

文章编号: 0258-7025(2007)09-1260-03

# 用于激光等离子体诊断系统的长焦深透镜

温圣林<sup>1</sup>, 粟敬钦<sup>3</sup>, 杨春林<sup>1</sup>, 郭永康<sup>2</sup>, 高福华<sup>2</sup>, 周礼书<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041; <sup>2</sup> 四川大学物理系, 四川 成都 610064)

<sup>3</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 针对惯性约束聚变(ICF)等离子体诊断系统中对长焦深光学元件的要求,采用非线性相位拟合法设计了一块孔径150 mm,焦距450 mm,焦深5 mm的长焦深球面透镜。为了验证该方法的可行性和正确性,制作了一块与设计等 $F$ 数(通光孔径为80 mm,焦距为240 mm)的长焦深透镜,并且测量了平行光经过该透镜后的轴上和横向光强分布。理论和实验结果都表明,采用非线性相位拟合法设计的长焦深透镜可以获得长焦深、小焦斑、小旁瓣的聚焦光束,可以满足诊断系统对长焦深元件的要求。

**关键词** 光学设计与制造;长焦深;非线性相位拟合;球面透镜;激光等离子体诊断;惯性约束聚变

中图分类号 TL 65 文献标识码 A

## Long-Focal-Depth Lens for Laser Plasma Diagnostic System

WEN Sheng-lin<sup>1</sup>, SU Jing-qin<sup>3</sup>, YANG Chun-lin<sup>1</sup>,

GUO Yong-kang<sup>2</sup>, GAO Fu-hua<sup>2</sup>, ZHOU Li-shu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China

<sup>2</sup> Department of Physics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

<sup>3</sup> Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** Aiming at the requirement of long-focal-depth elements used for the plasma diagnosis in inertial confinement fusion (ICF), a spheric lens with 150 mm aperture, 450 mm focus length, and 5 mm depth of focus is designed by nonlinear phase fitting method. In order to verify the correctness and feasibility of this method, a lens with a long-focal-length and the same  $F$  numbers (calibre 80 mm, focal length 240 mm) is fabricated. Moreover, the on-axis and transverse intensity distributions of parallel light after passing the lens are measured. The theoretical and experimental result indicates that the beam from the long-focal-depth lens has long focal depth, small focal spot and side lobe and it can meet the requirements of inertial confinement fusion.

**Key words** optical design and fabrication; long focal depth; nonlinear fitting of phase; spheric lens; laser plasma diagnosis; inertial confinement fusion

## 1 引言

在惯性约束聚变(ICF)系统打靶实验中,为了提高激光与靶的耦合效率,通常采用汤姆孙(Thomson)散射的方法对靶场附近激光等离子体电子和离子的温度、密度等参量进行诊断<sup>[1,2]</sup>。为提高等离子体诊断的空间分辨率,精确测量不同等离子体区域的电子温度和离子漂移速度,要求将诊断光束聚焦成长焦深、小焦斑且轴向光强均匀的光束,

在实验中一般要求诊断光束焦斑直径小于100  $\mu\text{m}$ 且焦深大于500  $\mu\text{m}$ 。然而传统的普通透镜等聚焦元件的焦深和焦斑存在制约关系,增加焦深必然引起焦斑尺寸的扩大。因此寻求同时满足焦斑大小和焦深要求的聚焦技术,是激光等离子体测量中一个亟待解决的难题。为了满足激光扫描、光刻、加工、光学成像、光学测量等特殊应用的需求,已提出了采用衍射光学元件<sup>[3]</sup>、折射-衍射混合元件<sup>[4]</sup>、全息元件<sup>[5]</sup>、轴锥镜(Axicon)<sup>[6]</sup>等多种实现长焦深的方

收稿日期:2007-01-29;收到修改稿日期:2007-04-03

基金项目:高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室(51480040105ZW0804)资助项目。

作者简介:温圣林(1980—),男,江西人,硕士,主要从事衍射光学和微光学方面的研究。E-mail:shenglinwen@163.com

法,而其中通过中心切趾的具有对数面型的对数型轴锥镜<sup>[7]</sup>不仅可以获得长的焦深,还同时能够得到良好的轴上和横向均匀性,理论上可以满足惯性约束聚变诊断系统的要求<sup>[8]</sup>。但由于对数型轴锥镜属于非球面结构,加工困难,制作费用昂贵。为了解决对数型轴锥镜的加工困难,本文提出采用非线性相位拟合法设计长焦深透镜实现对数型轴锥镜的长焦深性能<sup>[7]</sup>。

## 2 长焦深透镜设计

采用非线性相位拟合法设计长焦深透镜的基本思想为:设中心切趾后对数型轴锥镜和球面透镜的相位函数分别为  $\varphi_{\log}$  和  $\varphi_{\text{len}}$ <sup>[9,10]</sup>

$$\varphi_{\log}(r) = -\frac{k}{2a} \log[1 + a(r^2 - R_1^2)/d_1],$$

$$a = (d_2 - d_1)/(R_2^2 - R_1^2), \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{len}}(r) = k(n-1) \cdot H(r) =$$

$$k(n-1)[t + (\sqrt{s_1^2 - r^2} + \sqrt{s_2^2 - r^2}) - (s_1 - s_2)], \quad (2)$$

式中  $s_1$  和  $s_2$  分别为透镜前后表面曲率半径,  $R_1$  和  $R_2$  为轴锥镜通光环的内外环半径大小,  $R_1$  也就是中心切趾的半径,  $d_1, d_2$  分别为设计焦深的前后端的坐标,  $r$  为径向坐标,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为波长,  $H(r)$  为透镜的厚度分布函数,  $n$  为材料折射率,  $t$  为透镜中心厚度。然后采用非线性拟合的方法搜索合适的球面参量  $s_1$  和  $s_2$ , 使  $\varphi_{\text{len}}$  与  $\varphi_{\log}$  相等或者相差一个相位常数  $\varphi_0$ , 或者拟合因子  $D^2$  具有最小值

$$D^2 = \frac{1}{N} \sum_i [\varphi_{\text{len}}(s_1, s_2, r_i) + \varphi_0 - \varphi_{\log}(r_i)]^2, \quad (3)$$

式中  $N$  为采样点数。

激光等离子体诊断系统要求钕玻璃激光器发出激光(波长为  $1.053 \mu\text{m}$ )的四倍频光 ( $4\omega$ ) 通过口径为  $\phi 150 \text{ mm}$  聚焦成焦深大于  $500 \mu\text{m}$ , 光斑小于  $100 \mu\text{m}$ , 旁瓣峰值小于中心峰值的  $10\%$  光束。因此综合考虑各项长焦深性能, 选择目标相位函数的对数型轴锥镜参量:  $R_1 = 45 \text{ mm}$ ,  $R_2 = 75 \text{ mm}$ ,  $d_1 = 447.5 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 452.5 \text{ mm}$ ,  $t = 12.5 \text{ mm}$ 。选用材料为熔石英, 对  $4\omega$  光的折射率为  $1.50009$ 。将这些已知参量代入(1)式, 通过非线性曲线拟合得到透镜前后曲率半径分别为  $351.7 \text{ mm}$  和  $-645.5 \text{ mm}$ , 拟合因子  $D^2$  为  $1.12 \times 10^{-5}$ , 它们的相位延迟随半径变化关系如图 1 所示, 其中右侧纵轴为灰线拟合误差。由图 1 可知, 相位延迟的两根曲线基本重合, 即两元

件的相位分布基本相同, 理论上可实现相似的光学性能。

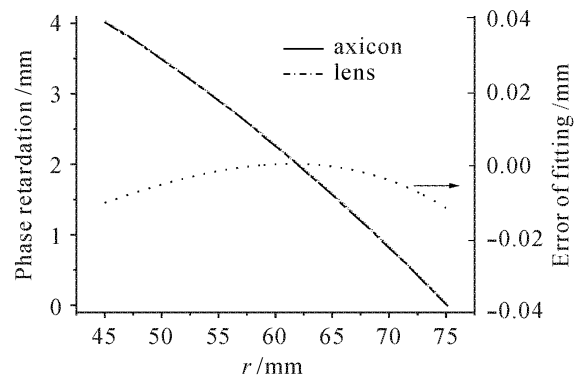


图 1 长焦深透镜的相位分布

Fig. 1 Phase distribution of the long-focal-depth lens

## 3 实验

为了检验采用非线性相位拟合法设计光学元件的正确性和可行性, 针对 He-Ne 激光, 采用 BK7 玻璃设计了一小口径但  $F$  数与设计相同的长焦深透镜, 该透镜设计通光口径为  $80 \text{ mm}$ , 焦距  $240 \text{ mm}$ , 焦深  $5 \text{ mm}$ , 其他参量:  $R_1 = 20 \text{ mm}$ ,  $R_2 = 40 \text{ mm}$ ,  $d_1 = 237.5 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 242.5 \text{ mm}$ ,  $t = 10 \text{ mm}$ ,  $n = 1.515$ , 拟合得到的前后球面曲率半径  $s_1 = 153.3 \text{ mm}$ ,  $s_2 = -700.2 \text{ mm}$ , 而实际加工得到曲率半径  $s_1 = 153.8 \text{ mm}$ ,  $s_2 = -700.0 \text{ mm}$ 。采用的实验光路如图 2 所示, He-Ne 激光通过两透镜准直放大得到平行光束, 然后入射到透镜上, 而带刻度的导轨平行于光轴放置在焦点附近, 科学级 CCD 固定于导轨上, 移动 CCD 即可获得焦深范围内的光场分布。实验中为了减小光源和环境不稳定性对测量结果的影响, 采用多次往返测量。

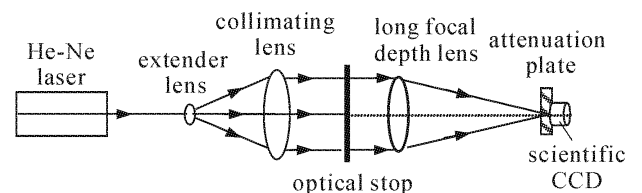


图 2 测量光强分布的实验光路

Fig. 2 Experimental layout for measuring intensity distributions

首先测量了中心切趾(加光阑)后轴上和横向光强分布, 归一化后的光强如图 3 所示, 纵坐标表示相对光强大小, 图 3(a)和(b)的横坐标分别表示传输距离  $z$  轴(以透镜前表面为原点)和径向坐标。其中图 3(a)是 5 次轴上光强测量结果与计算结果的比

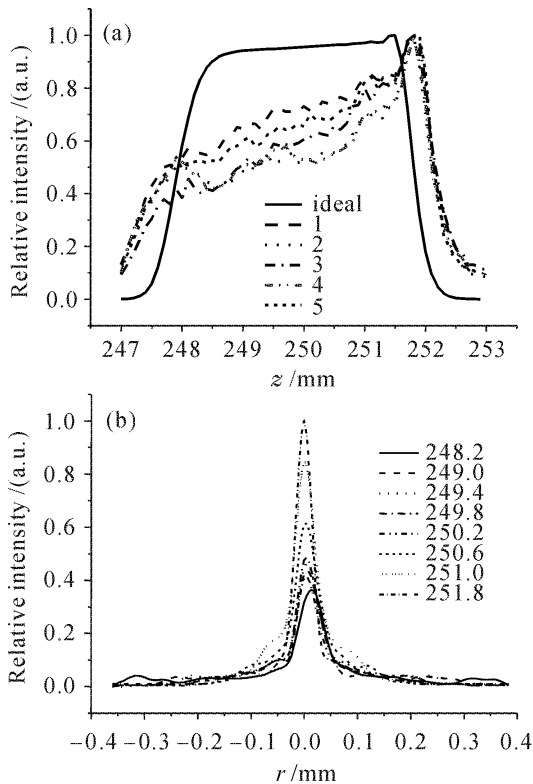


图 3 中心切趾的长焦深透镜产生的轴上(a)和横向(b)光强分布

Fig. 3 On-axis (a) and transverse (b) intensity distributions after long-focal-depth lens with central apodization

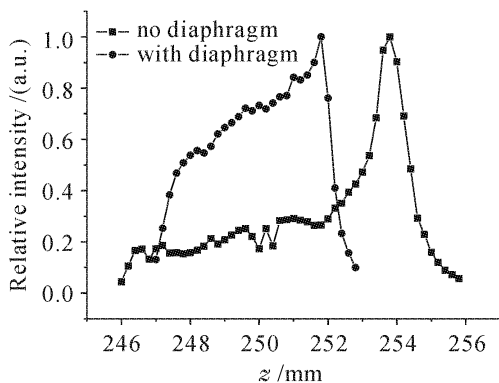


图 4 中心切趾前后的轴上光强比较

Fig. 4 Comparison of on-axis intensity after the long-focal-depth lens with and without central apodization

较,而图 3(b)是测量得到的  $z$  轴上焦深附近不同位置的横向光斑径向分布。从结果可以看出,虽然轴上光强均匀性比理论计算结果略差,但仍然保持了长的焦深,横向光斑小(小于  $100 \mu\text{m}$ )而且均匀。另外,还对比测量了无光阑时的光场分布,产生的轴上光强如图 4 所示,中心切趾后轴上光强均匀性和焦深都有较明显的改善,这也验证了中心切趾消除轴

上光强振荡的重要性。综上结果表明,采用非线性相位拟合法设计的长焦深透镜产生的聚焦光束具有长的焦深、良好的轴上和横向光强分布。

## 4 结 论

采用非线性相位拟合法设计了用于惯性约束聚变的长焦深透镜,并且实际制作了采用该方法设计的长焦深透镜,测量了它所产生的聚焦光束的轴上和横向光学性能。实验结果表明,设计的长焦深透镜具有与对数型轴锥型类似的长焦深性能,能够产生具有长焦深、小焦斑和小旁瓣的聚焦光束,能够应用于惯性约束聚变激光等离子体诊断系统中。实验结果同时也初步验证了采用非线性相位拟合法设计光学元件的正确性和可行性。

## 参 考 文 献

- 1 S. H. Glenzer, W. Rozmus, B. J. MacGowan *et al.*. Thomson scattering from high-Z laser produced plasmas [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(1):97~100
- 2 Wen Shenglin, Gao Fuhua, Guo Yongkang *et al.*. Study on the near field diffraction of color separation gratings applied in ICF system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8):1068~1072  
温圣林,高福华,郭永康等. 用于惯性约束聚变系统中的色分离光栅近场衍射研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8):1068~1072
- 3 N. K. Bao, Z. Y. Chen, Y. S. Chen. Adjacent sequence iteration method for designing a diffractive element with fuction of long focal depth [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(10):2348~2352
- 4 F. Angel, M. R. Wang, J. J. Yang. Achromatic hybrid refractive-diffractive lens with extended depth of focus [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(30):5618~5630
- 5 Feng Gao, Jianli Liu, Boliang Luo *et al.*. Long focal depth zone plate for optical coherence tomography [C]. *SPIE*, 2005, **5636**:812~819
- 6 J. H. McLeod. The axicon; a new type optical element [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, **44**(8):592~597
- 7 Z. Jaroszewicz, J. Sochachi, A. Kolodziejczyk *et al.*. Apodized annular-aperture logarithmic axicon; smoothness and uniformity of intensity distribution [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(22):1893~1895
- 8 Shenglin Wen, Yongkang Guo, Jingqin Su *et al.*. Design and optimization of an axicon used for plasma diagnostic system in ICF drivers [C]. *SPIE*, 2006, **6290**:62900U-1~62900U-7
- 9 Yao Xin, Wen Shenglin, Su Jingqin *et al.*. Design of long focal-depth optical element for plasma diagnostic system in ICF drivers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(8):1292~1296  
姚欣,温圣林,栗敬钦等. 应用于 ICF 等离子体诊断系统的长焦深光学元件设计[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(8):1292~1296
- 10 J. Sochachi, S. Bara, Z. Jaroszewicz *et al.*. Phase restradation of the uniform-intensity axilens [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(1):7~9