

基于随机入射光的连续相位板设计及匀滑特性分析

杨春林 温圣林 马 平 许 乔

(成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要 基于实际大型激光系统中光束波前随机变化的特征, 提出了针对任意入射光进行光束匀滑的连续相位板设计方案, 并建立了评价连续相位板在光路中匀滑效果的方法。利用随机理论对光束通过相位板前后的统计性质进行了分析, 计算了激光通过相位板后的传输特性, 分析了透射光的远场分布。计算了光场的复振幅及光强的一阶统计性质, 并根据远场光斑的复振幅及强度分布的数值特性对匀滑效果进行分析。设计了一个可用于实际光路束匀滑的相位板, 并对其面形特征进行了评价。

关键词 衍射光学; 连续相位板; 随机入射; 统计特性

中图分类号 TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200929s1.0365

Study on the Continuous Phase Plate for Laser Beam with Random Phase Distribution

Yang Chunlin Wen Shenglin Ma Ping Xu Qiao

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

Abstract According to requirement of the actual laser system, a design scheme of a continuous phase plate (CPP) for laser beam with random phase distribution has been developed. A kind of method has been established to analyze the smoothing character of CPP. The random theory is employed to study the statistic characteristics of the laser beam. The propagation parameters have been calculated and the results show the far-field distribution of the laser beam. Using the design principle, a CPP that can be used in the actual light path is designed and its surface character is analyzed in detail.

Key words diffractive optics; continuous phase plate; random input; statistic characters

1 引 言

大型激光系统中使用了大量的各类光学元件, 由于光学元件的加工误差、外界环境的振动、空气扰动等不可避免的客观因素的存在, 输出激光波前会产生明显的畸变, 进而影响其聚焦特性。为了满足系统对光束质量的要求, 必须在系统终端使用束匀滑元件, 而衍射光学元件是实现束匀滑的一种行之有效的技术途径^[1]。

20 世纪 80 年代 Kato 等^[2]设计出了随机相位板(RPP), 并将其应用于激光的束匀滑处理, 随后连续相位板(CPP)^[3]的设计及应用成为该方向目前重要的研究对象。通常 CPP 的设计可以根据需要使用需要采用模拟退火法^[4]或 GS 算法^[5], 目前为止, CPP

的设计工作都是在已知相位分布的情况下进行的^[6], 也就是认为激光波前畸变量是确定且分布不变。实际上, 系统输出的光束由于受到装架状态变化、光学元件更换、外界温度变化等等因素影响, 往往是一个波前相位分布随机变化的信号。能否通过设计得到一个合适的 CPP 元件, 使其能够对相位分布随机变化的光束起到束匀滑效果, 这需要开展进一步的研究。

本文从随机理论出发, 通过分析带有随机相位误差的光束具有的统计性质, 研究了这种情况下束匀滑相位板的设计方案。设计了 CPP 元件, 并计算了具有不同波前畸变的光束通过 CPP 后的远场分布, 计算结果证实了该方案的有效性。

基金项目: 国家 863 计划(2007AA804214)资助课题。

作者简介: 杨春林(1972—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事相位光学元件的设计与制造等方面的研究。

E-mail: yangchunlin@hotmail.com

2 CPP 对随机入射波前的匀滑理论分析

通常情况下,匀滑光强分布在聚焦透镜的焦面上获得,即远场光束匀滑。实际系统中输入到束匀滑元件上的是一个相位分布随机变化的光信号,因此可以将入射光的复振幅表示为一个随机函数,为了减少计算量,考虑畸变光束和相位板都是一维分布的情况。设畸变光束复振幅 $u(x)$ 和相位板复透过率 $t(x)$ 可以分别表示为

$$\begin{aligned} u(x) &= \exp[jk\alpha(x)], \\ t(x) &= \exp[jk\beta(x)], \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\alpha(x)$ 表示光束波前,考虑到受外界噪声调制,是一个随机函数, $\beta(x)$ 表示相位板的面积, k 是波数。可以假设畸变的波前 $\alpha(x)$ 是一个平稳高斯随机函数^[7],即 $\alpha(x) \sim N(0, \sigma_a^2)$, 且其自相关函数可以表示为 $B_a(s) = \sigma_a^2 \exp[-s^2/c^2]$, 其中 σ_a 是该高斯随机函数的方差。

根据光传输理论,光束通过相位板后的远场分布为

$$U_{\text{inf}}(f) = \mathcal{F}\{u(x)t(x)\}, \quad (2)$$

其中 $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换,因此激光的远场分布 $U_{\text{inf}}(f)$ 也是随机函数。经过推导可以求出光束远场分布的方差

$$\begin{aligned} D[U_{\text{inf}}(f)] &= E\{\overline{U_{\text{inf}}(f)U_{\text{inf}}(f)}\} - \\ &= \frac{E\{\overline{U_{\text{inf}}(f)}\}E\{U_{\text{inf}}(f)\}}{E\{U_{\text{inf}}(f)\}E\{U_{\text{inf}}(f)\}} = \\ &= \mathcal{F}\{B_a(x)\} * |T(f)|^2 - u_0^2 \cdot |T(f)|^2, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $u_0 = \exp(-k^2 \sigma_a^2 / 2)$ 是入射光的数学期望, $T(f)$ 是相位屏的傅里叶谱。

在光束匀滑的场合,引入相位板通常都会增大焦斑尺寸和远场分布宽度。可以认为 $\mathcal{F}\{B_a(x)\}$ 的半宽度远小于 $|T(f)|^2$ 的半宽度,这样 $\mathcal{F}\{B_a(x)\} \approx M\delta(f)$, 其中 M 是归一化常数因子。则方差的表达

式可以进一步简化为

$$D[U_{\text{inf}}(f)] \approx (M - u_0^2) \cdot |T(f)|^2, \quad (4)$$

这样就可以直接得出,激光束远场分布的方差 $D[U_{\text{inf}}(f)]$ 与相位屏的傅里叶谱强度 $|T(f)|^2$ 成正比,则相位屏的傅里叶谱强度越小,分布也就越宽^[8],这样通过其匀滑处理后的光束远场分布方差就越小,光强分布越均匀,这也就是 CPP 元件设计的基本原则。

通过推导过程,我们可以使用光束经过 CPP 后,光束远场分布的方差来对元件的匀滑效果进行评价。显然方差越小,说明焦斑处光能量的分布越均匀,匀滑效果也就越好。对于消相关型的相位板,分析方法也类似,我们将另文报道。

3 CPP 的设计与束匀滑特性

根据上文的分析结果,可以设计出一个对不同畸变入射波前都能够实现有效匀滑的 CPP 元件,文中的一维模型可以拓展为二维模型。为证实该设计原则的有效性,利用改进的 GS 算法设计了一个 CPP,其面积分布 $\beta(x, y)$ 满足(1)式描述的透过率函数形式,具体面积分布如图 1 所示。

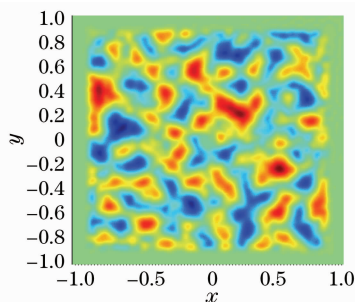


图 1 随机相位板设计面积

Fig. 1 A design result of a continuous phase plate

利用数值模拟方法随机生成两个畸变的光波前,如图 2 所示,为区分两个入射波前,畸变波前(a)

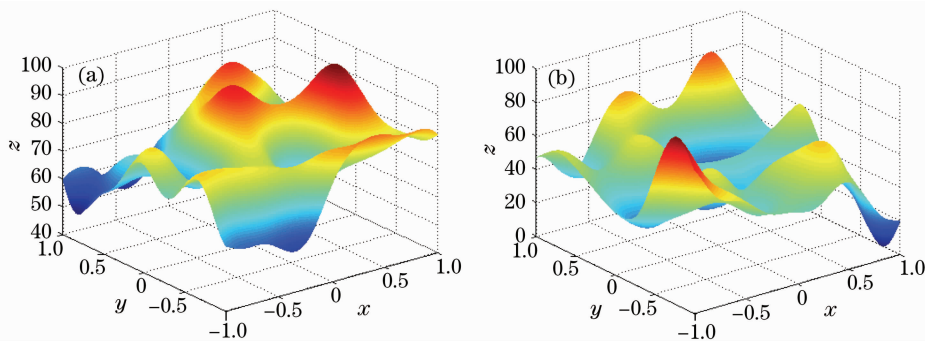


图 2 两个不同的畸变波前

Fig. 2 Two wavefronts with different aberration

和(b)的相位参数 $\alpha(x, y)$ 不同,但是具有相同的统计特性。

两个畸变波前直接聚焦后的远场分布如图 3 所示。可以看出在远场畸变光束的光场分布非常不均匀,能量起伏大。

根据(2)式将入射光复振幅与 CPP 的透过率函数代入计算,可以得到焦斑处的光场分布,如图 4 所示。

通过计算结果可以看出,与图 3 所示的未利用 CPP 进行匀滑处理的远场分布比较,经过 CPP 后,不同畸变光束经过同一块 CPP 后都得到了有效的匀滑,焦斑处的光能量分布的均匀性得到了改善。

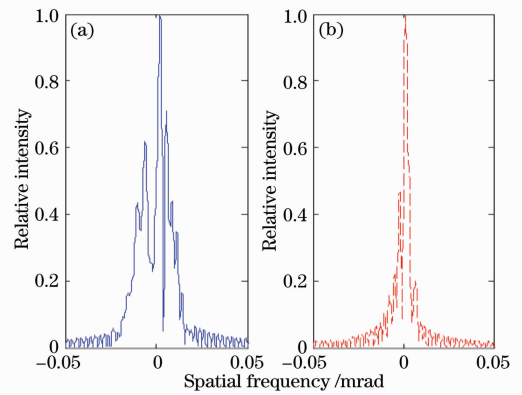


图 3 束匀滑处理前光束远场分布

Fig. 3 Far-field distribution of two aberration laser beam without beam smoothing

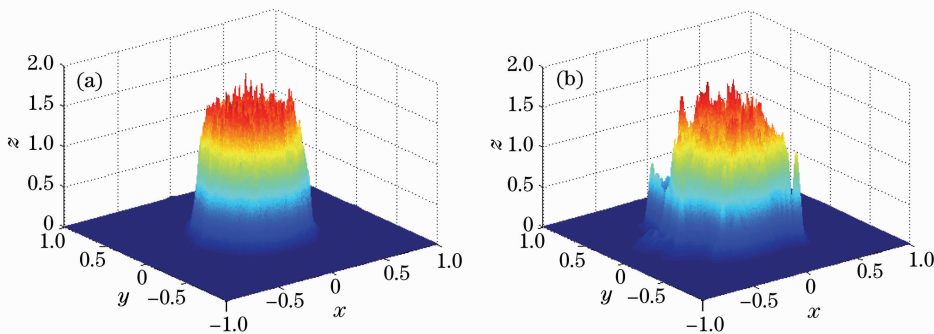


图 4 经过 CPP 后的光束远场分布

Fig. 4 Far-field distribution of two aberration laser beam passing through CPP

4 结 论

光学系统在实际应用中受到各种因素影响而导致的光波前畸变,可以在系统光路中使用 CPP 元件来对光束质量进行改善。由于实际使用中入射相位板光波前通常是不确定的,具有随机性,需要考虑设计的 CPP 元件是否能够对具有不同相位畸变的入射光都具有有效的匀滑效果。本文利用随机理论对输入光场通过束匀滑相位板后的传输特性进行了分析,通过对具有随机相位分布的光场通过 CPP 后的远场分布进行计算,证明了具有一定傅里叶谱宽度的 CPP 元件能够满足要求。根据这一原则,使用改进的 GS 算法设计了相位板,并通过数值模拟方法分析了不同畸变波前通过匀滑后的远场分布特性,计算结果表明所设计的 CPP 可以满足实际光学系统束匀滑的需要。

参 考 文 献

1 Jin Guofan, Tan Qiaofeng, Yan Yingbai *et al.*. Binary optics used in high power laser shaping[J]. *Engineering Science*, 2000, **2**(6): 27~32

金国藩,谭峭峰,严瑛白等. 二元光学在强激光波面整形中的应用[J]. *中国工程科学*, 2000, **2**(6): 27~32

2 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

3 Chen Bo, Wang Hanzi, 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,王涵子,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

4 Liu Hongliang, Zhao Yiqiong, Li Yongping *et al.*. A fast SA algorithm for the design of DOE for uniform illumination[J]. *Chinese J. Computation Physics*, 2005, **22**(3): 240~244

刘洪亮,赵逸琼,李永平等. 一种用于均匀照明的衍射光学元件设计的快速模拟退火法[J]. *计算物理*, 2005, **22**(3): 240~244

5 Liu Lanqin, Wu Yi. Research on the quadratic driving mends to the GS method retrieving wavefront [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11): 983~986

刘兰琴,吴毅. 契伯格-萨克斯顿方法反演相位的二次驱动改进研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(11): 983~986

6 Xiao Jun, Lü Baida. Characteristics of polarization control plate smoothing interference speckles[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(7): 627~632

肖峻,吕百达. 偏振控制板对干涉斑纹的匀滑特性[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(7): 627~632

7 Deng Qinghua, Zhang Xiaomin, Jing Feng *et al.*. Scale length of optics low-frequency phase aberration[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2002, **14**(4): 508~510

邓清华,张小民,景峰等. 光学元件低频相位噪声的空间尺度[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(4): 508~510

8 Chunlin Yang, Rongzhu Zhang, Qiao Xu *et al.*. Continuous phase plate for laser beam smoothing[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(10): 1465~1469