

文章编号: 0253-2239(2009)11-3179-04

基于工艺连续相位板设计

温圣林 许 乔 马 平 杨春林 周礼书 颜 浩

(成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要 为改善惯性约束聚变(ICF)系统中聚焦光束质量,降低元件的加工难度,建立了基于工艺的连续相位板(CPP)理论设计模型,并从初相选取、相位展开、滤波、焦斑频谱控制等多方面改进了传统的G-S算法,比较分析了传统设计方法和基于工艺设计方法设计的CPP的加工特性和焦斑性能。基于工艺设计的CPP面型光滑,其产生的焦斑顶部均方根(RMS)和能量利用率 η 分别从传统G-S的62.8%和98.0%改进到16.9%和98.6%,而且有效抑制了10~100 μm 的频谱成分。结果表明,基于工艺的CPP设计方法能够较好满足现有工艺约束条件和物理需求。

关键词 光学设计与制造;连续相位板;改进G-S算法;光束匀滑;惯性约束聚变

中图分类号 O435.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3179

Process-Based Design of Continuous Phase Plates

Wen Shenglin Xu Qiao Ma Ping Yang Chunlin Zhou Lishu Yan Hao

(Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract A theoretical design model for continuous phase plates (CPP) used in inertial confinement fusion is built to improve the focus beam quality and reduce the difficulty of CPP's fabrication. Moreover, the traditional G-S algorithm is modified through choosing continuous initial phase, phase unwrapping, phase filtering and controlling the frequency spectrum of focal spot. The operational characteristic and the focal spot's performance caused by the CPP designed by traditional G-S algorithm and modified G-S algorithm are analyzed comparatively. The surface designed by the modified method is smoother than the traditional G-S algorithm, and the root mean square (RMS) and capacity usage ratio of the focal spot caused by modified G-S algorithm are 16.9% and 98.6% respectively, which are all better than the traditional method's 62.8% and 98.0%. The 10~100 μm modulations of focal spot are suppressed very well. It shows that the CPP designed by the modified method meets the process restriction and physical specifications very well.

Key words optical design and fabrication; continuous phase plates; modified G-S algorithm; beam smoothing; inertial confinement fusion

1 引 言

连续相位板(continuous phase plates, CPP)是大型激光装置中一种非常重要的控制远场光束质量的衍射光学元件^[1,2]。美国经过二十多年的研究,在CPP设计算法和制作工艺上不断优化改进^[3,4],并于近期获得了较好的实验结果^[5],但一些关键技术并未公开,而且所设计的CPP结构复杂^[5],目前国内设备和工艺无法实现制作。国内对非连续的随机相位板(RPP)、分布式相位板(DPP)等衍射元件

开展了大量的研究^[6,7],获得了较好的理论设计结果,但非连续相位板存在大角散射和高级次衍射损失能量等理论缺陷;对于完全连续的CPP研究并不多,而且由于设计未考虑工艺条件或者未对设计结果进行工艺优化^[8,9],使得设计结果无法制作或者导致实验结果与理论有较大偏差,从而无法满足光束匀滑要求。

CPP的设计跟普通衍射光学元件设计一样^[10],类似于光学变换系统中的相位恢复问题^[11]。但这

收稿日期: 2008-12-05; 收到修改稿日期: 2009-03-06

作者简介: 温圣林(1980—),男,助理研究员,主要从事衍射光学和微光学等方面的研究。

E-mail: shenglinwen@163.com

类光学逆问题具有多解,难以保证结果具有最优性能和最好加工特性。而且 CPP 在实际应用时通常联用光谱色散匀滑技术(SSD)等时域匀滑技术来共同完成匀滑功能^[12],CPP 的设计目标并不是全频段匀滑最优,而是需要对 SSD 和强激光传输过程中二次热电子效应不能匀滑的中低频调制进行有效抑制。本文兼顾激光装置的物理需求和现有的工艺约束条件建立了基于工艺的 CPP 设计理论模型,通过初相选取、焦斑频谱控制等多方面改进了传统 G-S 算法,并与传统 G-S 算法设计结果比较分析了它的正确性和可行性。

2 CPP 理论设计模型

CPP 理论设计模型如图 1 所示,基本思想如下:首先明确输入和输出光场的物理需求,并通过实验确定工艺的最小空间周期等约束条件,然后通过改进 G-S 算法设计得到 CPP 面型分布,并输入随机误差模拟和校验,如果满足功能需求和加工约束则交付加工,否则返回用改进 G-S 重新设计。该模型中输入输出条件和工艺约束条件是设计的准备阶段,数值模拟和功能校验是设计的正确性检验过程,而如何改进设计算法来耦合这些输入条件、输出需求和工艺约束条件完成,CPP 的设计是整个模型的关键。

改进 G-S 算法框图如图 2 所示,其原理类似于普通 G-S 算法,为达到设计要求,主要在以下四方

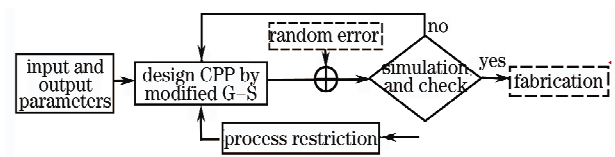


图 1 CPP 理论设计模型

Fig. 1 The theoretical design model for CPP

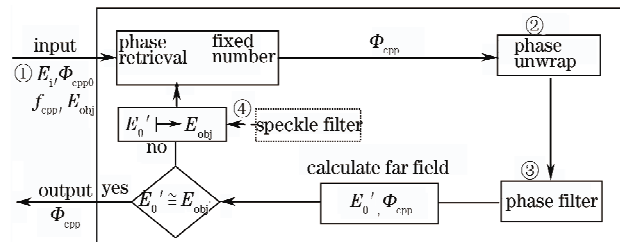


图 2 改进 G-S 算法设计 CPP 原理框图

Fig. 2 The schematic diagram of designing CPP by modified G-S algorithm

面进行改进:

1) 以连续相位作为 CPP 迭代初始值

为避免迭代过程带来不连续性,我们通过随机函数和超高斯函数卷积的方式获取,函数如(1)式所示,Re 代表取实部, \mathcal{F} , \mathcal{F}^{-1} 表示傅里叶变换和逆傅里叶变换, N_{Random} 是 -1 和 1 之间均值为 0 的随机函数, x, y, f_x, f_y 分别表示近场空域和频域坐标, f_{cpp} 代表工艺约束下的 CPP 最小单元频率, N 为超高斯函数阶数, a 是一个系数,通过改变它可调整产生的远场初始焦斑的大小。

$$\Phi_{cpp0} = a \text{Re} \left\{ \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} [N_{Random}(x, y)] \times \exp \left[- \left(\frac{f_x^2 + f_y^2}{f_{cpp}^2} \right)^N \right] \right\} \right\}. \quad (1)$$

2) 相位展开

相位恢复迭代的结果是在 2π 内变化的不连续分布相位,为避免其产生跳变引起大角度散射损失能量,采用相位展开技术对迭代结果进行相位展开处理^[13]。

3) 相位低通滤波

展开的相位不仅包括能够加工的中低频成分,而且还包含制作工艺不能加工的高中频分量,这些高中频成分会使实验加工的 CPP 不能达到设计效果,从而影响 CPP 的性能。为了抑制中高频成分,采用低通滤波处理,滤波函数如下

$$N_{\text{filt_cpp}} = \exp \left[- \left(\frac{f_x^2 + f_y^2}{f_{cpp}^2} \right)^N \right]. \quad (2)$$

4) 焦斑频域优化

对焦斑进行带通滤波处理,然后将此滤波轮廓

逐渐逼近目标焦斑,从而有效抑制特定频段的调制。滤波函数如下式

$$N_{\text{filt_1}} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{f_{0x}^2 + f_{0y}^2}{f_h^2} \right)^N \right] + \exp \left[- \left(\frac{f_{0x}^2 + f_{0y}^2}{f_l^2} \right)^N \right], \quad (3)$$

式中 f_{0x}, f_{0y} 为焦斑的频域坐标, f_h, f_l 分别为需匀滑的高低频截止频率。

3 设计结果和性能分析

为了验证理论模型和设计方法的正确性与可行性,分别采用基于工艺设计方法和常规 G-S 方法设计并进行比较分析,设计参数选择如下:

1) 输入光强分布为 12 阶超高斯光束方光束,表示为:

$$I_i = \exp\left\{-\left[\left(\frac{x^2}{R_i^2}\right)^{12} + \left(\frac{y^2}{R_i^2}\right)^{12}\right]\right\}, \quad (4)$$

其中束腰 $R_i=145$ mm;

2) 输出目标光场分布为 8 阶超高斯椭圆光束,表示为:

$$I_o = \exp\left[-\left(\frac{x_o^2}{a^2} + \frac{y_o^2}{b^2}\right)^8\right], \quad (5)$$

其长轴 $a=0.15$ mm,短轴 $b=0.707a$;

3) 聚焦透镜焦距 $F=2200$ mm,激光波长 $\lambda=0.351$ μm ,采用的熔石英折射率为 1.47;

4) 拟采用数控化学抛光方法制作,其刻蚀头约为 10 mm,根据工艺实验确定加工工艺约束的最小周期约为 15 mm.

为了衡量 CPP 的性能,分别从加工特性和功能方面进行分析。加工特性主要通过最小特征单元和功率谱密度(PSD)分布来判断。功能上分别从整形和匀滑角度进行分析,整形性能通过能量利用率 η ,而匀滑性能采用 20 μm 滤波后顶部 RMS 值和焦斑的 PSD 分布进行分析,它们的定义分别如下:

$$N_{\text{PSD}}(f_x, f_y) = \frac{|F[\Phi_{\text{CPP}}(x, y)]|^2}{df_x df_y}, \quad (6)$$

$$N_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{\text{top}} |I - \bar{I}|^2 / \bar{I}^2}{N - 1}}, \quad (7)$$

$$\eta = \frac{\sum_{\text{top}} I}{\sum_{\text{total}} I}, \quad (8)$$

其中 I 为输出光强各采样点的大小, \bar{I} 表示平均光强, N 为计算点数。

两种方法设计得到的相位分布如图 3 所示,从设计结果可以明显看出 G-S 设计的 CPP 位相展开后面型粗糙,包含较多的中高频成分,而基于工艺的改进 G-S 算法设计结果面型光滑,从图 3(c) PSD 分布对比图可以看出基于工艺设计方法设计的 CPP 在工艺条件约束(空间周期 T 小于 15 mm)之外的频率成分比普通 G-S 方法设计结果小了 2 个数量级,这说明基于工艺的 CPP 设计结果具有很好的工艺特性,为实验奠定了基础。

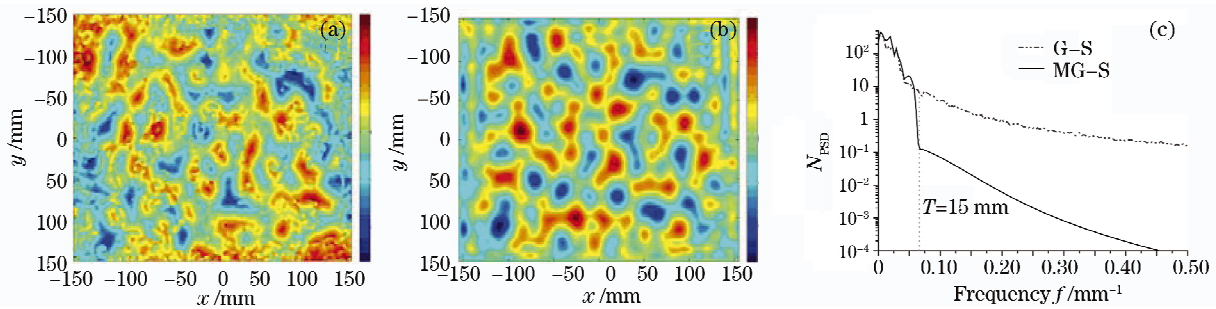


图 3 普通设计和基于工艺设计的 CPP 相位分布及其 PSD 对比。(a)G-S 设计结果,(b)基于工艺的设计结果,(c)PSD 分布对比

Fig. 3 The phase and PSD caused by G-S and process-based method. (a) G-S, (b) process-based method, (c) comparison of PSD

虽然 G-S 算法设计的 CPP 在理论上可具有较好的性能,但在实际制作工艺中不可能制作任意的中高频成分,而滤除它的中高频成分后焦斑匀滑性

能也会明显下降。图 4 是加工约束条件下两种设计方法的焦斑分布及其焦斑的 PSD 分布图,G-S 设计焦斑的 RMS 和 η 分别为 62.8% 和 98.0%,而改进

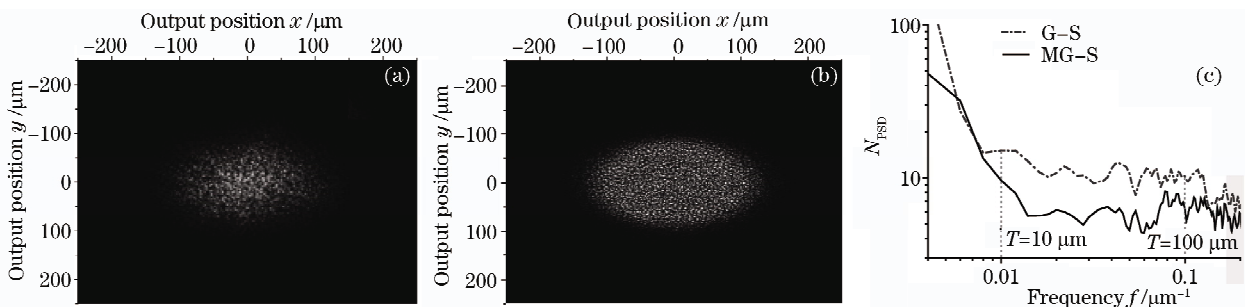


图 4 普通设计和基于工艺设计的焦斑及其 PSD 对比。(a)G-S 结果,(b)基于工艺的结果,(c)PSD 分布对比

Fig. 4 The focal spot caused by CPP designed by G-S and process-based method and its' PSD. (a) G-S, (b) process-based method, (c) comparison of focal spot's PSD

G-S 设计结果为 16.9% 和 98.6%。从它们焦斑的 PSD 分布图可以更直观地看出,采用基于工艺方法设计焦斑的 10~100 μm 频谱成分得到了有效控

制,滤除高频后(如图 5 所示)焦斑具有较好的性能,与 SSD 等匀滑技术耦合后能够满足惯性约束聚变(ICF)物理需求。

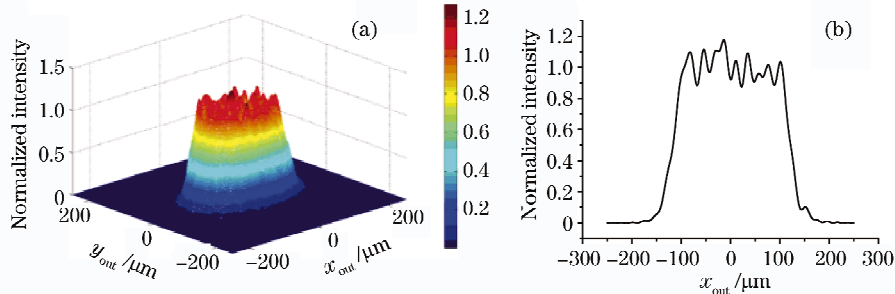


图 5 基于工艺设计 20 μm 滤波后焦斑。(a)二维,(b)一维

Fig. 5 The smoothed focal spot with 20 μm by process-based method. (a) 2-D, (b) 1-D

4 结 论

本文兼顾 ICF 的物理需求和现有工艺条件约束,建立了基于工艺的 CPP 理论设计模型,从初相选取、相位展开、滤波、焦斑频谱控制等多方面改进了传统的 G-S 算法,比较分析了传统设计方法和基于工艺设计方法设计的 CPP 的加工特性和焦斑性能,可以得出以下几个有意义的结论:

1) 基于工艺的设计能够很好地匹配工艺条件,这为 CPP 的实际制作奠定了基础;

2) 基于工艺的设计具有良好的匀滑性能,在 15 mm 最小周期的工艺约束条件下其顶部 RMS 和能量利用率 η 为 16.9% 和 98.6%,而如果放宽约束条件,其性能还将进一步提高;

3) 基于工艺设计的焦斑的 10~100 μm 的调制得到有效抑制,这为 CPP 与 SSD 等其他匀滑器件耦合奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 P. Wegner, J. Auerbach, T. Biesiada *et al.*. NIF final optics system; frequency conversion and beam conditioning [C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 180~189
- 2 J. Neauport, X. Ribeyre, J. Daurios *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
- 3 S. N. Dixit, M. D. Feit, M. D. Perry *et al.*. Designing fully continuous phase screens for tailoring focal-plane irradiance profiles[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(21): 1715~1717
- 4 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
- 5 J. A. Menapace, P. J. Davis, W. A. Steele *et al.*. MRF applications; on the road to making large-aperture ultraviolet

- laser resistant continuous phase plates for high-power lasers[C]. *SPIE*, 2006, **6403**: 64030N-1~12
- 6 Chen Bo, Wang Hanzhi, Wei Hui *et al.*. Design of fully continuous phase plates for beam smoothing in ICF[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4): 480~484
- 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): 480~484
- 7 Li Tao, Fu Shaojun, Wang Wei *et al.*. A hybrid algorithm applied to the design of diffractive optical elements used in uniform illumination[J]. *Chinese J. Computational Physics*, 2002, **19**(2): 77~80
- 李涛,付绍军,王炜等.一种用于均匀照明的衍射光学元件设计的混合算法[J]. *计算物理*, 2002, **19**(2): 77~80
- 8 Zhang Wei, Shu Fangjie, Zhang Xiaobo *et al.*. Spatial frequency spectrum optimization method for design of diffractive optical elements in uniform illumination[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1388~1392
- 张巍,舒方杰,张晓波等.均匀照明用衍射光学器件的空间频谱优化设计方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1388~1392
- 9 Li Ping, Ma Chi, Su Jingqin *et al.*. Analysis of laser optimized spectrum for smoothing the focused spot by temporal and special method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 534~538
- 李平,马驰,粟敬钦等.时域和与空域结合实现光束匀滑的光谱优化分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 534~538
- 10 Su Jingqin, Wen Shenglin, Yuan Jing *et al.*. Long-focal-depth lens designed by nonlinear phase fitting method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1842~1845
- 粟敬钦,温圣林,袁静等.采用非线性相位拟合法设计长焦深透镜[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1842~1845
- 11 J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms; a comparison[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(15): 2758~2769
- 12 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan. Spatial frequency analysis of beam smoothing performance realized by the diffractive optical element and the smoothing by spectral dispersion technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1384~1387
- 谭峭峰,严瑛白,金国藩.光谱色散匀滑技术与衍射光学器件联用性能的空间频谱分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1384~1387
- 13 M. A. Schofield, Y. M. Zhu. Fast phase unwrapping algorithm for interferometric applications[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14): 1194~1196