

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0257-05

背光照明连续相位板对光束波前畸变的宽容度分析

赵军普 胡东霞 粟敬钦 李平 周维 代万俊

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 由 Zernike 多项式生成 $P-V$ 值在 $5\lambda(1053\text{ nm})$ 范围之内变化的离焦、像散、彗差和球差等波前畸变, 叠加入用改进 Gerchberg-Saxton(G-S)算法设计的背光照明连续相位板(CPP)透射波前, 采用快速傅里叶变换方法计算远场。从能量利用率、焦斑 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 尺度的均匀性和焦斑尺寸三方面分析了波前畸变类型和畸变量大小对三倍频(351 nm)整形焦斑的影响。结果表明, 焦斑的能量利用率和焦斑尺寸对波前畸变有比较大的宽容度, 当波前畸变和 CPP 本身透射波前 $P-V$ 相当时, 两者的变化量均在 5% 之内; 整形焦斑的均匀性对波前畸变比较敏感, 1λ 的畸变量使焦斑的均方根(RMS)值从 0.325 增加到了 0.45 , 增量达到 38.5% , 必须对全系统的波前畸变进行严格控制。

关键词 物理光学; 焦斑整形; 连续相位板; 背光照明; 波前畸变

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL200936s1.0257

Wavefront Distortion Tolerance of Continuous Phase Plate for Backlighter

Zhao Junpu Hu Dongxia Su Jingqin Li Ping Zhou Wei Dai Wanjun

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

Abstract The wavefront, such as power, astigmatism, coma and spherical aberration distortion etc., was currently generated by Zernike polynomial with the $P-V$ value less than $5\lambda(1053\text{ nm})$. Then with the generated wavefront added the continuous phase plate (CPP), which was designed for backlight with the methods of improved Gerchberg-Saxton (G-S) algorithm, the focus process was simulated by fast Fourier transform (FFT) algorithm. The influences of wavefront distortion type and wavefront distortion value on the $3\omega(351\text{ nm})$ shaping focal spots were studied in details through three factors, energy efficiency, the uniformity of the $10\sim 100\ \mu\text{m}$ scale of focus and the size of the focal spot. The results showed it had a relatively wider tolerance for wavefront distortions due to the energy efficiency and the size of the focal spot, the variances will be no more than 5% as the $P-V$ of the generated wavefront distortion was analogous with the CPP. The uniformity of the focal spot was very sensitive to wavefront distortion, with $1\lambda(1053\text{ nm})$ wavefront distortion, the root-mean-square (RMS) of focal spots will be increased about 38.5% , from 0.325 to 0.45 . Therefore, it indicates that it is necessary to control the wavefront distortions of the whole laser systems.

Key words physical optics; focal spot shaping; continuous phase plate; backlighter; wavefront distortion

1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)物理实验中, 要求入射到特定尺度靶面区域的激光辐照强度分布尽可能均匀^[1]。这包含两方面的含义: 首先焦斑强度分布的轮廓要与特定的靶面区域吻合, 其次靶面特定区域内的光强要尽量均匀, 这就要求必须对激光焦斑强度分布进行定向平滑控制。目前采用的空间平滑控制技术主要是使用大口径的相位元件, 包括随机相位板(RPP)^[2,3]、相息相位板(KPP)^[4]、分布相位板

(DPP)^[5]、连续相位板(CPP)^[6~10]和透镜阵列(LA)^[11,12]等。其中连续相位板(CPP)具有能量利用率高、焦斑形态易于控制等优点而备受关注, 磁流变技术使得加工完全连续的面形成为可能, 目前采用该技术制作的 CPP 已经在美国 NIF 和 OMEGA 激光装置上开始使用^[13,14]。

背光照明是利用激光辐照背光材料转换的 X 光来替代 ICF 间接驱动中产生的 X 光作为照明光源, 以研究驱动靶丸的物理规律。本文从波前自适

基金项目: 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室(9140C6803020804)资助课题。

作者简介: 赵军普(1980—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事强激光传输和光束质量控制技术等方面的研究。

E-mail: scu junpu@126.com

应控制系统如何和 CPP 联合使用的角度,针对采用改进 Gerhberg-Saxton(G-S)算法设计的背光照明连续相位板,分析了不同类型波前畸变对整形焦斑的能量利用率、焦斑尺寸和焦斑 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 尺度均匀性的影响。

2 背光照明连续相位板的设计目标

2.1 原型装置背光照明整形焦斑的设计目标

原型装置(TIL)背光照明靶设计为正方形,由与竖直方向夹角为 45° 的激光束辐照背光材料产生照明光源。对激光整形焦斑的要求主要为:1)有效焦斑尺寸; $500\ \mu\text{m}\times 500\ \mu\text{m}$ (透镜焦距 $2.2\ \text{m}$,光束

口径 $290\ \text{mm}\times 290\ \text{mm}$,激光波长 $351\ \text{nm}$);2)焦斑形状:方形,轮廓大于一阶高斯,使焦斑边缘有一定陡度;3)焦斑顶部均匀性:主要是关注 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 尺度的焦斑调制。

如图 1(a)所示,根据原型装置靶场光路结构的参数和背光照明靶设计的结构参数(靶与支撑杆角度成 26°),为使照明靶上的焦斑投影为 $500\ \mu\text{m}\times 500\ \mu\text{m}$,和入射光垂直的焦平面上的焦斑轮廓为 $425\ \mu\text{m}\times 353\ \mu\text{m}$,两边夹角为 51.4° 的平行四边形,其特征尺寸见图 1(b),这就是背光照明 CPP 对焦斑匀滑整形的目标。

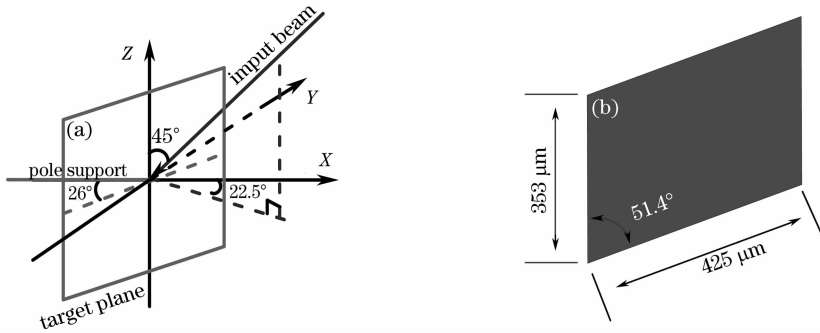


图 1 背光照明 CPP 设计目标焦斑尺寸示意图。(a)背光照明示意图;(b)整形焦斑的形状

Fig. 1 Designed focal spot for backlighter using CPP. (a) Sketch map of backlighter; (b) figure of shaping focal spot

2.2 改进 G-S 算法设计的背光照明 CPP 透射波前

图 2(a)为利用改进 G-S 算法设计的背光照明

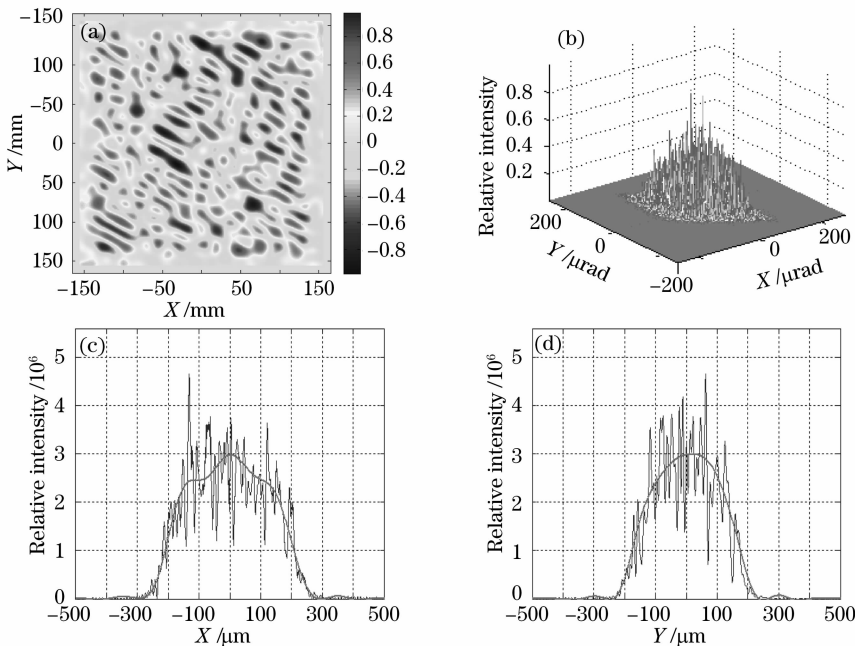


图 2 设计的背光照明 CPP 透射波前和对应的远场强度分布。(a)背光照明 CPP 设计透射波前;(b)远场强度分布;(c)远场强度的剖面线

Fig. 2 Designed phase profile and focal spot profile for backlighter. (a) Phase profile of CPP; (b) calculated character of the focused spot produced by CPP; (c), (d) focal spot profile after $100\ \mu\text{m}$ & $10\ \mu\text{m}$ lowpass filter

CPP 透射波前,为与实际加工能力相匹配,控制 CPP 特征单元尺度为 15 mm,为在应用中留有余量,设计口径为 320 mm×320 mm。透射波前 $P-V$ 值为 2λ ,均方根(RMS)值为 $0.3\lambda(1053\text{ nm})$ 。图 2(b) 为根据设计波前匹配 8 阶超高斯振幅分布计算的三倍频(351 nm)整形焦斑,焦斑边缘有比较清晰的分界,落入图 1(b)所示设计尺度的平行四边形区域内的能量占焦斑总能量的百分比,即能量利用率为 90.9%,该有效区域内 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 尺度的调制 RMS 为 0.325。图 2(c)所示光滑曲线为经 $100\ \mu\text{m}$ 滤波后的焦斑轮廓,带有调制的曲线为经 $10\ \mu\text{m}$ 滤波后的焦斑强度分布, $100\ \mu\text{m}$ 滤波后的焦斑峰值强度的 $1/e$ 对应的两个方向焦斑宽度分别为 $409\ \mu\text{m}$ 和 $343\ \mu\text{m}$ 。从目前设计的结果而言,焦斑的轮廓和尺寸符合设计要求,有效区域内的均匀性还需要耦

合时域匀滑技术如 SSD 进行进一步改善。

3 背光照明 CPP 对波前畸变的容忍度分析

3.1 波前畸变的产生模型

为了分析波前畸变对 CPP 焦斑整形的影响,采用 Zernike 多项式生成如图 3 所示的离焦、像散、彗差和球差等类型畸变,考虑到 CPP 设计透射波前的非对称性,像散取 0° 像散和 45° 像散两项,彗差取 X 方向和 Y 方向两项。畸变的大小用 $P-V$ 值描述,分析中的畸变量控制在 $5\lambda(1053\text{ nm})$ 之内,最大畸变量达到 CPP 本身透射波前 $P-V$ 值的 2.5 倍,这样的畸变量也在高功率固体激光驱动器通常的波前畸变量范围之内。

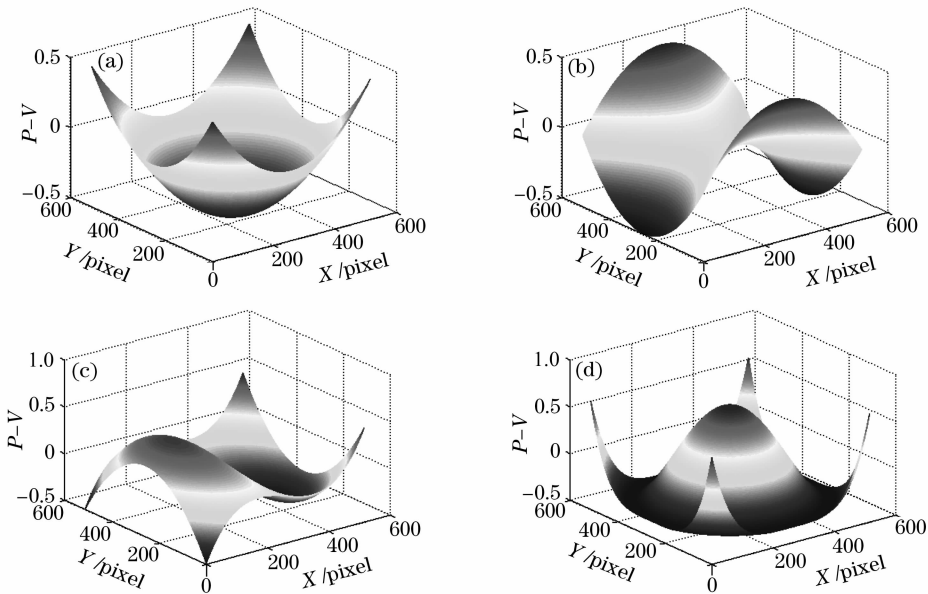


图 3 Zernike 多项式生成的波前畸变。(a)离焦;(b)像散;(c)彗差;(d)球差

Fig. 3 Zernike wavefront distortion with the $P-V$ value less than $5\lambda(1053\text{ nm})$. (a) Power; (b) astigmatism; (c) coma; (d) spherical aberration

3.2 数值计算结果及分析

根据图 2(a)所示设计的 CPP 透射波前,把图 3 所示的各种波前畸变作为 CPP 前的光束波前,两者叠加得到透过 CPP 后的光束波前。如果把 CPP 放在基频光段使用,实际应用中经 CPP 后还要经过谐波转换过程,把光束波长从近红外的 1053 nm 转换到 351 nm 的紫外波段。对于频率转换过程对光束波前的影响,当完全满足相位匹配条件时,三倍频光相位扰动幅度为基频光的 3 倍^[15],在此根据这个结论对计算过程进行简化。计算网格 $1024\text{ pixel}\times 1024\text{ pixel}$,有效数据区域约为 $512\text{ pixel}\times$

512 pixel ,波前相位分辨率为 0.64 mm/pixel ,聚焦透镜焦距取 2.2 m ,振幅有效区域为 $512\text{ pixel}\times 512\text{ pixel}$ 的 8 阶超高斯分布,采用快速傅里叶变换算法计算所得的焦斑分辨率为 $1.17\ \mu\text{m/pixel}$,满足分析 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 尺度的焦斑调制的采样要求。

焦斑 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 尺度强度调制的 RMS 值按 (1) 式定义

$$f_{\text{RMS}} = \frac{1}{F_{100\ \mu\text{m}}(i, j)} \times \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [F_{10\ \mu\text{m}}(i, j) - F_{100\ \mu\text{m}}(i, j)]^2 / (mn)}, \quad (1)$$

其中 $F_{10\ \mu\text{m}}$ 为计算焦斑经 $10\ \mu\text{m}$ 低通滤波后的强度分布, $F_{100\ \mu\text{m}}$ 为计算焦斑经 $100\ \mu\text{m}$ 低通滤波后的强度分布, $\overline{F_{100\ \mu\text{m}}}$ 为 $100\ \mu\text{m}$ 低通滤波后焦斑的平均强度, 计算区域为图 1(b) 所示尺度的平行四边形。

如图 4(a) 所示, 当波前畸变为离焦、像散和彗差时, 波前畸变量达到 2λ , 即和 CPP 本身透射波前 $P-V$ 值相当时, 整形焦斑的能量利用率降低只有 1%, 当波前畸变量达到 4λ 时, 能量利用率约降低 5%, 当波前畸变达到 5λ 时, 能量利用率约降低 8%, 而当波前畸变为球差时, 2λ 的波前畸变就能使能量利用率降低 5%, 5λ 的波前畸变使能量利用率降低了近 20%, 说明设计的 CPP 对离焦、像散和彗差有较大的宽容度, 对球差较为敏感。图 4(b) 显

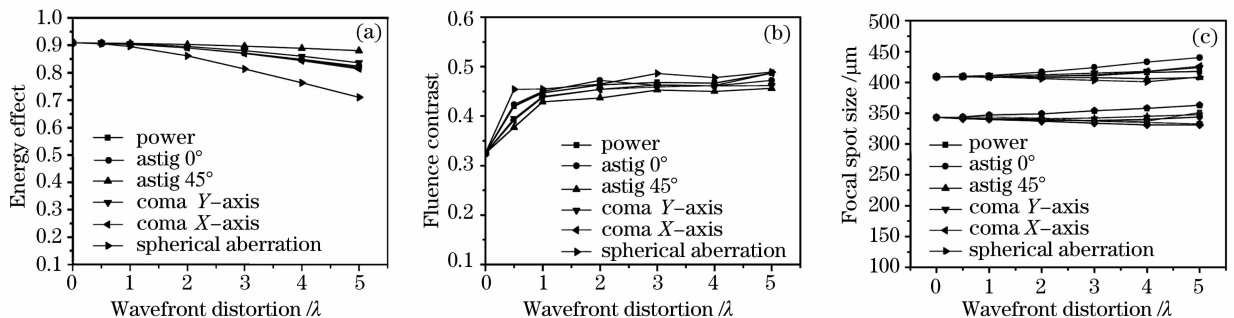


图 4 波前畸变对 CPP 整形焦斑的影响。(a) 对焦斑能量利用率的影响; (b) 对焦斑 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 尺度的调制影响; (c) 对焦斑尺寸的影响

Fig. 4 Calculations demonstrating impact of wavefront distortion on (a) energy efficiency on focal spots; (b) modulation on the $10\sim 100\ \mu\text{m}$ size of focus modulation; (c) focal spot size

4 结 论

采用改进 G-S 算法设计的背光照明连续相位板获取的整形焦斑的能量利用率和焦斑尺寸对光束波前畸变具有比较大的宽容度, 焦斑 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 尺度的调制对 1λ 以下的波前畸变比较敏感, 当畸变量大于 1λ 时, 焦斑不均匀性比较稳定, 说明在使用 CPP 实现背光均匀照明时, 必须把全系统波前畸变控制在 1λ 之内。

参 考 文 献

- Kilkenny J. D., Glendinning S. G., Haan S. W. *et al.*. A review of the ablative stabilization of the Rayleigh-Taylor instability in regimes relevant to inertial confinement fusion[J]. *Phys. Plasmas*, 1994, **1**(5): 1379~1389
- Kato Y., Mima K., Miyanaga N. *et al.*. Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma-instability suppression[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**(11): 1057~1060
- Dixit S. N., Thomas I. M., Woods B. W. *et al.*. Random phase plates for beam smoothing on the Nova laser[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14): 2543~2554

示, 焦斑有效区域内 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 尺度的调制, 在 1λ 畸变范围内的变化比较快速, RMS 值从设计值 0.325 增长到 0.45, 而从 1λ 畸变量增加到 5λ , 调制的 RMS 增量小于 0.05, 各种畸变类型的区别不大, 说明为了改善焦斑的均匀性, 要采用波前主动控制系统把基频光波前畸变尽量控制在 1λ 之内。图 4(c) 显示, 焦斑尺寸(峰值强度的 $1/e$ 对应的宽度)对 0° 像散较敏感, 其他畸变类型差别很小, 2λ 的波前畸变引起的焦斑尺寸变化不超过 $6\ \mu\text{m}$, 可以忽略; 当波前畸变达到 5λ 时, 0° 像散引起的焦斑两个边长方向的尺度变化分别为 $30\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$, 其他类型的像差引起的尺度变化不超过 $18\ \mu\text{m}$, 各种像差引起的焦斑尺寸变化量不超过 7%, 并且对球差不敏感。

- Thomas I., Dixit S. N., Rushford M. C. *et al.*. Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(6): 417~419
- Lin Y., Kessler T. J., Lawrence G. N.. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profiles[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 764~766
- Néauport J., Ribeyre X., Daurios J. *et al.*. Design and optical characterization of a large continuous phase plate for laser integration line and laser megajoule facilities[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(13): 2377~2382
- Lin Y., Kessler T. J.. Design of continuous surface-relief phase plates by surface-based simulated annealing to achieve control of focal-plane irradiance[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(20): 1703~1705
- J. A. Marozas. Fourier transform-based continuous phase-plate design technique: a high-pass phase-plate design as an application for OMEGA and the National Ignition Facility[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(1): 74~83
- Chen Bo, Wang Hanzhi, Wei Hui *et al.*. Design of fully continuous phase plates for beam smoothing in ICF concave refractive microlens arrays fabricated by ion beam etching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4): 480~485
- 陈波, 王茜子, 韦辉等. 用于惯性约束聚变束匀滑的完全连续相位板设计方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(4): 480~485
- Li Ping, Ma Chi, Su Jingqin *et al.*. Design of continuous phase plates for controlling spatial spectrum of focal spot[J]. *High*

- Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(7): 1114~1118
李平, 马驰, 栗敬钦等. 基于焦斑空间频谱控制的连续相位板设计[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(7): 1114~1118
- 11 Deng X. M., Liang X. C., Chen Z. Z. *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3): 377~381
- 12 Jiang Xiujuan, Zhou Shenlei, Lin Zunqi. Improved target irradiation uniformity using two-dimensional spectral dispersion and lens array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1533~1537
江秀娟, 周申蕾, 林尊琪. 利用二维光谱色散和透镜阵列改善靶面辐照均匀性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1533~1537
- 13 Wegner P., Auerbach J., Auerbach J. M. *et al.*. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning[C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 180~189
- 14 Haynam C. A., Wegner P. J., Auerbach J. M. *et al.*. National ignition facility laser performance status[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3276~3303
- 15 Zhang Bin, Li Qiang, Cai Bangwei. Influence of high-power third harmonics conversion on laser beam quality[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 553~556
张彬, 李强, 蔡邦维. 高强度三次谐波转换对光束质量的影响[J]. *光子学报*, 2004, **33**(5): 553~556