

文章编号: 0253-2239(2006)11-1698-7

# 利用双折射透镜组实现激光束空间整形

杨向通 范 薇

(中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

**摘要:** 为了提高惯性约束聚变高功率激光系统的整体效率和充分利用光能, 需要将高斯分布的光束整形为空间均匀分布的平顶光束。本文从球面透镜的琼斯矩阵出发, 利用光学传输矩阵对双折射透镜组空间光束整形系统进行了理论分析, 数值模拟了整形效果, 讨论了透镜组参量的选择以及中心加工厚度误差等因素带来的影响, 并对该系统进行了实验研究。在实验中, 利用该双折射透镜组整形系统实现了光束的均匀化输出。在神光 II 第九路中, 在近场静态工作条件下, 可将光束填充因子从原来的 66% 提高到 80%。

**关键词:** 激光光学; 光束整形; 均匀化输出; 双折射透镜; 填充因子

中图分类号: TN249 文献标识码: A

## Spatial Laser Beam Shaping Using Birefringent Lenses

Yang Xiangtong Fan Wei

(National Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** To improve the energy efficiency of the inertial confined fusion (ICF) high-power laser system and sufficiently use the optical energy, it is important to convert Gaussian laser beam into uniform beam. From the Jones matrix of spheric lenses, the intensity transmittance distribution of birefringent lenses spatial beam shaping system has been analyzed in detail by optical transmission matrix. The shaping effect has been numerically simulated. The choice of the parameters of birefringent lenses is discussed. The factors, which will influence the shaping effect, such as the fabrication error of center thickness, have also been analyzed. In the experiment, the uniform laser beam is obtained. In the ninth beamline of "Shenguang-II" device, the static beam filling factor of near field is improved from 66% to 80%.

**Key words:** laser optics; beam shaping; uniform beam output; birefringent lens; filling factor

## 1 引 言

惯性约束聚变(ICF)的高功率激光装置中,要求激光束强度分布均匀,输入光束的不均匀会导致B积分等非线性效应而容易造成激光介质的损伤,同时会因为填充因子较低而不能保证高的能量提取效率。为了提高高功率激光系统的整体效率和充分利用光能,把高斯光束整形为平顶(均匀)光束有重要意义。

激光光束的空间整形就是在空间上有效控制改

变光场的分布,从而改进光束的质量。到目前为止,已经发展了多种激光束空间整形技术<sup>[1~9]</sup>,如全息滤波器光束空间整形<sup>[1]</sup>,二元矩形相位光栅用于高斯光束空间整形<sup>[2]</sup>、衍射相位元件光学系统空间光束整形<sup>[3]</sup>,选偏衍射相位元件光束空间整形<sup>[4]</sup>,这些光束整形技术在一定程度上实现了光束整形,但同时也存在各种问题,限制它们的应用。我们采用美国劳伦兹·利弗莫尔国家实验室在其前端使用的一种新型空间光束整形系统<sup>[10]</sup>。该系统利用两对石

作者简介: 杨向通(1981~),男,河南汝州人,中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生,主要从事激光束空间整形的研究。E-mail: yangxt81@eyou.com

导师简介: 范 薇(1975~),女,博士,中国科学院上海光学精密机械研究所副研究员,目前主要从事光纤激光器与放大器,光开关及光束空间整形方面的研究工作。E-mail: fanweil@siom.ac.cn

收稿日期: 2006-01-12; 收到修改稿日期: 2006-05-31

英双折射透镜巧妙而方便地实现了激光束的空间整形。本文对该系统的工作特性进行了理论研究和数值模拟,并进行了实验,实现了高斯光束的均匀化输出,光束填充因子达到 86%,能量利用率达到 30%,并对实验中发现的问题作了分析。将该系统运用到神光 II 第九路中,在静态情况下,可将光束填充因子从原来的 66%提高到 80%。

## 2 系统结构及理论分析

如图 1 所示<sup>[10,11]</sup>,空间整形系统由两对双折射透镜和起偏器、检偏器组成。其中, $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  分别构成两组平凸-平凹透镜对,晶体的主轴方向(竖直向)以及起偏、检偏器的透振方向均垂直于系统的光轴方向。 $L_1$ 、 $L_4$  是两个完全相同的平凸透镜,对偏振光而言,中心相当于  $\lambda/2$  波片,有效通光孔径边缘处相当于  $\lambda/4$  波片,两镜对称排列; $L_2$ 、 $L_3$  是两个完全相同的平凹透镜,中心相当于  $\lambda/4$  波片,有效通光孔径边缘处相当于  $\lambda/2$  波片,两镜对称放置;固定透镜  $L_1$ 、 $L_4$  的主轴与  $x$  轴同向,透镜  $L_2$ 、 $L_3$  的主轴平行并可作为一个整体绕系统光轴旋转至任意

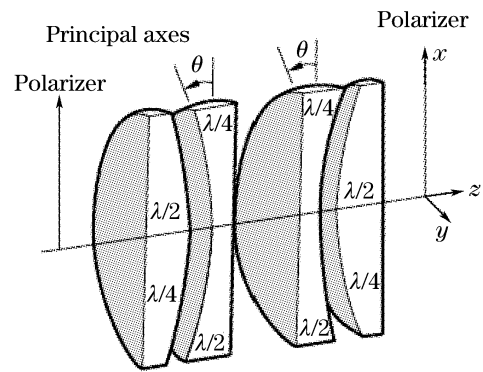


图 1 空间整形系统结构

Fig. 1 Configuration of spatial beam shaping system 角度。

从激光器输出的光束经扩束、准直和起偏后,通过该系统时,调节透镜  $L_2$ 、 $L_3$  的主轴与竖直方向的夹角,入射到检偏器上的光束在不同的位置有不同偏振态,经检偏后的出射光则被整形为中心部分平顶(均匀)的线偏振光。

假设透镜  $L_2$ 、 $L_3$  的主轴与  $x$  轴夹角为  $\theta$ ,由琼斯矩阵方法对系统透过率进行分析和计算,对于单个平凸或平凹透镜,其琼斯矩阵  $M_i (i=1,2,3,4)$ <sup>[11]</sup> 为

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos \delta_i(r) + i \sin \delta_i(r) \cos 2\theta_i & i \sin \delta_i(r) \sin 2\theta_i \\ i \sin \delta_i(r) \sin 2\theta_i & \cos \delta_i(r) - i \sin \delta_i(r) \cos 2\theta_i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, $r$  是考察点到系统光轴的径向距离, $2\delta_i(r)$  是透镜对  $o$  光和  $e$  光的相位延迟,对于平凸或平凹透镜有

$$2\delta_i(r) = \frac{2\pi\Delta n}{\lambda} d_i(r), \quad (2)$$

式中  $\Delta n = n_o - n_e$  即双折射晶体对  $o$  光和  $e$  光的折射率(分别表示为  $n_o, n_e$ ) 差, $\lambda$  是入射光波长, $d_i(r)$  是透镜上距离透镜中心  $r$  处的晶体厚度,由几何关系推导得出

$$d_i(r) = d_{i0} - \rho_i \left| 1 - \sqrt{1 - (r/\rho_i)^2} \right|, \quad (3)$$

式中  $\rho_i$  是透镜的曲率半径,对凸透镜  $\rho > 0$ ,对凹透镜  $\rho < 0$ ;  $d_{i0}$  是透镜中心厚度。所以,整个整形系统的琼斯矩阵为

$$M = M_5 \cdot M_4 \cdot M_3 \cdot M_2 \cdot M_1, \quad (4)$$

其中,检偏器的琼斯矩阵  $M_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。起偏后的光束琼斯矢量为

$$E_{in} = \begin{bmatrix} E_x(r) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

输出光束的琼斯矢量为

$$E = M \cdot E_{in}, \quad (6)$$

系统的光强透射率分布:

$$T(r) = I_{out}/I_{in}, \quad (7)$$

透镜  $L_1$ 、 $L_4$  中心相当于  $\lambda/2$  波片,有效通光孔径边缘相当于  $\lambda/4$  波片,故  $d_0$  和  $d_{r0}$  满足:

$$\begin{cases} d_0 = (2m-1)\lambda/(2\Delta n), \\ d_{r0} = d_0 - \lambda/(4\Delta n), \end{cases} \quad (8)$$

由几何关系推导得

$$\Delta n \cdot (d_0 - d_{r0}) = \Delta n \cdot (\rho - \sqrt{\rho^2 - r_0^2}) = \lambda/4,$$

因此

$$\rho = 2\Delta n r_0^2/\lambda + \lambda/(8\Delta n), \quad (9)$$

同理,求得平-凹透镜  $L_2$ 、 $L_3$  的曲率半径:

$$\rho' = -\rho = -2\Delta n r_0^2/\lambda - \lambda/(8\Delta n). \quad (10)$$

## 3 数值模拟及工程设计参量

入射基模高斯光束的归一化光强分布为

$$I(r) = \exp(-2r^2/\omega^2),$$

其中  $\omega$  是光束光斑半径,为了使输出的整形光束有

最高效率和最大功率,若整形所需要的平顶光斑半径为  $r_0$ ,则满足

$$\omega = \sqrt{2} \cdot r_0. \tag{11}$$

在工程中,工作波长为  $\lambda = 1053 \text{ nm}$ ,入射光束的口径为  $16 \text{ mm}$ ,要求整形后的光束平顶宽度大于  $10 \text{ mm}$ 。根据(11)式,该入射口径光束经整形后可得到直径约  $11.3 \text{ mm}$  的平顶光束。石英晶体  $\Delta n = 0.008747$ ,经计算需要透镜  $L_1$ 、 $L_4$  的曲率半径为  $\rho = 530.36 \text{ mm}$ ,中心厚度为  $3.07 \text{ mm}$ [考虑到透镜加工要求,(8)式中  $m$  取  $26$ ],平凹透镜的中心厚度为  $3.04 \text{ mm}$ ( $m$  取  $51$ )。

旋转透镜  $L_2$ 、 $L_3$  的光轴相对  $x$  轴的角度,对由(4)式~(7)式得到的系统透射率  $T(r)$ ,及高斯光束经系统后的输出光强分布进行数值模拟。

图 2 为整形系统的光强透射率分布,图 3 是对高斯光束整形后的输出光强分布,可以看出,当旋转角度为  $23^\circ$  时,得到的理想平顶光束(图中虚线所示  $\theta = \pi/7.7$ ) 填充因子可达  $94.5\%$ ( $\theta$  为整形透镜对  $L_2 - L_3$  光轴相对  $x$  轴的旋转角度)。

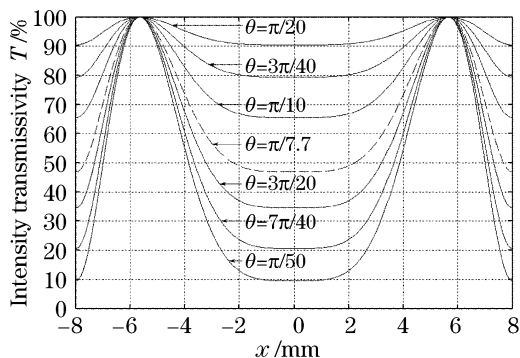


图 2 双折射透镜组整形系统透射率分布  
Fig. 2 Intensity transmissivity distribution of birefringent lenses shaping system

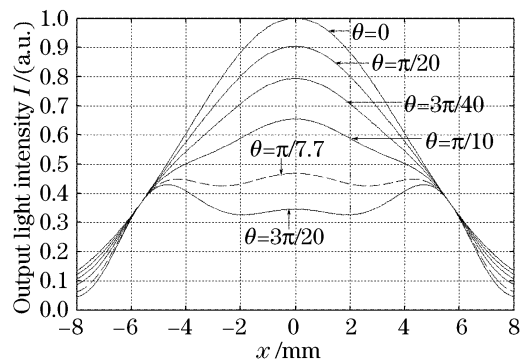


图 3 高斯光束通过整形系统后的空间光强分布  
Fig. 3 Spatial distribution of output light intensity of the shaped Gaussian beam

但是,在工程设计中透镜加工难免存在误差。对该系统而言,平凹透镜对的中心厚度误差对输出

光强有直接影响,若其误差量为  $\sigma$ ,则<sup>[11]</sup>

$$d'_0 = (2m - 1 + \xi) \frac{\lambda}{4\Delta n} = (2m - 1) \frac{\lambda}{4\Delta n} + \sigma, \tag{12}$$

其中

$$\sigma = \xi \frac{\lambda}{4\Delta n}, \tag{13}$$

图 4 的模拟是  $\sigma$  在  $0 \sim 20 \mu\text{m}$  范围内,整形透镜对光轴旋转角度  $\theta$  大约为  $23^\circ$  时的结果。

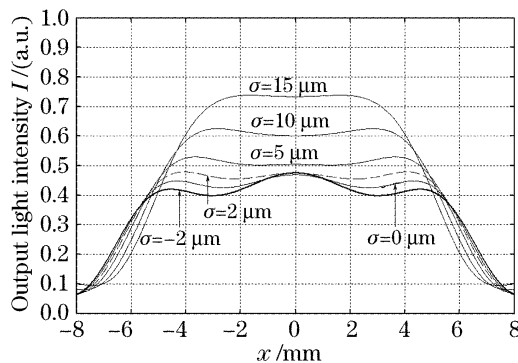


图 4 厚度误差对整形效果的影响  
Fig. 4 Influence of thickness error of lenses on shaping effect

可以看到,输出光束口径为  $10 \text{ mm}$  左右时,大约  $2 \mu\text{m}$  的中心厚度误差可以得到较好的整形效果,光束填充因子达到  $97.4\%$ ;随着厚度误差的增大,尽管仍可以将高斯光束整形为平顶光束,但平顶口径逐渐减小,能量提取效率降低。厚度误差为负值时,则不能得到理想的均匀光束。根据理论分析,我们要求的加工精度是  $3.0418 \text{ mm} \pm 0.005 \text{ mm}$ 。除了厚度误差以外,以下因素对输出光束的质量也会产生较大影响。

### 3.1 入射光束偏离整形系统光轴

图 5 为当入射光束与整形系统光轴平行,但不在同一直线上时对整形效果的影响( $d$  为光束偏离系统光轴的横向距离)。可以看出,光束越偏离系统光轴,输出光束强度分布整体的倾斜度越大,影响了

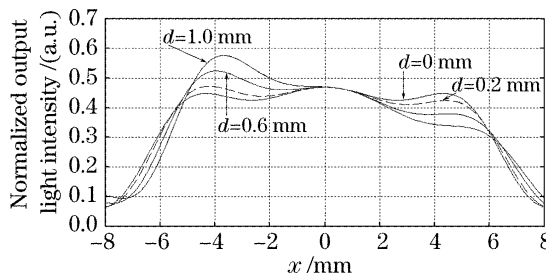


图 5 光束偏离光轴对整形效果的影响  
Fig. 5 Influence on shaping effect by the deviation of the incident beam from the shaping system optical axes

光束的均匀性分布。经计算,当入射光束偏离 $\pm 0.2$  mm时,输出光强的强度起伏已达到 15%。

### 3.2 光束斜入射

当入射光束与整形系统的光轴有一小角度时,整形光束的强度分布也存在一定的倾斜,如图 6 所示。经计算,入射光束斜入射角度在  $4^\circ$  时,输出光强的强度起伏达到大约 15%;随着斜入射角度的增加,输出光强的空间不均匀性逐渐增大。

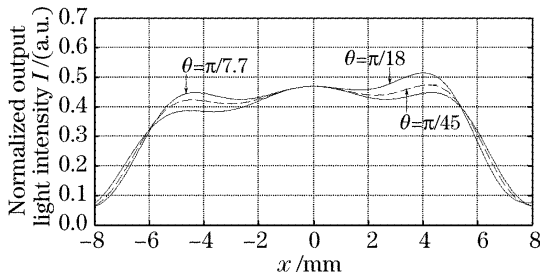


图 6 光束斜入射对整形效果的影响

Fig. 6 Influence on shaping effect by skew incidence of laser beam

### 3.3 入射光束偏振度

图 7 是对完全理想偏振光、偏振度为 90% 和

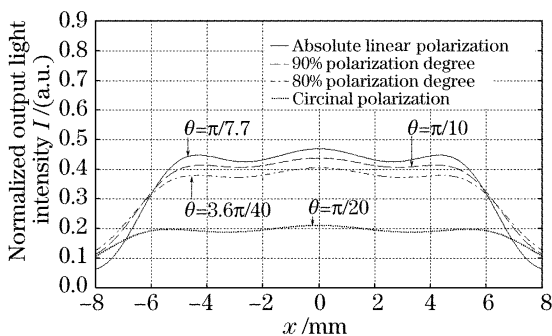


图 7 偏振度对整形效果的影响

Fig. 7 Influence of polarization degree of the incident light on shaping effect

80% 的椭圆偏振光以及圆偏振光整形后的模拟结果图。与图 3 比较,可见随着入射光束偏振度的降低,适当减小整形透镜对旋转角度,仍可得到较好的均匀光束,且其平顶宽度增加,但能量利用率降低。

### 3.4 入射光束空间分布

该光束空间整形系统不仅对高斯光束有显著整形效果,同样对 4 阶超高斯光束有整形效果,只是整形透镜对的光轴旋转角度不同。图 8 为对 4 阶超高斯光束的整形效果图。可以看出,在整形透镜对光轴旋转大约  $18^\circ$  时可以得到较好的整形效果,相比于高斯光束,只是透镜组的光轴旋转角度发生了改变,且其能量利用效率明显提高。

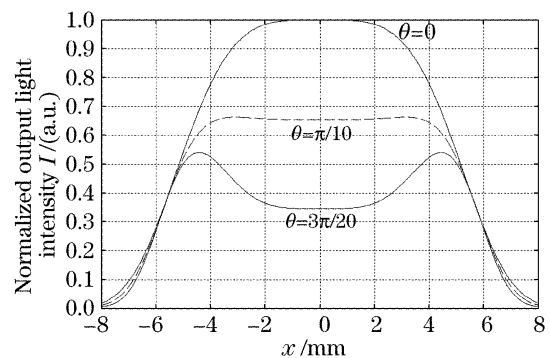


图 8 4 阶超高斯光束经过整形系统后的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of shaped 4th super-gaussian laser beam

### 3.5 入射光束口径变化

当入射光束口径发生变化时,该整形系统同样有较好的整形效果,只需要调整整形透镜对光轴的旋转角度即可。图 9 为光束口径变大、减小与原来口径不变时的整形效果对比图。可以看出,当入射光束口径增大时,减小整形透镜组光轴的旋转角度即可得到较好的整形效果;反之,则需增大旋转角度。

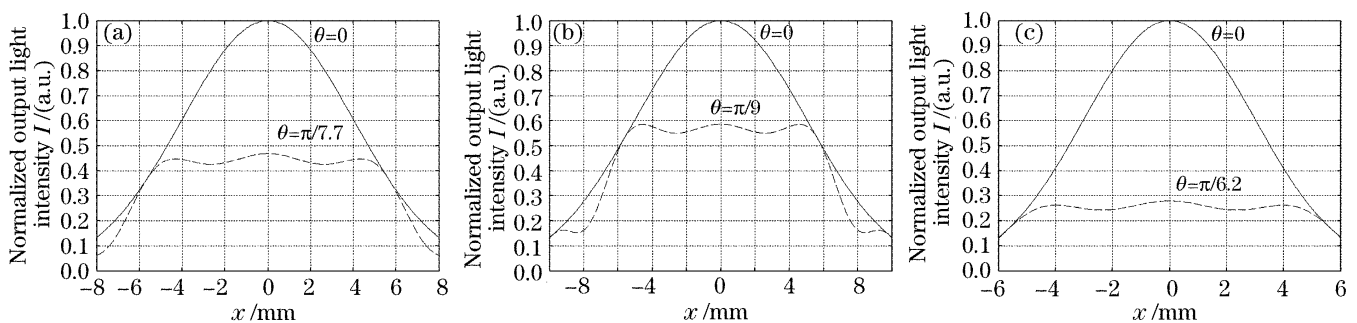


图 9 口径变化时的整形效果图。(a)最佳口径,(b)口径增大,(c)孔径减小

Fig. 9 Shaping effect of the different incident light beam dimension. (a) Optimal dimension, (b) increased dimension, (c) decreased dimension

## 4 实验结果

由以上理论分析,我们采用 1053 nm 光纤激光

器作为连续光光源,实验光路如图 10 所示。由光纤直接输出的光源光强分布如图 11 所示。经扩束准

直到光束口径为 16 mm,起偏后,进入光束空间整形系统。图 12 为光束经过整形系统和检偏后由 CCD 采集的输出光强度分布图。

图 12 中平顶部分的倾斜是由于整形透镜组在旋转过程中所产生的系统同心度偏离所造成。可以

看出,光束的空间分布上有圆孔光阑衍射造成的衍射环,因此进一步利用软边光阑结合空间滤波器,可改善光束近场分布,抑制光束总体的衍射调制。光束经过波纹软边光阑后,在光阑的像面上得到的输出光强分布如图 13 所示。之后,光束经空间滤波器,

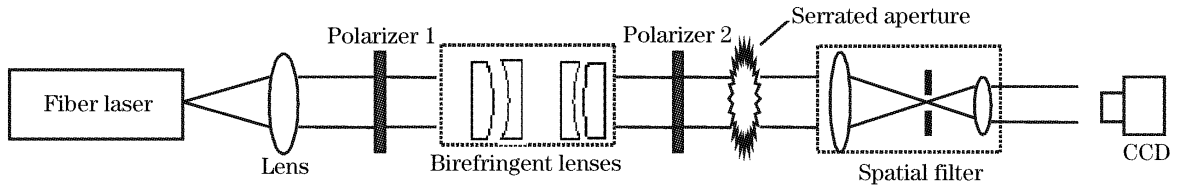


图 10 实验装置

Fig. 10 Experimental setup

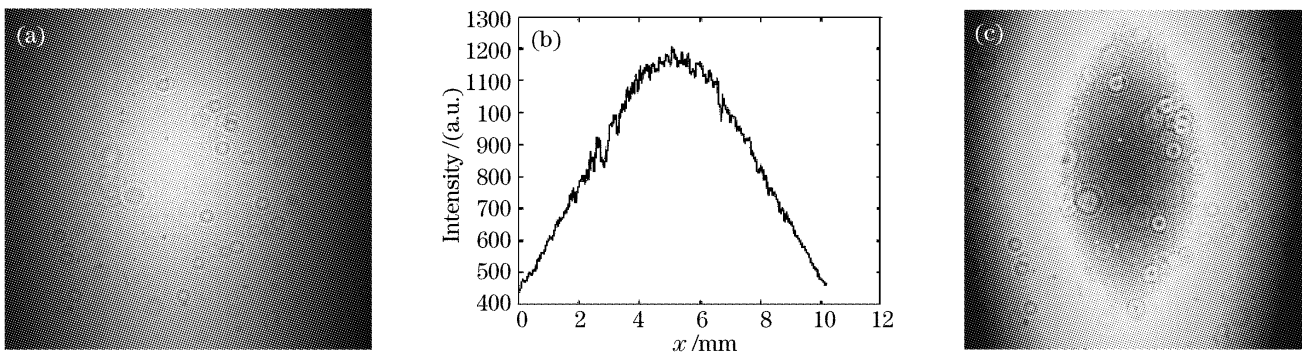


图 11 入射光束光强的一维和二维分布

Fig. 11 One- (two-) dimensional distribution of incident light beam

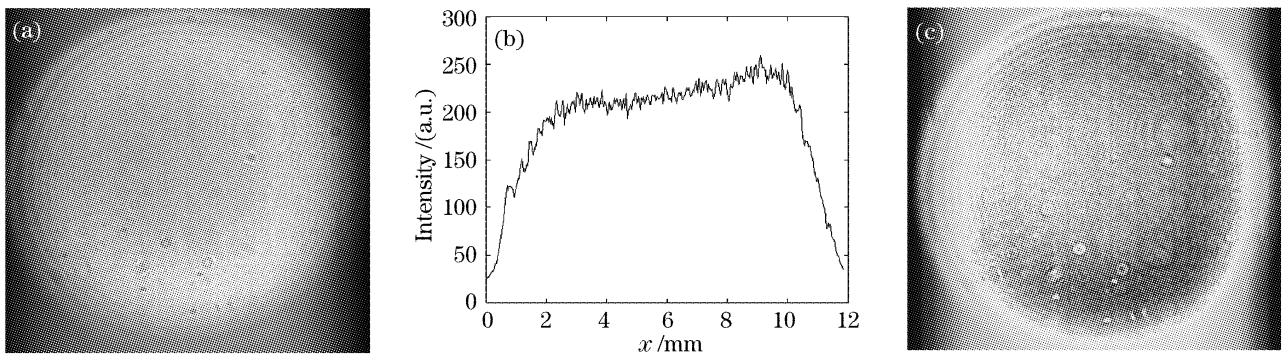


图 12 整形后的输出光强分布

Fig. 12 Distribution of shaped output light intensity

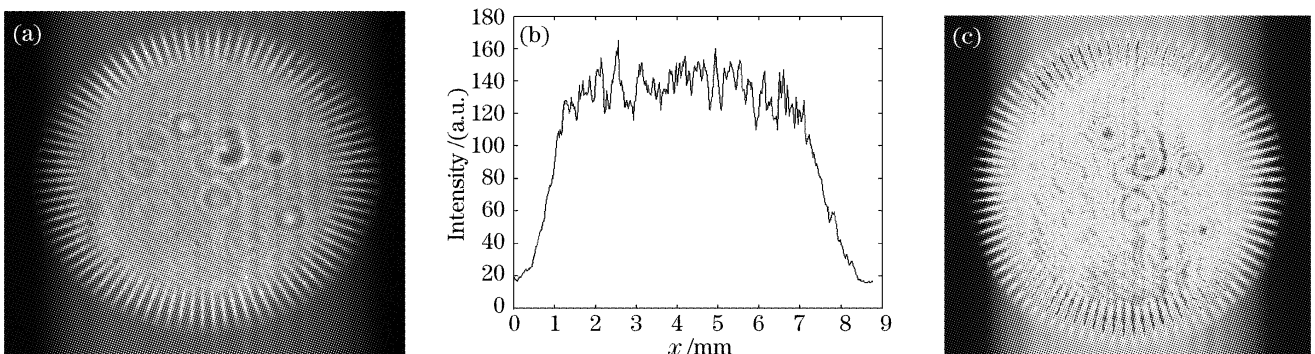


图 13 软边光阑之后的光束光强分布

Fig. 13 Distribution of output light intensity behind serrated aperture

消除掉由软边光阑带来的高频调制成分,在光阑的像面上由 CCD 采集输出光强的分布,如图 14 所示。比较图 14 和图 11 可见,我们已经成功地将高斯分

布的光束整形为空间上均匀分布的平顶光束。光束填充因子达到 86%,能量利用率达到 30%。

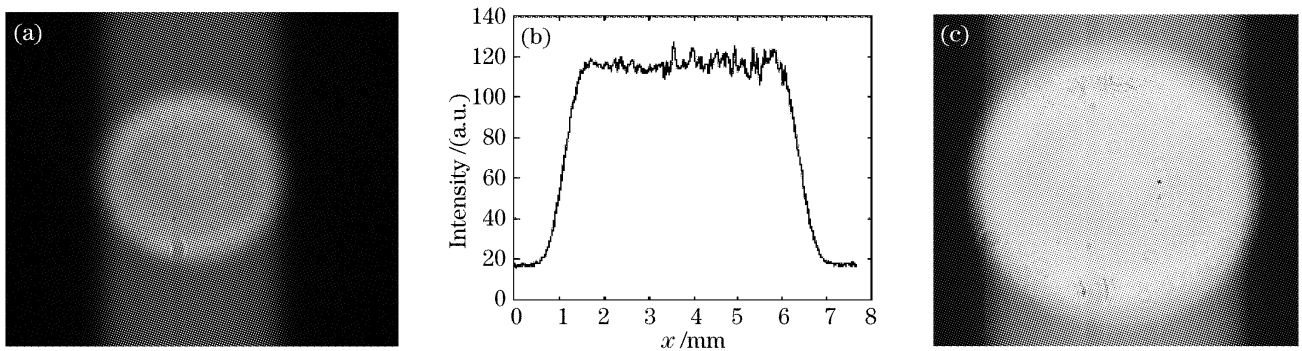


图 14 在空间滤波器之后测得的光强的一维和二维分布

Fig. 14 One- (two-) dimensional distribution of output light intensity after the spatial filter

## 5 系统在工程中的应用

目前,该系统已试用于神光 II 九路系统,在静态(放大器未工作)条件下由 CCD 采集到的主激光光束整形前和整形后的强度分布(非像面位置)图像如

图 15 所示。在近场静态条件下,经过测试,可将光束的填充因子从 66% 提高到 80%。在近场动态(放大器工作的情况下)条件下,系统目前正在进行调试。

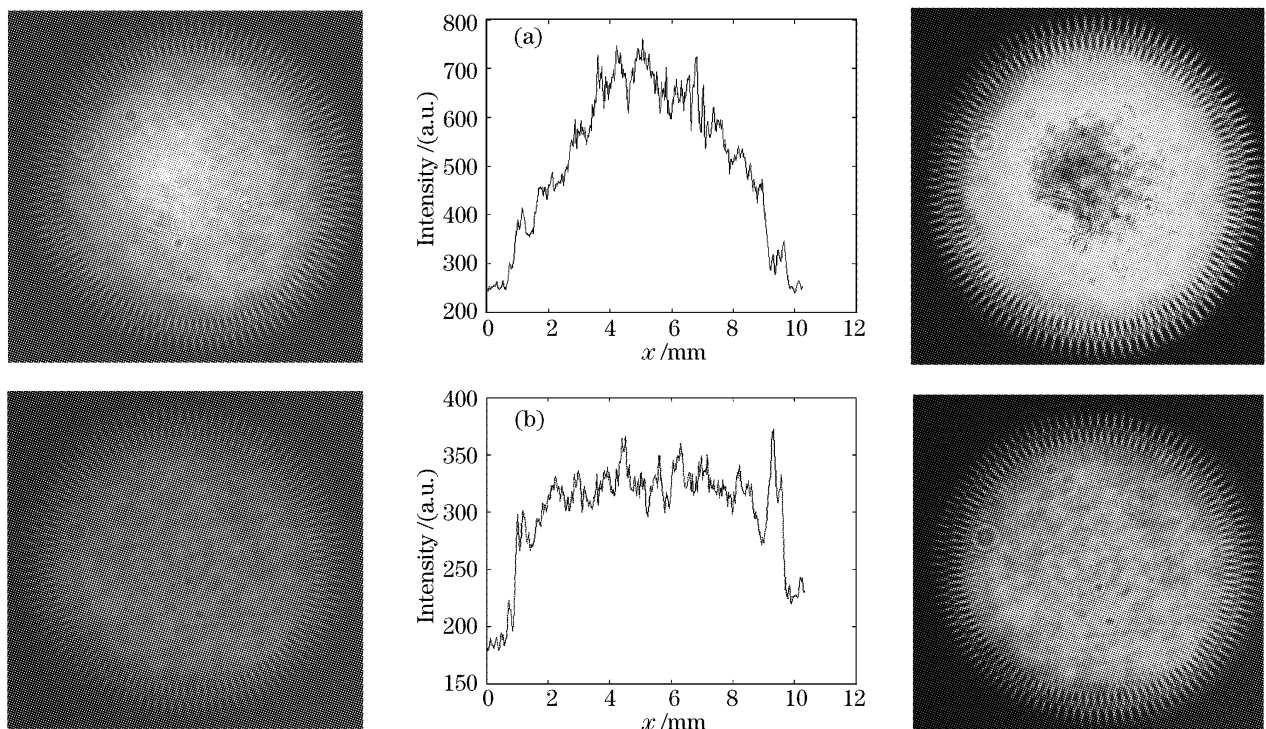


图 15 静态输出光强分布图。(a)整形前,(b)整形后

Fig. 15 One- (two-) dimensional distribution of static output light intensity. (a) Before reshaping, (b) after reshaping

## 6 结 论

由非球面透镜的琼斯矩阵出发,利用光学传输矩阵对双折射透镜组空间光束整形系统进行了理论分析,数值模拟了整形效果,讨论了透镜组设计参量的选择以及中心加工厚度误差等因素带来的影响,

并对该系统进行了实验研究。在实验中,利用该双折射透镜组整形系统实现了光束的均匀化输出,在神光 II 第九路中,在近场静态工作条件下,可将光束填充因子从原来的 66% 提高到 80%。

该方案可以通过旋转透镜组的角度方便地得到

不同的反高斯透射率分布函数,从而达到光束整形目的。该系统设计方便、结构紧凑且费用低廉,在工程上有较高实用价值。但该整形系统对入射光束的强度分布对称性要求较高。

**致谢** 感谢蔡希洁老师、林尊琪院士、李学春老师给予的有益指导,感谢联能光子技术有限公司郑连生老师给予的有益建议及对双折射透镜的加工制作,感谢徐松庆老师对系统的机械设计。

### 参 考 文 献

- 1 Chang-Yuan Han, Yukihiko Ishii, Kazumi Murata. Reshaping collimated laser beams with Gaussian profile to uniform profiles [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(22): 3644~3647
- 2 Zhang Xinping, Dong Liping, Zhang Baohua. Binary rectangular phase gratings applied to spatial shaping of Gaussian beam[J]. *Laser Technology*, 1995, **19**(2): 74~79 (in Chinese)  
张新平,董丽萍,张保华. 二元矩形位相光栅用于高斯光束的空间整形[J]. *激光技术*, 1995, **19**(2): 74~79
- 3 Xin Tan, Ben-Yuan Gu, Guo-Zhen Yang *et al.*. Diffractive phase elements for beam shaping: a new design method [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(8): 1314~1320
- 4 Juan Liu, Ben-Yuan Gu. Laser beam shaping with polarization-selective diffractive phase elements [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(18): 3089~3092
- 5 Patrick W. Rhodes, David L. Shealy. Refractive optical systems for irradiance redistribution of collimated radiation: their design and analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(20): 3545~3553
- 6 Cheng Wang, David L. Shealy. Design of gradient-index lens systems for laser beam reshaping [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(25): 4763~4769
- 7 Sie Poon Chang, Jin-Min Kuo, Yar-Ping Lee *et al.*. Transformation of Gaussian to coherent uniform beams by inverse-Gaussian transmittive filters [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(4): 747~752
- 8 W. W. Simmons, G. W. Leppelmeier, B. C. Johnson. Optical beam shaping devices using polarization effects [J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(7): 1629~1632
- 9 Chen HuaiXin, Sui Zhan, Chen Zhenpei *et al.*. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1107~1111 (in Chinese)  
陈怀新,隋展,陈祯培等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1107~1111
- 10 B. M. van Wonterghem, J. T. Salmon, R. W. Wilcox. Beamlet pulse-generation and wavefront-control system [P]. UCRL-LR-105821-95-1
- 11 Ye Yidong, Lü Baida, Cai Bangwei. Temporal and spatial pulse shaping of high power laser—Spatial pulse shaping using a combination of birefringent lenses [J]. *Laser Technology*, 1996, **20**(6): 324~328 (in Chinese)  
叶一东,吕百达,蔡邦维. 强激光的时间整形和空间整形——利用双折射透镜组实现激光束的空间整形[J]. *激光技术*, 1996, **20**(6): 324~328