

文章编号: 1001-3806(2009)01-0091-03

## 用于光束匀滑的连续相位板设计

温圣林, 杨春林, 周礼书, 许 乔  
(成都精密光学工程研究中心, 成都 610041)

**摘要:** 为了满足大型激光装置中驱动源聚焦光斑的均匀光强分布、高能量利用率和小旁瓣等特殊要求, 提出了采用追迹法和改进 G-S 算法相结合的连续相位板设计方法。进一步采用衍射积分方法模拟了该连续相位板的光学性能, 计算得到其产生的焦斑具有类似 24 阶超高斯分布, 其顶部光强均方差  $\sigma_{\text{RMS}} = 0.35\%$ 、顶部调制度  $\gamma = 1.33\%$ 、能量利用率  $\eta = 99.79\%$ 。结果表明, 该方法不仅具有追迹法计算简单、运算量小的优点, 而且克服了 G-S 算法容易陷入局部最优的缺点。采用该方法设计的连续分布, 解决了加工难题, 从而也提高了相位板的匀滑性能。

**关键词:** 光学设计与制造; 连续相位板; 追迹法; G-S 算法; 光束匀滑

**中图分类号:** TH741.6 **文献标识码:** A

### Design of the continuous phase plates for beam smoothing

WEN Sheng-lin, YANG Chun-lin, ZHOU Li-shu, XU Qiao  
(Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Aiming at the special requirements such as homogeneous intensity, high ratio of applied energy and small side-lobe for the focal spot of drive source in large-sized laser device, a hybrid method based on geometrical transformation and modified Gerchberg-Saxton (G-S) algorithm was proposed to design continuous phase plates (CPP). The performance of the CPP was verified by means of diffraction numerical integrating method and the result showed that the CPP obtained good 24th-order super-Gaussian fit with diffractive efficiency up to 99.79%, top mean square error of 0.35% and top modulation of 1.33%. This method is fast and avoiding the shortcoming that the G-S result is easy to trap in local optimum. Moreover, the designed plate is fully continuous, so the plate is easy to be fabricated and improves the smoothing performance of the plate.

**Key words:** optical design and fabrication; continuous phase plates; geometrical transformation; G-S algorithm; beam smoothing

### 引言

惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 系统对靶面焦斑的光强均匀性、能量利用率和旁瓣都提出了非常苛刻的要求: 直接驱动的光强不均匀性要求高达 1% ~ 2%, 能量利用率需大于 90%; 间接驱动的不均匀性要求虽可降至 5% ~ 10%, 但能量利用率需大于 95%, 而且要求旁瓣非常小。因此, 靶面均匀辐照是实现 ICF 必不可少的条件<sup>[1]</sup>, 各种束匀滑技术应运而生, 其中连续相位板 (continuous phase plates, CPP) 由于其能量利用率高、焦斑形貌易于控制等优点而被认为是实现 ICF 光束匀滑最具有前途的解决方案之一<sup>[2-3]</sup>, 国内外学者对它开展了广泛研究。其中美国的利弗莫尔和罗切斯特大学在 CPP 设计算法和制作

工艺上不断优化改进, 并于近期获得了较好的实验结果<sup>[4-5]</sup>。但一些关键技术并未公开, 而且所设计的 CPP 结构非常复杂, 目前国内无法实现加工。国内对 CPP 的研究起步较晚, 清华大学、中国科技大学等研究机构开展了较深入的理论研究, 取得了较好的理论设计结果, 但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, 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<sup>[6-7]</sup>。

CPP 的设计算法不仅包括常规的 Gerchberg-Saxton (G-S) 算法<sup>[8-9]</sup>、杨顾 (Y-G) 算法<sup>[10-11]</sup>、模拟退火 (simulated annealing, SA) 算法<sup>[12-13]</sup>、遗传算法 (genetic algorithm, GA)<sup>[14]</sup> 等设计方法, 还包括以这些算法为基础的混合算法<sup>[15]</sup> 和改进优化算法<sup>[5]</sup>。G-S 和 Y-G 算法原理简单、计算效率高, 但对初始条件和参量敏感, 容易陷入局部最优; SA 和 GA 算法都是全局搜索算法, 但计算效率非常低。这些算法设计的 CPP 通常具有剧烈的相位跳变, 不仅给加工造成了巨大困难, 而且

作者简介: 温圣林 (1980-), 男, 研究实习员, 主要从事衍射光学理论设计和加工技术的研究。

E-mail: shenglinwen@163.com

收稿日期: 2007-12-17; 收到修改稿日期: 2008-03-13

降低了 CPP 的匀滑效果,所以,在国内外相关实验报道较少,匀滑效果不能满足要求。

作者将提出采用几何追迹法和改进 G-S 算法相结合的混合算法设计 CPP,以改善 CPP 的匀滑性能和降低 CPP 的加工难度,并采用菲涅耳衍射积分模拟计算了 CPP 的光学性能。

## 1 CPP 混合设计算法

本文中 CPP 设计的基本思想如下:首先采用追迹法得到将入射光整形为输出光束所需的连续相位分布,然后以此连续相位作为迭代初始相位,采用 G-S 算法优化得到所需的 CPP 相位分布。

基于能量守恒原理的设计方法——追迹法,具有设计简单方便、运算量小的优点<sup>[16]</sup>。该方法假设输入平面和输出平面上各点一一对应,两个面上的总能量相等。如图 1 所示,面  $x-O-y$  为输入面,面  $x'-O'-y'$  为

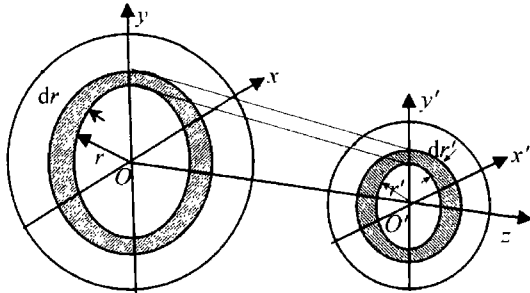


Fig. 1 The schematic plan of geometrical transformations between input plane and output plane

输出面,两面相距  $z$ ,  $R_{in}$ ,  $R_{out}$  分别为输入和输出光斑的半径大小。如果已知输入和输出光强分布分别  $I_{in}$ ,  $I_{out}$ , 由几何关系和能量守恒推导得到相位板相位分布为:

$$\varphi_g(r) = \frac{kr^2 R_{out}}{2z R_{in}} \quad (1)$$

式中,  $k=2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为入射光波长。

G-S 算法是一种基于快速傅里叶变换的迭代优化算法,它在已知输入面和输出面的实振幅分布  $A_{in}$  与  $A_{out}$  时,通过以下迭代过程求解最优解:(1) 随机选取输入面初始位相  $\varphi$ ;(2) 利用输入面和输出面的傅里叶变换关系计算得到输出面的位相分布  $\alpha = \arg[\mathcal{F}(A_{in} \exp(i\varphi))]$ ;(3) 利用傅里叶反变换关系求得输入面的位相分布  $\varphi = \arg[\mathcal{F}^{-1}(A_{out} \exp(i\alpha))]$ ;(4) 判断是否获得误差允许范围内的结果,如不满足则返回第(2)步继续迭代。

G-S 算法充分发挥了快速傅里叶变换的优点,能较快得到误差小于某给定值的设计结果,而且对输出面形的控制比较灵活,设计得到的相位板能量利用率比较高,相位分布也比较连续。但是,传统的 G-S 算法设计的相位板容易陷入局部最优, CPP 相位分布变化

可能很剧烈,设计结果可能无法加工,而且还有一个致命的缺点,即存在大量的  $2\pi$  线,在  $2\pi$  线的两侧,相位从 0 突然变化到  $2\pi$ 。这些  $2\pi$  线使制作的连续相位板在  $2\pi$  线附近产生了过渡区,形成了大角度散射,这造成了不必要的光能量损失。针对以上不足,采用追迹法得到的连续分布相位  $\varphi_g$  作为初始相位,这既能够获得完全连续的相位分布,降低 CPP 的制作难度,还减少了不必要的能量损失,从而优化了 CPP 的性能。

## 2 设计结果和性能分析

为了验证上述方法和理论的正确性,实际设计了一块连续相位板,设计参量选择如下:输入光为 12 阶超高斯光束,束腰  $R_{in} = 145\text{mm}$ ,如图 2a 所示;输出

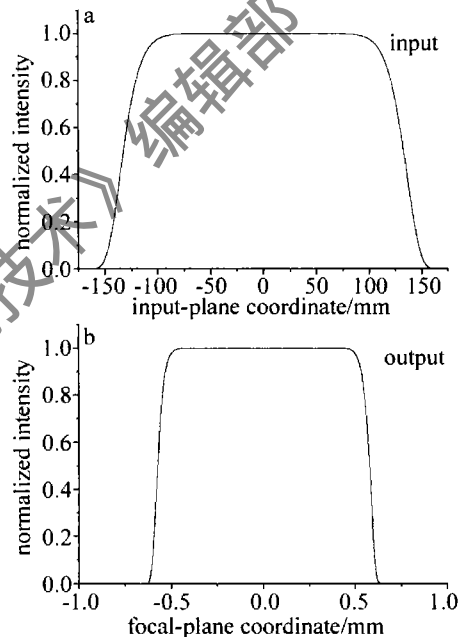


Fig. 2 The intensity distribution of input and output for designing

目标光场分布为 24 阶超高斯光束,束腰  $R_{out} = 0.5\text{mm}$ ,如图 2b 所示;聚焦透镜焦距  $f = 4000\text{mm}$ ,激光波长  $\lambda = 0.351\mu\text{m}$ 。

为了比较分析 CPP 的匀滑性能,定义顶部光强均方差  $\sigma_{\text{RMS}}$ 、顶部光强调制度  $\gamma$  和能量利用率  $\eta$  等参量对输出光场质量进行定量评价,它们的表达式分别如下:

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

$$\gamma = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{\bar{I}} \quad (3)$$

$$P = \frac{\sum_{\text{top}} I}{\sum_{\text{total}} I} \quad (4)$$

式中,  $I$  为输出光强顶部各采样点的大小,  $\bar{I}$  表示顶部平均光强,  $N$  为计算点数。

根据这些已知条件采用追迹法得到 CPP 的相位分布如图 3a 所示,然后将该连续相位作为改进 G-S 算

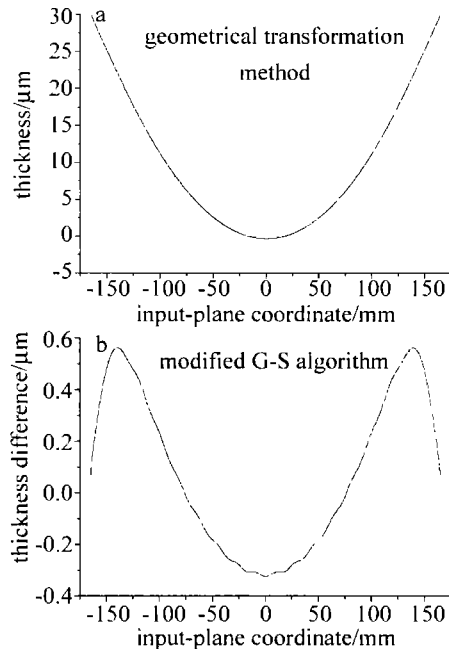


Fig. 3 The design result of CPP

法的初始相位,通过多次迭代求解获得 CPP 的设计结果,图 3b 是改进 G-S 算法优化后的 CPP 与追迹法设计的初始相位的差别。为验证所设计 CPP 的匀滑性能,采用菲涅耳衍射积分模拟计算了上述已知输入光场经过 CPP 和透镜后的远场分布<sup>[17]</sup>,其焦斑光强分布和能量分布如图 4 所示,图中实线为设计结果,而虚

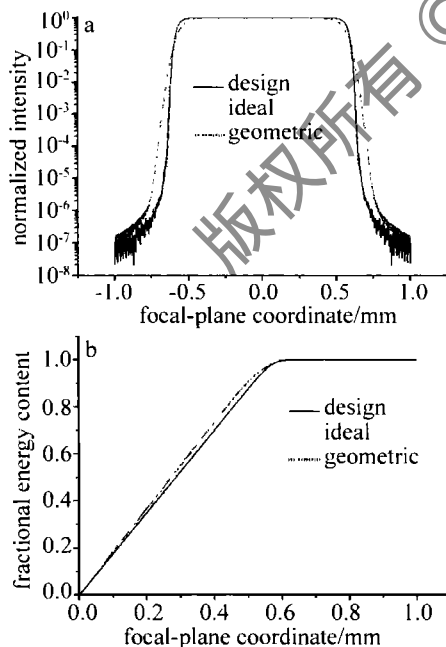


Fig. 4 The distribution of intensity and energy in the focal spot

线和点线分别表示理想输出和追迹法结果。由图可见,设计结果基本与目标一致,输出焦斑光强分布和能量分布都与 24 阶超高斯分布几乎重合。将设计结果进一步定量分析,计算得到顶部光强均方差  $\sigma_{\text{RMS}} =$

0.35%、顶部调制度  $\gamma = 1.33\%$ 、能量利用率  $\eta = 99.79\%$ 。设计结果表明,采用追迹法和改进 G-S 算法相结合的方法设计得到的 CPP 具有连续的分布,易于加工,而且它所产生的焦斑具有类似 24 阶超高斯分布,顶部平坦、旁瓣小,而且具有很高的能量利用率。

### 3 结论

提出了采用追迹法和改进 G-S 算法相结合的相位板设计方法,讨论了该设计方法及其原理,针对大型激光装置的特殊需求设计了用于光束匀滑的连续相位板,该相位板具有连续的相位分布,非常适合加工。作者还进一步采用衍射积分方法模拟了该 CPP 的光学性能,计算得到 CPP 产生的焦斑具有类似 24 阶超高斯分布,其顶部光强均方差  $\sigma_{\text{RMS}} = 0.35\%$ 、顶部调制度  $\gamma = 1.33\%$ 、能量利用率  $\eta = 99.79\%$ 。

### 参考文献

- [1] XIE Y J, LIU J R, ZHAO X Q. Laser beam smoothing and uniform illumination in ICF [J]. Laser Technology, 2001, 25(6): 454-459 (in Chinese).
- [2] WEGNER P, AUERBACH J, BIESIADA T, et al. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning [J]. Proc SPIE, 2004, 5341: 180-189.
- [3] NEAUPORT 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.
- [4] LIN Y, KESSLER T J, LAWRENCE G N. 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] MENAPACE J A, DIXIT S N, FRANCOIS Y G, et al. Magnetorheological finishing for imprinting continuous phase plate structure onto optical surfaces [J]. SPIE, 2003, 5273: 220-230.
- [6] LI Y P, ZHOU Q G, ZHAO Y Q. Improving PMA and IO algorithm for annular Gaussian beam uniform illumination [J]. SPIE, 2003, 5175: 194-201.
- [7] TAN Q F, YAN Y B, JIN G F, et al. Continuous phase diffractive optical element to realize uniform target illumination in inertial confinement fusion (ICF) [J]. SPIE, 1999, 3740: 424-447.
- [8] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. Optik, 1972, 35(2): 237-246.
- [9] FIENUP J R. Phase retrieval algorithms; a comparison [J]. Appl Opt, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [10] YANG G Z, GU B Y. On the amplitude-phase retrieval problem in the optical system [J]. Acta Physica Sinica, 1981, 30(3): 410-413 (in Chinese).
- [11] GU B Y, YANG G Z. On the phase retrieval problem in optical and electronic microscopy [J]. Acta Optica Sinica, 1981, 1(1): 517-522 (in Chinese).
- [12] KIRKPATRICK S. Optimization by simulated annealing [J]. Science, 1983, 220(4598): 671-680.

(下转第 96 页)

一定大气折射率与大气声速测量的不确定度关系。

由图2和图3可以看出,当大气折射率 $n$ 一定的时候,大气声速测量的不确定度随着大气布里渊频移

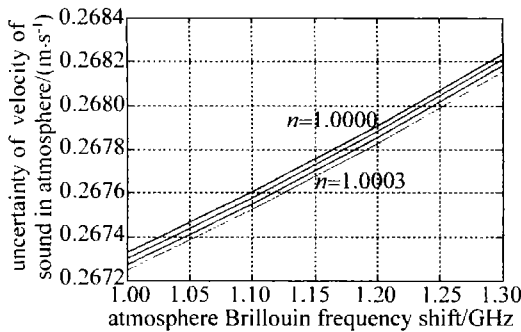


Fig. 2 Atmosphere Brillouin frequency shift versus the uncertainty of velocity of sound in atmosphere

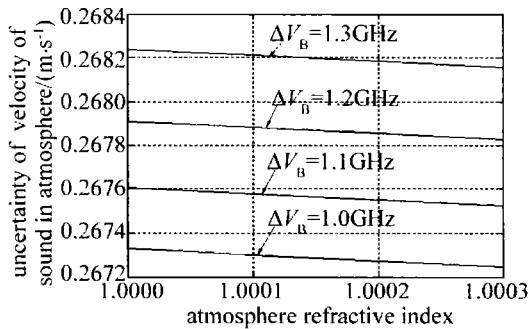


Fig. 3 Atmosphere refractive index versus the uncertainty of velocity of sound in atmosphere

的增大而增大,并近似成线性关系,且斜率较大,说明大气布里渊频移对大气声速的测量精度影响较大。当大气布里渊频移 $\Delta V_B$ 一定的时候,大气声速测量的不确定度随着大气折射率的增大而减小,也近似成线性关系,但斜率较小,说明大气折射率对大气声速的测量精度影响较小。所以在实际测量时,由于大气折射率的 $n=1$ 对测量结果影响很小。在典型值 $\Delta V_B=1.3\text{GHz}$ , $n=1$ 时,声速测量的总不确定度小于 $0.269\text{m/s}$ 。

### 3 结论

分析了布里渊激光雷达系统测量大气声速的误差,对各物理量具体对声速测量精度的影响做了详细

分析和数值计算。结果表明,在 $0\text{km}\sim 86\text{km}$ 海拔高度范围内使用该方法测量大气声速的不确定度小于 $0.269\text{m/s}$ ,同时,大气声速的误差受布里渊频移量测量精度的影响较大,而受大气折射率和激光入射波长的误差影响较小。该误差的分析对布里渊激光雷达测量大气声速系统的设计有着重要的参考意义。

### 参考文献

- [1] KORB C L, GENTRY B M, WENG Ch Y. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind [J]. Appl Opt, 1992, 31(21): 4202-4213.
- [2] PIIRONEN P, ELORANTA W. Demonstration of a high-spectral-resolution lidar based on an iodine absorption filter [J]. Opt Lett, 1994, 19(3): 234-236.
- [3] KORB C L, GENTRY B, HAYS P B. Observations winds with an incoherent lidar detector [J]. Appl Opt, 1992, 31(22): 4509-4514.
- [4] MA Y, LIN H, JI H, et al. Lidar system design based on brim detecting technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(2): 170-175 (in Chinese).
- [5] WANG L L, REN G, ZHANG Y, et al. Study of Brillouin scattering in atmosphere [J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 365-367 (in Chinese).
- [6] HUANG Zh H, REN G, CAI B W, et al. Calculation of detecting spatial object based on Brillouin scattering [J]. Laser Technology, 2004, 28(5): 518-520 (in Chinese).
- [7] CHENG G X. Roman Brillouin scattering [M]. Beijing: Science Press, 2001: 576-580 (in Chinese).
- [8] ZHANG X J, JIANG W H. Numerical calculation and results analysis for atmospheric refraction and atmospheric dispersion [J]. Opto-electronic Engineering, 2002, 29(2): 1-5 (in Chinese).
- [9] MA Y, LIANG K, LIN H, et al. Model of atmosphere detection in based on Brillouin scattering [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 962-966 (in Chinese).
- [10] PAN Q, ZHANG T C, ZHANG Y, et al. Intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized CW ring Nd: YAP laser [J]. Appl Opt, 1998, 37(12): 2394-2396.
- [11] LI X Y, PAN Q, JING J T, et al. LD pumped intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd: YAP/KTP laser with 1.1W output at 540nm [J]. Opt Commun, 2002, 201(1/3): 165-171.
- [12] FRY E S, EMERY Y, QUAN X H, et al. Accuracy limitations on Brillouin lidar measurements of temperature and sound speed in the ocean [J]. Appl Opt, 1997, 36(27): 6887-6894.

(上接第93页)

- [13] LIN Y. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profiles [J]. Opt Lett, 1995, 20(7): 764-766.
- [14] BENNETT A P, SHAPIRO J L. Analysis of genetic algorithms using statistical mechanics [J]. Phys Rev Lett, 1994, 72(9): 1305-1309.
- [15] FENG D, TAN Q F, YAN Y B, et al. A new hybrid algorithm for designing the continuous phase screen used for beam shaping [J].

SPIE, 2001, 4443: 16-23.

- [16] DONG M F, SONG X X, LI S. The designation and experiment of the DOE applied to shape the laser beam to square frame shape [J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 169-182 (in Chinese).
- [17] WEN Sh L, SU J Q, DONG J, et al. Spheric long-focal-depth lens [J]. Opt Commun, 2007, 278(1): 14-16.