

用于背光照明的的大口径连续相位板设计和制作

温圣林 侯晶 杨春林 颜浩 石琦凯 周礼书

(成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要 连续相位板(CPP)是大型激光装置中用于控制光束形状、能量和波前分布的一种重要衍射光学元件。为改善聚焦光束的质量,建立了基于现有工艺的大口径 CPP 理论设计模型,优化了传统衍射元件设计算法。采用该算法设计了用于背光照明的 $\Phi 330\text{mm}$ CPP,开展了数控化学抛光制作 CPP 试制,并在大型激光装置上开展了验证实验。结果表明,基于工艺改进算法设计的 CPP 具有更好的加工特性和焦斑性能,基本实现了整形和匀滑性能,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;衍射光学

中图分类号 O435.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.052201

Design and Fabrication of Large-Aperture Continuous Phase Plates for Back Lighting

Wen Shenglin Hou Jing Yang Chunlin Yan Hao Shi Qikai Zhou Lishu

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

Abstract Continuous phase plates (CPPs) are important diffractive elements for precise control of beam-shape, energy distribution, and wavefront profile in large laser assembly. A theoretical design model for 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 improved through choosing continuous initial phase, phase unwrapping, phase filtering and controlling the frequency spectrum of focal spot. The operational characteristics and the focal spot's performance caused by the CPP designed by traditional and improved G-S algorithm are analyzed comparatively. The CPP with 330 mm of diameters used for back lighting is designed and first fabricated using numerical control wet-etching. It shows that the CPP designed by the improved method meets the process restriction and physical specifications very well.

Key words optical design and fabrication; continuous phase plates; improved G-S algorithm; beam smoothing; diffraction optics

OCIS codes 220.0220; 220.4610

1 引言

连续相位板(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]。物理实验对 CPP 的要求有大焦斑背光照明和小焦斑进洞两种,它们要求略有不同,背光照明要求具有较好的均匀性但对能量利用率要求较低,而进洞 CPP 要求具有很高的能量利用率和很小的旁瓣。为了实现这些要求,连续相位板的面形分布是非常复杂的自由曲面结构,给 CPP 的设计、加工及检测都带来了很大的困难^[3~5]。CPP 的设计跟普通衍射光学元件设计一样^[6],类似于光学变换系统中的相位恢复问题^[7]。但这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(SSD)等时域匀滑技术来共同完成匀滑功能^[8],CPP 的设计目标并不是全频段匀滑最优,而是需要对 SSD 和强激光传输过程的二次热电子效应不能匀滑的中低频调制进行有效抑制。

通常 CPP 具有复杂的面形,尤其是其峰谷(PV)和位相梯度,设计的极限分别达到 1 mm 和 20 $\mu\text{m}/\text{cm}$ 。复杂面形和大口径提高了加工成本。目前用来制作小周期空间结构磁流变抛光等方法制作成本都非常

收稿日期: 2010-09-22; 收到修改稿日期: 2010-11-25

作者简介: 温圣林(1980—),男,助研,主要从事衍射光学和光束传输等方面的研究。E-mail: shenglinwen@163.com

高。数控化学抛光方法能够实现熔石英材料的表面去除^[9]。氢氟酸缓冲液和 Marangoni 效应的结合可以通过表面张力梯度来实现局部刻蚀,从而形成了一种稳定、灵活的数控化学抛光技术。在抛光过程中,为达到设计结果需对加工结果进行检测。大口径干涉仪由于受到系统传递函数和采样理论的限制无法直接检测 CPP 的透射面形^[10]。

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,采用数控化学抛光方法和子孔径拼接检测技术制作了背光照明大口径 CPP,并在大型激光装置上开展了实验验证。

2 基于工艺的 CPP 理论设计

CPP 理论设计模型如图 1 所示,基本思想如下:首先明确输入光场和输出的物理需求,并通过实验确定工艺的最小空间周期等约束条件;然后通过改进的 G-S 算法设计得到 CPP 面形分布,并通过输入随机误差模拟和校验功能;如果满足功能需求和加工约束则交付加工,否则返回重新设计^[11]。其中,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。

改进算法的原理类似于普通 G-S 算法,为达到设计要求主要在以下 4 方面进行改进:

1) 为避免迭代过程带来不连续性,通过随机函数和超高斯函数卷积的方式获取连续相位,以此为 CPP 迭代初始值;

2) 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^[12];

3) 为了抑制中高频成分,采用低通滤波处理;

4) 为了有效耦合使用条件,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。

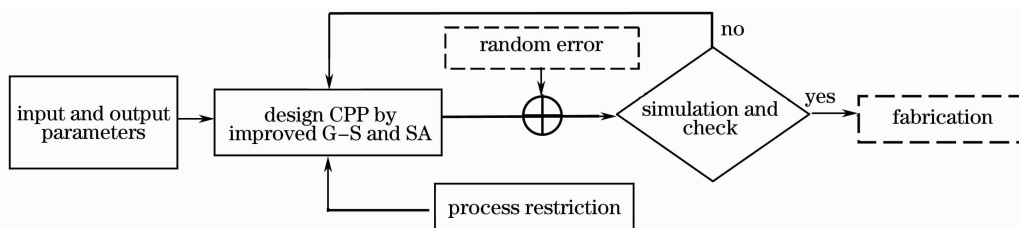


图 1 CPP 理论设计模型

Fig. 1 Theoretical design model for CPP

3 数控化学加工技术与子孔径拼接检测技术

数控化学抛光工艺过程如下:首先用干涉仪检测基片初始面形,计算得到整个基片表面的去除函数,然后根据刻蚀速率计算基片表面各点的刻蚀时间,从而确定刻蚀头的驻留时间,加工完成后再检测加工面形,并以此作为初始面形重复以上过程,直至加工面形符合设计要求。基片在刻蚀前需要清洗处理,并且各点对水的亲和性要有很好的 consistency,这样才能保证刻蚀头的一致性。基片必须精确定位,这样才能保证去除量与基片位置一一对应。刻蚀过程完成后必须立即清洗基片上残留的刻蚀液滴,使刻蚀终止,然后进行检测。

由于 CPP 元件的空间周期通常只有数毫米,波前梯度较大,因而大口径干涉仪不适合用于 CPP 波前的检测。子孔径拼接检测是一种比较适宜的方法,系统主要由小口径高分辨率干涉仪、测试软件及大口径元件平移支撑机构组成,如图 2 所示。

由于倾斜项、常数项在拼接过程中可以有效去除,因而对测量精度要求纳米级,而对平移支撑结构的要求可以适度放宽。同时振动是相移过程的一个重要的误差来源,因而在拼接系统中选用了振动不敏感的商业化干涉仪(4D FizCam1500),以保证子孔径波前测试精度,测试波长为 660 nm,通光口径为 150 mm,采样间距为 0.165 mm,均方根(RMS)误差测试重复性优于 0.132 nm。对大口径元件的支撑平移结构,位移精度要求约为干涉仪采样间距的 1/10 即可(对 4D Fiz1500 而言,即为 0.016 mm),角度偏转量可以由倾斜项、常数项的修正自动补偿。

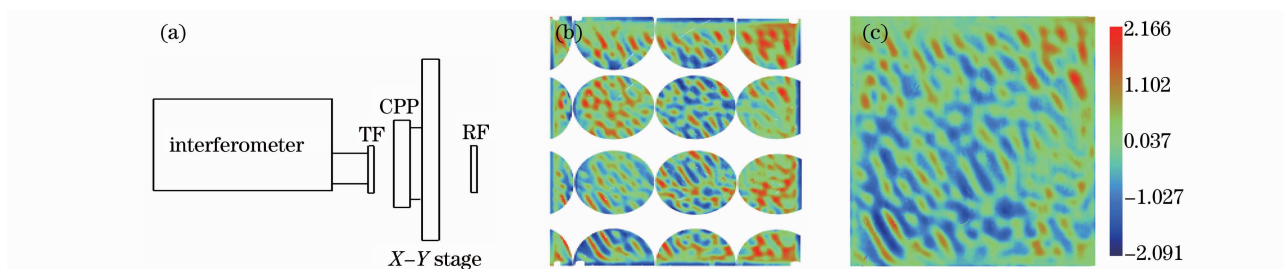


图 2 子孔径拼接检测系统示意图。(a)拼接系统,(b)子孔径,(c)拼接结果

Fig. 2 Schematic plan for measurement system of connecting small-aperture interferograms. (a) schematic plan, (b) small-aperture interferograms, (c) connecting result

4 背光 CPP 验证实验

为了验证设计和加工方法的正确性与可行性,采用基于工艺设计方法设计了用于背光照明的 CPP,设计参数选择如下:

- 1) 输入光场分布为 20 阶超高斯圆形光束,有效口径为 $\Phi 330$ mm,束腰 R_i 为 155 mm;
- 2) 输出目标光场分布为 8 阶超高斯圆形焦斑,直径为 $500 \mu\text{m}$;
- 3) 聚焦透镜焦距 $F=1575$ mm,激光波长 λ 为 $0.351 \mu\text{m}$,采用的熔石英折射率为 1.47;
- 4) 采用数控化学抛光方法制作,其刻蚀头为 10 mm 左右,根据工艺实验确定加工工艺约束的最小周期约为 15 mm。

设计和加工 CPP 面形分布如图 3 所示,为便于比较,将设计和加工面形统一转化成波长 λ 为 632.8 nm 的数据,设计 CPP 面形 PV 和 RMS 分别为 5.7λ 和 0.91λ ,而加工结果分别为 6.1λ 和 0.85λ ,其加工误差 RMS 为 0.15λ ($\lambda=632.8$ nm)。

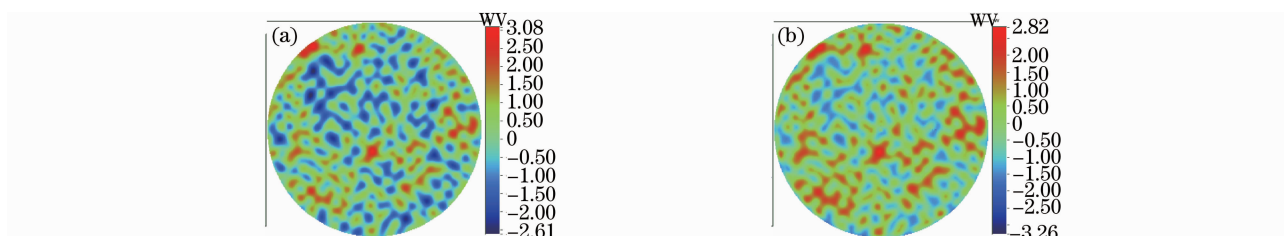


图 3 CPP 设计(a)和加工(b)面形

Fig. 3 Wavefront of designed (a) and fabricated (b) CPP

根据设计和加工结果模拟得到焦斑光强分布如图 4(a),(b)所示,并在大型激光装置上实测得到其焦斑分布如图 4(c)所示。计算和实测的焦斑能量比随半径分布的曲线如图 5(a)所示,3 根曲线比较接近,特别是由加工面形的模拟结果和实测结果曲线非常逼近。设计和加工计算焦斑及实测的焦斑在设计目标区域 ($\phi 500 \mu\text{m}$) 内所占能量百分比 ER500 分别为 91.8%,94.4%,90.7%。因此,理论和实验结果表明 CPP 具有

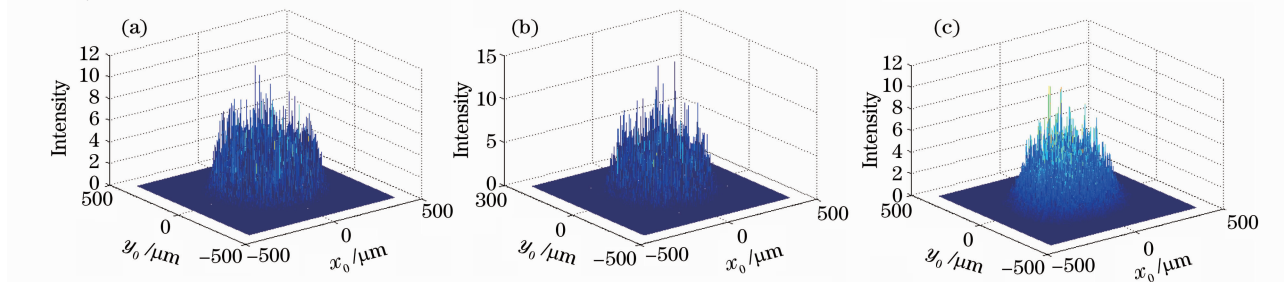


图 4 模拟计算和实测焦斑分布。(a)设计(模拟),(b)加工(模拟),(c)实验

Fig. 4 Simulated and measured intensity of focal spot. (a) design (simulation), (b) fabrication (simulation), (c) experimental result

较好的整形能力,而且可获得较高的能量集中度。

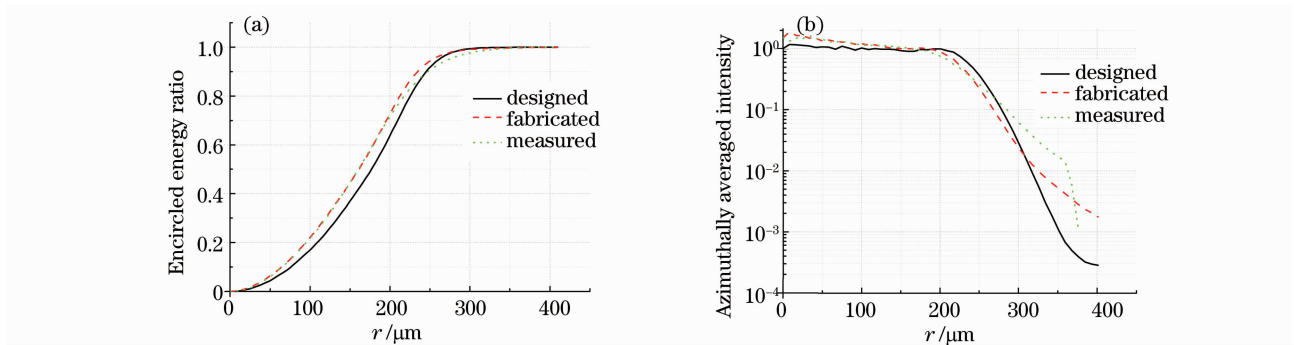


图5 计算和测量 CPP 焦斑的能量及径向平均光强分布。(a)能量分布,(b)径向平均光强

Fig. 5 Simulated and measured energy and averaged radial intensity distribution. (a) energy, (b) averaged intensity

在大型激光装置匀滑方案中,通常 CPP 与 SSD 共同完成束匀滑功能, CPP 主要匀滑中低频,而 SSD 对高频成分具有很好的匀滑效果。因此, CPP 匀滑性能的衡量主要关注它的中低频匀滑能力。径向平均光强分布能够直观反映焦斑大面积均匀性,可定性判断焦斑匀滑效果;虽然低通滤波与 SSD 高频匀滑不能等同,但它们对高频的作用具有较大相似性,可近似用 $20\mu\text{m}$ 滤波后焦斑的 RMS 值(RMS20)定量判断 CPP 匀滑性能。计算和实测焦斑的径向平均光强如图 5(b)所示,3 条曲线大致吻合,但由于加工误差和光束波前畸变使得加工结果和实测结果的中心光强较强且陡边程度变差,这也使得 RMS20 从设计的 17.4% 分别下降到 28.5% 和 36.7%。

5 结 论

兼顾惯性约束聚变(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,多方面改进了传统 CPP 设计算法,提出采用数控化学刻蚀方法和子孔径拼接检测技术制作 CPP 的工艺和方法。采用本文提出的设计方法和制作方法完成了用于背光照明的 CPP 设计和制作,并在大型激光装置上开展了验证实验,理论模拟和实验结果吻合,结果表明 CPP 具有较好的整形和匀滑性能,这也验证了设计理论和制作工艺的正确性和可行性。

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 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域优化设计方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1388~1392
- 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
- 6 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
- 7 J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**: 2758~2769
- 8 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, J in 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 等. 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
- 9 M. C. Rushford, J. A. Britten, S. N. Dixit *et al.*. Wet-etch figuring for precision optical contouring [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(28): 5706~5713
- 10 Masashi Otsubo, Katsuyuki Okada, Jumpel Tsujiuchi. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms[J]. *Optical Engineering*, 1994, **33**(2): 608~613
- 11 Wen Shenglin, Xu Qiao, Ma Ping *et al.*. Process-based design of continuous phase plates [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3179~3182
- 温圣林, 许 乔, 马 平等. 基于工艺连续相位板设计[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3179~3182
- 12 M. A. Schofield, Y. M. Zhu. Fast phase unwrapping algorithm for interferometric applications[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14): 1194~1196