

非线性调制影响束匀滑相位板离焦性能的研究

田玉婷^{1,2}, 邬融^{1*}, 孙明营¹, 张军勇¹, 张艳丽¹, 杨野^{1,2}, 周申蕾¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 结合非线性强度和相位调制作用, 研究束匀滑相位板整形焦光斑在焦面附近传输变换的特性。采用衍射光学理论方法来计算三维空间离焦面上的光场分布, 引入光斑落点漂移和光强对称度两个指标参量来表征光斑在传输演化过程中的性能。研究分析了高通量激光辐照下非线性效应对连续相位板整形焦斑的影响, 尤其是楔形透镜厚端和薄端的较大差异引起的小尺度自聚焦强度调制差异, 该差异使得光斑传输至焦点后的一段距离后开始渐渐偏离光轴, 同时其整体强度分布也出现不对称度偏置。结果表明, 非线性强度畸变的影响远大于相位畸变的影响, 在给定激光装置光路中 5 GW/cm² 功率密度的入射条件下, 焦点后 4 mm 处光斑落点漂移超过 0.1 mm, 光强左右不对称度偏置达到 30%。

关键词 激光光学; 光束合束; 束匀滑; 连续相位板; 衍射光学; 小尺度自聚焦

中图分类号 O436.1; O437.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1014003

Influence of Nonlinear Modulation on the Defocusing Performance of Beam Smoothing Phase Plate

Tian Yuting^{1,2}, Wu Rong^{1*}, Sun Mingying¹, Zhang Junyong¹,

Zhang Yanli¹, Yang Ye^{1,2}, Zhou Shenlei¹

¹Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Transmission characteristics of smoothed beam spots near the focal plane were investigated under the influence of nonlinear intensity and phase modulation. Diffraction theory was used to calculate the light field distribution on the defocused surface in three-dimensional space. Spot position drift and intensity symmetry were used to characterize beam spot performance during transmission evolution. The impact of non-linear effects under high-flux laser irradiation on smoothed spot of continuous phase plate was studied. Especially, the small-scale self-focusing intensity modulation difference caused by large difference between the thick and thin ends of wedge lens resulted in gradual deviation of beam spot from the optical axis during the defocusing transmission process, and caused asymmetric bias of intensity distribution. The results show that the effect of nonlinear intensity distortion is far greater than that of phase distortion. Under irradiation with 5 GW/cm² power density on a given laser device, the spot position offset is more than 0.1 mm on the 4 mm defocused plane, and the asymmetry of light intensity is biased to 30%.

Key words laser optics; laser beam combining; beam smoothing; continuous phase plate; diffractive optics; small-scale self-focusing

OCIS codes 140.3298; 260.1960; 260.5950

1 引 言

在高功率激光装置惯性约束聚变 (ICF) 的研发

过程中, 对束匀滑系统有特定需求, 期望在靶面获得足够均匀的激光辐照^[1-2], 以实现对称压缩靶丸的目标。激光驱动器主要采用空域焦斑整形和时域平均

收稿日期: 2018-03-27; 修回日期: 2018-05-09; 录用日期: 2018-05-15

基金项目: 中国科学院高功率激光物理重点实验室基金 (CXJJ-16S040)

* E-mail: 46438131@qq.com

扫描结合的方式来构建束匀滑系统。时域匀滑主要采用基于时间扫描的光谱色散匀滑(SSD)技术^[3-5]和基于 e、o 光分解为非相干叠加的偏振匀滑技术^[6]。空间匀滑技术主要采用衍射光学元件(DOE)和透镜列阵(LA)^[7]等,可使入射光在焦面产生指定形态和尺寸、光强具有一定均匀性的光斑。DOE 通过在表面设计刻蚀相位结构来达到焦斑调控目标,故也称为相位板。自 20 世纪 80 年代最初的二元随机相位板(RPP)^[8],到后来不断改进的相息图位相板(KPP)^[9]、分布式相位板(DPP)^[10-11]等,台阶式结构不仅会引起近场强度调制,还会使入射光在焦面出现高级次衍射斑,造成光能利用率过低并且可能损坏附近器件等问题^[12]。为了改善这一问题,90 年代末 Lin 等^[13]又提出了连续相位板(CPP)的方案,采用连续相位结构替代台阶式结构,使得器件光能利用率达到 95% 以上^[14]。国内也自 21 世纪初跟踪完成了 CPP 相位板的设计研究^[15-17],随后再结合磁流变抛光技术攻克了 CPP 相位板的加工工艺^[18-19]。故 2010 年之后, CPP 相位板也就成为目前常用的束匀滑元件。

近年来随着物理实验和聚变驱动的发展,束匀滑的需求也在不断变化和推进,浮现出的问题也越来越多。尤其是在高通量激光辐照下,非线性频率转换不均匀性以及非线性小尺度自聚焦^[20-22]等都会对激光近场产生很多不可预测的影响,导致实验探测到的光斑形态甚至是落点偏离 CPP 设计值较多。此外,精密化的物理实验或者驱动聚变等不再单纯关注焦面上的光斑,而是要考察焦后一小段距离的三维(3D)光场分布,比如间接驱动激光等离子体不稳定性(LPI)^[23]和直接驱动变焦压缩靶丸^[24]的变焦特性等都与焦后的光场三维传输密切相关。故有必要将 CPP 束匀滑光斑拓展到焦后三维空间中研究,尤其是高通量各种非线性畸变调制下的光斑演化情况。

本文研究非线性调制下 CPP 相位板离焦光斑性能变化,结合各类非线性强度和相位调制类型,提出了表征三维空间光斑演化的两个量化指标(落点漂移和光强对称度),随后结合衍射理论给出了离焦三维空间的光传输方法。最后仿真计算结果表明,因厚薄相差很大的楔形透镜中小尺度自聚焦导致的非线性强度调制,是导致 CPP 束匀滑光斑在其后离焦传输中出现落点漂移和不对称度偏置的主要原因。

2 束匀滑光束整形系统概况和需求

CPP 相位板具有丰富的中高频精细相位结构,

与透镜联合使用,能在目标焦面产生给定形态(圆、椭圆、矩形和其他特殊形态)和强度分布(高斯、超高斯等)的焦斑。在高功率激光装置中, CPP 板通常置于透镜前,在目标焦面产生 50~200 倍艾里斑尺寸的圆形或者椭圆形焦斑。在当前高功率激光装置终端光学链路上,一般采用图 1 所示的工程应用光路, CPP 置于终端最前方,其后有密封窗口(window)、谐波转换晶体(KDP crystal)和楔形透镜(WFL)^[25],焦平面上 spot 为具有一定尺寸、强度分布均匀的目标光斑。 f 为楔形透镜焦距, d_{thin} 和 d_{thick} 分别是透镜薄厚两端的厚度。

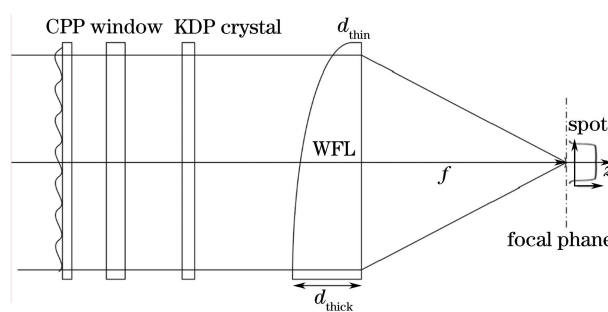


图 1 高功率激光装置终端系统的 CPP 工程应用光路
Fig. 1 Engineering optical path with CPP in the high power laser terminal system

相位板设计关注焦面上的目标光斑,其设计方法基于 GS(Gerchberg-Saxton)等迭代算法^[14,16],这里不再赘述。令 $U_i = A \cdot \exp(i\phi)$ 为输入光场,其中 A 为光场振幅, ϕ 为光场相位,则由远场衍射理论得到焦平面上光场分布 U_o 为

$$U_o = \mathcal{F}(U_i), \quad (1)$$

式中: \mathcal{F} 为傅里叶变换。对于不考虑畸变的理想系统, A 一般为矩形方波或者超高斯平面波, ϕ 就是 CPP 相位板的面型函数 ϕ_{cpp} 。

随着物理实验和聚变驱动的发展,对光束匀滑要求也越来越严苛,比如间接驱动最初只是关注进洞口焦面的光斑匀滑性,但是由于洞内 LPI 导致背向散射能量损失过高,故研究者对洞口到腔壁这段数毫米的离焦光场分布提出了量化要求^[23],如图 2(a)腔口到腔壁红色区域所示。图 2(b)为直接驱动球靶对称压缩模型,即将初始较大球体(实线)压缩到内爆前的小球体(虚线),该过程要求辐照光斑具有很好的均匀性,此时球体上束匀滑光斑也将经历图 2(b)球体压缩前后红色区域所示的离焦变化过程。这些都对焦面附近三维光场分布提出了量化要求。CPP 束匀滑光斑能否在其后一段距离保持一定的均匀性需进一步研究。

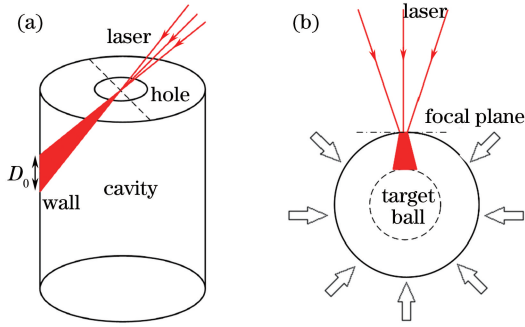


图 2 三维光场量化需求。(a)间接驱动黑腔注入模型；
(b)直接驱动球靶对称压缩模型

Fig. 2 Quantification of 3D light field. (a) Indirectly driven black cavity injection model; (b) directly driven spherical target compression model

3 非线性调制下焦面附近三维光场分布

约定远场为焦平面,其后离焦小段距离可视为准远场。首先可以明确的是,焦面附近三维光场可视为远场到准远场的变化过程,相关的强度和相位由入射光场和离焦传输确定。故对(1)式进行改进,即能演算实际激光参数下焦点后一系列离焦面上的光场。考虑装置上所有线性和非线性引起的强度和相位调制为 $U_{aberr} = A_{aberr} \exp(i\phi_{aberr})$,其中 A_{aberr} 为附加振幅畸变, ϕ_{aberr} 为附加相位畸变,综合得到入射光场为

$$U_i = A_{ideal} A_{aberr} \cdot \exp[i(\phi_{cpp} + \phi_{aberr})] = U_{ideal} U_{aberr}, \quad (2)$$

下标 ideal 表示不考虑畸变的理想入射。焦点后切片式传播可描述为

$$U_o = \text{Trans}(\mathcal{F}(U_i), d_z), \quad (3)$$

式中: d_z 为偏离焦平面的离焦距离, Trans 为某种传输方法。

3.1 非线性调制的类型

如前所述,高功率激光装置不可避免地存在各种强度和相位畸变,如图 1 所示,在 CPP 相位板之前,自空间滤波器过来的基频近场光束具有一定的强度调制和低频相位畸变。CPP 之后 KDP 晶体的频率转换常引入非线性不均匀光强调制,比如局部峰值大幅增强和整体区域转换率不平衡等。带楔角的 WFL(d_{thick} 可达 5~10 cm 不等),在低通量或者离线模拟光辐照下,不会引入任何非线性畸变,与对称结构的平凸或者弯月透镜表现一样;但是在高功率激光辐照下(比如 1~5 GW/cm²),根据激光非线性自聚焦理论,WFL 厚/薄端的小尺度 B 积分效应会存在很大差异,故出射光透过楔形镜后,其整体和局部强度以及相位分布都会因厚薄不同产生很大的差异。

光束的振幅和相位调制引起的介质局部折射率变化,反作用于光束,使光束局部变得不稳定,经过传输后,光束分裂成一根根高强度细丝,最后导致局部激光介质破坏, B 积分可表述为^[20,22]

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l n_2 I(z) dz, \quad (4)$$

式中: λ 为 0.351 μm 紫外光; n_2 为介质的非线性折射率,熔石英测量值^[21]一般约 $4.1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$; l 为介质长度; $I(z)$ 为激光辐照功率密度,单位为 W/cm^2 。对于低通量情况,既无增益也不会引起非线性强度调制,故 $I(z)$ 可视为常数,比如 $I(z) < 0.1 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时,对于 10 cm 厚的熔石英介质,根据(4)式可得 $B < 0.074$,此时厚/薄端都不会存在非线性调制。不过在平均光强大于等于 $1 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 高通量辐照下,KDP 晶体转换后的紫外光强度调制相对很大,通常转换后局部峰值光强约为平均值的 2 倍,即大于等于 $2 \text{ GW}/\text{cm}^2$,此时需要用局部峰值光强来衡量小尺度自聚焦的非线性增长。局部峰值光强增长一般用分步傅里叶变换求解非线性薛定谔方程来获得^[21]。为简单起见,沿楔形镜的楔角方向对不同厚度作一维模拟,结果如图 3 所示,3 条曲线分别对应输入功率密度为 2、4、5 GW/cm^2 的情况,图 3(a)显示了熔石英体内不同厚度处的局部峰值光强,图 3(b)为与 B 积分相关的沿楔角方向光束截面的非线性相移。

高通量激光装置中非线性调制可分为两类,一是与局部峰值相关的强度调制,二是 B 积分非线性相移。两者均与非线性自聚焦变化过程相关,都是非线性增长出现的必然产物。首先是晶体频率转换非线性过程放大了激光近场的不均匀度和局部峰值调制幅度,接着后面楔形镜厚薄不一致又引入了非线性斜向增长的强度和相位畸变。

3.2 三维空间光场分布的表征

对于平面光场分布,其表征一般采用光斑强度均方差(RMS)、峰谷值(PV)以及 FOPAI(fractional power above intensity)等参量来描述光斑的均匀性^[17],这里不再赘述。扩展到焦面附近三维光场,简单的方式是切片式一个面一个面地表征,分别计算上述相关指标参数。不过按此方式统计指标参量太多,无法直观地反映光场的变化情况,更为重要的是,光斑在离焦后的三维演化过程中,这些指标参数的退化并不重要。后续计算分析表明,在非线形畸变调制下,光斑可能会偏离光轴,且其强度分布对称性也可能会破坏。故引入两个新参数来表征三维空

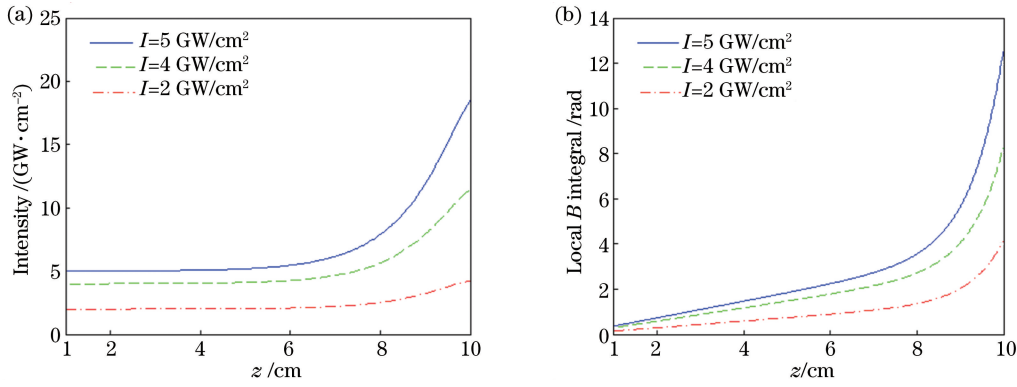


图 3 晶体及楔形镜非线性效应调制。(a)熔石英体内不同厚度处局部峰值光强;(b)与局部 B 积分相关的非线性相移
Fig. 3 Nonlinear effect modulation by KDP and WFL. (a) Local peak intensity at different thicknesses in fused silica;
(b) nonlinear phase shift related to local B integral

间内光场分布,其一是光斑中心偏离光轴量 γ ,其二是左右或者上下两半相对光斑中心的对称度 η ,表达式为

$$\gamma = \sqrt{d_x^2 + d_y^2}, \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\sum(I_{\text{half1}})}{\sum(I_{\text{half2}})}. \quad (6)$$

此两指标计算方式或区域如图 4 所示,(5) 式中 d_x 、 d_y 表示光斑中心偏离光轴量,若分别考虑某一维的漂移,则记 $\gamma_x = d_x$ 、 $\gamma_y = d_y$ 。由于光斑中心可能偏离光轴,若仍以 xOy 坐标系光轴上的 O 点来统计,则对称度会大幅恶化而失真,故(6)式统计对称性时以光斑中心坐标系 $x'Oy'$ 来确定:统计 x' 方向左右对称度时记为 η_{LR} ,有 $\sum(I_{\text{half1}}) = I_{\text{LU}} + I_{\text{LD}}$, $\sum(I_{\text{half2}}) = I_{\text{RU}} + I_{\text{RD}}$;统计 y' 方向上下对称度时记为 η_{UD} ,则 $\sum(I_{\text{half1}}) = I_{\text{LU}} + I_{\text{RU}}$, $\sum(I_{\text{half2}}) = I_{\text{LD}} + I_{\text{RD}}$ 。

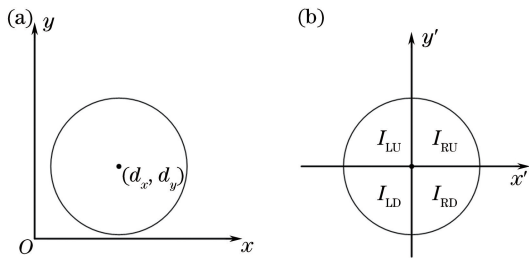


图 4 表征三维空间中光斑演化两个指标的计算方式。
(a)光斑中心相对光轴的偏移;(b) $x'Oy'$ 坐标系中 4 个象限的光斑强度分布
Fig. 4 Calculation model of two indicators for characterizing spot evolution in 3D space. (a) Spot position offset to optical axis; (b) spot intensity distribution of 4 quadrants in $x'Oy'$ coordinate

故对于离焦传输演化来说,易知 $\gamma = 0$ 和 $\eta = 1$ 表示光斑在三维空间内维持了很好的匀滑性能。相

反,如果 γ 大于 0,则光斑中心逐渐偏离光轴,即相当于落点偏离目标点位;如果 η 偏离 1,则表明光斑左右或者上下强度分布不对称,在不同区域的等离子体作用效果、激发 X 射线能力等也都会出现不对称性,对于直接驱动和间接驱动都是有害的。

3.3 三维空间传输模型和计算方法

三维空间里离焦传输模型如图 5 所示, (x_i, y_i) 是入射场坐标, (x_o, y_o) 是出射场(远场或者准远场)坐标。对于高功率激光装置聚焦系统来说,前者空间尺度远大于后者。垂直虚线为焦平面,则 $z = f + d_z$ 即为离焦面到透镜的距离。

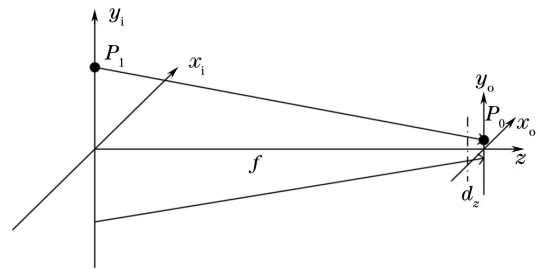


图 5 离焦传输模型
Fig. 5 Defocus transmission model

(x_o, y_o) 面的光场分布计算由(3)式描述,其中的 Trans 变换核,本节采用菲涅耳-惠更斯原理来进行推导,带有透镜相位变换因子的离焦模型的入射场为

$$U_{\text{input}} = U_{\text{ideal}} U_{\text{aberr}} \exp \left[i \left(\frac{k}{2z} - \frac{k}{2f} \right) (x_i^2 + y_i^2) \right]. \quad (7)$$

可见当 d_z 为 0 时, U_{input} 即为入射光场 U_i ; 当 d_z 不为 0 时,相当于 U_i 再附加一个离焦相位项。经积分推导最终得到离焦面上光场分布为

$$U_o(x_o, y_o) = C \iint_{\Sigma} U_{\text{input}} \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda z} (x_o x_i + y_o y_i) \right] \times dx_i dy_i = C \mathcal{F}(U_{\text{input}}), \quad (8)$$

式中 C 为常数, Σ 表示积分区域为入射光场的全部口径范围, 故离焦面上光场 U_0 即为 U_{input} 的傅里叶变换, 可以采用快速傅里叶变换方法来计算。考察计算网格, 焦面附近有 $d_z \ll f$, 则积分式中 \exp 因子的 $2\pi/(\lambda z)$ 和远场的 $2\pi/(\lambda f)$ 几乎相等, 故一系列离焦面上光场的坐标就能确定。根据傅里叶变换性质, 若空域上叠加的 U_{aberr} 是简单的低频随机噪声, 频域上相当于卷积 $\mathcal{F}\{U_{\text{aberr}}\}$, 通常是一类对称的调制, 对三维空间光场表征的两个指标 γ 和 η 基本没影响。不过一旦引入非线性效应, 情况则变得很复杂, 第 4 节将详细计算论述。

4 仿真实验与分析

本节对第 3 节内容进行仿真实验, 激光装置光路参数有: 波长 $\lambda = 351 \text{ nm}$, 焦距 $f = 2234 \text{ mm}$, 方形 6 阶超高斯入射光基膜模场尺寸 $310 \text{ mm} \times 310 \text{ mm}$, CPP 相位板有效面型尺寸 $338 \text{ mm} \times 338 \text{ mm}$, 远场目标为 0.6 mm 直径的圆斑。楔形镜厚端置于 x 正方向, 薄端置于 x 负方向。理想无畸变入射并在两维 $50 \mu\text{m}$ 尺寸上做平均均匀滤波后, 设计焦斑强度分布如图 6 所示, 初始焦斑在光轴中心, 故 $\gamma_x = \gamma_y = 0$, 光强对称度算得 $\eta_{\text{LR}} = 1.0137$ 、

$\eta_{\text{UD}} = 1.0091$, 将其作为后续演化过程比较的基准值。图 6(a) 所示焦斑形态, 外圈标注绿圆直径即为 0.6 mm , 过光轴中心两正交方向一维强度曲线如图 6(b) 所示。接下来计算分析各种非线性畸变调制下, 离焦距离 d_z 从 0 到 4 mm 的光斑演化情况。

4.1 只有非线性相位调制时的光场分布

一般认为相位调制对 CPP 束匀滑焦斑性能的影响比强度调制的要大, 事实上由于 CPP 具有深达 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 丰富的中高频成分相位结构, 故它具有较大的相位波前畸变容差能力。先只考虑 B 积分非线性相移 ϕ_B , 有 A_{aberr} , 则 $U_{\text{aberr}} = \exp(i\phi_B)$, 将图 3(b) 中不同功率密度对应非线性相移代入 (7) 式和 (8) 式计算。图 7(a)、(b) 分别是在 $I(z) = 5 \text{ GW/cm}^2$ 入射光条件下, 计算得到的 $d_z = 0$ 远场光斑和 $d_z = 4 \text{ mm}$ 离焦面上光斑。可见只考虑非线性相移时, 图 7(a) 所示的远场焦面光斑强度均匀性几乎与图 6(a) 所示的理想无畸变焦面光斑强度相仿。在后续传输过程中, 尽管离焦后光斑均匀性有所退化, 旁瓣晕区外扩导致光斑变大, 但是光斑落点不会漂移 (γ_x 和 γ_y 约为 0) 并且强度也能保持较好的对称度 (η_{LR} 和 η_{UD} 都约为 1)。两图中外圈标注都是 0.6 mm 的圆, 由图 7(b) 标注的红线和蓝线即可确定两正交方向的光斑中心位置。

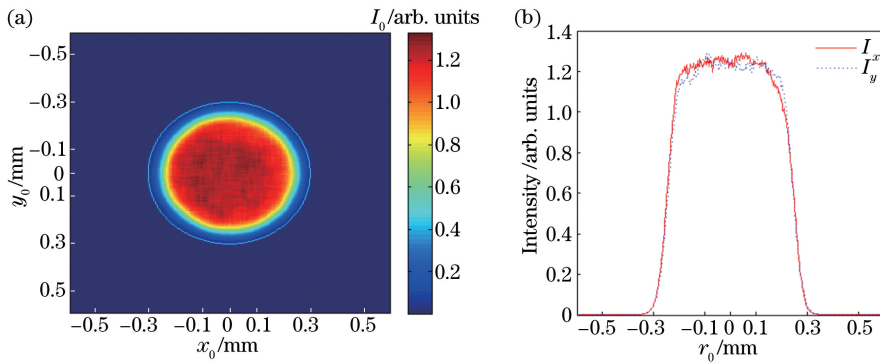


图 6 理想入射下 CPP 设计焦斑。(a) 二维焦斑形态; (b) 过光轴中心两正交方向的一维强度
Fig. 6 CPP design focal spot under ideal irradiation. (a) 2D focal spot; (b) 1D intensity along two

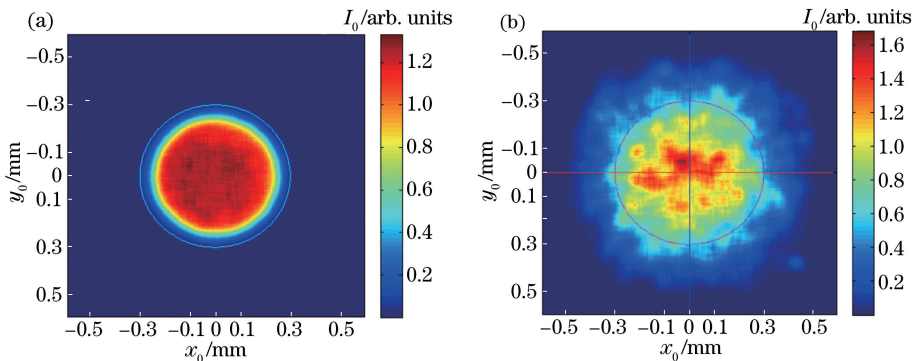


图 7 只考虑 $I(z) = 5 \text{ GW/cm}^2$ 时非线性相移。(a) 远场光斑; (b) 4 mm 离焦光斑
Fig. 7 Only include nonlinear phase shift at $I(z) = 5 \text{ GW/cm}^2$. (a) Far-field spot; (b) 4 mm defocusing spot

在三种功率密度入射下,将离焦距离 0~4 mm 连续切片,仿真计算每个离焦面光斑的演化情况如图 8 所示,由图 8(a)可见表征落点漂移的指标参量 γ_x 在正负 2 μm 范围内抖动, γ_y 为 0 且一直不变,故未在图中画出,因此光斑落点几乎不变、都在光轴上。由图 8(b)可见,左右对称度 η_{LR} 在 1~1.05 之

间波动,相较远场初始基准 1.0137, x 方向对称性退化量很小。上下对称度 η_{UD} 三者几乎重合用黑点线表示,其值在 0.99~1.01 波动,相较于远场初始基准 1.0091, y 方向对称性退化更小。总而言之,传输结果表明, CPP 相位板具有很好的相位波前畸变容差能力。

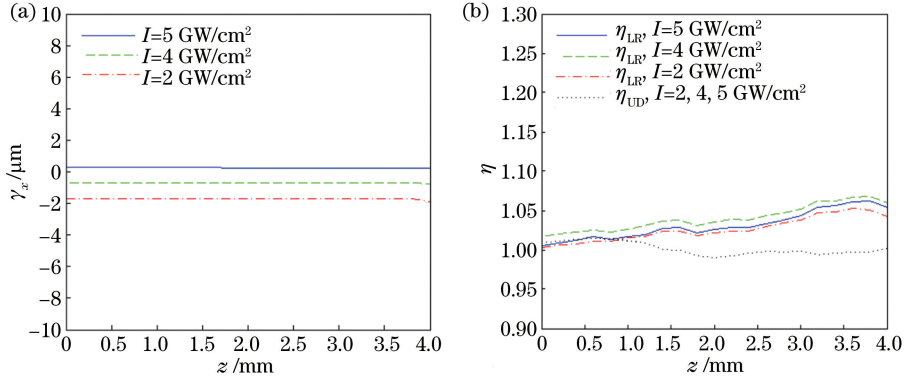


图 8 非线性相移对应 γ 和 η 变化曲线。(a) γ_x ; (b) η_{LR} 和 η_{UD}
Fig. 8 γ and η versus nonlinear phase shift. (a) γ_x ; (b) η_{LR} and η_{UD}

4.2 有非线性强度和相位调制的光场分布

图 9(a)、(b)分别为在 $I(z)=5 \text{ GW/cm}^2$ 入射光条件下,同时考虑非线性强度和相位畸变时 $d_z=4 \text{ mm}$ 离焦面上光斑形态及过其中心两正交方向的一维强度曲线。图 9(a)表明光斑中心 y 方向不变,在 x 负方向漂移超过 0.1 mm,即 $\gamma_x=-0.1 \text{ mm}$;

图 9(b)中强度曲线显示 x 方向红实线相对 y 方向蓝虚线向左偏移,结合计算值 $\eta_{LR}=1.3$ 和 $\eta_{UD}=1.025$ 表明,光斑强度分布更偏向左边区域,左边光强大于右边约 30%,故相较远场初始基准 1.0137,左右对称性变差很多。

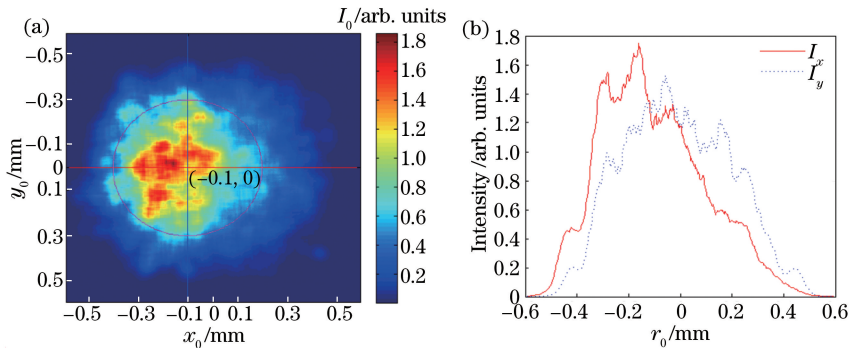


图 9 同时计入非线性强度和相位畸变的离焦 4 mm 面上的光场分布。(a) 二维焦斑形貌;(b) 过光轴中心两正交方向的一维强度
Fig. 9 Intensity in 4 mm defocusing plane taking into accounts both nonlinear intensity and phase distortions.

(a) 2D spot; (b) 1D intensity curve of two orthogonal directions

类似 4.1 节,在三种功率密度入射下,将离焦距离 0~4 mm 连续切片,仿真计算每个离焦面光斑的演化情况如表 1 和图 10 所示,表中以 I_2, I_4, I_5 分别简化表示 2, 4, 5 GW/cm^2 三个功率密度。表 1 和表 2 分别显示了几个典型离焦面在 x 和 y 方向上的 γ 和 η 指标,由于 y 方向漂移 γ_y 基本为 0,对称度 η_{UD} 基本为 1,故图 10 仅绘出 x 方向指标参量的变化曲线。由表 1 和图 10 (a)可见表征落点漂移的

指标参量 γ_x 随着离焦距离的增加而变大,漂移方向与楔形镜厚端位置相反,并且入射功率密度越高即因非线性调制越强引起的漂移越大,超过 0.1 mm 的移动量相当于漂移了 1/3 光斑半径。表 1 和图 10(b)表明左右对称度也随着离焦距离的增大而退化,光斑强度越来越偏向左侧,入射功率密度越高,对称度越大。

表 1 x 方向落点漂移和对称度Table 1 Position shift and symmetry along x axis

Defocus /mm	γ_x at I_2 /mm	γ_x at I_4 /mm	γ_x at I_5 /mm	η_{LR} at I_2	η_{LR} at I_4	η_{LR} at I_5
1	-0.0144	-0.0168	-0.0175	1.0237	1.0203	0.9972
2	-0.0296	-0.0377	-0.0430	1.0577	1.0834	1.0599
3	-0.0448	-0.0584	-0.0684	1.1434	1.1578	1.1558
4	-0.0654	-0.0864	-0.1027	1.2260	1.2733	1.2949

表 2 y 方向落点漂移和对称度Table 2 Position shift and symmetry along y axis

Defocus /mm	γ_y at I_2 /mm	γ_y at I_4 /mm	γ_y at I_5 /mm	η_{UD} at I_2	η_{UD} at I_4	η_{UD} at I_5
1	0.0016	0.0016	0.0016	1.0312	1.0384	1.0445
2	0.0016	0.0016	0.0016	1.0064	1.0111	1.0161
3	0.0016	0.0016	0.0016	1.0132	1.0197	1.0215
4	0.0016	0.0016	0.0016	1.0123	1.0196	1.0253

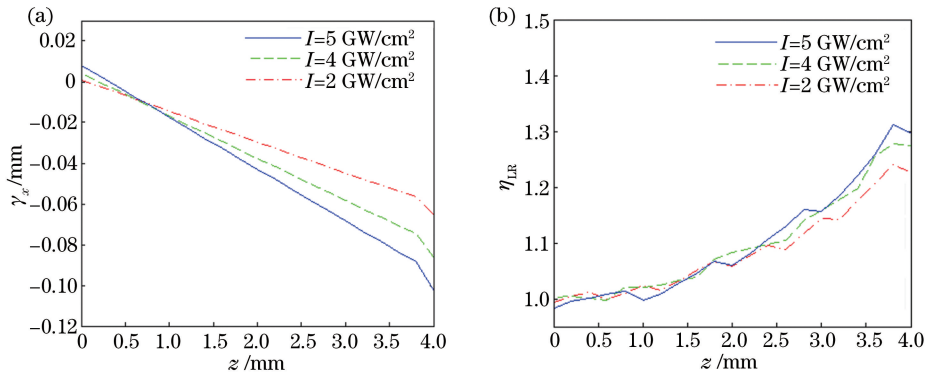


图 10 光斑落点漂移和对称度指标随离焦距离的变化曲线。(a)光斑落点漂移;(b)对称度指标

Fig. 10 Position shift and symmetry varying with defocusing distance. (a) Position shift; (b) symmetry

因此,在计入非线性强度和相位畸变调制下,一旦透射光经过在某一维度厚度差异很大的介质(类似楔形镜)时, CPP 相位板整形光斑在焦后传输过程中,这一维反方向就会出现光斑落点移动和强度不对称偏置的情况,符合傅里叶系统传输的时频关系。为解决这个问题,一种方法是将楔形镜厚度减薄,这就要求增大楔形镜焦距,减小楔角,将其厚端降低到5 cm以下,避免不对称的非线性局部峰值强度调制出现。另一种方法是改进 CPP 输入设计,补偿楔形镜厚端非线性强度调制的影响,故在设计 CPP 相位结构时,提前在入射光场中纳入相应的非线性强度调制,也能避免后续准远场传输中出现光斑落点漂移和不对称度偏置的问题。

5 结 论

高通量非线性调制引起了激光近场的不均匀性,尤其是楔形透镜厚薄端差异较大,导致厚端出射激光的强度和相位畸变相对薄端具有明显的非线性增长,故楔形镜出射近场表现出很强的不均匀性和

不对称性。束匀滑 CPP 相位板整形焦斑受此影响,在焦面附近三维空间传输演化过程中,也逐渐出现落点漂移和光强对称度被破坏的现象。对于间接驱动来说, LPI 背向散射和调控各环带在腔壁上的落点更难抑制;对于直接驱动来说,激光对称辐照的条件被破坏,更难以达到内爆要求的极限物理条件。期望本文针对该问题的研究分析,能为后续 CPP 相位板设计中预补偿非线性局部光强调制提供思路,以使得整形光斑能在焦面附近三维空间中保持良好的性能。

参 考 文 献

- [1] Jiang X J, Lin Z Q. Research progress of beam smoothing in high power laser driver [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(9): 091407. 江秀娟, 林尊琪. 高功率激光驱动器光束匀滑技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(9): 091407.
- [2] Zhou S L, Zhu J, Li X C, *et al.* Experimental study of smoothing by spectral dispersion [J]. Chinese

- Journal of Lasers, 2006, 33(3): 321-325.
周申蕾, 朱俭, 李学春, 等. 光谱色散平滑的实验研究[J]. 中国激光, 2006, 33(3): 321-325.
- [3] Li P, Su J Q, Ma C, *et al.* Effect of smoothing by spectral dispersion on the spatial spectrum of focal spot[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(9): 6210-6215.
李平, 粟敬钦, 马驰, 等. 光谱色散平滑对焦斑光强频谱的影响[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6210-6215.
- [4] Li T F, Hou P C, Zhang B. Parameters optimization for radial smoothing based on optical Kerr effect[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1114002.
李腾飞, 侯鹏程, 张彬. 基于光克尔效应的径向平滑方案参数优化[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1114002.
- [5] Zheng T R, Zhang Y, Geng Y C, *et al.* Smoothing by spectral dispersion technology based on bundle multiple-frequency modulation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1205003.
郑天然, 张颖, 耿远超, 等. 基于集束多频调制的光谱色散平滑技术[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1205003.
- [6] Xiao J, Lü B D. Characteristics of polarization control plate smoothing interference speckles [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(7): 627-632.
肖峻, 吕百达. 偏振控制板对干涉斑纹的平滑特性[J]. 中国激光, 2000, 27(7): 627-632.
- [7] Deng X M, Liang X C, Chen Z Z, *et al.* Uniform illumination of large targets using a lens array [J]. Applied Optics, 1986, 25(3): 377-381.
- [8] Kato Y, Mima K, Miyanaga N, *et al.* Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma-instability suppression [J]. Physical Review Letters, 1984, 53(11): 1057-1060.
- [9] Dixit S N, Nugent K A, Lawson J K, *et al.* Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control [J]. Optics Letters, 1994, 19(6): 417-419.
- [10] Lin Y, Lawrence G N, Kessler T J. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profiles[J]. Optics Letters, 1995, 20(7): 764-766.
- [11] Shu F J, Jia T J. Analysis of the caliber tolerance of phase plate [J]. Journal of Zhongzhou University, 2009, 26(3): 113-116.
舒方杰, 贾廷见. 位相片口径宽容性分析[J]. 中州大学学报, 2009, 26(3): 113-116.
- [12] Wu R, Hua N, Zhang X B, *et al.* Large-diameter multi-level diffractive optical elements with high energy efficiency[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(22): 224202.
邬融, 华能, 张晓波, 等. 高能量效率的大口径多台阶衍射光学元件[J]. 物理学报, 2012, 61(22): 224202.
- [13] Lin Y, Lawrence G N, Kessler T J. Design of continuous surface-relief phase plates by surface-based simulated annealing to achieve control of focal-plane irradiance[J]. Optics Letters, 1996, 21(20): 1703-1705.
- [14] Marozas J A. Fourier transform-based continuous phase-plate design technique: a high-pass phase-plate design as an application for OMEGA and the National Ignition Facility[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 24(1): 74-83.
- [15] Chen B, Wang H Z, Wei H, *et al.* Design of fully continuous phase plates for beam smoothing in ICF [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(4): 480-484.
陈波, 王菡子, 韦辉, 等. 用于惯性约束聚变束平滑的完全连续相位板设计方法[J]. 光学学报, 2001, 21(4): 480-484.
- [16] Yang C, Zhang R, Xu Q, *et al.* Continuous phase plate for laser beam smoothing[J]. Applied Optics, 2008, 47(10): 1465-1469.
- [17] Zhang R, Li P, Su J Q, *et al.* Experimental research of target uniform illumination using smoothing by spectral dispersion and continuous phase plate [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(5): 054204.
张锐, 李平, 粟敬钦, 等. 采用光谱色散平滑和连续相位板实现靶面均匀辐照的实验研究[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 054204.
- [18] Zhang W W, Peng X Q, Shi F. Research on manufacturing of constant phase plate with magnetorheological finishing techniques[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2010, 46(5): 20-22, 30.
张伟伟, 彭小强, 石峰. 连续相位板的磁流变加工技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(5): 20-22, 30.
- [19] Wen S L, Xu Q, Ma P, *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. 基于工艺的连续相位板设计[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3179-3182.
- [20] Wen S C, Fan D Y. Filamentation of intense laser beam in high power laser and the B integral[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(11): 1331-1335.
文双春, 范滇元. 高功率激光放大器中光束的成丝和B积分[J]. 光学学报, 2001, 21(11): 1331-1335.
- [21] Li K, Zhang B, Li K Y, *et al.* Nonlinear self-focusing by intense UV laser infused silica[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(10): 1653-1656.

- 李琨, 张彬, 李格宇, 等. 熔石英介质中强紫外激光自聚焦效应研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(10): 1653-1656.
- [22] Chen B S, Zhang J Y, Zhang Y L, *et al.* Study of small-scale self-focusing in high-power laser system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 010002.
- 陈宝算, 张军勇, 张艳丽, 等. 高功率激光系统中的小尺度自聚焦研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 010002.
- [23] Li B, Hu X Y, Zheng C Y, *et al.* Numerical simulation of filamentation for spatially smoothing beam in hohlraum[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(11): 112004.
- 李斌, 胡晓燕, 郑春阳, 等. 黑腔中空间束匀滑光束成丝不稳定性数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(11): 112004.
- [24] Wang W L. Study on fast focal zooming technology for direct-drive fusion [J]. *Journal of Lanzhou University of Arts and Science (Natural Sciences)*, 2015, 29(5): 30-36.
- 王文莲. 用于直接驱动的快速可变焦技术研究[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版), 2015, 29(5): 30-36.
- [25] Shao P, Xia L, Zhao D F, *et al.* Measurement and debugging of wedge-shaped lens in high power laser facility[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0408006.
- 邵平, 夏兰, 赵东峰, 等. 高功率激光装置终端楔形透镜的测量与调试[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408006.