

连续位相板均方根梯度对焦斑匀滑特性的影响*

冯友君 林中校 张蓉竹†

(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

(2011年4月7日收到; 2011年5月9日收到修改稿)

为满足惯性约束聚变(ICF)系统中, 对焦斑均匀辐照的条件, 研究了连续位相板(CPP)面形特征对远场光斑质量的影响. 从波动光学和几何光学两个不同的角度建立分析模型, 并利用均方根梯度这一参数将其统一起来. 利用所建立的分析模型, 通过数值计算研究了CPP面形均方根梯度对低频畸变光束的匀滑效果. 结果表明: 随着CPP均方根梯度增大, 匀滑后的远场焦斑半径增大; 光束顶部不均匀性先很快减小, 再缓慢降低, 最后趋于不变, 可见CPP对光束的匀滑效果明显; 束匀滑过程对能量利用率的影响先几乎不变, 然后逐渐减小. 当CPP的相关长度不变, 均方根梯度在0.2—0.8 wave/mm范围内时, 光斑尺寸、光束顶部不均匀性及能量利用率都在较好的范围.

关键词: 连续位相板, 均方根梯度, 光束匀滑, 聚焦光斑

PACS: 42.25.Fx, 42.25.Bs, 42.15.-i

1. 引言

在激光惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)系统中, 为满足打靶条件, 要求入射的激光对靶场区域辐照的光强分布尽可能均匀, 因此发展了多种靶面均匀辐照技术, 国内外对此也做了大量的工作^[1-8]. 大致可分为空间匀滑技术及时间匀滑技术, 而空间匀滑技术可控制焦斑包络形状并改善大空间尺度的辐照均匀性, 可消除入射激光强度或相位不均匀性分布的影响, 所以近年来受到广泛关注并先后研究出了随机位相板(RPP)^[9], 相息图位相板(KPP)^[10], 分布相位板(DPP)^[11,12], 连续位相板(CPP)^[13,14]及透镜阵列技术(LA)^[15]等光学元件. 但CPP相对其他元件而言, 衍射效率能达到95%以上, 同时可灵活控制焦斑形状, 所以近年来特别受关注.

目前国内外关于CPP的研究主要集中在设计方法、制造工艺^[16]以及CPP元件使用对系统光路的影响等方面, 关于CPP自身的结构特征对光束匀滑处理特性并没有更为系统的研究工作发表. 传统的CPP设计方法主要采用的是G-S算法^[17], 由于迭代相位是 2π 内变化的不连续分布相位, 且包括制作

工艺不能加工的高中频分量^[16], 所以让实际加工出的CPP不能达到设计时的匀滑效果. 本文采用改进的G-S算法设计CPP, 对其进行解相和滤波. 用CPP的均方根梯度(GRMS)来描述CPP的面形特征, 从波动光学及几何光学角度得出, CPP的GRMS将对光束的焦斑产生很大影响. 数值模拟了在相关长度不变时, 不同GRMS值的CPP对有低频畸变波前的光束远场焦斑产生的影响.

2. 物理模型

2.1. 波动光学光束传输模型

2.1.1. 低频位相噪声模型

在实际的光学系统中, 由于光学加工、装夹等过程不可避免地会给输出波前带来调制, 从而引起波前畸变. LLNL研究表明, 光束的波前畸变主要是由引入的位相噪声决定的. 从频域上, 可将由光学元件表面加工误差引起的激光波前畸变按空间频率划分为高中低频, 其中低频误差对焦斑形状有明显影响, 并且低频误差在光束传输过程中仍以位相形式存在而不会影响光束振幅的分布, 可以用随机位相屏来处理, 其数学表达式如下^[18]:

* 国家重大科学研究计划(批准号: JG2010099)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zhang_rz@scu.edu.cn

$$\phi_{nf}(x_{nf}, y_{nf}) = A_1 \cdot \text{random}(-1, 1) * \exp\left[-\left(\frac{x_{nf} + y_{nf}}{p_1}\right)\right], \quad (1)$$

其中, A_1 为决定位相起伏的振幅, $\text{random}(-1, 1)$ 为在 -1 到 1 之间的均匀分布的随机数序列, “*” 表示卷积, p_1 是坐标方向上决定位相噪声空间起伏的参数, 不同的 p_1 , 可产生不同空间起伏的位相噪声, 该参数与位相屏的自相关函数有关.

由于低频波前畸变对焦斑将产生很大的影响, 让靶场中辐照不均匀, 所以需要光束进行匀滑处理.

2.1.2. 连续位相板(CPP)的设计原理

采用改进 G-S 算法来设计 CPP, 基本流程如图

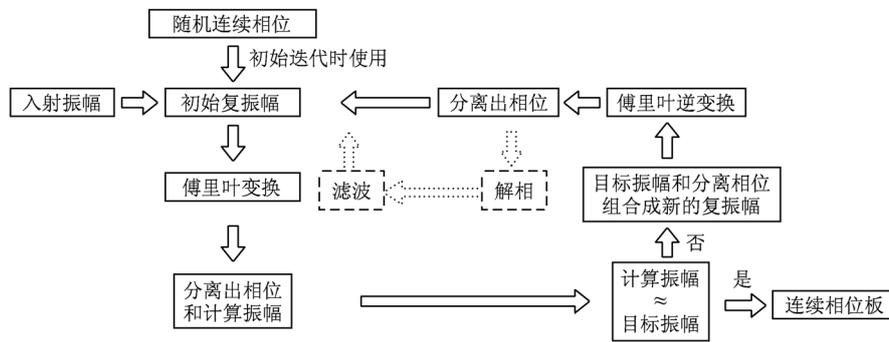


图1 改进的 G-S 算法流程图

2.1.3. CPP 均方根梯度的引入

梯度是量化分析低频误差的主要参数之一, 因此重点考虑 CPP 本身面形的梯度对光束质量的影响. 根据梯度概念, CPP 沿 x, y 方向上的位相梯度函数 $g_x(x_{nf}, y_{nf}), g_y(x_{nf}, y_{nf})$ 分别是 CPP 沿 x, y 方向的一阶偏微分:

$$g_x(x_{nf}, y_{nf}) = \frac{\partial \phi_{\text{cpp}}(x_{nf}, y_{nf})}{\partial x_{nf}}$$

及

$$g_y(x_{nf}, y_{nf}) = \frac{\partial \phi_{\text{cpp}}(x_{nf}, y_{nf})}{\partial y_{nf}},$$

则整个 CPP 面形的梯度为

$$g(x_{nf}, y_{nf}) = \sqrt{g_x(x_{nf}, y_{nf})^2 + g_y(x_{nf}, y_{nf})^2}.$$

我们将 $g(x_{nf}, y_{nf})$ 的均方根值

$$\text{GRMS}_{\text{CPP}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N g_i(x_{nf}, y_{nf})^2 / N}, \quad (2)$$

称作为 CPP 的均方根梯度, N 为采样点.

2.1.4. 光束传输模型

图 2 是 CPP 对畸变波前进行匀滑处理时的光路结构. 根据夫琅和费衍射, 我们可以得到远场光

1 所示. 其基本思想是: 将入射光振幅与初始随机连续相位结合组成初始复振幅, 对其进行傅里叶变换, 并将变换后所得到的光场振幅与目标振幅比较. 若达到误差标准, 则该相位即为设计所要求的, 若没达到误差标准, 则将该相位与目标振幅结合组成新的复振幅并做傅里叶逆变换. 求得新的相位分布, 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. 其中虚线框为相对传统 G-S 算法所做的改进, 即对傅里叶逆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, 以便在接下来的迭代过程中保持相位的连续性和光滑性^[19].

场分布为

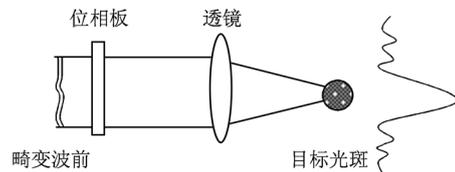


图2 用连续相位板实现靶面均匀辐照的典型结构

$$E_{ff}(x_{ff}, y_{ff}) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \times \exp\left[\frac{ik(x_{ff}^2 + y_{ff}^2)}{2z}\right] \iint_{\infty} E_{nf}(x_{nf}, y_{nf}) \times \exp\left[-\frac{ik}{z}(x_{nf}x_{ff} + y_{nf}y_{ff})\right] dx_{nf} dy_{nf} = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik(x_{ff}^2 + y_{ff}^2)}{2z}\right] \times F[E_{nf}(x_{nf}, y_{nf})], \quad (3)$$

其中 $E_{nf}(x_{nf}, y_{nf}), E_{ff}(x_{ff}, y_{ff})$ 分别为近场及远场的复振幅. $E_{nf}(x_{nf}, y_{nf})$ 的位相包含入射光束的畸变波

前 $\phi_{nf}(x_{nf}, y_{nf})$ 以及 CPP 的面形函数 $\phi_{cpp}(x_{nf}, y_{nf})$. (x_{nf}, y_{nf}) 及 (x_{ff}, y_{ff}) 分别是近场、远场的坐标, z 为传输距离, λ 为波长, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, F 为傅立叶变换, 光强为

$$I(x_{ff}, y_{ff}) = E_{ff}(x_{ff}, y_{ff}) \cdot E_{ff}^*(x_{ff}, y_{ff}),$$

其中 $E_{ff}(x_{ff}, y_{ff})$ 与 $E_{ff}^*(x_{ff}, y_{ff})$ 互为共轭.

一般情况下, 认为入射光束为超高斯光束

$$E_{nf} = \exp\left\{\ln(\mu) \left[\left(\frac{x_{nf}}{\omega_x}\right)^2 + \left(\frac{y_{nf}}{\omega_y}\right)^2 \right]^n\right\}, \quad (4)$$

其中 ω_x, ω_y 分别为 x, y 方向上束腰半径. μ 为常数, 它表示在束腰半径位置上的光强与顶部峰值光强的比值.

根据 2.1 节的分析, CPP 的面形分布 $\phi_{cpp}(x_{nf}, y_{nf})$ 对远场光斑会产生影响, 这样面形梯度值的大小也将对远场光场产生影响.

2.2. 几何光学模型

根据几何光学理论, 波前的法线方向就是光束传输的方向, 光束在传输过程中由于光学元件会对波前产生调制, 因此也会导致波前相位梯度发生变化. 最后的波前梯度分布决定了焦斑形状, 所以用位相均方根梯度能更好的描述光束传输的物理实质. 由梯度概念可知, 梯度恰好与波传递的角谱是相关的.

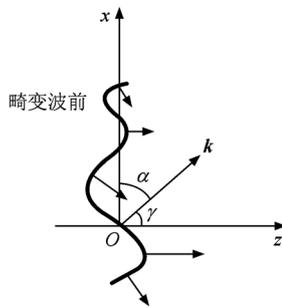


图3 波前及其法线方向

如图 3 所示, 假设有近场畸变波前 $\phi(x_{nf}, y_{nf})$, 根据角谱理论, 可得到远场的角谱分布为^[20]

$$\begin{aligned} & A\left(\frac{\cos\alpha}{\lambda}, \frac{\cos\beta}{\lambda}\right)_{ff} \\ &= A\left(\frac{\cos\alpha}{\lambda}, \frac{\cos\beta}{\lambda}\right)_{nf} \\ & \times \exp\left(i\frac{2\pi z}{\lambda} \sqrt{1 - \cos^2\alpha - \cos^2\beta}\right), \quad (5) \end{aligned}$$

其中, $A\left(\frac{\cos\alpha}{\lambda}, \frac{\cos\beta}{\lambda}\right)_{ff}$ 与 $A\left(\frac{\cos\alpha}{\lambda}, \frac{\cos\beta}{\lambda}\right)_{nf}$ 分别是远场、近场的角谱, α, β 分别为波矢量 k 沿 x, y 轴的方

向角. 对此做傅里叶逆变换, 可得远场的光场为

$$\begin{aligned} E_{ff}(x_{ff}, y_{ff}) &= \iint_{\infty} A\left(\frac{\cos\alpha}{\lambda}, \frac{\cos\beta}{\lambda}\right)_{nf} \\ & \times \exp\left\{i\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \cos^2\alpha - \cos^2\beta}\right\} \\ & \times \text{circ}\left(\sqrt{\cos^2\alpha + \cos^2\beta}\right) \\ & \times \exp\left[i2\pi\left(\frac{\cos\alpha}{\lambda}x + \frac{\cos\beta}{\lambda}y\right)\right] \\ & \times d\frac{\cos\alpha}{\lambda}d\frac{\cos\beta}{\lambda}, \quad (6) \end{aligned}$$

其中 circ 为圆域函数, α, β, γ 分别为波矢量 k 沿 x, y, z 轴方向角, 满足 $\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1$.

由梯度的概念, 可得到波前沿 x, y 轴方向的梯度分布为

$$\begin{aligned} G_x(x_{nf}, y_{nf}) &= \frac{\partial\phi(x_{nf}, y_{nf})}{\partial x} = \tan\alpha, \\ G_y(x_{nf}, y_{nf}) &= \frac{\partial\phi(x_{nf}, y_{nf})}{\partial y} = \tan\beta. \quad (7) \end{aligned}$$

根据三角函数关系, 利用 (6) 与 (7) 式, 就可以得到远场光场与波前相位梯度的关系.

整个面形的梯度分布为

$$G(x_{nf}, y_{nf}) = \sqrt{G_x(x_{nf}, y_{nf})^2 + G_y(x_{nf}, y_{nf})^2},$$

则 $G(x_{nf}, y_{nf})$ 的均方根称为位相均方根梯度.

所以, 从几何光学角度, 也可以用相位均方根梯度来描述光束传输的实质.

3. CPP 面形梯度对焦斑的影响

CPP 作为激光系统束匀滑的核心元件, 其面形特征对匀滑效果的影响是直接的. 本文将针对随机畸变光通过不同 CPP 后, 光束的远场焦斑分布进行模拟计算, 并对匀滑后光斑的质量进行定量比较.

3.1. 匀滑效果评价参数

能量利用率 (PE): 焦平面指定区域内光强能量占焦斑总能量的比例, 它是评价远场焦斑能量分布的一个很重要的指标. 公式表示为

$$PE = \frac{\int_S I(x_{ff}, y_{ff}) dx_{ff} dy_{ff}}{\int_{\text{all}} I(x_{ff}, y_{ff}) dx_{ff} dy_{ff}}, \quad (8)$$

其中 $I(x_{ff}, y_{ff})$ 是实际的焦斑光强, S 是指定的计算区域, all 表示焦斑的整个区域.

光强对比度 (RMS_I): 焦平面指定区域内光强分布的统计均方根, 它是一个统计参数, 定量的描

述了远场焦斑的均匀性,公式表示为

$$\text{RMS}_I = \sqrt{\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{I(x_{ff}, y_{ff}) - \bar{I}(x_{ff}, y_{ff})}{\bar{I}(x_{ff}, y_{ff})} \right)^2 \right]}, \quad (9)$$

其中 $I(x_{ff}, y_{ff})$ 为实际的焦斑光强, $\bar{I}(x_{ff}, y_{ff})$ 为指定区域的平均光强, n 为采样点.

3.2. 束匀滑模拟分析

激光在实际传输过程中总存在畸变,根据激

光系统光束波前畸变的随机特性,我们首先随机生成了两个畸变波前,并计算了对应的远场焦斑分布,结果如图4. 其中图4(a)为空间周期为150 mm, GRMS 值为 0.04528 wave/mm 的畸变波前,图4(b)为其远场光强分布. 图4(c)为空间周期为80 mm, GRMS 值为 0.0551 wave/mm 的畸变波前,图4(d)为图4(c)的远场光强分布.

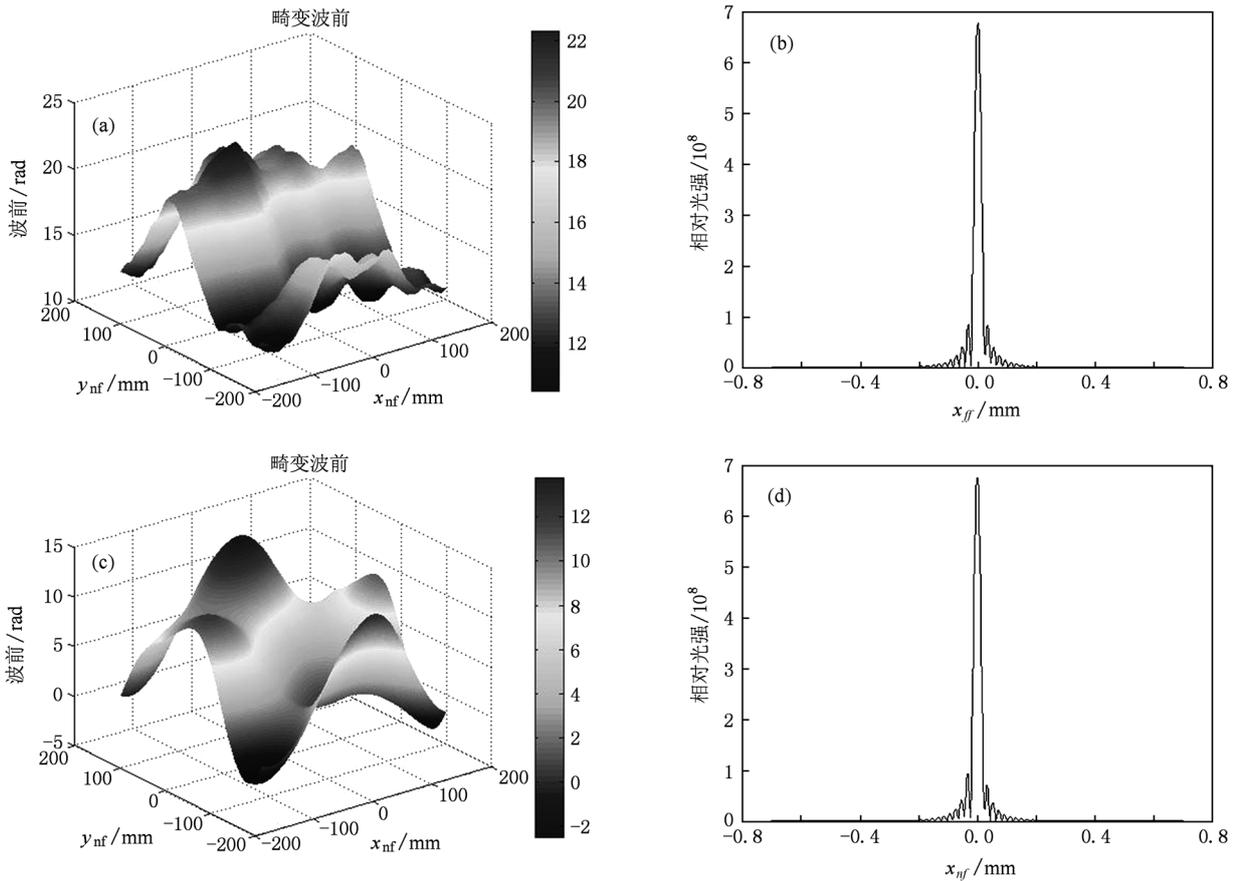


图4 畸变波前及其远场光强分布

由图4可知,波前畸变所产生的远场光强分布不均匀,且光斑有旁瓣.而在ICF中为有效满足靶场需要,要求远场焦斑对特定的靶面区域辐照的光强分布尽可能均匀,所以需要进行束匀滑处理.

作为匀滑元件的 CPP,一个相关长度为 11.1347 mm 的面形设计结果如图5所示,保持相关长度和面形分布不变,通过增大 CPP 相位起伏的幅值可以调整该元件的梯度大小.图4(a)所示的畸变波前分别通过面形结构为图5所示,GRMS 值为 0.2814 和 0.8442 wave/mm 的 CPP,用截止频率为 30 mm^{-1} 的低通滤波器对其滤波后,远场焦斑及其光强分布如图6.

为了更为明确地比较出面形梯度不同的 CPP 对畸变光束的匀滑能力,我们列表1来对焦斑的主要参数进行比较.

表1 图4(a)所示畸变波前经 CPP 匀滑后,焦斑的主要参数

	GRMS = 0.2814 wave/mm CPP	GRMS = 0.8442 wave/mm CPP
焦斑半径/mm	0.0931	0.2316
能量利用率/%	99.545	61.225
光强对比度	1.9785	0.1397

从表1比较两个 CPP 的匀滑效果可知,GRMS 大的 CPP 匀滑效果更好,匀滑处理后的焦斑半径更

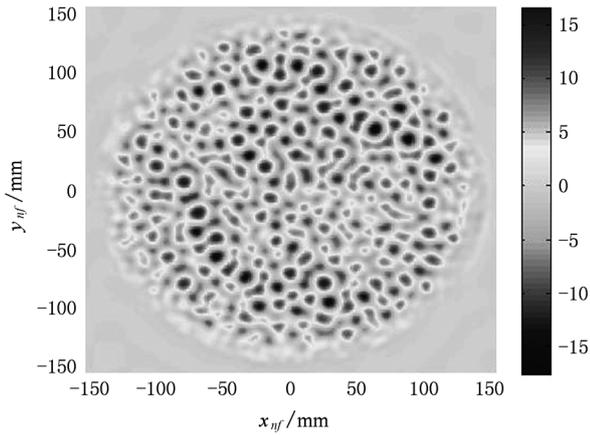


图5 相关长度为 11.1347 mm 的 CPP 面形

大,但能量利用率比 GRMS 小的 CPP 小.

而在实际的系统中,所使用的 CPP 均方根梯度越大是否匀滑效果越好,需对此进行研究.本文中用相关长度不变的 CPP,研究它的均方根梯度对畸变光束的远场焦斑产生的匀滑效果,其中所使用的相关长度为 21.9290 mm 的 CPP 面形结构如图 7 所示.图 4(a) 所示畸变波前经不同 CPP 匀滑后的效果如图 8.

所选择的 CPP 相关长度分别为 21.9290 和 11.1347 mm,起始 PV 值分别为 2.2473 和 1.9134 μm . 让其相关长度不变,改变 PV 值范围为起始 PV 值的 0.1—2.5 倍来改变 CPP 的 GRMS 值,得到不同 GRMS 对畸变波前图 4(a) 匀滑后焦斑的关系.其

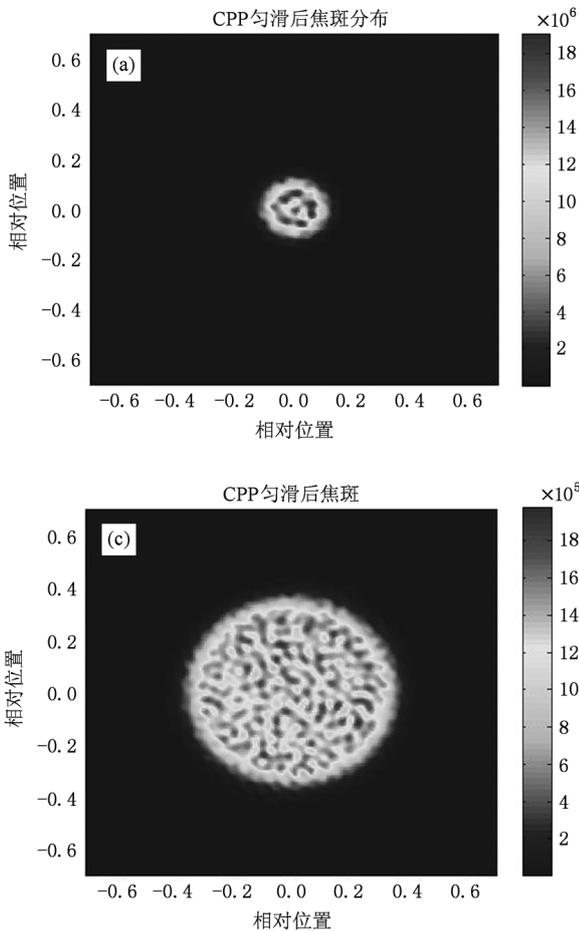


图6 图 4(a) 所示畸变波前经 CPP 匀滑后的远场焦斑及光强分布 (a) 为图 4(a) 所示畸变波前经过 GRMS = 0.2814 wave/mm 的 CPP 匀滑后的远场焦斑;(b) 为图 4(a) 所示畸变波前经过 GRMS = 0.2814 wave/mm 的 CPP 匀滑后的光强分布;(c) 为图 4(a) 所示畸变波前经过 GRMS = 0.8442 wave/mm 的 CPP 匀滑后的远场焦斑;(d) 为图 4(a) 所示畸变波前经过 GRMS = 0.8442 wave/mm 的 CPP 匀滑后的光强分布

中图 8(a) 是 CPP 的 GRMS 值与 86% 能量的焦斑半径关系图,可以看出,随着 CPP 的 GRMS 值的增加,

焦斑半径逐渐增加.图 8(b) 是 CPP 的 GRMS 值与远场光强对比度的关系,可以看出焦斑顶部的均方

根值减小很快,最后趋于不变,可见 CPP 匀滑效果明显,让焦斑能量分布均匀. 图 8(c) 是 CPP 的 GRMS 值与远场光强能量利用率 PE 的关系图,当 CPP 的 GRMS 值增加时,能量利用率先基本趋于不变,随着焦斑的变大,能量利用率逐渐变小,最后减小的速度变慢. 由图 8 可以看出,当 CPP 的 GRMS 在 0.2—0.8 wave/mm 范围内时,光斑尺寸、光束顶部不均匀性及能量利用率都在较好的范围,焦斑质量较好,能满足 ICF 打靶需求的范围.

可见,当 CPP 的相关长度相同时,不同 GRMS 值会对焦斑产生很大的影响,在实际的应用中,将根据需要避重就轻地选择 CPP 的 GRMS 值尽量在 0.2—0.8 wave/mm 范围内来匀滑光束.

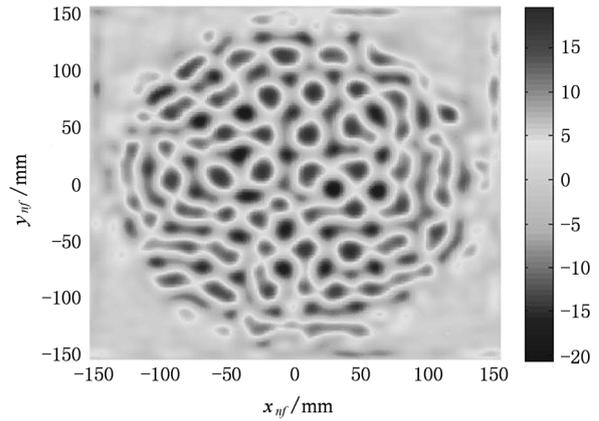


图 7 相关长度为 21.9290 mm 的 CPP 面形

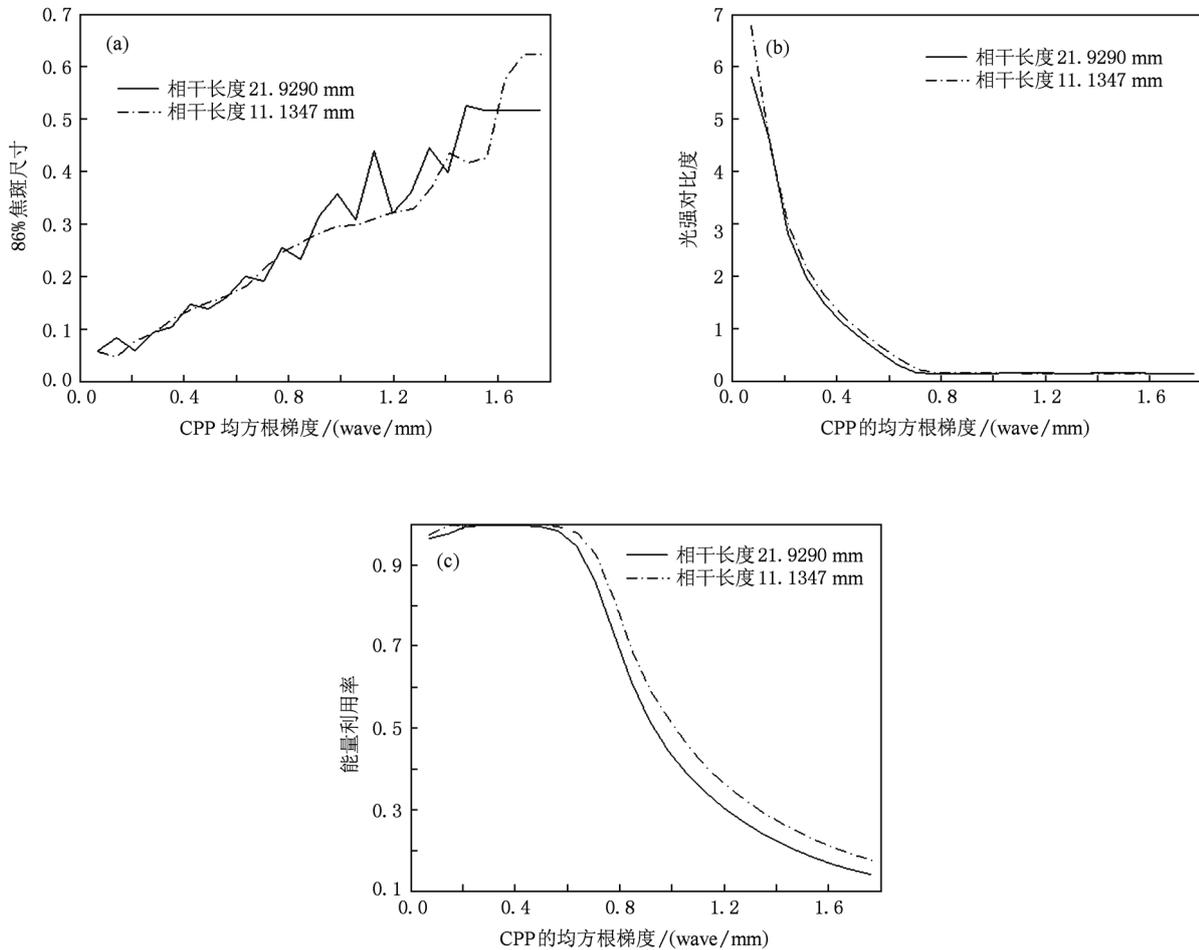


图 8 两不同相关长度的 CPP 对波前畸变图 4(a) 匀滑后的影响

4. 结 论

本文从波动光学及几何光学角度都推导出 CPP

的 GRMS 会对焦斑产生很大的影响. 利用 CPP 对畸变光束的匀滑技术,模拟计算了超高斯光束的低频畸变波前经过 CPP 后的匀滑效果. 发现当 CPP 的相关长度不变时,对于特定的低频畸变波前,焦斑半

径、光强对比度、能量利用率都会随着 CPP 的 GRMS 值变化而变化. 对于相关长度为 150 mm, GRMS = 0.04528 wave/mm 的畸变波前, 采用相关长度为 21.9290 mm 或 11.1347mm 的 CPP 对光斑进行匀滑

时, 发现当 CPP 的 GRMS 值在 0.2—0.8 wave/mm 范围内时, 光斑质量较好. 这对 ICF 系统中, 为满足靶场的实际要求, 需要选择合适的 CPP 来匀滑光束提供了理论参考.

- [1] Li P, Ma C, Su J Q, Cheng W Y, Liu L Q, Wang W Y, Mo L, Zhou L D 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 1114 (in Chinese) [李平、马驰、栗敬钦、程文雍、刘兰琴、王文义、莫磊、周丽丹 2008 强激光与粒子束 **20** 1114]
- [2] Enzo Di Fabrizio, Dan Cojoc, Stefano Cabrini, Burkhard Kaulich, Jean Susini, Paolo Facci, Thomas Wilhein 2003 *Opt. Exp.* **11** 2278
- [3] Zapata-Rodríguez C J, Caballero M T 2007 *Opt. Lett.* **32** 2472
- [4] Wei S B, Bu J, Zhu S W, Yuan X C 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 031001
- [5] Yao X, Gao F H, Zhang Y X, Wen S L, Guo Y K, Lin X D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3130 (in Chinese) [姚欣、高福华、张怡霄、温圣林、郭永康、林祥棣 2009 物理学报 **58** 3130]
- [6] Zhan J H, Yao X, Gao F H, Yang Z J, Zhang Y X, Guo Y K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014205 (in Chinese) [占江徽、姚欣、高福华、阳泽健、张怡霄、郭永康 2011 物理学报 **60** 014205]
- [7] Yao X, Gao F H, Gao B, Zhang Y X, Huang L X, Guo Y K, Lin X D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4598 (in Chinese) [姚欣、高福华、高博、张怡霄、黄利新、郭永康、林祥棣 2009 物理学报 **58** 4598]
- [8] Li J L, Lü B D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3006 (in Chinese) [李建龙、吕百达 2008 物理学报 **57** 3006]
- [9] Kato Y, Mima K, Miyanaga N, Arinaga S, Kitagawa Y, Nakatsuka M 1984 *Phys. Rev. Lett.* **53** 1057
- [10] Dixit S N, Lawson J K, Manes K R, Powell H T, Nugent K A 1994 *Opt. Lett.* **19** 417
- [11] Kessler T J, Lin Y, Armstrong J J, Velazquez B 1993 *SPIE* **1870**
- [12] Lin Y, Kessler T J, Lawrence G N 1995 *Opt. Lett.* **20** 764
- [13] Lin Y, Kessler T J, Lawrence G N 1996 *Opt. Lett.* **21** 1703
- [14] Yang C L, Zhang R Z, Xu Q, Ma P 2008 *Appl. Opt.* **47** 1465
- [15] Deng X, Liang X, Chen Z, Yu W 1986 *Appl. Opt.* **25** 377
- [16] Wen S L, Xu Q, Ma P, Yang C L, Zhou L S, Yan H 2009 *Acta Optica Sinica* **29** 3179 (in Chinese) [温圣林、许乔、马平、杨春林、周礼书、颜浩 2009 光学学报 **29** 3179]
- [17] Marozas J A 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **24** 74
- [18] Williams W, Auerbach J, Hunt J, Lawson L, Manes K, Orth C, Sacks R, Trenholme J, Wegner P 1997 LLNL Technical Report
- [19] Lin Z X, Zhang R Z, Yang C L, Xu Q. 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 2634 (in Chinese) [林中校、张蓉竹、杨春林、许乔 2010 强激光与粒子束 **22** 2634]
- [20] Goodman J W (Translated by Qin K C, Liu P S, Chen J 2006 *Introduction to Fourier Optics Third Edition* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp51—53 (in Chinese) [顾德曼 Joseph W 著 秦克城、刘培森、陈家璧、曹其智译 2006 傅里叶光学导论 第三版(北京;电子工业出版社)第 51—53 页]

The influence of root mean square phase gradient of continuous phase plate on smoothing focal spot^{*}

Feng You-Jun Lin Zhong-Xiao Zhang Rong-Zhu[†]

(College of the Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

(Received 7 April 2011; revised manuscript received 9 May 2011)

Abstract

In order to satisfy uniform irradiation requirement in inertial confinement fusion (ICF) system, the influence of surface characteristics of continuous phase plate on beam quality is studied in this paper. Based on wave optics and geometrical optics, theoretical analysis model is established, respectively. And the parameter, root mean square gradient, is used to unify both theoretical models. Meanwhile, the smoothing effects of root mean square phase gradient of continuous phase plate on laser beam with low-frequency aberrant wavefront are simulated. Numerical simulations show that the radius of focus spot will increase with the increase of root mean square phase gradient of continuous phase plate, and nonuniformity of beam top will decrease quickly, then reduce slowly and tend to be unchanged finally. So smoothing effect of continuous phase plate is obvious. In addition, energy availability factor has little change, then decreases gradually and reduces slowly. Spot size, nonuniformity of beam top and energy availability factor are all in a good range when the correlation length of continuous phase plate is not changed and root mean square gradient is 0.2—0.8 wave/mm.

Keywords: continuous phase plate (CPP), root mean square phase gradient (GRMS), beam smoothing, focal spot

PACS: 42.25.Fx, 42.25.Bs, 42.15.-i

^{*} Project supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. JG2010099).

[†] Corresponding author. E-mail: zhang_rz@scu.edu.cn