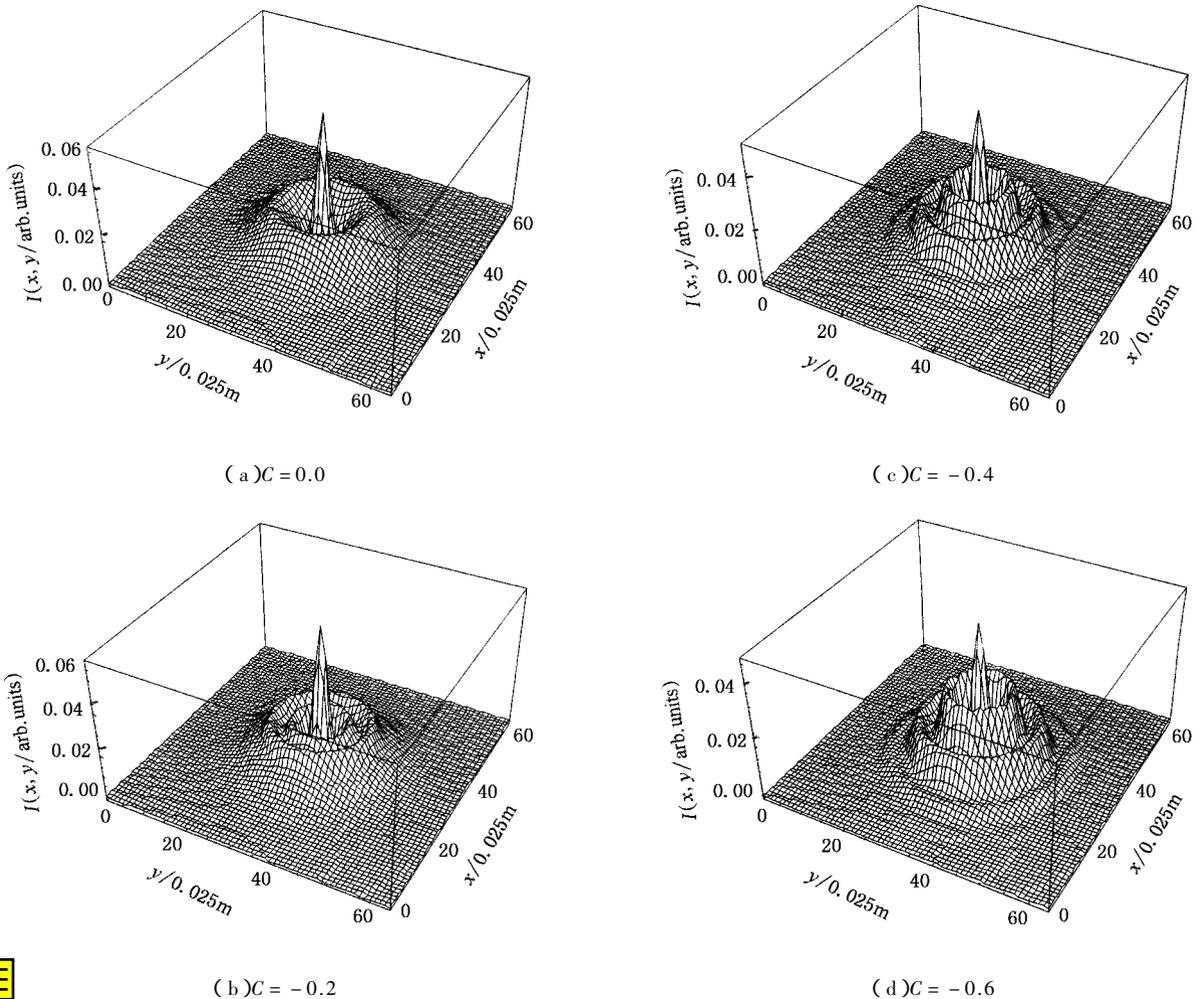


图 3 不同负球差系数高斯光束在几何焦面上的光强分布

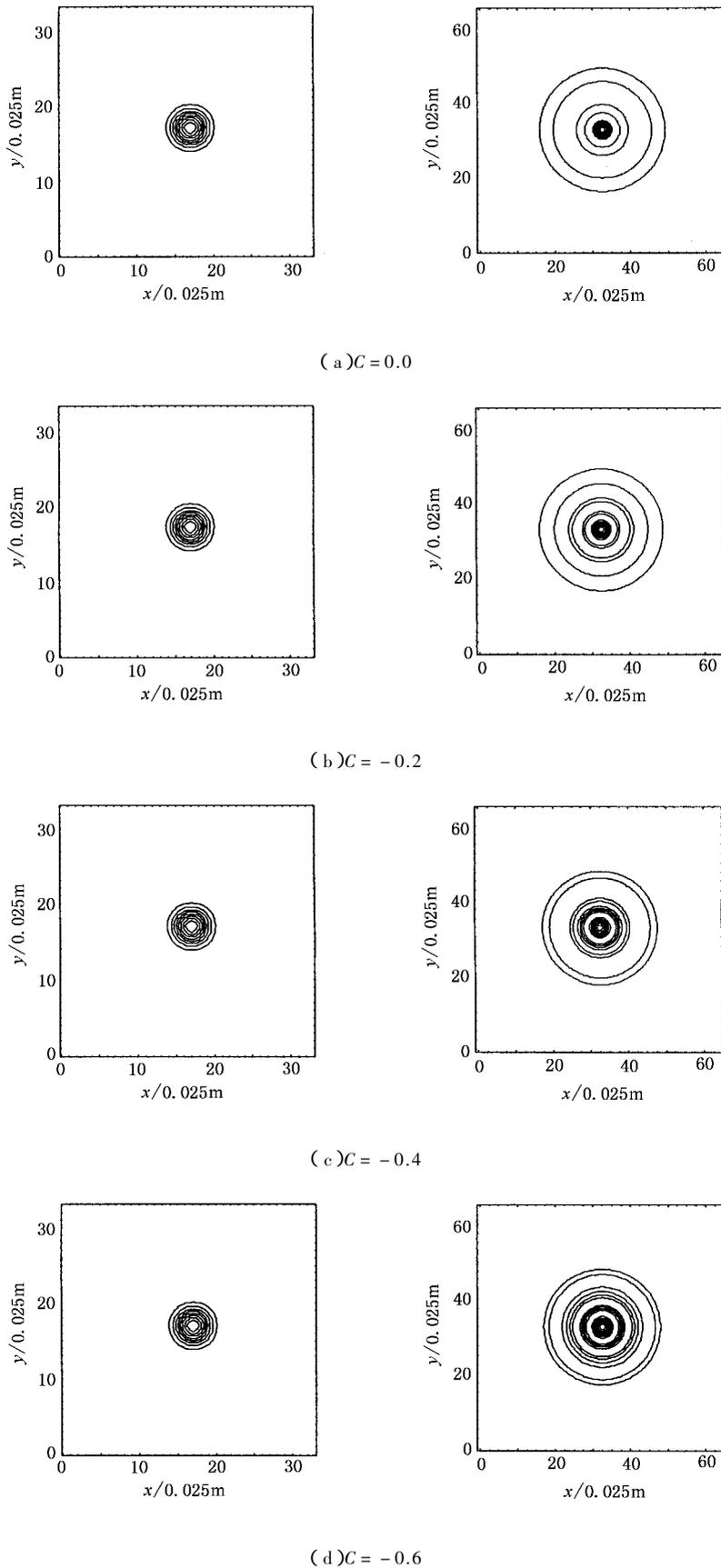


图4 不同负球差系数球差高斯光束在光束控制系统出口处和几何焦面上的等光强线

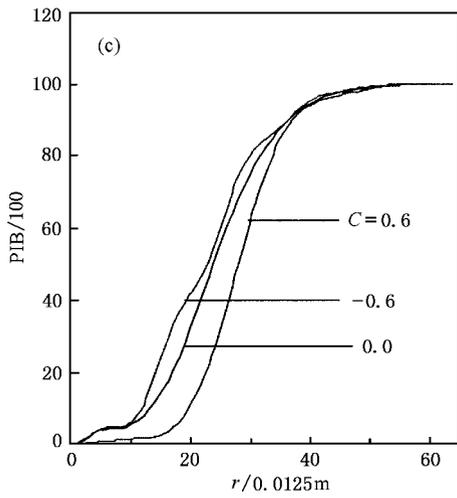
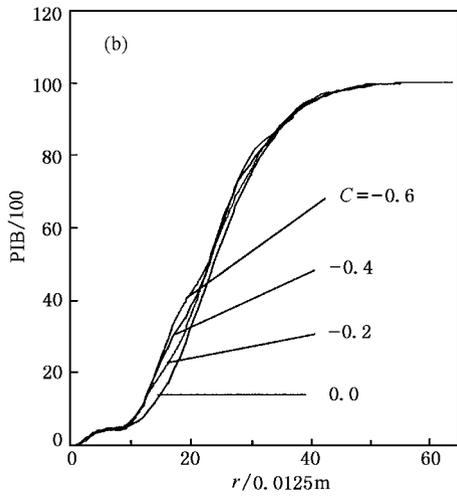
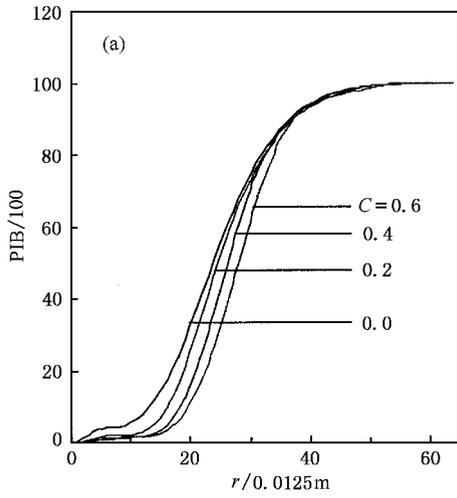


图 5 不同球差系数高斯光束的 PIB 曲线

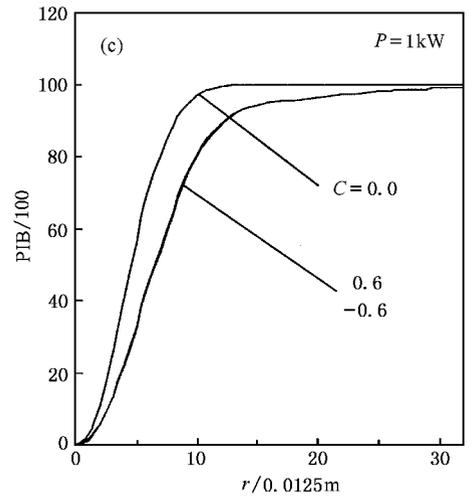
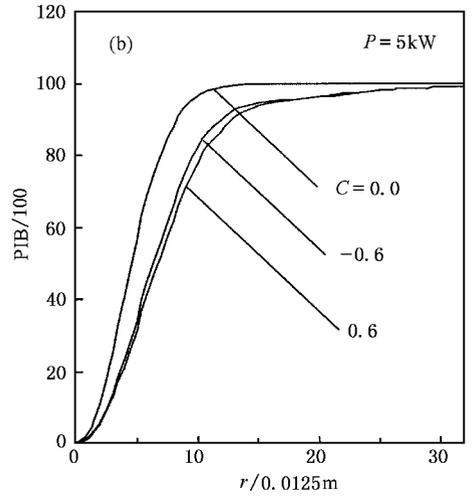
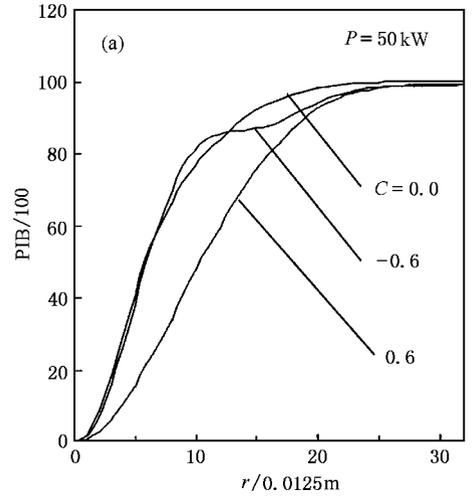


图 6 不同发射功率的球差高斯光束的 PIB 曲线

表 1 远场光束质量参数的数值计算结果

C	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.2	0.4	0.6
参数							
S_R	0.094	0.101	0.115	0.111	0.038	0.036	0.033
β	4.18	4.16	4.23	4.35	4.44	4.64	4.91
$w_x, w_y/\text{mm}$	439	443	450	462	478	498	521

4. 小 结

本文采用有球差的高斯光束模型,用 Strehl 比、PIB、 β 参数和束宽 w_x, w_y 描述远场光束质量,分析了光束控制系统热效应和球差对远场激光光束质量影响.研究表明,尽管激光在光束控制系统中传输的距离很短,光束在传输通道出口处仍呈现良好的高斯分布,但由于激光的功率密度很高,因此传输通道中的热效应对远场光强分布会产生很大影响,它使得光束的远场光强峰值减小,光斑扩散,光束质量降低. $v = 0$ 时光束控制系统热效应和球差都不会引起光束像散.与无球差高斯光束相比较,正球差使光束在几何焦面上的中心光强减小,峰值光强不再出

现在中心,且随正球差系数的增大,峰值光强越小,可聚焦能力越低.选取合适的负球差,可得到比理想高斯光束更高的中心峰值光强和可聚焦度,得到更好的远场光束质量.与文献[12—14]不同的是,对 PIB 和 β 参数的计算结果说明,当激光发射功率达到一定值时,在几何焦面上合适选取的负球差也能提高光束可聚焦能力,这是由非线性热晕与球差相互作用造成的.最后,应当指出,在本文的工作中,未计光束控制系统中光学元件的热效应对光传输的影响,当发射功率不是特别高时这是合理的近似^[20].进一步的研究应考虑发射功率继续增大时光学元件的热效应和全程光传输问题,相关工作正在进行之中.

- [1] Smith D C 1977 *Proc. IEEE* **65** 1679
- [2] Gebhardt F G 1990 *Proc. SPIE* **1221** 2
- [3] Karr T J 1990 *Proc. SPIE* **1221** 26
- [4] Fleck J A, Morris J R and Feit M D 1976 *Appl. Phys.* **10** 129
- [5] Chen D Q *et al* 1993 *High Power Laser Particle Beams* **5** 243 (in Chinese)[陈栋泉等 1993 强激光与粒子束 **5** 243]
- [6] Wan M *et al* 1996 *Infrared Laser Eng.* **25** 51 (in Chinese)[万敏等 1996 红外与激光工程 **25** 51]
- [7] Jiang W H 1997 *Physics* **26** 73 (in Chinese)[姜文汉 1997 物理 **26** 73]
- [8] Jin G *et al* 2002 *Chin. J. Lasers A* **29** 895 (in Chinese)[金钢等 2002 中国激光 **A 29** 895]
- [9] Liu S F *et al* 2001 *Opto-Electron. Eng.* **28** 14 (in Chinese)[刘顺发等 2001 光电工程 **28** 14]
- [10] Siegman A E 1993 *Appl. Opt.* **32** 5893
- [11] Whinnery J R, Miller D T and Dabby F 1968 *Appl. Phys. Lett.* **13** 284
- [12] Yoshida A and Asakura T 1996 *Opt. Commun.* **123** 694
- [13] Pu J 1998 *J. Mod. Opt.* **45** 239
- [14] Lü B, Ji X and Luo S 2001 *J. Mod. Opt.* **48** 1171
- [15] Born M and Wolf E 1999 *Principles of Optics* 7th ed(England: Cambridge University Press)pp527—532
- [16] Siegman A E 1998 *OSA TOPS* **17** 184
- [17] Garay A 1988 *Proc. SPIE* **888** 17
- [18] Siegman A E 1990 *Proc. SPIE* **1224** 2
- [19] Li Y and Wolf E 1981 *Opt. Commun.* **39** 211
- [20] Wang W P 2003 *PhD Thesis* Sichuan University (in Chinese)[王伟平 2003 博士学位论文(四川大学)]

The influence of thermal effects in a beam control system and spherical aberration on the laser beam quality^{*}

Ji Xiao-Ling^{1 2)} Tao Xiang-Yang^{1 3)} Lü Bai-Da¹⁾

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 and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027, China*

(Received 9 April 2003 ; revised manuscript received 4 May 2003)

Abstract

With the strehl ratio, power in the bucket, β parameter and beam widths taken as the characteristic parameters of laser beam quality in the far field, the influence of thermal effects in a beam control system and spherical aberration on the laser beam quality in the far field is studied. Detailed calculations are performed using a four-dimensional simulation code, and numerical results are given and analyzed physically. It is shown that the thermal effects in the propagation channel and positive spherical aberration give rise to an expansion of intensity distributions and reduce the focus ability in the far field, and degrade the beam quality. It is interesting that a suitable choice of the negative spherical aberration would result in a higher peak intensity and a better focus ability at the geometrical focal plane than that of the spherical-aberration-free case, as the emissive power reaches a certain value; whereas a similar result is achieved at the real focal plane due to the focal shift as in the previous work. The physical interpretation is that there exists the nonlinear thermal blooming, which is illustrated with numerical examples.

Keywords : high-power laser, thermal effect, beam control system, spherical aberration

PACC : 9265R

^{*} Project supported by the National High Technology Development Program of China(Grant No.2003A823070).