

文章编号: 0258-7025(2008)10-1481-04

# 超短脉冲激光系统中空间滤波器透镜的优化设计

周凯南 朱启华 王晓东 郭仪 孙立 邓武 黄小军 谢旭东 王逍

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 在超短脉冲激光系统中, 像差的存在会使焦斑能量集中度降低。为了克服系统中像差的影响, 提高系统最终功率密度, 分析了系统中像差的来源, 并利用光线追迹方法模拟了系统光路, 计算了全系统的像差, 提出并设计了双分离透镜作为末级空间滤波器输出透镜进行全系统像差的补偿。实验表明, 利用所设计的双分离透镜, 可以有效地补偿系统色差和球差, 使系统输出焦斑半径从未补偿前的  $8.6 \mu\text{m}$  缩小为  $5.7 \mu\text{m}$ , 而系统的聚焦功率密度提高了 8 倍, 改善了装置性能。

**关键词** 光学设计; 超短脉冲激光; 色差; 球差; 焦斑

**中图分类号** O 435.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083510.1481

## Special Design of the Lens of Spatial Filter in an Ultra-Short Laser System

Zhou Kainan Zhu Qihua Wang Xiaodong Guo Yi Sun Li Deng Wu  
Huang Xiaojun Xie Xudong Wang Xiao

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** Analysis shows that intensity of the focal spot will be decreased by the systemic optical aberration in a multi-hundred TW ultra-short laser system. In order to increase the intensity of the far-field by avoiding both axial chromatic and spherical aberrations caused by the lens as in the laser system, source of the aberrations was studied, simulation of layout was performed by ray tracing method and air-spaced doublet as the last spatial filter was specially designed to compensate those aberrations. Experimentation proves that the air-spaced doublet can diminish both axial chromatic and spherical aberration of the whole system effectively, the radius of the output focal spot decreases from  $8.6 \mu\text{m}$  to  $5.7 \mu\text{m}$ , and the intensity of the focus increases by eight times.

**Key words** optical design; ultra-short laser; chromatic aberration; spherical aberration; focal spot

## 1 引言

啁啾脉冲放大(chirped pulse amplification, CPA)技术促进了超短超强激光研究的飞速发展, 利用该技术能得到的脉冲峰值功率已达到几百太瓦(TW)甚至拍瓦(PW)的量级, 并被广泛地应用于超快 X 射线源的产生、电子加速、激光聚变、相对论等离子体物理及强场物理等领域<sup>[1~5]</sup>。但是, 在超强激光与物质相互作用的实验中, 真正起作用的最主要指标通常不是激光的峰值功率, 而是可聚焦的功率密度, 因为激光系统提高光束能量代价往往很大, 因此在功率一定的情况下, 控制光束质量, 提高激光

远场能量集中度显得尤为重要。空间滤波器在大型激光系统中是控制光束质量不可缺少的关键单元, 然而由于超短脉冲激光宽光谱的特性, 多个空间滤波器透镜会引入比较大的色差, 而透镜产生的球差也会使激光远场扩大到数倍甚至十几倍衍射极限, 这对于追求近衍射极限的激光焦斑很不利。

根据像差理论, 本文分析了中国工程物理研究院 SILEX-I 超短脉冲激光装置<sup>[6]</sup>全系统像差的主要来源, 利用商用 Zemax 软件对全系统光路进行模拟, 优化设计了最后级空间滤波器的透镜。

收稿日期: 2007-10-22; 收到修改稿日期: 2008-03-10

基金项目: 国防科技重点实验室基金(9140c6803020605)和中国工程物理研究院面上基金(20060426)资助课题。

作者简介: 周凯南(1979—), 男, 黑龙江人, 硕士研究生, 主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: zhoukn@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 朱启华(1969—), 男, 四川人, 研究员, 硕士生导师, 主要从事高功率固体激光技术研究。

E-mail: qzhu@sina.com

## 2 光路分析

实际光学系统的成像都是不完善的,像差就是光学系统成像不完善程度的描述。一般几何像差包括色差、球差、慧差、像散、场曲和畸变等,其中后四种像差都是轴外像差,在系统的整体设计上可克服离轴的因素影响,使上述像差的影响可忽略。在传统的大型高能脉冲激光系统中,因带宽比较窄,同时对焦斑的要求不高,加上对调节的可操作性和成本的考虑,空间滤波器一般采用球面单透镜作为空间滤波器窗口,但在用于超短脉冲激光系统中时,其透镜带来的色差与球差将使系统最终聚焦焦斑远大于衍射极限,对物理实验造成较大影响。

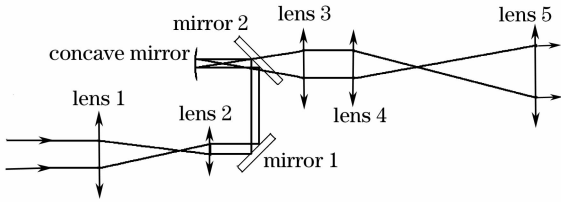


图 1 系统光路

Fig. 1 Layout of the system

在 SILEX-I 超短脉冲激光装置中,分别需要经过两级空间滤波器和一对由凹面反射镜和凸透镜组成的扩束系统,激光波长 760~840 nm,光谱半峰全

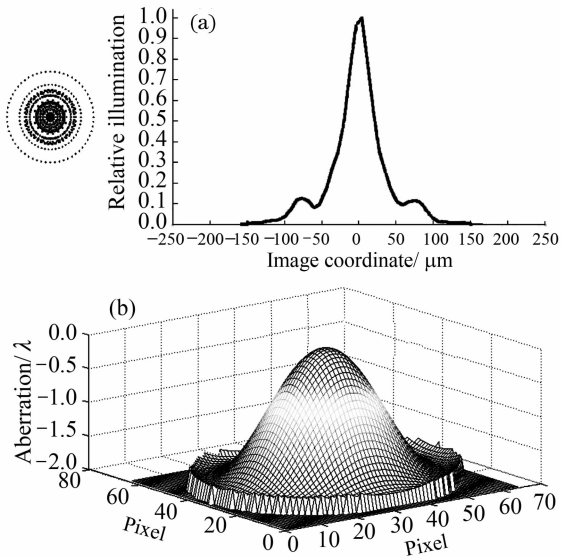


图 2 补偿像差之前的系统远场焦斑(a)和激光波前畸变(b)

Fig. 2 Far-field focal spot (a) and wave-front aberration

(b) without optimization

宽接近 50 nm。系统光路利用 Zemax 软件简化模拟如图 1 所示,反射镜 1,2 为 45°高反镜,其中凹面反射镜和凸透镜 3 构成一组扩束系统,透镜 1 和 2,透镜 4 和 5 分别组成两组空间滤波器。

在终端利用抛物面镜聚焦,聚焦后的结果如图 2 所示,其中(a)图为远场焦斑的点列图和 X 轴亮度扫描图,半径 66 μm,(b)图为激光畸变波前,可见波前的峰值(PV)达到了 1.8λ。

经过模拟计算可见,当空间滤波器采用球面单透镜时会引入很大的球差与色差,其中轴向球差将焦斑扩大到了百微米,严重影响了激光的聚焦性。而当利用设计的非球面透镜<sup>[7]</sup>消掉球差时,色差的存在仍将影响激光远场的能量集中度。利用 Zemax 软件模拟了口径为 30 mm 的激光经过厚度 10 mm、焦距 1000 mm 的理想透镜后的焦斑情况,如图 3 所示。可见 800 nm 激光形成的焦斑半径为 0.01 μm,而 760~840 nm 激光形成的焦斑半径为 24 μm。

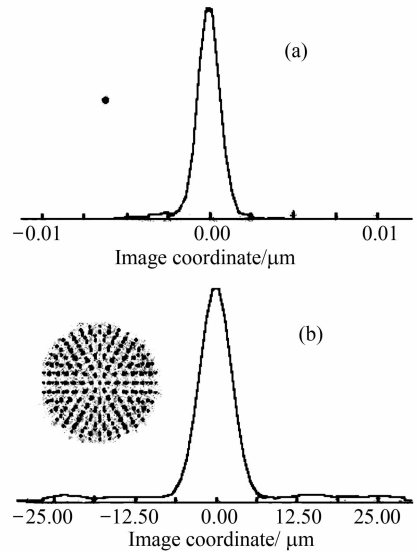


图 3 800 nm 激光(a)与 760~840 nm 激光(b)通过理想透镜后的远场焦斑

Fig. 3 Far-field focal spot of 800 nm laser (a) and 760~840 nm laser (b) passing through an aspheric lens

因此,当激光具有宽光谱特性时,色差将是光学设计上必需考虑的因素。由简单色差公式<sup>[8]</sup>,得消色差公式的约束条件

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2, \quad (1)$$

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2} = 0, \quad (2)$$

式中,  $\varphi_1, \varphi_2$  分别为两块透镜的光焦度,  $\nu_1, \nu_2$  分别为组合透镜的两块透镜的阿贝数,  $\varphi$  为组合透镜的光焦度。可见,由两块折射率相差较大的透镜组合而成的消色差透镜可很好地消除色差,同时利用组成双分离透镜的凸凹透镜特点,也可对球差进行优

化。但由于系统中有多级空间滤波器,如果都采用双分离透镜不但增加了调节难度,同时也增加了成本,所以在最后一级空间滤波器输出端采用双分离透镜来优化全系统的色差及球差。

### 3 优化原理

根据消色差约束条件,同时考虑镜子优化后的可制作性,选取的组合透镜材料分别为 K9 和 ZF3,其中 K9 材料的  $\nu_1 = 64.133$ ,而 ZF3 的  $\nu_2 = 29.52$ ,根据(1),(2)式可推出双分离透镜的光焦度表达式:

$$\varphi_1 = \frac{\nu_1}{\nu_1 - \nu_2} \varphi, \varphi_2 = \frac{\nu_2}{\nu_1 - \nu_2} \varphi$$

已知组合透镜所需焦距  $f = 2700$  mm,即  $\varphi = 1/f = 3.7 \times 10^{-4}$ ,所以易求出两个透镜焦距分别为:  $f_1 = 1/\varphi_1 = 1457.2$

mm,  $f_2 = -3165.8$  mm。为了保证双分离透镜便于安装,设定  $r_2 = r_3$ 。利用商用软件 Zemax 进行详细优化设计,最终参量设计分别为:K9 材料透镜  $r_1 = 1247.58$  mm,  $r_2 = 323.30$  mm,中心厚度 24 mm;ZF3 材料透镜  $r_1 = 323.40$  mm,  $r_2 = 526.13$  mm,中心厚度为 18 mm。两个透镜中心距 5 mm,组合焦距为 2733 mm,光束经过透镜如图 4 所示。

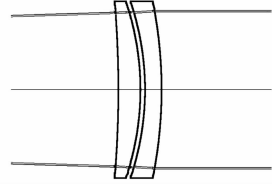


图 4 双分离透镜结构图

Fig. 4 Layout of the air-spaced doublet

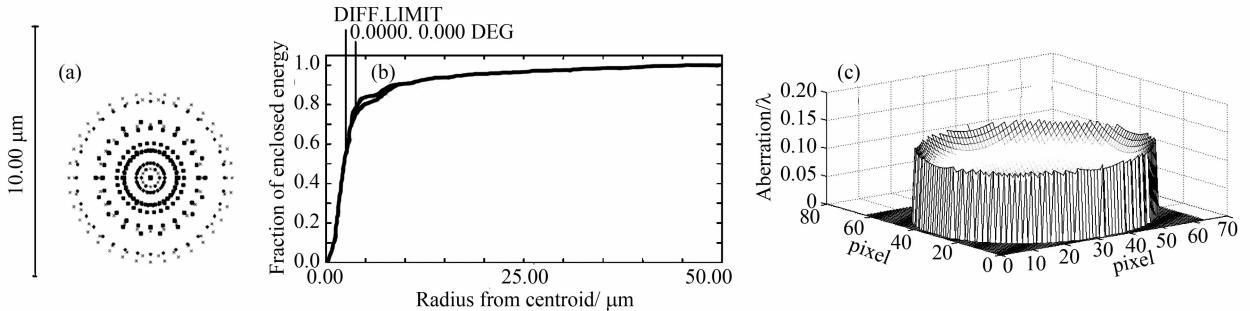


图 5 优化后激光远场焦斑(半径  $2.8 \mu\text{m}$ ) (a), 激光焦斑的能量集中度 (b) 和波前畸变 ( $0.18 \lambda$ ) (c)

Fig. 5 (a) Far-field focal spot of the laser (radius is  $2.8 \mu\text{m}$ ) (a) encircled energy (fraction) (b) and wave-front aberration ( $0.18 \lambda$ ) (c)

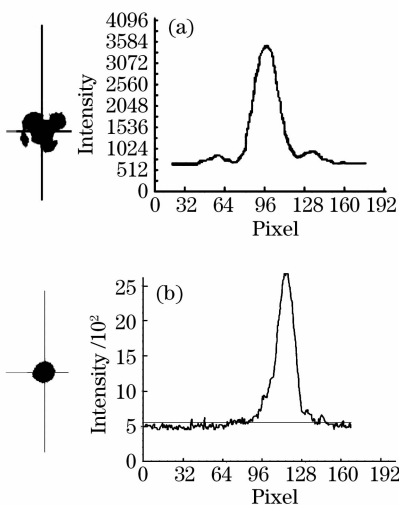


图 6 双分离透镜优化前 (a) 优化后 (b) 焦斑

Fig. 6 Focal spot before optimization (a) and after optimization (b) by using air-spaced doublet

将设计好的双分离透镜放入系统光路中,进行全系统光路模拟,此时全系统球差和数与色差和

数<sup>[9,10]</sup>分别减小为 0.001 和  $-0.0003$ ,而最终聚焦后焦斑的情况如图 5 所示。

与图 2 对比可见,经过对最后级空间滤波器输出透镜进行优化,可成功地对全系统像差进行修正,使焦斑质量得以极大地提高,其中波前 PV 值从  $1.8 \lambda$  改善为  $0.18 \lambda$ ,能量集中度从  $11 \mu\text{m}$  内能量与总能量的 13% 提升到了在  $4 \mu\text{m}$  内能量占总能量的 80% (其中没有考虑衍射的影响)。

### 4 实验验证

按照设计参量制作了双分离透镜,将其放入光路代替 SILEX-I 装置压缩器前的空间滤波器输出透镜,激光经过压缩后利用 F/4.2 抛物面聚焦镜聚焦,在测量上,使用 50 mm 成像镜头测量,使用科学级 CCD 接收图像,3 mm 光栅定标,成像放大倍数约 28 倍,最终得到优化前后的激光远场如图 6。

对比图 6(a),(b) 可见,经过优化后,激光远场对比度有了极大提高。通过分析计算得到了优化前

后焦斑大小以及能量集中度,优化前的激光远场半峰全宽为  $8.6\mu\text{m}$ (F/4.2),半峰全宽内能量占总能量 11.3%;而在相同测量装置下得到了优化后的焦斑半峰全宽为  $5.7\mu\text{m}$ ,其在半峰全宽范围内能量集中度为 44.3%,1% 范围内能量集中度达到 79%,与衍射极限情况非常接近。通过分析可见,虽然可能因为扣除测量本底时有误差,但与优化之前相比,相对功率密度提高 9 倍。

## 5 结 论

分析了大型超短脉冲激光系统中的像差主要为色差和球差,采用光线追迹的方法理论模拟了系统像差对激光系统最终功率密度的影响,并以此优化设计了末端空间滤波器输出透镜。计算表明,利用两种材料组合而成的双分离透镜可以同时补偿超短脉冲激光系统中的色差和球差。根据设计结果制作了双分离透镜,实验结果表明,双分离透镜能够有效地补偿超短脉冲激光装置全系统的色差和球差,使系统输出焦斑半径从未补偿前的  $8.6\mu\text{m}$  缩小到  $5.7\mu\text{m}$ 。

## 参 考 文 献

- 1 T. Tajima, G. Mourou. Zettawatt-exawatt lasers and their applications in ultrastrong-field physics [J]. *Phy. Rev. , ST-Accelerators and Beams*, 2002, **5** (3):031301
- 2 D. Umstadter. Review of physics and applications of relativistic

- plasmas driven by ultra-intense lasers [J]. *Phys. Plasmas*, 2001, **8** (5):1774~1785
- 3 T. Ditmire, S. Bless, G. Dyer *et al.*. Overview of future directions in high energy-density and high-field science using ultra-intense lasers [J]. *Rad. Phys. and Chem.*, 2004, **70**:535~552
- 4 Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33** (6):721~729  
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用(1)[J]. 中国激光, 2006, **33**(6):721-729.
- 5 Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33** (7):865~872  
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用(2)[J]. 中国激光, 2006, **33**(7):865~872
- 6 Hansheng Peng, Xiaojun Huang, Qihua Zhu *et al.*. 286-TW Ti:sapphire laser at CAEP [C]. *SPIE*, 2005, **5627**:1~5
- 7 Chen Jianping, Shen Lincheng. Model and control technology for machining large-diameter optical aspheric mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1705~1709  
陈建平, 沈林成. 大口径非球面镜加工建模与控制技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(12):1705~1709
- 8 Zhang Yimo. *Applied Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 1982  
张以谟. 应用光学[M]. 北京, 机械工业出版社, 1982
- 9 Yuan Xucang. *Optical Design* [M]. Beijing: Science Press, 1983.  
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 科学出版社, 1983
- 10 Zeng Jiyong, Jin Guofan, Wang Minqiang *et al.*. PWC primary aberration expression of thin lens system including diffractive optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26** (1):96~100  
曾吉勇, 金国藩, 王民强等. 含衍射光学元件的薄透镜系统初级像差的 PWC 表示[J]. 光学学报, 2006, **26**(1):96~100.