

文章编号: 1001-3806(2009)04-0426-03

大功率激光扩束器的光学设计

巩盾^{1,2}, 王红^{1*}, 田铁印¹, 袁钾光³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 中国人民解放军总装备部 沈阳军事代表局驻长春地区军事代表室, 长春 130022)

摘要: 为了使激光扩束器可以长时间的工作于大功率激光照射情况下, 在传统多波长激光扩束器的基础上, 利用变更材料和结构的方法进行改进, 设计了 2.3 倍和 6 倍两级扩束的激光扩束器, 用光学设计软件分析其像质并进行优化, 对像质进行理论分析; 加工成型后, 置于实际环境中进行实验。经实验验证, 在调 Q 脉冲激光器的峰值功率高达 20MW 的大功率激光照射下, 在系统后 1m 位置出射光束直径分别为 24.5mm 和 154.8mm, 脉冲间隔可以在 5s 以上, 并很好地保持了高斯光束的固有特性。结果表明, 扩束器完全达到设计要求, 有良好的使用效果。

关键词: 光学设计与制造; 激光扩束器; 石英; 大功率激光器

中图分类号: TB133 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.027

The optical design of high-power laser-beam expander

GONG Dun^{1,2}, WANG Hong¹, TIAN Tie-yin¹, YUAN Jia-guang³

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130022, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Changchun Office of Shenyang Army Branch, General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to make a laser beam expander work a long time under high power laser radiation, on the base of the traditional multi-wavelength laser-beam expander, a two-serial expander with magnification of 2.3 and 6 respectively was designed through modifying the optical material and configuration. The expander was optimized and its image quality was analyzed with optical design software. After the expander was manufactured, experiments were performed in practical environment. It could work for a long time under laser radiation with pulse interval of 5s at high peak power up to 20MW, the output beam diameters were 24.5mm and 154.8mm respectively at 1m behind the expander with the characteristic of Gaussian-beam kept very well. The result indicates that the expander meets the design requirement and is practical.

Key words: optical design and fabrication; laser-beam expander; silica; high-power laser

引言

由于激光的高单色性及准直性优点, 在现代光学领域得到广泛应用。随着激光器件的性能与激光功率的不断提高, 激光加工在工业生产中所占的比例越来越大, 对激光光束的平行度, 即发散角和聚焦光斑的要求就越来越高^[1]。由于光束的发散角与扩束倍率成反比, 激光扩束器的主要作用就是压缩激光的空间发散角^[2], 使激光束满足孔径要求, 是组成激光雷达等诸激光仪器设备的重要部分^[3]。当激光器功率较高时, 普通的激光扩束器会产生热应力损伤、焦移等现象, 影响扩束器的正常工作, 因此, 在大功率情况下工作的激光扩束器的光学设计就变得尤为重要^[4]。

作者简介: 巩盾(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wanghong@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2008-05-28; 收到修改稿日期: 2008-10-07

1 激光扩束器的分类

激光扩束器可分为折射型扩束器、反射型扩束器和折反射型扩束器^[5]。当出射光束的口径不是很大时, 一般选用折射型扩束器。当要求有较大的出射光束口径时, 应选用反射型扩束器。在满足激光束放大比的条件下, 尽量选用折射型扩束器, 因为这种结构简单, 调试方便。

折射型扩束器有两种设计形式: 开普勒式和伽利略式^[6]。

1.1 开普勒式

光束通过两组正透镜(组), 通过第 1 个正透镜(组), 出现一个真实的焦点, 再通过第 2 个正透镜(组), 并出现一个倒影, 这两个元件(组)之间的距离由这两个正透镜(组)焦距决定。

1.2 伽利略式

光束通过 1 个负透镜(组)产生发散, 以这种放大

的状态再通过1个正透镜(组)复原成平行光,负透镜(组)的焦点必须与正透镜(组)的焦点重合。这两个元件(组)之间的距离由它们实际的焦距决定^[7]。

2 望远系统的激光扩束原理

高斯光束通过望远系统的变换矩阵为:

$$m = \begin{bmatrix} M_1 + \frac{\Delta}{f_1} & l \\ -\frac{\Delta}{f_1 f_2} & \frac{1}{M_1} + \frac{\Delta}{f_2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, f_1, f_2 分别表示两镜的焦距, 两镜间距 $l = f_1 + f_2 + \Delta$, 其中 Δ 表示失调量, $M_1 = -f_2/f_1$ 为望远系统的放大倍率。

设入射光束束腰为 w_0 , 波长为 λ , 焦参量为 $f = \pi w_0^2/\lambda$, 物距为 s , 经望远镜系统后变为束腰为 w_0' 、像距为 s' 的高斯光束。

设 $\Delta = 0$, 有:

$$s = -M_1(f_1 + f_2) - M_1^2 s' \quad (2)$$

$$w_0' = |M_1| w_0 \quad (3)$$

设初始发散角为 θ_{o1} , 经过系统后发散角为 θ_{o2} , 远场发散角 θ_0 与束腰 w_0 间有反比关系, 即:

$$\theta_{o2} = \frac{1}{|M_1|} \theta_{o1} \quad (4)$$

远场发散角被压缩 $|M_1|$ 倍, 且与物距和像距均无关。当 $s = f_1$ 时, $s' = f_2$, 即像方激光束腰位于第2透镜的后焦点上; 当 $s \gg f_1 + f_2$ 时, $s' \approx -M_1^2 s$ 。图1中的望远系统的

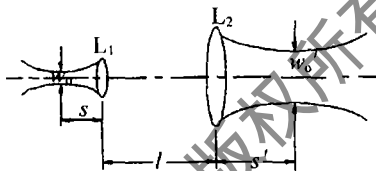


Fig. 1 Laser transfer through the expander

扩束比为:

$$M = \frac{w_0'}{w_0} = |M_1| \quad (5)$$

3 光学设计

3.1 系统要求

激光器输出为 $1.064\mu\text{m}$ 和 $0.532\mu\text{m}$ 两种波长, 其中 $1.064\mu\text{m}$ 为主要参考波长, 调 Q 脉冲激光器的峰值功率高达 20MW , 属于强脉冲, 需要对系统材料和结构进行特殊考虑, 以达到长时间工作的稳定性要求。

入射光束直径为 10mm , 发散角分别为 1mrad 和 0.8mrad 。激光束经过两级扩束: 第1级入射光束直径 $\varnothing 10\text{mm}$, 出射光束直径 $\varnothing 23\text{mm}$, 扩束比 2.3 倍; 第2级入射光束直径 $\varnothing 25\text{mm}$, 出射光束直径 $\varnothing 150\text{mm}$, 扩

束比 6 倍; 6 倍扩束器要求筒长小于 450mm 。

3.2 结构与材料的选择

开普勒式系统具有实际光束聚焦点, 强脉冲激光过度聚焦时会导致光腰太小, 产生空气的击穿现象, 致使光学元件受到损伤。而伽利略式系统的共焦点为虚焦点, 避免了空气的击穿效应, 且光学系统的轴向尺寸小于开普勒式系统。因此, 应选用伽利略式扩束器, 即正负透镜组的组合^[8]。由于在激光器功率较大的情况下胶合组会产生脱胶现象, 并且1级扩束时对筒长没有特殊要求, 像质要求不苛刻, 所以1级放大可以选择一正一负两组单透镜的组合; 1级扩束时如果采用普通玻璃, 激光的直接长时间照射会使玻璃折射率产生温漂, 严重时还会有热应力损伤等现象, 因此选择熔石英这种热膨胀系数低、对温度不敏感的特殊玻璃作为1级扩束的材料^[9]。

2级扩束时筒长较短, 两组单透镜的结构已不能满足筒长要求, 并且随着激光束口径的扩大和光能损耗, 单位面积上的光强已经降低, 口径较大的后组可以选用常规玻璃。但由于元件口径较大时无法使用胶合组, 激光束的长时间照射还会使胶合组脱胶, 因此选择双分离结构作为2级扩束的后组, 玻璃选择 K9 和 ZF2 组合^[10], 而前组依然使用熔石英玻璃。

1级和2级扩束结构如图2a、图2b所示。

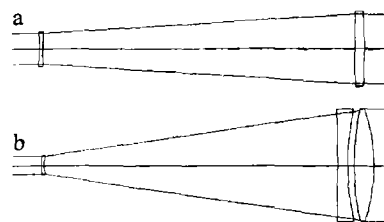


Fig. 2 a—the first-level expander configuration b—the second-level expander configuration

在设计过程中, 考虑到由于激光束的发散角较小, 因此只需校正轴上球差及正弦差。同时由于是激光, 不必校正色差, 但尽量减少色球差, 以兼顾几种不同的波长。

初始结构确定后, 根据像质要求与加工难度确定前后组 $F/\#$, 从而确定前后组间隔, 并初步计算各光学表面半径; 将以上初始数据输入 CODE V 光学设计软件, 并在最后一个光学表面后加入一理想透镜表面将出射平行光聚焦, 以便分析像质。

为了使两波长光束均能达到理想像质, 要分主次的给两波长的权重赋予合理的值; 经过优化后, 分析两扩束器的点扩散函数与像差曲线, 将像面弥散斑大小除以理想透镜的焦距, 所得弧度值与理想弧度值进行比较即可得到经过扩束器的激光束平行性是否符合设计要求。

两组扩束器的像差曲线和点扩散函数如图3~图5所示。

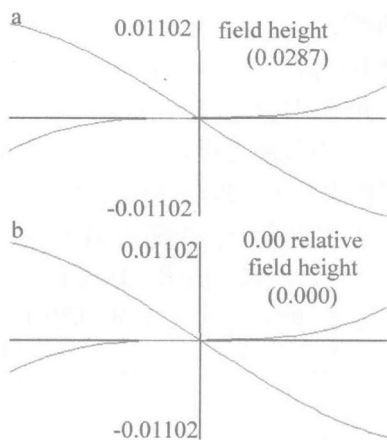


Fig. 3 The first-level expander aberration curve

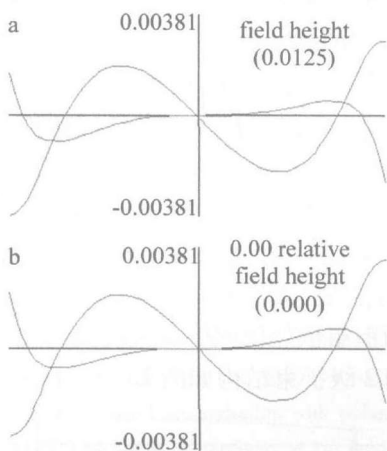


Fig. 4 The second-level expander aberration curve

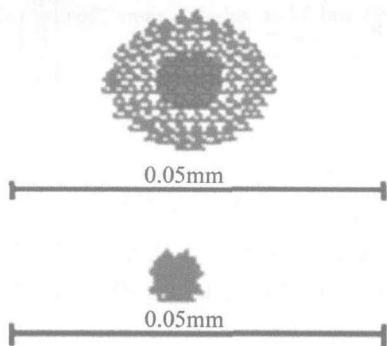


Fig. 5 a—the first-level expander spot b—the second-level expander spot
系统参量如表1、表2所示。

Table 1 The first-level expander lens data

| object | sphere | infinity | infinity | refract | 0mm |
|--------|--------|-----------|----------|-----------|--|
| stop | sphere | -25.6936 | 1.5000 | SILICA_SP | refract $\varnothing 5.0000\text{mm}$ |
| 2 | sphere | -59.4665 | 128.1002 | | refract $\varnothing 5.0000\text{mm}$ |
| 3 | sphere | 3766.3254 | 4.0000 | SILICA_SP | refract $\varnothing 11.5000\text{mm}$ |
| 4 | sphere | -108.5121 | 10.0000 | | refract $\varnothing 11.5000\text{mm}$ |
| 5 | sphere | infinity | 20.0000 | | refract $\varnothing 11.5000\text{mm}$ |
| image | sphere | infinity | 0.0000 | | refract $\varnothing 0.0044\text{mm}$ |

Table 2 The second-level expander lens data

| object | sphere | infinity | infinity | refract | 0mm |
|--------|--------|------------|----------|-----------|--|
| stop | sphere | 338.5180 | 3.0000 | SILICA_SP | refract $\varnothing 12.5000\text{mm}$ |
| 2 | sphere | 40.3860 | 450.0000 | | refract $\varnothing 12.5000\text{mm}$ |
| 3 | sphere | -2554.2822 | 15.0000 | ZF2_CHINA | refract $\varnothing 75.0000\text{mm}$ |
| 4 | sphere | 320.6534 | 10.0000 | | refract $\varnothing 75.0000\text{mm}$ |
| 5 | sphere | 350.5764 | 30.0000 | K9_CHINA | refract $\varnothing 75.0000\text{mm}$ |
| 6 | sphere | -216.1620 | 20.0000 | | refract $\varnothing 75.0000\text{mm}$ |
| 7 | sphere | infinity | 100.0000 | | refract $\varnothing 11.5000\text{mm}$ |
| image | sphere | infinity | 0.0000 | | refract $\varnothing 0.0036\text{mm}$ |

4 公差分配

完成初始设计后,就要考虑公差分配的问题,1级扩束系统结构简单,像质要求不高,查询光学设计手册后直接给出较宽松的半径、间隔、倾斜、偏心等公差,调焦量作为补偿量;将给出量输入光学设计软件进行公差分析,所给公差分配合理可以采用。

而2级扩束系统相对结构复杂,像质也随着平行度要求的提高而提高,必然影响公差的分配,将1级扩束系统的公差紧缩2倍,调焦量还作为补偿量;经光学设计软件分析后发现双分离结构的元件倾斜量对像质影响较大,需要进一步紧缩。这是由于采用双分离结构,4、5面(见表2)上的高级像差较大,元件入射角也比普通结构增大,微小的倾斜就会带来显著的光线偏折,必然成为影响像质的主要因素。将计算机分析结果与光学设计手册查询结果相结合,最后给出双分离组的元件倾斜公差为 $1'$,可以与多数光学车间加工指标相吻合^[11]。

5 结论

以上2级扩束系统结构简单,成像质量满足准直性要求,加工装调难度不高。更主要的是由于熔石英材料与2级扩束系统后组双分离结构的采用,使扩束系统具有热稳定性高、抗高温、抗强功率激光等优点,可以长时间工作于大功率激光照射条件下,较好地满足了现代激光扩束系统的发展要求。经加工与装调完成,现已工作于实际环境中,在系统后1m位置出射光束直径分别为24.5mm和154.8mm,脉冲间隔可以在5s以上,并很好地保持了高斯光束的固有特性,完全达到使用要求,有良好的应用效果。

参考文献

[1] ZHAO X. The importance of the beam expander in laser processing system [J]. Laser Technology, 1999, 23(6): 378-380 (in Chinese).

(下转第436页)

由上述解密过程和结果,可以分析得到,在非涅耳域采用双随相位加密算法对对称图像进行加密时,两个随机相位板实际上根本就不能作为密钥,作为密钥的只有 z_1, z_2 和 λ 了。所以,在分配密钥时,关键要确保 z_1, z_2 和 λ 的安全,不被攻击者截获。

3 结 论

提出了一种基于菲涅耳域对称图像的双随机光学加密系统的解密的方法。这种方法通过利用加密图像逆变换后在变换面的光强和加密系统的参量,对离散值的自相关和复卷积进行排列组合,通过迭代来重构图像。在整个解密过程中不需要随机相位板,就可以重构出对称图像。根据这个算法可知,对于对称图像而言,菲涅耳域中的两个随机相位板的保密性已经失效,这提醒了要更加注重对其余密钥 λ 和 z_1, z_2 的保护。分析表明,对称偏差和像素值 $f(N/2 - 1)$ 对图像恢复质量有影响。

参 考 文 献

- [1] REFREGIER P, JAVIDI B. Optical image encryption based on input plane and output plane random encoding [J]. *Opt Lett*, 1995, 20(7): 767-769.
- [2] SITU G H, ZHANG J J. Double random-phase encoding in the Fresnel domain [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(14): 1584-1586.
- [3] UNNIKRIISHNAN G, JOSEPH J, SINGH K. Optical encryption by double-random encoding in the fractional Fourier [J]. *Opt Lett*, 2000, 25(12): 887-889.
- [4] ZHOU X, YUAN S, WANG S W, *et al.* Affine cryptosystem of double-random-phase encryption based on the fractional Fourier transform [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(33): 8434-8439.
- [5] CARNICER A, MONTES-USATEGUI M, ARCOS S, *et al.* Vulnerability to chosen-ciphertext attacks of optical encryption schemes based on double random phase keys [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(13): 1644-1646.
- [6] PENG X, ZHANG P, WEI H, *et al.* Known-plaintext attack on optical encryption based on double random phase keys [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(8): 1044-1046.
- [7] PENG X, TANG H Q, TIAN J D. Ciphertext-only attack on double random phase encoding optical encryption system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(5): 2629-2636 (in Chinese).
- [8] FIENUP J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. *Appl Opt*, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [9] UNNIKRIISHNAN G, MONAGHAN D S, NAUGHTON J T. A known-plaintext heuristic attack on the Fourier plane encryption algorithm [J]. *Optics Express*, 2006, 14(8): 3181-3186.
- [10] YU F T S, JUTAUMULIA S. Optical signal processing computing and neural networks [M]. New York: Wiley-Interscience, 1992: 1-432.
- [11] GARRETT P. Introduction to cryptology [M]. Beijing: Science Press, 1999: 4 (in Chinese).
- [12] HWANG H E, HAN P. Signal reconstruction algorithm based on a single intensity in the Fresnel domain [J]. *Optics Express*, 2007, 15(7): 3766-3776.
- [13] CONG W X, CHEN N X, GU B Y. Phase retrieval in the Fresnel transforms system: a recursive algorithm [J]. *J O S A*, 1999, A16(7): 1827-1830.
- [14] GOODMAN J W. Introduction to fourier optics [M]. New York: McGraw-Hill, 1968: 1-441.
- [15] GOUDAI F, JAVIDI B, REFREGIER P. Influence of a perturbation in a double phase-encoding system [J]. *J O S A*, 1998, A15(10): 2629-2637.
- [2] SUN N Ch, CHENG J, DAI M, *et al.* Problem of engineering application for laser expansion telescope [J]. *Laser Technology*, 1996, 20(3): 191-192 (in Chinese).
- [3] XIN W J, GAO M, DU Y J. Lens design for multi-wavelength laser beam expander [J]. *Optical Instruments*, 2007, 29(3): 31-34 (in Chinese).
- [4] GUO Sh F, LU Q Sh, YIN Y, *et al.* Theoretical study on damage thresholds for elastic stress fracture in laser-irradiated optical glass [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(2): 133-137 (in Chinese).
- [5] KONG X L, HAO P M, ZHOU Sh K, *et al.* Study on Aspherical Reflecting Beam Expander [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(s1): 40-44 (in Chinese).
- [6] ZHANG Y M. Geometrical optics [M]. Tianjing: Engineering Industry Publishing Company, 1987: 78-79 (in Chinese).
- [7] YUAN L, PAN B Zh, HAO P M, *et al.* Study of the laser beam-expander optical system with large aperture and non-curvature of field [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(7): 672-675 (in Chinese).
- [8] YUAN X C. Optical design [M]. Beijing: Science Press, 1983: 223-224 (in Chinese).
- [9] HUANG J, REN H, LÜ H B, *et al.* Comparison of damage action of fused silica at different laser wavelength [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, 5(6): 5-8 (in Chinese).
- [10] ZHANG J, XIAO L, ZHAO J J. Study of thermal and mechanical damage in ZF2 glass induced by high-power laser [J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(16): 3990-3994 (in Chinese).
- [11] LI Sh X, ZHENG L N. Optical design manual [M]. Beijing: University of Science & Technology Beijing Press, 1990: 135-136 (in Chinese).

(上接第 428 页)