

文章编号: 0253-2239(2007)10-1842-4

采用非线性相位拟合法设计长焦深透镜*

栗敬钦¹ 温圣林¹ 袁 静¹ 刘兰琴¹ 王文义¹ 高福华²

(¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)
(² 四川大学物理系科学与技术学院, 成都 610064)

摘要: 针对惯性约束聚变(ICF)激光等离子体诊断系统应用的需求,提出一种采用非线性相位拟合法设计单透镜代替理想对数轴锥镜的方法。对所要得到的球面透镜与理想对数轴锥镜的相位进行拟合,求解得出所需要的球面透镜参量。设计了用于激光等离子体诊断系统的长焦深透镜,并对透镜的焦深、轴向光场均匀性、横向均匀性、焦斑旁瓣等指标进行分析。数值分析结果表明,长焦深透镜具有与理想对数轴锥镜相同的相位分布,焦深、轴向光场均匀性、横向均匀性、焦斑旁瓣均符合设计要求,验证了非线性相位拟合法的的正确性。

关键词: 光学设计与制造;长焦深透镜;非线性相位拟合;对数轴锥镜

中图分类号: O435.2 文献标识码: A

Long-Focal-Depth Lens Designed by Nonlinear Phase Fitting Method

Su Jingqin¹ Wen Shenglin¹ Yuan Jing¹ Liu Lanqin¹ Wang Wenyi¹ Gao Fuhua²

(¹ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)
(² School of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract: For requirement of plasma diagnostic system in inertial confinement fusion (ICF) drivers, simple lens which can be substituted for logarithmic axicon is designed by nonlinear-phase fitting method. Required spherical lens parameters are determined by fitting the phase of spherical lens and logarithmic axicon. A long-focal-depth lens applied for plasma diagnostic system is designed, and the optical performance of lens is analyzed, such as long focal depth, homogeneous axial, transverse intensity distribution and side lobe of focal spot. Numerical results show that long-focal-depth lens has the same phase distribution with logarithmic axicon, its optical performance can satisfy the requirements of plasma diagnostic system, so the nonlinear phase fitting method is valid.

Key words: optical design and fabrication; long-focal-depth lens; nonlinear-phase fitting; logarithmic axicon

1 引 言

轴锥镜是 J. H. McLeod^[1] 在 1954 年提出来的,一种可实现长焦深功能的光学元件,它可以将入射平行光变换为光强沿轴锥镜光轴成线性分布的光束。1987 年 J. Durnin 等^[2] 提出无衍射光束,并利用轴锥镜从实验上得到了无衍射的零阶贝塞尔光束。之后,轴锥镜得到广泛研究^[3~7]。J. Sochachi 等^[4] 采用几何追迹和能量守恒法设计了对数型轴锥镜,Z. Jaroszewicz 等^[5] 采用非球面像差透镜同样实现了对数轴锥镜的长焦深性能。但非球面结构加工困难,制作费用昂贵,严重限制了对数轴锥镜的实际应用。传统的普通球面透镜加工技术制作相对成

熟,但普通透镜的长焦深与高分辨力存在制约关系。如何在保持长焦深元件性能的同时简化元件的加工一直是对数轴锥镜研究的重点。2004 年 A. Burvall 等^[7] 采用 Zemax 软件设计了由两块正负像差的胶合球面透镜,实现了长焦深性能,其加工难度大大降低。但胶合透镜需要两种材料,而且两块透镜严格对准也较困难。

本文基于光的标量衍射理论,采用非线性相位拟合的方法对所要得到的球面透镜相位与理想对数轴锥镜的进行拟合,求解得出所需要的球面透镜参量。该透镜仅需一种光学材料,由两个球面组成,结构简单、制作容易,并且还保持了对数轴锥镜的长焦

* 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室(51480040105ZW0804)资助课题。

作者简介:栗敬钦(1973—),男,贵州锦屏人,副研究员,主要从事强激光技术和衍射光学等方面的研究。

E-mail: sujingqin@hotmail.com

收稿日期:2006-09-28;收到修改稿日期:2007-04-02

深、轴向光强均匀等光学性能。针对惯性约束聚变(Inertial confinement fusion, ICF)激光等离子体诊断系统应用的需求,本文设计了满足长焦深聚焦要求的元件,并对元件的焦深、轴向光场均匀性、横向均匀性、旁瓣等指标进行了分析。

2 长焦深透镜设计方法

通过选择合适的中心切趾和超高斯边缘匀滑^[8],对数型轴锥镜不仅能够得到很长的焦深,而且轴上均匀性也很好。其聚焦原理的截面如图 1 所示, R_1 、 R_2 分别为轴锥镜通光环的内外环半径,设计焦斑的焦深范围在 $d_1 \sim d_2$ 间。在理想平面波入射、傍轴近似情况下,采用几何追迹和能量守恒法推导出该轴锥镜的相位分布函数为

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

式中 $a = (d_2 - d_1)/(R_2^2 - R_1^2)$, r 为径向坐标, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长。

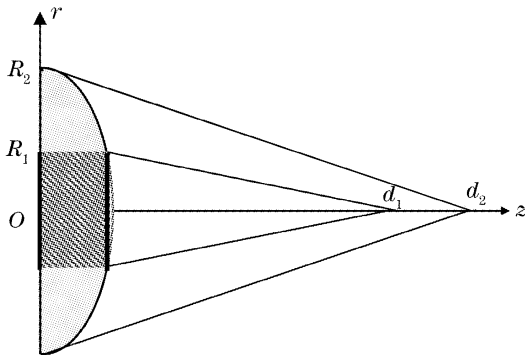


图 1 对数轴锥镜聚焦原理截面图

Fig. 1 Focusing principle of logarithmic axicon

普通透镜的截面结构如图 2 所示,由几何关系可以推导出透镜的相位分布函数为

$$\varphi_{\text{lens}}(r) = H(r) \cdot (n - 1) = (n - 1)[t + (\sqrt{s_1^2 - r^2} + \sqrt{s_2^2 - r^2}) - (s_1 - s_2)], \quad (2)$$

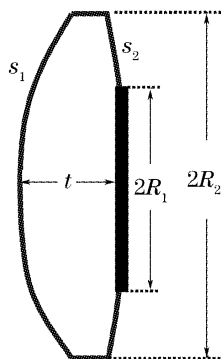


图 2 长焦深透镜结构

Fig. 2 The structure of long-focal-depth lens

式中 $H(r)$ 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, s_1 和 s_2 分别为透镜前后面曲率半径。

以对数轴锥镜的相位分布函数为目标函数,以透镜的前后表面曲率半径为设计参量,需要找到合适的 s_1 和 s_2 使每一点的 r 都满足

$$\varphi_{\text{lens}}(r) + \varphi_0 = \varphi_{\text{Axicon}}(r), \quad (3)$$

式中 φ_0 为相位常量。(3) 式为非线性方程,没有精确解。通过非线性曲线拟合法,采用数值迭代计算,求解出(3)式中最逼近的 s_1 和 s_2 参量,拟合因子 D

$$D^2 = \frac{1}{N} \sum_i [\varphi_{\text{lens}}(s_1, s_2, r_i) + \varphi_0 - \varphi_{\text{Axicon}}(r_i)]^2, \quad (4)$$

D 表征 $\varphi_{\text{lens}}(r)$ 和 $\varphi_{\text{Axicon}}(r)$ 拟合程度, D 越小,拟合程度越高。当 D 有最小值时,表明长焦距透镜和轴锥镜的相位分布最接近。

3 等离子体诊断系统长焦深透镜设计

惯性约束聚变实验的等离子体诊断系统要求将诊断光束聚焦成为长焦深、小焦斑且轴向光强均匀的光束。其简化光路如图 3 所示,钕玻璃激光器发出的激光经过频率转换后的四倍频光(4ω)经过通光口径为 150 mm,焦距为 450 mm 的聚焦光学元件后聚焦于靶面上。一般的实验中汤姆逊(Thomson)散射要求诊断光束焦斑直径小于 $100 \mu\text{m}$ 、焦深大于 $500 \mu\text{m}$ 且旁瓣峰值小于中心峰值的 10%。Shenglin Wen 等^[8]采用对数轴锥镜很好地满足了诊断系统的要求。

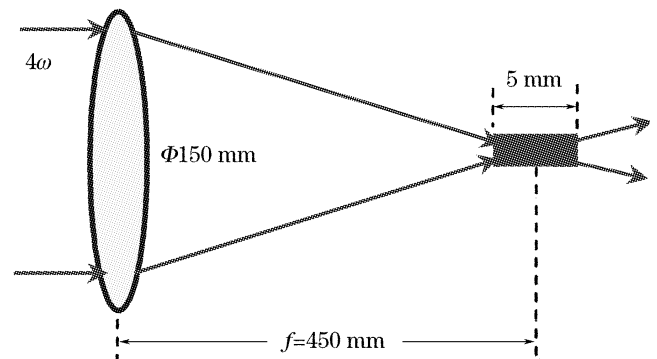


图 3 激光等离子体诊断光路简图

Fig. 3 Optical path of laser plasma diagnostic

采用非线性拟合方法拟合对数轴锥镜可得到长焦深透镜。以 5 阶超高斯光束为入射光,并且在中心切趾边缘采用 5 阶超高斯函数匀滑。当诊断光束焦深为 5 mm 时,确定 $d_1 = 447.5 \text{ mm}$, $d_2 = 452.5 \text{ mm}$ 。透镜的半径 R_2 为 75 mm,中心切趾半径 R_1 为 45 mm。根据透镜材料对 4ω 光的折射率 1.50009,

确定透镜厚度 $t=12.5\text{ mm}$ 。将这些已知参量代入(4)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 mm 和 -645.5 mm , $D^2=1.12\times 10^{-5}$ 。透镜与对数轴锥镜的相位延迟随半径变化关系如图4所示,可看出两条曲线基本重合,表明长焦深透镜具有与理想对数轴锥镜相同的相位分布。

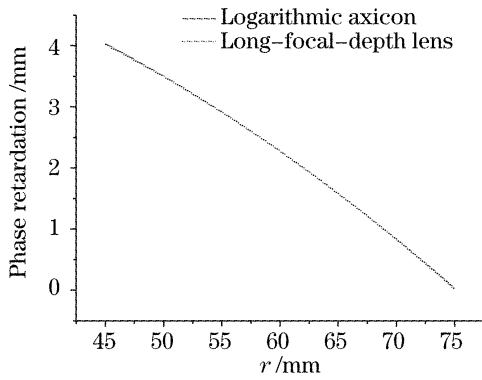


图4 相位延迟随半径变化曲线
Fig. 4 Phase retardation versus radius

4 长焦深透镜性能分析

为了检验该透镜的长焦深性能,利用圆对称情况下的菲涅耳衍射积分公式分析光束通过该透镜后

的焦面的光场分布

$$U(r',z) = \left(\frac{2\pi}{\lambda z}\right)^2 \times \left| \int_0^{R_2} \exp\left[i2\pi\left(\frac{r^2}{2\lambda z}\right) - \varphi(r)\right] J_0\left(\frac{2\pi r r'}{\lambda z}\right) r dr \right|^2, \quad (5)$$

式中 J_0 为零阶贝塞尔函数, z 为轴向衍射距离。

将设计得到的相位函数代入(5)式,计算得到的焦斑光场分布如图5(a)所示。图5(b)是长焦深透镜、普通透镜以及对数轴锥镜沿轴上强度分布对比结果,可见长焦深透镜的焦深远大于普通透镜,而且轴上光强在所设计的焦深范围内均匀,基本与理想对数轴锥镜结果一致。长焦深透镜在焦点 450 mm 处的横向光场分布见图5(c)。图5(d)是长焦深透镜与理想轴锥镜的中心主瓣大小对比。从横向光场分布看出,长焦深透镜聚焦后的横向光斑非常小,中心主瓣可以控制在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 内,而 $5\text{ }\mu\text{m}$ 外的旁瓣已小于 5% ;而且光斑随传播距离的变化也比较小,与理想对数轴锥镜相比,虽然变化的趋势不同,但变化幅度基本一致。从分析可知,采用非线性拟合方法设计的长焦深透镜能够达到对数轴锥镜的性能,并能够满足惯性约束聚变诊断系统的要求。

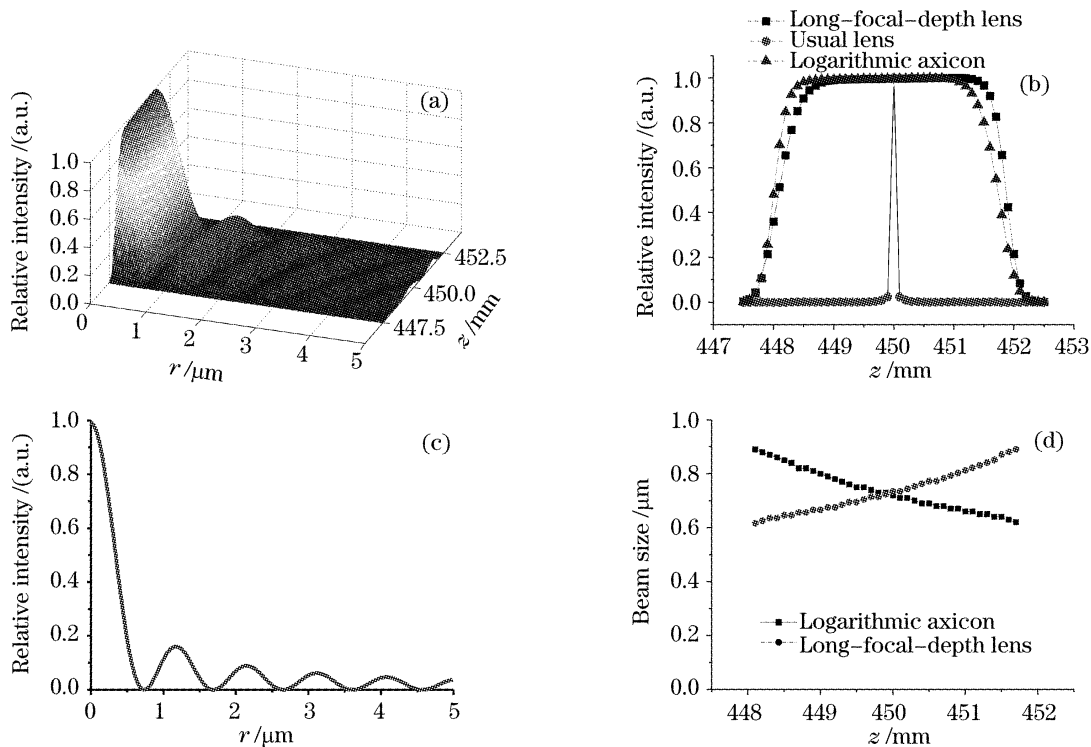


图5 长焦深透镜和理想对数轴锥镜的长焦深性能对比分析。(a) 焦斑三维分布, (b) 轴向焦斑光强分布, (c) 截面焦斑光强分布, (d) 轴向焦斑尺寸

Fig. 5 Long-focal-depth performances comparison between the long-focal-depth lens and logarithmic axicon. (a) Three-dimensional intensity distribution of focal spot, (b) intensity distribution along Z axis of focal spot, (c) one-dimensional intensity distribution of focal spot, (d) size of focal spot along Z axis

5 结 论

提出了一种采用非线性相位拟合法设计长焦深透镜来代替理想对数轴锥镜的方法。数值分析结果表明,长焦深透镜具有与理想对数轴锥镜相同的相位分布,在焦深、轴向光场均匀性、横向均匀性等各项性能指标与理想对数轴锥镜一致,能满足惯性约束聚变等离子体诊断系统对聚焦元件指标的特殊要求。

参 考 文 献

1 J. H. McLeod. The axicon; a new type optical element[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1954, **44**(8): 592~597

2 J. Durnin, J. J. Miceli, J. H. Eberly. Diffraction-free beams

[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(15): 1499~1501

3 N. Davidson, A. A. Friesem, E. Hasman. Holographic axicon: High resolution and long focal depth[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(7): 523~525

4 J. Sochacki, S. Bará, Z. Jaroszewicz *et al.*. Phase retardation of the uniform-intensity axilens[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(1): 7~9

5 Z. Jaroszewicz, J. Sochacki, A. Kolodziejczyk *et al.*. Apodized annular-aperture logarithmic axicon: smoothness and uniformity of intensity distributions[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(22): 1893~1895

6 Z. Jaroszewicz, J. Morales. Lens axicons; systems composed of a diverging aberrated lens and a perfect converging lens[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(9): 2383~2390

7 A. Burvall, K. Kolacz, Z. Jaroszewicz *et al.*. Simple lens axicon [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(25): 4838~4844

8 Shenglin Wen, Yongkang Guo, Jingqin Su *et al.*. Design and optimization of an axicon used for plasma diagnostic system in ICF drivers[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6290**: 62900U-1~62900U-7



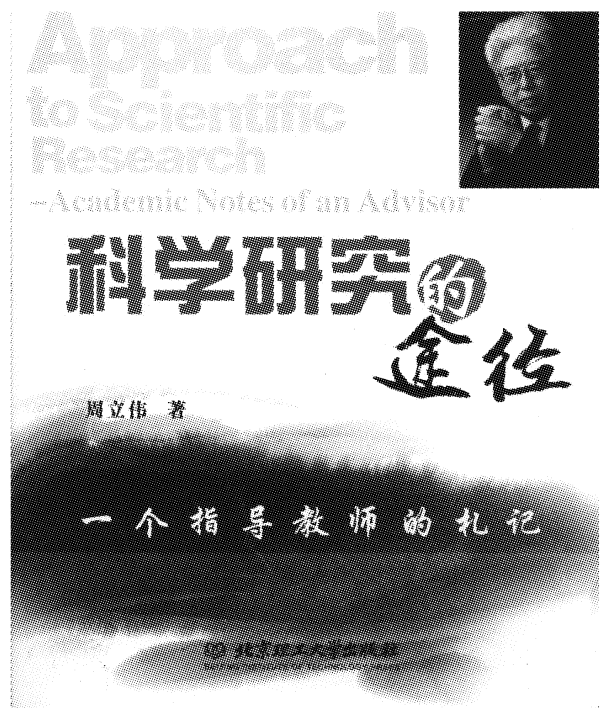
• 新书推荐

《科学研究的途径》——一个指导老师的札记

本书是作者作为一个指导教师在近 30 年的研究生指导实践中写下的有关研究生学习和科学方法的札记。诸凡青年学人,特别是研究生在学习与科学研究过程中的科学探索,为人与治学,以及论文写作方法等,著者都以亲身的经历阐述自己的认识和体会。其中很多内容都是应青年研究生的要求撰写的,非常符合青年学人的实际需要,能帮助初涉科研的青年学人较快地熟悉科研过程及方法,及早多出成果,出好成果。本书作为有志于从事科学研究的理工科大学生、研究生、青年教师和青年科技人员的一本参考书,将对青年学人成长为学者起到辅助作用,使他们在从事科学研究时少走些弯路。同时,它也是研究生指导教师交流指导心得的一个平台。另外,本书实际上也是一本论述科学方法的科普读物。

作者简介 周立伟,电子光学和光电子成像专家。北京理工大学首席专家、教授、博士生导师;中国工程院院士,俄罗斯联邦工程科学院外籍院士。长期在宽束电子光学、光电子成像领域从事教学与科研工作,研究成果曾多次获部和国家科技进步奖励。

本书由北京理工大学出版社出版,16 开,定价:25 元。



联系人:郑京华
 地址:北京理工大学出版社人文社科事业部
 邮编:100081
 手机:13810624594
 办公电话:010-68945381
 电子邮件:caizhengjinghua@126.com