

文章编号: 0253-2239(2010)01-0142-05

用衍射器件校正高能拍瓦激光系统色差的设计研究

谢旭东 朱启华 周凯南 张 颖 黄小军

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心 等离子体物理国家级重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要 高能拍瓦激光器系统中的空间滤波器透镜的色差会影响聚焦强度。研究了用衍射器件预校正系统轴向色差的可行性及设计方法,并给出具体的设计实例。结果表明,单片衍射器件可以预补偿高能拍瓦激光系统的轴向色差,且其总光焦度为零易于使用,特征线宽为数微米。为高能拍瓦激光系统的色差校正提供了一种新的解决思路。

关键词 激光器;衍射器件;拍瓦激光系统;色差;聚焦强度

中图分类号 TN24 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0142

Design of Diffractive Optical Elements for Chromatic Aberration Correction in High-Energy Petawatt Laser System

Xie Xudong Zhu Qihua Zhou Kainan Zhang Ying Huang Xiaojun

(National Key Laboratory of Plasma Physics, Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Chromatic aberration associated with large-aperture lens in high-energy petawatt laser system affects the focused intensity. Diffractive optical element has been used to pre-correct primary axial chromatic aberration. Temporal distortion and spatial convergence of focal spot can be improved. A single diffractive chromatic corrector is designed with zero power facilitating alignment and minimal groove of several micrometers. It will serve as a new proposal for correction of chromatic aberration on high energy petawatt laser system.

Key words lasers; diffractive optical element; petawatt laser system; chromatic aberration; focused intensity

1 引 言

啁啾脉冲放大(CPA)技术在钛宝石激光器系统上能够产生几十飞秒数百太瓦的超短脉冲,但是单个脉冲的能量只有数十焦耳。快点火、新型强辐射源等研究需要上千焦耳的超短脉冲。目前,实现途径是在大口径钕玻璃激光器系统中采用啁啾脉冲放大技术。将带宽数纳米的激光种子脉冲在时间上展宽到纳秒尺度,然后注入到具有千焦耳输出能力的高能拍瓦钕玻璃激光器系统中放大。系统中要使用大口径(数十厘米)的空间滤波器来滤波、像传递和扩束。宽带激光经过空间滤波器的透镜传输后,不同频谱成分聚焦在光轴上不同位置,引起轴向色差。只有中心频谱处的激光经过滤波器后仍是平行光,其它频率成分则呈发散或会聚。透镜的口径大,通

过次数多,全系统轴向色差总量大,激光脉冲空间聚焦性能比窄带脉冲差。介质材料色散特性使其折射率随波长变化,激光脉冲在介质内传输时群速度低于相速度,其等振幅面滞后于等相位面。在透镜截面内不同半径处,激光经历群延迟不同,等振幅面在光束中心部分比边缘部分滞后,这就是脉冲群延迟畸变。它导致光束截面内不同半径处的激光能量不能同时到达透镜焦点,使得焦点处脉冲宽度被展宽。可见,在宽带激光系统内色差会引起激光焦斑时空畸变。传统的胶合透镜或分离透镜会增加激光系统介质长度^[1],在高功率运转条件下 B 积分增大,光束分裂的风险增加;而且大口径胶合(或分离)透镜会增加加工难度大、提高系统成本。而衍射器件具有与折射器件相反的色散特性,在小型折射衍射混

收稿日期: 2009-02-11; 收到修改稿日期: 2009-04-15

基金项目: 国家 863 计划(2009AA8044002)资助课题。

作者简介: 谢旭东(1976—),男,硕士,助理研究员,主要从事超短脉冲产生、放大方面的研究。

E-mail: xiexudong76@yahoo.com.cn

合系统中能够很好地校正色差^[2~5]。本文利用衍射器件的色散特性,研究利用单片小口径衍射器件预校正高能拍瓦激光系统色差的可行性及器件的设计方法。针对星光高能拍瓦(XGPW)激光系统给出零光焦度衍射器件校正方法的具体设计实例,结果表明单片衍射器件可以预补偿拍瓦系统的色差,其特征尺寸为数微米具备可制造性,并具有直接插入光路,不改变光路结构的优点。

2 理论分析

介质折射率(n)对波长一阶偏导决定了相速度与群速度不同,在介质内激光脉冲能量传输滞后于相位。激光脉冲经单个折射透镜聚焦后,在光束截面内不同半径处脉冲群延迟不同,脉冲能量不会同时到达焦点,其效果相当于将脉冲宽度展宽。将光束截面内边缘处的群延迟与轴上群延迟之差定义为脉冲群延迟畸变,它能表征焦点处激光脉冲能量的时域集中度。Z. Bor^[6]证明单个折射透镜引起的脉

冲群延迟畸变 $\Delta T(r)$ 可以表示为

$$\Delta T(r) = \frac{\lambda r^2}{2cf(n-1)} \frac{dn}{d\lambda} = -\frac{\lambda r^2}{2cf^2} \frac{df}{d\lambda}, \quad (1)$$

式中 c 为真空中的光速, f 为透镜焦距, λ 为中心波长, r 为光线与光轴的距离(如图 1 所示)。在拍瓦激光系统中多级空间滤波器有 m 个透镜,总的群延迟畸变为

$$\Delta T = \sum_{i=1}^m -\frac{\lambda r_i^2}{2cf_i^2} \frac{df_i}{d\lambda}. \quad (2)$$

可见光束口径越大,通过透镜的次数越多,色差累积就越严重。

在傍轴条件下,设衍射透镜具有抛物面型闪耀分布,衍射环带的边缘 r_n 定义为

$$r_n^2 = 2\lambda f n. \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

衍射透镜的相位函数为^[7]

$$\phi(r) = 2\pi \left(n - \frac{r^2}{2\lambda f} \right). \quad r_{n-1} \leq r < r_n \quad (4)$$

根据 $\Delta T = d\phi/d\omega$ 可得衍射透镜的群延迟畸变。

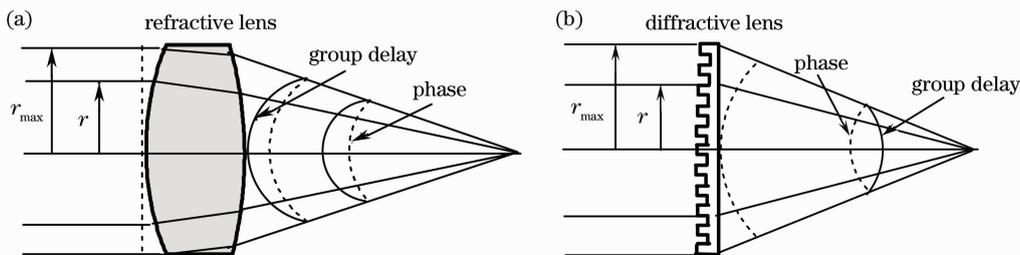


图 1 由折射透镜(a)和衍射透镜(b)引起的脉冲群延迟畸变

Fig. 1 Group delay distortion caused by (a) refractive lens and (b) diffractive lens respectively

折射透镜在透明波段具有正色散,而衍射透镜 $df/d\lambda = -f/\lambda$ 为负,具有负色散,且其色散量比折射透镜大得多,因此可以用衍射透镜预补偿折射透镜系统的色差。衍射透镜的最小衍射环带尺寸决定着器件的加工难度,太小的环带甚至无法加工制造。根据(3)式衍射环带边缘的定义可得衍射环带的最小宽度:

$$\Delta r_{\min} = 2\lambda f / 2r_{\max} = 2\lambda F, \quad (5)$$

式中 r_{\max} 为衍射透镜的最外环半径, $F = f/2r_{\max}$ 。(5)式说明衍射透镜的最小环带与其 F 数成正比,较大的 F 数可以获得较宽的衍射环带,从而降低加工难度。

若衍射透镜总共有 N 个衍射环带,将 $r_{\max}^2 = 2N\lambda f$ 代入(1)式,可得其群延迟畸变:

$$\Delta T_{\text{diff}} = \frac{r_{\max}^2}{2cf} = \frac{r_{\max}}{4cF} = N \frac{\lambda}{c}. \quad (6)$$

该式的物理意义是衍射透镜相邻环带最大相位

延迟为 2π , 相应的光程差为 λ , 每一衍射环带对群延迟畸变的贡献量 λ/c (具有时间的量纲)。(6)式说明衍射透镜的衍射环带越多其提供的群延迟畸变量越大。对特定的激光系统,色差引起的脉冲群延迟畸变量保持不变,即衍射透镜的衍射环带总数基本给定。合适的工作口径与较大的 F 数可以保证其最小衍射环带具有足够的宽度,从而可加工。

3 光学设计

针对星光高能拍瓦(XGPW)激光系统进行光学设计,其主放大级光路结构如图 2 所示,包括两组钕玻璃放大器(14 片钕玻璃片按布儒斯特角放置, $480 \text{ mm} \times 238 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$),腔内空间滤波器 SF1 由透镜 L1 (口径 $225 \text{ mm} \times 225 \text{ mm}$) 和 L2 ($255 \text{ mm} \times 255 \text{ mm}$) 组成,空间滤波器 SF2 由透镜 L3 ($255 \text{ mm} \times 255 \text{ mm}$) 和 L4 ($225 \text{ mm} \times 225 \text{ mm}$) 组

成。种子激光经 L0 透镜聚焦后注入到 L3 的焦平面离轴小孔(离轴量 22.5 mm)、经 L3、L2、L1 到 CM(高反射镜)完成第一程放大;经 CM 反射沿 L1、

L2、L3 到 L5 完成第二程放大;再经 L6 注入完成三、四程放大,从 L4 输出。BM3、BM4、BM5 构成光束反转器,将光束近场和偏振态旋转 90°。

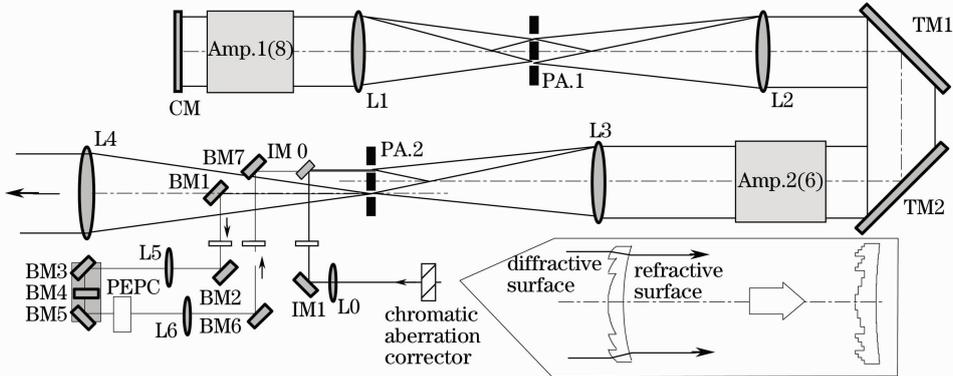


图 2 XGPW 主放大级光路结构及色差校正器工作位置

Fig. 2 Optical schematic of main amplification stage of XGPW laser system and location of chromatic aberration corrector

注入放大器的种子光束口径 40 mm×40 mm(能量小于 1 J),输出光束口径 190 mm×190 mm。出于避鬼点的需要,主放系统的透镜除 L1 两面曲率半径作适当优化,其余透镜均选择最小球差透镜构型。透镜没有倾斜放置,透镜焦距很长(接近 10 m),焦平面小孔离轴量很小,所以即便是四程离轴设计,主放大系统的单色像差仍能控制在一个相当小的尺度。透镜材料采用 K9 玻璃,不考虑离轴量时,由滤波器透镜材料色散造成的脉冲群延迟畸变 $\Delta T = -1018$ fs,光栅压缩器不能消除这种畸变。对输出数百飞秒激光脉冲的目标,激光器系统的色差对输出激光聚焦强度的影响很严重。国际上同类在研装置报道色差造成焦平面上能量密度降低约 5 倍,傅里叶极限脉冲展宽 1.5,综合效果使焦面强度降低 8 倍^[8,9]。

色差校正器件的基质材料为 BK7 玻璃,工作位置选择在放大器的注入端(如图 2 所示),工作通量远小于材料的损伤阈值。衍射器件正入射工作,第一面为正光焦度衍射面,第二面为负光焦度折射面,器件总光焦度为零,等效于一个 1:1 扩束的伽利略望远镜。便于插入到放大器注入端的平行光束中,不影响光路的准直调试。有效口径为 62 mm(基片直径为 80 mm),比放大器空间滤波器透镜的口径小得多。根据(5)式、(6)式获得衍射器件的初始设计参数:中心波长 1053 nm,工作带宽 8 nm,光谱平顶分布。衍射面焦距 $f_{\text{diff}} = 1283$ mm,折射面曲率半径 650.2 mm。衍射器件需要提供群延迟畸变补偿量 $\Delta T_{\text{diff}} = 1018$ fs。对于实际补偿情况,需要在光线追迹软件 Zemax 中进行精确计算,以初始参数为参考点,对衍射器件优化设计。

衍射面通过表面浮雕结构改变传输波前的相位,在 Zemax 软件中用二元光学面实现,不对波长尺度的浮雕结构建模,而是通过局部的相位延迟来改变光线传输方向。二元光学面的相位函数用多项式表示为

$$\Phi = M \sum_{i=1}^N A_i \rho^{2i}, \quad (7)$$

式中 M 为衍射级次, ρ 为孔径的归一化半径, A_i 为 ρ^2 的偶次幂系数。 ρ^2 对应初级轴向色差, ρ^4 对应三阶球差。激光器工作带宽 8 nm,光谱平顶分布。

4 结果与分析

用二元光学面的 ρ^2 项校正全系统的色差,扇形像差曲线如图 3 所示,其中水平轴为归一化孔径。图 3(a)是激光器系统中未采用衍射器件校正色差时,8 nm 平顶光谱的中心光谱与边谱光线在主放系统的光线像差,此时中心光谱的光线存在三阶球差,而边谱的光线还有离焦,激光器系统色差导致使得三条像差曲线严重分离。采用衍射器件校正轴向色差后,从图 3(b)可见三条谱线的像差曲线基本上重合到一起,说明激光器系统中的初级色差基本被校正。通过 ρ^4 或者用非球面校正残余三阶球差之后,系统的残余像差已经相当小[如图 3(c)所示]。

前面的像差分析说明衍射器件基本校正了 XGPW 主放大系统的色差,但是对于短脉冲的群延迟畸变补偿还不能给出直观地说明。在 Zemax 系统环境中默认光源是连续光,它不能直接处理脉冲光源的时间传输特性,如由介质材料一阶色散引起的脉冲传输延迟、二阶色散引起的脉冲展宽等。

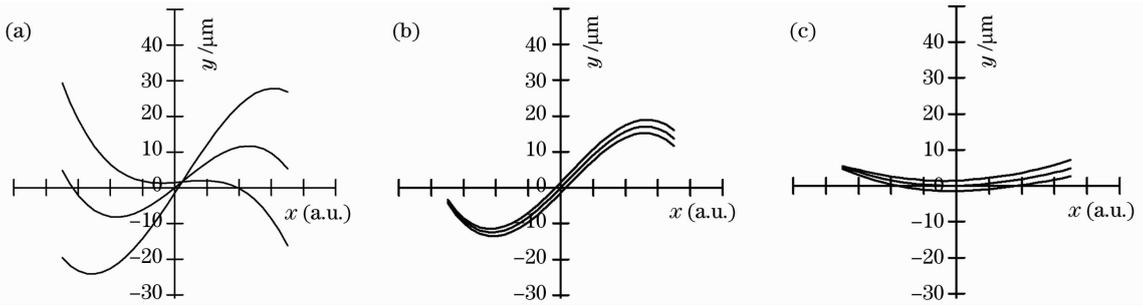


图3 光线追迹分析光线像差曲线。(a)未校正色差;(b)衍射器件校正初级轴向色差;(c)校正残余三阶球差

Fig. 3 Ray aberration by ray tracing with Zemax. (a) without correction; (b) axial chromatic aberration correction by diffractive optical element; (c) correction of residual third-order spherical aberration

为了精确计算光学系统的脉冲群延迟畸变以及衍射器件校正色差之后对脉冲群延迟畸变的补偿效果,利用 Zemax 软件的编程语言作二次开发,使用其强大的光线追迹功能,编写用户宏命令,计算不同波长的光线通过光学系统后的光程 $L(\rho, \lambda)$, 它与波长 λ 和孔径 ρ 有关。根据脉冲群延迟的定义 $G_D = d\phi/d\omega$, 其中 $\phi = 2\pi L(\rho, \lambda)/\lambda$ 是相位。相位对角频率 ω 的一阶偏导就是载波频率 ω 的光脉冲通过该系统后的脉冲群延迟 $G_D(\rho)$, 它是光束孔径的函数,表示脉冲传输时间延迟。

XGPW 主放大系统输出光束脉冲群延迟线沿光束径向分布的计算结果比较如图 4 所示。曲线 a 表示激光器系统色差造成的脉冲群延迟,沿光束边缘传输的脉冲比沿光轴传输的脉冲提前约 1.14 ps [对应的光线像差是图 3(a)],从图 1 可知这是因为正透镜系统中心厚度比边缘厚,介质材料一阶色散积累更多的结果。畸变随光束口径的增加呈平方律增长,曲线 e 是用二阶多项式对其拟和的结果,与(1)式的推导结果吻合。群延迟面不完全对称,源于主放大光路的离轴四程构型。曲线 b 是色差校正器件的群延迟(为了便于与曲线 a 比较将其值乘-1),与折射透镜相反,沿光束边缘传输的脉冲比沿光轴传输的脉冲滞后,正是这一特性提供了补偿脉冲延迟畸变的能力。曲线 c 是用衍射器件(DOE)校正系统色差[对应的光线像差是图 3(b)],残余三阶球差,此时光束径向截面内脉冲群延迟分布变得平坦,最大畸变量由 1.14 ps 减小到-0.12 ps,说明通过衍射器件校正系统色差能够较好地补偿脉冲群延迟畸变。曲线 d 表示同时校正色差与三阶球差[对应的光线像差是图 3(c)]。综上所述,通过对校正前后脉冲群延迟畸变的光线追迹法计算,证明衍射器件确实极大地改善了 XGPW 主放系统输出光束的脉冲群延迟畸变。与激光器系统输出 0.5 ps 的

目标相比,残余脉冲延迟畸变已经相当小,也就是说,在光束截面内脉冲能量传输延迟基本一致,焦点处的时间特性将获得明显改善。

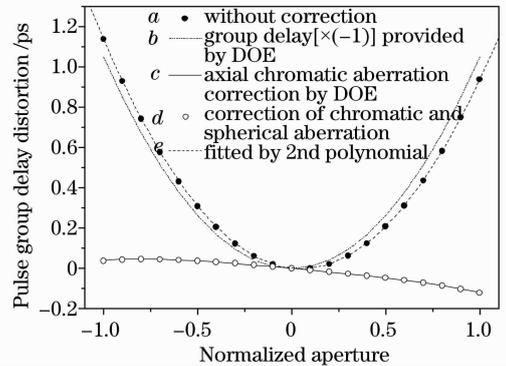


图4 用 Zemax 追迹计算脉冲群延迟畸变

Fig. 4 Pulse group delay distortion traced by Zemax

优化后的衍射器件为平凹构型,在平面端为 62 mm 区域内刻蚀衍射浮雕结构,最小衍射环带宽度 44.9 μm 。若将其相位分布用 8 级台阶量化近似,最小台阶宽度仍有 5.6 μm 。当前微光学加工技术完全具备制造该器件的能力^[10]。

5 结 论

研究了单片衍射器件补偿高能拍瓦激光系统轴向色差的潜力、设计方法。设计结果表明采用单片衍射器件能够校正高能拍瓦激光器系统空间滤波器透镜引起的轴向色差。而零光焦度的器件可以直接插入激光器系统的平行光路中,易于调试。通过解析设计获得器件的初始参数,然后经过全系统优化设计获得器件最终优化参数,表面浮雕结构最小特征尺寸为几十微米,经过 8~16 级台阶量化近似处理后最小特征仍有数微米,当前微光学加工技术具有制造该器件的能力。将衍射器件应用于一个新的领域,并为高能拍瓦激光领域的色差校正提供了一种新的解决思路。

参 考 文 献

- 1 Xia Lan, Qian Liejia, Wang Shiji. Study and design of spatial filter in high power femtosecond laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(1): 1~4
夏 兰, 钱列加, 王世绩. 高能飞秒激光系统中空间滤波器的研究和设计[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(1): 1~4
- 2 Sun Qiang, Lu Zhenwu, Wang Zhaoqi. The dual band design of harmonic diffractive-refractive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 830~833
孙 强, 卢振武, 王肇圻. 谐衍射/折射双波段系统设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 830~833
- 3 Jin Guofan. Binary optics[J]. *Physics and Engineering*, 2000, **10**(5): 2~16
金国藩. 二元光学[J]. *物理与工程*, 2000, **10**(5): 2~16
- 4 Wang Qian, Xu Shiwen. Athermal design for visible diffractive-refractive hybrid optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1595~1598
王 茜, 许士文. 可见光折/衍射混合光学系统消热差设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12): 1595~1598
- 5 Lou Di, Bai Jian, Hou Xiyun *et al.*. Design and application of binary hybrid optical system used in the visible spectra[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(1): 45~49
娄 迪, 白 剑, 侯西云 等. 用于可见波段的二元光学混合光学系统的设计与应用[J]. *光电子 • 激光*, 2006, **17**(1): 45~49
- 6 Z. Bor. Distortion of femtosecond laser pulses in lenses[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(2): 119~121
- 7 T. R. M. Sales, G. M. Morris. Diffractive-refractive behavior of kinoform lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1): 253~257
- 8 H. M. Heuck, P. Neumayer, T. Kuhl *et al.*. Chromatic aberration in petawatt-class lasers[J]. *Appl. Phys. B Lasers*, 2006, **84**(3): 421~428
- 9 J. Neauport, N. Blanchot, C. Rouyer *et al.*. Chromatism compensation of the PETAL multipetawatt high-energy laser[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(9): 1568~1574
- 10 Sun Yanjun, Chen Yu, Cao Ziwei *et al.*. Design and fabrication of binary optical element photolithography mask [J]. *J. Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2007, **30**(4): 40~43
孙艳军, 陈 宇, 曹子维 等. 二元光学器件光刻掩模的设计与制作[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2007, **30**(4): 40~43