

基于变焦像传递的飞秒拍瓦激光系统色差补偿

崔自若^{1,2}, 康俊^{1*}, 谢兴龙¹, 高奇¹, 朱坪¹, 郭爱林¹, 朱海东¹, 杨庆伟¹, 孙美智¹,
杨鹏千¹, 欧阳小平¹, 张志祥¹, 梁潇^{1,2}, 杨顺华^{1,2}, 张诚^{1,2}, 张栋俊^{1,2}, 朱健强^{1**}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 高功率超短脉冲激光系统中,空间滤波器透射元件引入的色差会影响系统的聚焦功率密度。针对这一问题,提出一种具备动态调节能力的色差预补偿方案。该方案由正负透镜和反射系统构成共焦像传递系统,能够实现全系统色差的动态精确补偿。基于该方案为神光-II 5 PW(SG-II 5 PW)激光系统设计并搭建了色差预补偿光路。实验结果表明,通过精密调节该单元内部透镜间距能够精确补偿全系统的色差,显著提升系统峰值功率密度。经过色差补偿后,在 SG-II 5 PW 系统开展质子加速实验,获得了超过 16 MeV 的质子产额。

关键词 激光光学; 高功率超短脉冲激光; 宽带激光; 空间滤波器; 色差; 传输时间延迟

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0905001

Compensation for Chromatic Aberration in Femtosecond Petawatt Laser Systems Based on Zoom Image Transfer

Cui Ziruo^{1,2}, Kang Jun^{1*}, Xie Xinglong¹, Gao Qi¹, Zhu Ping¹, Guo Ailin¹,
Zhu Haidong¹, Yang Qingwei¹, Sun Meizhi¹, Yang Pengqian¹, Ouyang Xiaoping¹,
Zhang Zhixiang¹, Liang Xiao^{1,2}, Yang Shunhua^{1,2}, Zhang Cheng^{1,2}, Zhang Dongjun^{1,2},
Zhu Jianqiang^{1**}

¹Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China

Abstract A chromatic aberration pre-compensation scheme with dynamic adjustment ability is proposed to address the problem that chromatic aberration introduced by transmission-based spatial filters in ultrashort high-power laser systems strongly affects the focused intensity. In the pre-compensation scheme, the confocal transfer system comprises of a group of concave lenses and a reflecting system. The proposed scheme can realize dynamic precise compensation for chromatic aberration in the total system. Based on the proposed scheme, an optical path of chromatic aberration compensation is designed and established for the Shen-Guang-II 5 PW (SG-II 5 PW) laser system. The experimental results verify that chromatic aberration in the laser system can be fully corrected by accurately adjusting the pre-compensator, and the peak power density is improved significantly. A proton energy greater than 16 MeV is obtained in the proton acceleration experiment with the SG-II 5 PW laser system after chromatic aberration compensation.

Key words laser optics; ultrashort high-power pulse laser; broadband laser; spatial filters; chromatic aberration; propagation time delay

OCIS codes 140.3538; 320.7090; 080.3620

收稿日期: 2019-03-26; 修回日期: 2019-04-22; 录用日期: 2019-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(11304332,11704392,61705245)

* E-mail: kangjun@siom.ac.cn; ** E-mail: jqzhu@mail.shenc.ac.cn

1 引言

近年来,随着超短脉冲激光技术的迅猛发展,激光系统的规模越来越大,峰值功率密度也越来越高。目前,各国争相研制拍瓦级乃至十拍瓦级的激光系统^[1-4]。超短超强激光技术的蓬勃发展极大推动了物理、化学、生物、材料等学科的发展,新的研究成果与日俱增^[5-8]。在高功率超短脉冲激光装置中,通常采用由前后两块正透镜共焦排列组成的空间滤波器将激光脉冲逐级扩束,一方面避免光学损伤,另一方面滤除高频光谱噪声并有效实现像传递,提高光束质量^[9]。由于透镜系统的材料色散,不同波长激光出射角度不同,当不同波长的激光会聚到焦平面时具有不同的焦距,产生轴向色差,造成焦斑变大^[10];由于透镜中心厚、边缘薄,经过透镜不同径向位置的激光脉冲有着不同的脉冲时间延迟^[11]。高功率超短脉冲激光系统的光束口径通常可达几十厘米,当宽带激光在脉冲经过空间滤波系统逐级扩束之后,色差量逐级累积,倘若不经过补偿,全系统累积的色差将使激光终端聚焦性能产生时空畸变,严重降低系统聚焦性能^[12-16]。传统的色差补偿方法主要包括全反射扩束系统,使用消色差透镜组代替单透镜以及引入系统色差补偿单元(包括利用衍射器件、负透镜与球面反射镜组合、Offner 结构)等,这些方法已经成功地应用在国内高功率激光系统中^[17-20]。全反射扩束系统能够避免色差的产生,但其成本较高且对系统光路异常敏感;胶合消色差透镜组加工困难且容易引入高阶色散,从而降低了系统性能;此外,上述文献报道中诸多色差补偿方法均不具备动态调节色差补偿量的功能,而对于具体激光装置而言,在实际应用中往往需要动态调节最优化自由度用以补偿理论设计与实际使用中的偏差。利用目前的补偿方法往往难以精确补偿全系统的色差。

本文提出了一种具备动态调节补偿量的色差预补偿方案,该装置由正透镜、负透镜和反射镜组成共焦像传递系统,通过调节正负透镜之间相对距离实现色差的连续、动态控制。基于神光-II 5 PW(SG-II 5 PW)激光系统的实际参量,设计加工了色差预补偿单元并在系统中进行实验验证。实验结果表明,通过调节色差预补偿单元能够实现全系统色差的精确补偿,显著提升系统的聚焦功率密度。该方案具有成本低、结构简单、体积小、调节灵活,以及对近场光束质量与原有系统设计影响小等优点,可以广泛应用于高功率超短脉冲激光系统中,实

现全系统的色差精确补偿。

2 色差动态补偿方案设计

Bor^[13]和 Heuck 等^[14]对超短脉冲激光系统的色差开展了深入研究,根据 Bor 的理论,级联空间滤波器的传输时间延迟(PTD)可以表示为^[13]

$$\Delta T_{\text{SF}}(\lambda, r) = \sum_{i=1}^N \Delta T_{\text{lens}}(\lambda, r) = \sum_{i=1}^N \frac{-r_i^2}{2cf_i[n_i(\lambda) - 1]} \left(-\lambda \frac{dn_i}{d\lambda} \right), \quad (1)$$

式中: ΔT_{SF} 和 ΔT_{lens} 分别为由空间滤波器和透镜引入的 PTD; i 为透镜编号; c 为真空中光速; f_i 为空间滤波器各透镜的焦距; n_i 为各透镜的折射率; N 为透镜的个数; λ 为中心波长; r_i 为光线与光轴的距离。由(1)式可知,光束口径越大,通过透镜次数越多,PTD 累积量越大。

尽管高功率超短脉冲激光系统的色差为稳定值,但由于材料加工及系统光路的调节误差,通过植入固定色差量的补偿单元进行系统色差补偿时往往难以实现精确补偿。为了解决现有补偿装置的不足,实现色差的连续动态调节,提出了一种基于正负透镜与反射镜组成的色差预补偿单元,其结构如图 1 所示。入射激光经过棱镜反射后,依次透射经过 1/4 波片(P1)、正透镜(L1)、负透镜组(L2、L3)、反射镜(M1),被 M1 反射后光束沿原路返回至分光棱镜,垂直透射 1/4 波片(P2),被平面反射镜(M2)反射后沿原路返回,再次经 P2 透射后被分光棱镜反射。其中 L1 与 L2、L3、M1 组成共焦像传递系统,焦点处由真空管道封装避免空气击穿。

由图 1 可知,该方案的色差连续动态调节能力可以通过改变正负透镜及反射镜之间的相对距离(Z_0 、 Z_1 、 Z_2 、 Z_3)实现,其色差动态补偿范围由正负透镜焦距、通光口径以及球面反射镜(M1)的有效口径决定。为了定量阐明该装置的色差动态补偿能力,假设该方案中的所有透镜(L1、L2、L3)均由 K9 玻璃制成;入射光中心波长为 808 nm,光束口径为 23 mm;正透镜(L1)的焦距、通光口径分别为 196 mm 和 30 mm;负透镜(L2、L3)的焦距和通光口径分别为 -391.5 mm 和 100 mm;球面反射镜(M1)的焦距和通光口径分别为 -175 mm 和 220 mm。基于上述参数,可以利用光线追迹法求得光束通过各透镜(L1、L2、L3)的光束口径,并利用(1)式计算该装置引入的 PTD。图 2 为该色差预补偿方案的动态补偿范围。

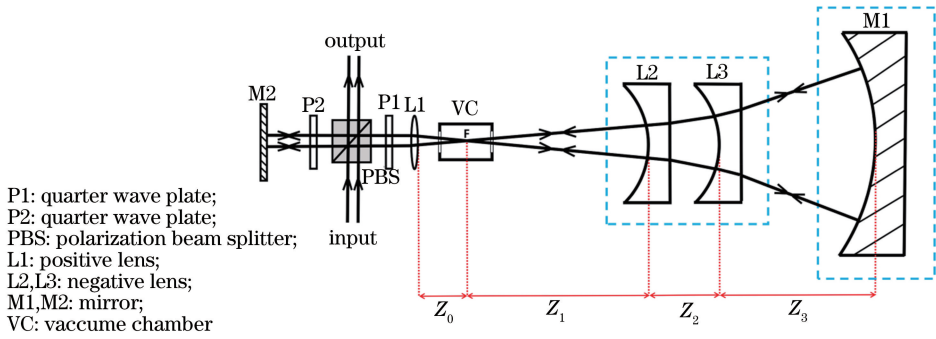


图 1 色差预补偿单元示意图

Fig. 1 Schematic of chromatic aberration pre-compensation scheme

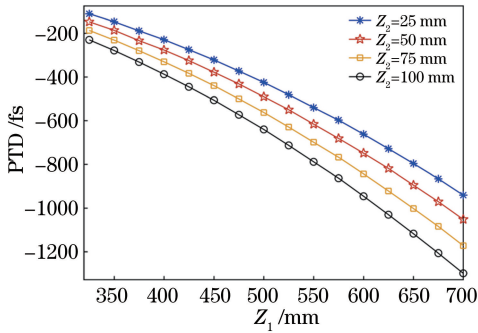


图 2 色差动态补偿效果

Fig. 2 Dynamic compensation effect of chromatic aberration

如图 2 所示,通过连续调节 Z_1 能够有效改变经过 L2、L3 的透射光束口径,从而连续控制该装置引入的 PTD。该补偿方案的色差补偿量主要由 Z_1 决定,当 Z_1 在 350~700 mm 范围内变化时,该预补偿单元引入的 PTD 能够实现在 150 fs~1.3 ps 范围内的连续、动态调节。此外,改变 Z_2 也可小范围调节 PTD,从而满足精确控制色差补偿量的要求。需指出的是,为了保证出射光与入射光波前一致,L3 与 M1 之间的距离(Z_3)需要随着 Z_1 、 Z_2 的变化作相应的调节。此外,该装置在补偿 PTD 的同时,由于材料色散会不可避免地引起脉宽展宽(在光束截面内均匀分布),故需要在系统脉宽压缩过程中对色散进行精密补偿。

3 结果与分析

为了验证本文提出的色差预补偿装置的补偿效果,为 SG-II 5 PW 激光系统设计搭建了色差补偿单元。SG-II 5 PW 超短脉冲激光系统为飞秒级拍瓦激光器,包含三级光学参量啁啾脉冲放大(OPCPA)放大系统,旨在输出脉宽为 30 fs、能量为 150 J 的飞秒激光脉冲^[21]。该系统通过六级级联空间滤波器进行扩束,将信号光口径逐级扩束到 290 mm×

290 mm。系统累计的 PTD 约为 780 fs,离焦量为 490 mm。综合考量色差补偿效果与材料成本,将色差补偿单元放置于系统第四级空间滤波器(SF3)的入瞳处。色差补偿单元实验光路如图 3 所示。

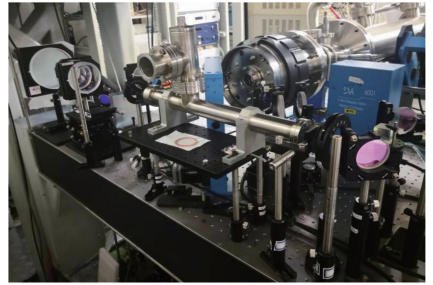


图 3 SG-II 5 PW 系统色差补偿光路

Fig. 3 Optical path of chromatic aberration compensation in SG-II 5 PW laser system

为了精确补偿 SG-II 5 PW 系统色差,利用光线追迹法建立全系统模型,根据通过透镜 L1、L2、L3 的光束口径定量计算系统残余 PTD 的取值范围。方便起见,将系统残余 PTD 控制在 ± 150 fs 范围内;根据残余 PTD 的取值范围可以计算出 Z_1 的值域(凹透镜间距 Z_2 分别取定值 25, 50, 75 mm),残余 PTD 与 Z_1 的关系如图 4(a) 所示。根据残余 PTD 的取值范围(± 150 fs)可以确定 Z_1 与 Z_3 的取值范围以及对应关系。根据图 4(a) 的计算结果,可以将 Z_1 的取值范围界定在 550~680 mm 之间,并可由此确定 Z_3 的取值范围。如图 4(b) 所示, Z_1 在 550~680 mm 范围内取值时,PTD、 Z_3 随 Z_1 的变化近似呈线性关系,根据这一特点,可以根据系统实际需要精确控制 Z_1 的值,并由此精确调节 Z_3 的取值。图 4(c) 描述了残余 PTD 对系统焦斑的影响,可以看出,残余 PTD 的绝对值越小,系统焦斑越接近理想焦斑。

SG-II 5 PW 系统的色差补偿效果通过在终端靶室内测量靶点聚焦焦斑的尺寸加以验证。将补偿

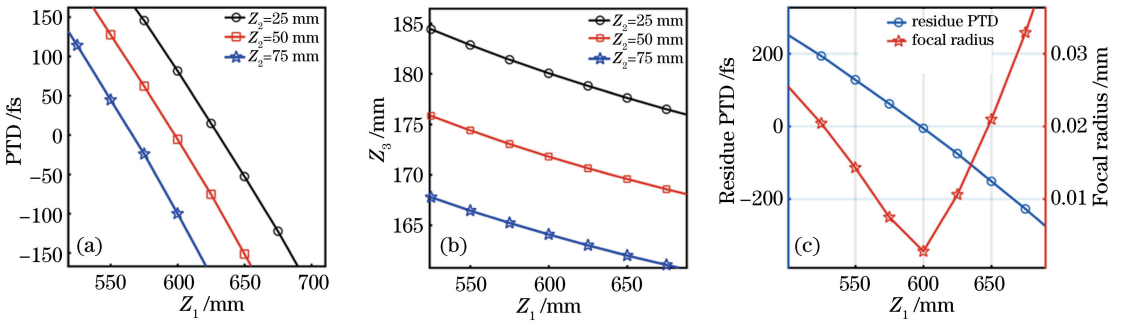


图4 系统残余PTD与 Z_1 、 Z_2 的关系(残余PTD在 ± 150 fs范围内; Z_2 分别取25,50,75 mm)。

(a)残余PTD与 Z_1 的关系;(b) Z_3 与 Z_1 的对应关系;(c)残余PTD对系统焦斑的影响

Fig. 4 Relationship among residual PTD, Z_1 , and Z_2 (residual PTD is within ± 150 fs, and Z_2 is 25, 50, and 75 mm, respectively). (a) Relationship between residual PTD and Z_1 ; (b) relationship between Z_3 and Z_1 ; (c) relationship between residual PTD and focal diameter

单元中的正负透镜与反射镜之间的相对距离调节到图4所示的理论设计值($Z_2 = 50$ mm、 $Z_1 = 605$ mm、Residue PTD为0)。为了优化聚焦焦斑,采用图4所示的方法精密调节色差补偿单元中正负透镜之间的相对距离(Z_1 、 Z_2),利用科学CCD测量靶点处焦斑的强度信息,并以此为依据计算相应的焦斑能量集中度。其结果如图5所示。

如图5所示,精密调节 Z_1 、 Z_2 的长度能够显著改善焦斑的能量集中度,焦斑60%的能量集中度对应的焦斑尺寸从理论设计位置的 $35.2 \mu\text{m}$ 缩减到 $17.6 \mu\text{m}$;焦斑面积缩小为补偿前焦斑面积的1/20。经过优化后的聚焦焦斑与经过色差补偿前的聚焦焦斑如图6所示。

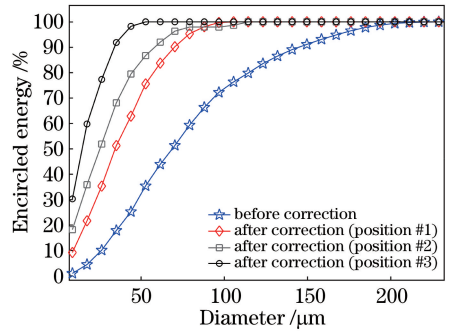


图5 色差补偿前后SG-II 5 PW系统终端焦斑能量集中度对比

Fig. 5 Comparison of encircled energy of focal spot before and after chromatic aberration compensation

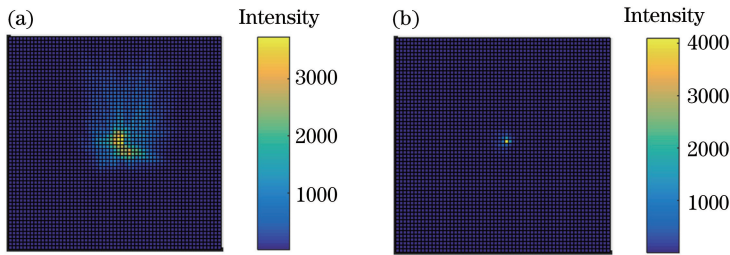


图6 经过色差补偿前后系统终端靶点焦斑。(a)补偿前;(b)补偿后

Fig. 6 Focal spot of system terminal target before and after applying pre-compensator.

(a) Before applying pre-compensator; (b) after applying pre-compensator

如图6所示,经过色差补偿后,系统终端聚焦焦斑得到了显著改善,焦斑尺寸从补偿前的 $32 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$ 缩小至 $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ (半峰全宽)。经过补偿后,焦斑尺寸已接近衍射极限(艾里半径为 $2.23 \mu\text{m}$)。此外,该色差补偿单元在补偿色差的同时,对信号光的光谱宽度、压缩后脉宽和OPA能量放大无明显影响,从而保证聚焦功率密度的提升。

经过色差补偿后,在SG-II 5 PW系统开展质子加速实验,质子产额获得了显著提升,由补偿前的7 MeV提高到补偿后的16 MeV,由此验证了该方案在SG-II 5 PW系统的工程可实施性。

4 结论

提出了一种应用于高功率超短脉冲激光系统的

色差动态预补偿技术方案,相比传统的色差预补偿技术,该方案能够提供大动态范围内连续、精确可调的色差预补偿量;能够在小入射口径的前提下实现整个系统的色差补偿。基于该补偿方案,为 SG-II 5 PW激光系统设计并搭建了色差补偿平台。通过精密调节色差补偿单元,能够明显改善系统终端聚焦能力,显著提高系统输出峰值功率密度。经过色差补偿后,在 SG-II 5 PW系统开展质子加速实验,获得了超过 16 MeV 的质子产额,位居国际同类装置前列^[22]。该方案能够广泛应用于皮秒、飞秒高功率超短脉冲激光系统中进行全系统的色差精确补偿。

参 考 文 献

[1] Zamfir N V. Nuclear physics with 10 PW laser beams at extreme light infrastructure-nuclear physics (ELI-NP) [J]. The European Physical Journal Special Topics, 2014, 223(6): 1221-1227.

[2] Chériaux G, Giamb Bruno F, Fréneaux A, *et al.* Apollon-10P: status and implementation [C]. AIP Conference Proceedings, 2012, 1462: 78.

[3] Hernandez-Gomez C, Blake S P, Chekhlov O, *et al.* The Vulcan 10 PW project [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2010, 244(3): 032006.

[4] Lozhkarev V V, Freidman G I, Ginzburg V N, *et al.* Compact 0.56 petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD * P crystals[J]. Laser Physics Letters, 2007, 4(6): 421-427.

[5] Tabak M, Hammer J, Glinsky M E, *et al.* Ignition and high gain with ultrapowerful lasers [J]. Physics of Plasmas, 1994, 1(5): 1626-1634.

[6] Edwards M J, MacKinnon A J, Zweiback J, *et al.* Investigation of ultrafast laser-driven radiative blast waves[J]. Physical Review Letters, 2001, 87(8): 085004.

[7] Tajima T, Mourou G. Zettawatt-exawatt lasers and their applications in ultrastrong-field physics [J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2002, 5(3): 031301.

[8] Umstadter D. Review of physics and applications of relativistic plasmas driven by ultra-intense lasers[J]. Physics of Plasmas, 2001, 8(5): 1774-1785.

[9] Xia L, Qian L J, Wang S J. 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, 王世继. 高功率超短脉冲激光系统中光束传输技术研究 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15

(1): 1-4.

[10] Born M, Wolf E, Hecht E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[J]. Physics Today, 2000, 53(10): 77-78.

[11] Bor Z. Distortion of femtosecond laser pulses in lenses and lens systems [J]. Journal of Modern Optics, 1988, 35(12): 1907-1918.

[12] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, *et al.* National ignition facility laser performance status[J]. Applied Optics, 2007, 46(16): 3276-3303.

[13] Bor Z. Distortion of femtosecond laser pulses in lenses[J]. Optics Letters, 1989, 14(2): 119-121.

[14] Heuck H M, Neumayer P, Kühl T, *et al.* Chromatic aberration in petawatt-class lasers [J]. Applied Physics B, 2006, 84(3): 421-428.

[15] Kempe M, Rudolph W. Femtosecond pulses in the focal region of lenses[J]. Physical Review A, 1993, 48(6): 4721-4729.

[16] Jeong T M, Ko D K, Lee J. Deformation of the focal spot of an ultrashort high-power laser pulse due to chromatic aberration by a beam expander [J]. Journal- Korean Physical Society, 2008, 52(6): 1767-1773.

[17] Stone T, George N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats[J]. Applied Optics, 1988, 27(14): 2960-2971.

[18] Néauport J, Blanchot N, Rouyer C, *et al.* Chromatism compensation of the PETAL multipetawatt high-energy laser[J]. Applied Optics, 2007, 46(9): 1568-1574.

[19] Xie X D, Zhu Q H, Zhou K N, *et al.* Design of diffractive optical elements for chromatic aberration correction in high-energy petawatt laser system [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 142-146.

谢旭东, 朱启华, 周凯南, 等. 用衍射器件校正高能拍瓦激光系统色差的设计研究 [J]. 光学学报, 2010, 30(1): 142-146.

[20] Bahk S W, Bromage J, Zuegel J D. Offner radial group delay compensator for ultra-broadband laser beam transport [J]. Optics Letters, 2014, 39(4): 1081-1084.

[21] Zhu J Q, Xie X L, Sun M Z, *et al.* Analysis and construction status of SG II-5PW laser facility [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6(2): 115-127.

[22] Petrov G M, McGuffey C, Thomas A G R, *et al.* Proton acceleration from high-contrast short pulse lasers interacting with sub-micron thin foils [J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(5): 053302.