

不同波前畸变对连续相位板焦斑的影响

冯友君¹ 王忠²

¹四川旅游学院信息技术系, 四川 成都 610100

²四川大学电气信息学院, 四川 成都 610064

摘要 为了提高惯性约束聚变(ICF)系统中的焦斑质量,达到靶面辐照均匀性的苛刻要求,系统需要采用束匀滑技术。由于连续相位板(CPP)能灵活控制焦斑形状,且衍射效率高等自身特点,得到了极大推荐。在实际使用过程中,由于光学系统中的多种因素可能造成激光束波前畸变,这将影响连续相位板的匀滑效果。建立了全频段波前畸变激光束的传输与远场的关系,给出了86%的能量焦斑尺寸与低频波前畸变峰谷值和连续相位板面形峰谷值比值的的关系,以及86%能量焦斑尺寸与低频畸变波前的均方根梯度值的关系。根据该关系,可以找到波前控制的范围。

关键词 光学设计;连续相位板;峰谷值;均方根梯度;波前畸变

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.072204

Influence of Different Distorted Wavefronts on Continuous Phase Plate Smoothing Focal Spot

Feng Youjun¹ Wang Zhong²

¹Department of Information Technology, Sichuan Tourism University, Chengdu, Sichuan 610100, China

²School of Electrical and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract In order to improve focal spot quality in inertial confinement fusion (ICF) system, beam smoothing technology is required so as to meet the strict requirements of target surface irradiated. Continuous phase plate (CPP) can control the shape of focal spot easily and has high diffraction efficiency. In practical optical system, beam smoothing results can be influenced since a variety of factors can cause distorted wavefront of laser beam. The relationship between the full spectrum of distorted wavefront and optical field in the far field is given, and it is obtained that the relationship between 86% focal spot size and the ratio of peak valley value of low frequency distorted wavefront and surface shape of CPP. Meanwhile, the relationship between 86% focal spot size and root-mean-square gradient value of low frequency distorted wavefront is also shown. According to the relationship, the range of controlling distorted wavefront can be found.

Key words optical design; continuous phase plate; peak valley; root-mean-square gradient; distorted wavefront

OCIS codes 220.1010; 050.1940; 120.4820; 140.3460; 350.5030

1 引言

到目前为止,国内外已经发展了多种靶面均匀辐照技术,其中空间域技术可以控制焦斑轮廓的形状,对焦斑进行整形,获得所需的焦斑包络形状,以达到靶面均匀辐照的目的。实现空间匀滑的主要有衍射光学元件、透镜列阵技术^[1-2]和偏振匀滑技术^[3]等。其中,衍射光学元件主要有随机相位板(RPP)^[4]、相息图位相板(KPP)^[5]、分布相位板(DPP)^[6-7]等,这些元件均采用了台阶式结构设计,其相位点附近会出现大角度散射,不仅将造成能量损失,还会引起近场强度调制。为了改善这一问题,Lin等^[8]又提出了连续相位板(CPP)的方案,采用连续相位结构替代台阶式结构进行设计,这样即能灵活控制焦斑形状,又能得到几乎连续的位相分布,使激光能量衍射效率达到95%以上。随着制作工艺不断成熟,连续相位板也就逐步取代了其他的相位板成为了目前常用的相位匀滑器件,因而自出现以来,就受到了极大的关注^[9]。

收稿日期: 2015-01-13; 收到修改稿日期: 2015-03-04; 网络出版日期: 2015-06-24

基金项目: 四川省教育厅重点项目(14ZA0292)

作者简介: 冯友君(1980—),女,博士,讲师,主要从事光学与光通信技术方面的研究。E-mail: fengli522@163.com

在惯性约束聚变(ICF)系统中,可能由于光学元件加工、系统的二次装配、热累积等诸多因素引起波前畸变,在CPP的使用过程中,将对远场焦斑严重影响,甚至是破坏性的。针对波前畸变对CPP焦斑的影响已有一些报道^[10-14],但都没有详细的具体计算。本文建立了在应用过程中全频段波前畸变激光束的传输与远场的关系,详细分析了波前畸变对CPP焦斑的影响。

2 物理模型

2.1 畸变波前的描述

根据劳伦斯利弗莫尔国家重点实验室(LLNL)的研究结果表明,最终到达靶上的光束波前畸变是激光光束在整个传输过程中各种因素引起的波前畸变的总和,焦斑的形态和尺寸是由传输过程引起的。根据波前畸变空间周期(空间频率)的不同,将其划分为3个不同空间周期(空间频率),研究结果表明:不同频段的波前畸变,对焦斑及光束质量有不同的影响。其中,低频段畸变波前会导致焦斑尺寸增加,影响光束的聚焦特性;中频段畸变波前会使光束光强分布产生调制,对焦斑光束质量及激光介质或光学元件造成极大影响;高频段会使焦斑形态产生明显旁瓣。因此,在ICF系统中,详细研究波前畸变对连续相位板焦斑的影响有着十分重要的作用。

通常,对于激光束的低频畸变可以通过随机位相屏来构建,即^[15-16]

$$\phi(x,y) = A_1 \text{random}(-1,1) \otimes \exp\left[-\left(\frac{x^2}{\omega_x^2} + \frac{y^2}{\omega_y^2}\right)\right], \quad (1)$$

式中 A_1 为决定位相起伏的振幅, $\text{random}(-1,1)$ 为在 $-1\sim 1$ 的均匀分布的二维随机数序列, \otimes 为卷积运算符, ω_x 、 ω_y 分别是 x 、 y 方向上决定位相畸变空间起伏的参数,不同参数可以产生不同的位相畸变及不同的均方根梯度值。低频畸变波前一般用峰谷值(PV)及均方根梯度值(GRMS)来表征畸变程度。

在ICF激光装置中,中高频波前畸变分布与幅度的对数值之间存在一定关系,可以由下式表示^[14,17]:

$$\ln[A(f_x)] = a + b \ln(f_x), \quad (2)$$

式中 f_x 表示空间频率, $A(f_x)$ 表示频率为 f_x 成分的幅度, a 、 b 是与光学元件质量有关的常数。 b 决定了波前畸变频谱分布的相对比例, a 决定了波前的总体畸变程度。调整 a 、 b 值,构成不同的线性功率谱密度(PSD, D_{ps})曲线,再通过逆傅里叶变换(IFFT)便可以获得具有相应频谱分布的畸变波前。

中高频波前畸变通常采用PSD曲线来描述,下面为PSD的一维数值计算方法。假设 $z(x)$ 表示波前畸变沿某一方向上的位相畸变值,其傅里叶(FFT)变换为^[18]

$$Z(k) = \int_0^L z(x) \exp(-ikx) dx, \quad (3)$$

式中 $k = 2\pi f$, f 为频率。在计算时,将波前畸变进行离散化处理,沿采样长度 L 方向离散成 N 个离散点,离散间隔为 Δx ,即 $L = N \cdot \Delta x$ 。于是,可得到一维PSD公式为

$$D_{\text{ps}}(m) = \frac{\Delta x}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} z(n) \exp(-i2\pi f_m n \Delta x) \right|^2, \quad (4)$$

式中波数离散为 $2\pi f_m$, $f_m = m/(N \cdot \Delta x)$,为空间频率,即 f_x , $-N/2 \leq m \leq N/2$, $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。PSD的量纲为长度单位的三次方,在(4)式中,如果 $z(n)$ 的单位为nm, Δx 的单位为mm,则PSD的单位为 $\text{nm}^2 \cdot \text{mm}$ 。

2.2 连续相位板的设计

采用改进Gerchberg-Saxton(G-S)算法来设计连续相位,其基本流程如图1所示。基本设计思想:将入射光振幅与初始随机连续相位结合组成初始复振幅,对其进行快速傅里叶变换,并将变换后所得到的光场振幅与目标振幅进行比较。若达到设计误差要求,则该相位即为设计所要求的,若没达到设计误差要求,则将该相位与目标振幅结合组成新的复振幅并做逆傅里叶变换。然而,求得新的相位分布后,再将该相位分布作为下一次迭代的初始相位重复上面的过程,直到最后的误差达到要求的标准。图1中的虚线框为相对传统G-S算法所做的改进,即对逆傅里叶变换后分离出来的相位进行解相和滤波,使它具有光滑的连续位相结构,以便在后续迭代过程中保持相位的连续性和光滑性^[19-20]。

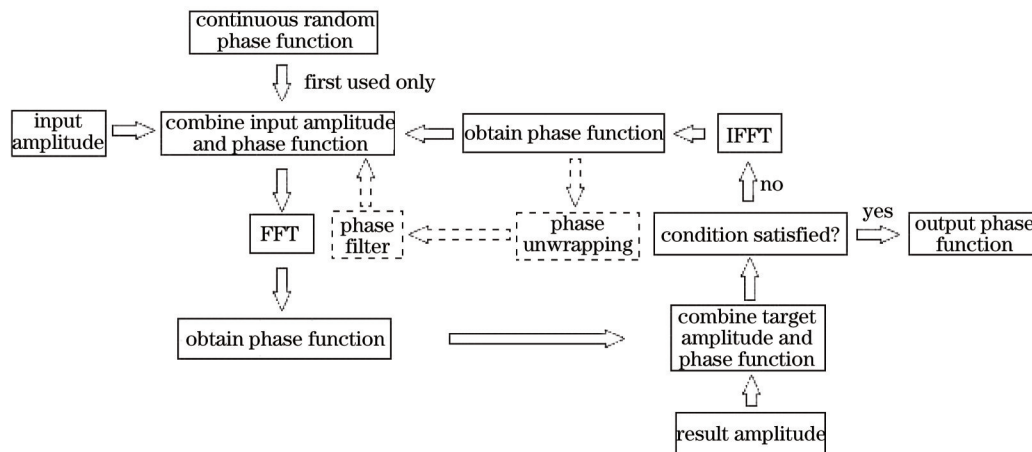


图1 改进的G-S算法流程图

Fig.1 Flow diagram of improved G-S algorithm

2.3 畸变波前对 CPP 焦斑影响的计算模型

图2是CPP对畸变波前进行匀滑处理时的典型光路结构。根据夫琅禾费衍射,可以得到远场光场分布为

$$E_0(x_0, y_0) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \times \exp\left[\frac{ik(x_0^2 + y_0^2)}{2z}\right] \iint E(x, y) \cdot \exp\left[-\frac{ik}{z}(x_0x + y_0y)\right] dx dy = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik(x_0^2 + y_0^2)}{2z}\right] \cdot \mathcal{F}[E(x, y)], \quad (5)$$

式中 $E_0(x_0, y_0)$ 和 $E(x, y)$ 分别为远场及近场的光场复振幅, $E(x, y)$ 的相位包含入射光束的畸变波前 $\psi(x, y)$ 以及 CPP 的面形函数 $\phi_{\text{cpp}}(x, y)$, (x_0, y_0) 、 (x, y) 分别是远场、近场的坐标, z 为传输距离, l 为波长, \mathcal{F} 为傅里叶变换。光强 $I(x, y) = E(x, y) \cdot E^*(x, y)$, 由此可见, 实际远场焦斑的情况, 主要由 CPP 的面形函数及激光束的畸变波前决定。

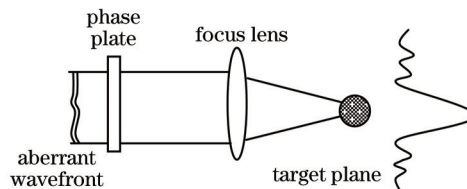


图2 光学系统中的连续相位板典型结构

Fig.2 Typical principle of CPP in the optical system

3 波前畸变对 CPP 焦斑的影响

采用2.2节所述的原理, 设计了不同相关长度的 CPP。由于 CPP 面形是分布连续、完全随机的, 因此可以把 CPP 元件表面高度看作一个以空间位置为坐标的随机函数。因此, 就可以采用统计学的方法来对 CPP 面形进行统计分析。为了定量描述 CPP 面形中不同位置相关性的大小, 定义 CPP 的自相关函数的半峰全宽为相关长度^[21], 即

$$L = |x_1 - x_2|, R(x_1) = R(x_2) = 0.5, \quad (6)$$

式中 $R(x)$ 为 CPP 的归一化自相关函数, x_1, x_2 分别为 $R(x)$ 中半高位置对应的坐标, $R(x)$ 为 CPP 面形的自相关函数。从(6)式可见, CPP 面形的相关长度具有长度量纲, 它可以直接反映 CPP 中相位起伏的空间频率大小。

本文所使用的 CPP 的相关长度如表1所示。其中 CPP_1, CPP_4 的面形如图3所示。

表1 不同 CPP 的相关长度

Table 1 Correlation length of different CPPs

	CPP_1	CPP_2	CPP_3	CPP_4
Correlation length L /mm	21.9290	16.8758	17.0592	16.2174

波前畸变将影响焦斑的质量, 图4给出了典型的低频波前及其在无匀滑元件下的远场焦斑, 其中畸变的起伏参数 $\omega_x = \omega_y = 80$ mm。由此可见, 焦斑分布很不均匀。

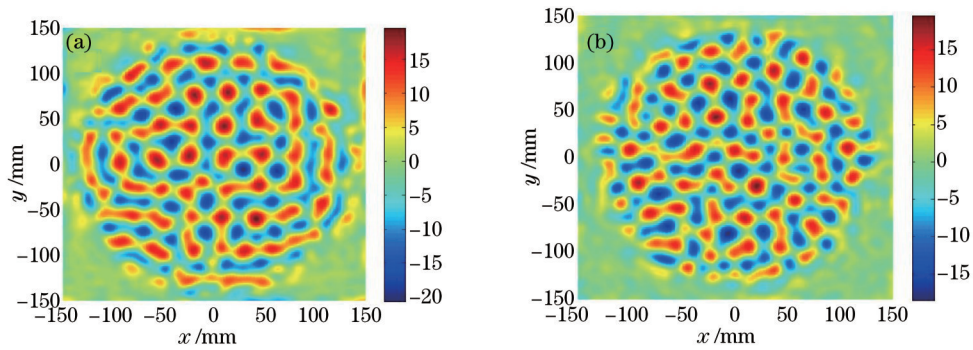


图3 不同CPP的面形。(a) 相关长度为21.9290 mm; (b) 相关长度为16.2174 mm

Fig.3 Surface shape of different CPPs. (a) Correlation length of 21.9290 mm; (b) correlation length of 16.2174 mm

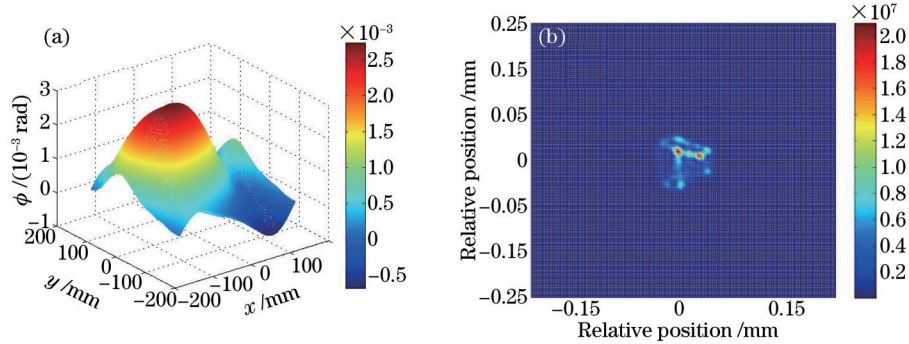


图4 $\omega_x = \omega_y = 80$ mm时的畸变波前分布及远场焦斑。(a) 畸变波前; (b) 远场焦斑

Fig.4 Distorted wavefront and focal spot in the far field when $\omega_x = \omega_y = 80$ mm. (a) Distorted wavefront; (b) focal spot in the far field

在有CPP匀滑的情况下,图5给出了入射激光束有波前畸变与无波前畸变时的远场焦斑。其中图5(a)是在波前畸变的PV值为0.0014 mm,GRMS为 0.2928 mm^{-1} 的激光束入射时,经过CPP_4后远场焦斑。图5(b)是激光束无畸变时,经过CPP_4后的远场焦斑。由此可见,当有波前畸变的激光束经过CPP后,焦斑会展宽,顶部不均匀性会明显增强,焦斑质量变差。

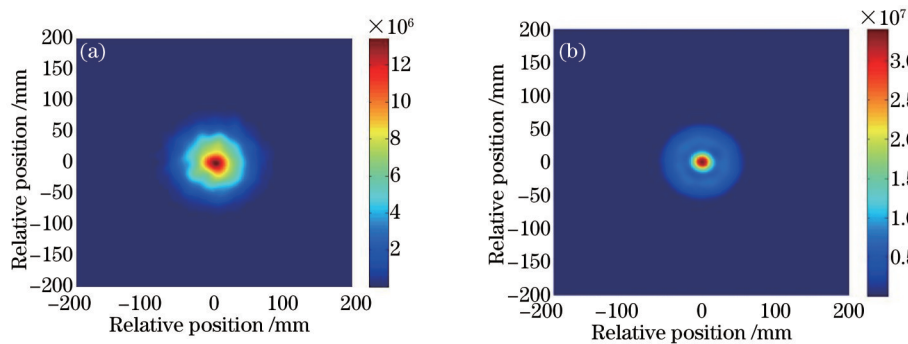


图5 远场焦斑形态。(a) 有畸变; (b) 无畸变

Fig.5 Focal spots in the far field. (a) With distorted wavefront; (b) without distorted wavefront

为了更清楚地反应波前畸变对焦斑的影响,改变低频波前的参数得到不同的畸变波前,研究波前的PV值、GRMS与焦斑的关系,如图6所示。其中图6(a)是86%的能量焦斑尺寸与低频波前畸变PV值 ϕ_{PV} 和CPP面形PV值 $\phi_{CPP,PV}$ 的比值的关系,图6(b)是86%的能量焦斑尺寸与低频畸变波前的GRMS值的关系。由图6可以看出,焦斑尺寸随着波前畸变的PV值和CPP面形PV值的比值的增加明显增加,PV值对焦斑尺寸的影响很明显。同时,焦斑尺寸也随着波前畸变的GRMS的增加迅速增加,波前畸变的GRMS也是影响CPP焦斑的一个重要因素。

为了更全面分析波前畸变对CPP焦斑的影响,也需要分析中高频波前畸变的影响。采用2.1节的中高频波前的描述及评价,调整常数 a 及 b ,构造出不同的波前PSD曲线,因此可得到不同的波前畸变。也可以分析得出,焦斑尺寸会有不同的变化。

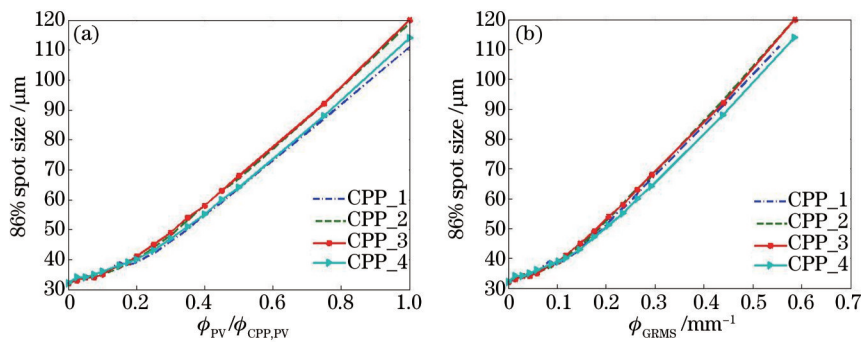


图6 焦斑尺寸与波前畸变量的关系。(a) 86%的能量焦斑尺寸与低频波前畸变PV值和CPP面形PV值的比值的关系;
(b) 86%的能量焦斑尺寸与低频畸变波前的GRMS值的关系

Fig.6 Relationship between focal spot size and distorted wavefront. (a) Relationship between 86% focal spot size and the ratio of PV value of low frequency distorted wavefront and surface shape of CPP; (b) relationship between 86% focal spot size and GRMS value of low frequency distorted wavefront

4 结 论

采用改进G-S算法,对CPP进行设计。根据全频段光的传输与远场的关系,重点分析了有波前畸变的激光束经过CPP后的远场焦斑情况,以及远场焦斑尺寸与低频畸变波前的PV值和CPP的PV值的比值关系,和远场焦斑尺寸与低频波前畸变的GRMS值的关系。结果表明,当激光束有低频波前畸变时,经过CPP后,远场焦斑会明显变化。远场焦斑尺寸会随着低频畸变的PV与CPP的PV值的比值、GRMS值的增加而增加。这将对ICF系统中进行波前畸变合理控制提供理论参考,并且也对CPP所需要的面形加工精度提供一定的参考。

参 考 文 献

- 1 Ximing Deng, Xiangchun Liang, Zezun Chen, *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array[J]. *Appl Opt*, 1986, 25(3): 377-381.
- 2 Li Kun. Study on the Properties of the Harmonic Generation and the Propagation of High Power Laser in the Final Optical System[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.
李 琨. 靶场强激光频率变换及传输特性研究[D]. 成都: 四川大学, 2007.
- 3 Zhou Yuliang, Sui Zhan, Liu Lanqin, *et al.*. Research on beam smoothing technology for high-power laser system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(10): 101407.
周煜梁, 隋 展, 刘兰琴, 等. 高功率激光装置光束匀滑技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(10): 101407.
- 4 Y Kato, K Mima, N Miyanaga, *et al.*. Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma instability suppression[J]. *Phys Rev Letts*, 1984, 53(11): 1057-1060.
- 5 S N Dixit, J K Lawson, K R Manes, *et al.*. Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control[J]. *Opt Lett*, 1994, 19(6): 417-419.
- 6 T J Kessler, Y Lin, J J Armstrong, *et al.*. Phase conversion of lasers with low-loss distributed phase plates[C]. *SPIE*, 1993, 1870: 95-104.
- 7 Y Lin, T J Kessler, G N Lawrence. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profiles[J]. *Opt Lett*, 1995, 20(7): 764-766.
- 8 Y Lin, T J Kessler, G N Lawrence. 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.
- 9 Jiang Xiujuan, Lin Zunqi. Research progress of beam smoothing in high power laser driver[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(9): 091407.
江秀娟, 林尊琪. 高功率激光驱动器光束匀滑技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(9): 091407.
- 10 Zhang Yuanhang, Yang Chunlin, Wen Shenglin, *et al.*. Factors affecting focusing performance of continuous phase plate concentration[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(7): 1741-1744.
张远航, 杨春林, 温圣林, 等. 影响连续相位板聚焦性能的主要因素[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(7): 1741-1744.

- 11 Huang Xiaoxia, Gao Fuhua, Yuan Qiang, *et al.*. Wavefront criterion of small focal spot in optical zooming[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(20): 205206.
黄小霞, 高福华, 袁 强, 等. 动态聚焦中小焦斑的波前判据[J]. *物理学报*, 2013, 62(20): 205206.
- 12 Wu Chao, Zhao Yahui, Zhang Rongzhu. Irradiance superposition characteristic of distorted beams in far field[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2437-2441.
吴 超, 赵雅慧, 张蓉竹. 畸变光束远场光强叠加特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8): 2437-2441.
- 13 Wen Shenglin, Hou Jing, Yang Chunlin, *et al.*. Uniformity of near-field caused by continuous phase plate for beam smoothing[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(6): 1543-1547.
温圣林, 侯 晶, 杨春林, 等. 用于光束匀滑的连续相位板近场均匀性[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(6): 1543-1547.
- 14 Wen Shenglin, Yan Hao, Zhang Yuanhang, *et al.*. Calculation and experiment of the focal spot caused by continuous phase plate with incident wavefront distortion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0314001.
温圣林, 颜 浩, 张远航, 等. 波前畸变下连续相位板焦斑的计算与实验[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0314001.
- 15 J K Lawson, J M Auerbach, R E English, *et al.*. NIF optical specifications: the importance of the RMS gradient[C]. SPIE, 1998, 3492: 336-343.
- 16 W Williams, J Auerbach, J Hunt, *et al.*. NIF Optics Phase Gradient Specification[R]. LLNL, CA (United States), 1997.
- 17 王德恩. 精密位相主动控制技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2011: 11-14.
- 18 Zhang Rongzhu, Cai Bangwei, Yang Chunlin, *et al.*. Numerical method of the power spectral density[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(6): 661-664.
张蓉竹, 蔡邦维, 杨春林, 等. 功率谱密度的数值计算方法[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(6): 661-664.
- 19 Lin Zhongxiao, Zhang Rongzhu, Yang Chunlin, *et al.*. Choice of phase filter in designing continuous phase plate with GS algorithm[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(11): 2634-2638.
林中校, 张蓉竹, 杨春林, 等. GS算法设计连续相位板时相位滤波器的选择[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(11): 2634-2638.
- 20 Feng Youjun, Lin Zhongxiao, Zhang Rongzhu. The influence of root mean square phase gradient of continuous phase plate on smoothing focal spot[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 104202.
冯友君, 林中校, 张蓉竹. 连续位相板的均方根梯度对匀滑特性的影响[J]. *物理学报*, 2011, 60(10): 104202.
- 21 Lü Chen, Zhang Rongzhu. Surface stochastic characteristics of continuous phase plate[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(16): 164203.
吕 晨, 张蓉竹. 连续相位板面形的随机特性研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(16): 164203.

栏目编辑: 史 敏