

连续相位板对靶面 SBS 激光后向传输特性影响研究

徐守英^{1,2}, 周申蕾^{1*}, 龚雨枫^{1,2}, 张军勇¹, 邬融¹, 刘德安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联合实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 激光辐照靶面产生的后向受激布里渊散射(SBS)光经连续相位板(CPP)调制会产生衍射强值并对光学元件造成损伤。利用建立的 SBS 激光后向近场衍射传输模型及菲涅耳衍射理论,分析并数值模拟了衍射距离、CPP 设计参数和应用位置等参量对近场衍射调制的影响。结果表明:在一定范围内,近场调制随衍射距离的增大而迅速增强;CPP 相位幅度、最小空间周期和频谱控制均会影响近场调制,其中相位幅度的影响较大;倍频 CPP 对近场调制的影响小于基频 CPP 对近场调制的影响。CPP 后向近场衍射传输分析有助于理解相位型光学器件的近场光强分布,对高功率激光系统中光学元件的排布及 CPP 的优化具有指导意义。

关键词 衍射; 连续相位板; 受激布里渊散射; 近场调制; 惯性约束聚变

中图分类号 TN241

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2205001

Influence of Continuous Phase Plate on Backscattered Transmission Characteristics of SBS Laser Light at Target

Xu Shouying^{1,2}, Zhou Shenlei^{1*}, Gong Yufeng^{1,2}, Zhang Junyong¹, Wu Rong¹, Liu Dean¹

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

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The stimulated Brillouin scattered (SBS) light caused by laser irradiation at target is modulated when passing through a continuous phase plate (CPP), which causes damage to optical elements. In this paper, a theoretical model for analyzing back near-field diffraction transmission of SBS light is established, which is combined with Fresnel diffraction theory and used to analyze and numerically simulate the influences of diffraction distance, CPP parameters and application position on near-field diffraction modulation. The results show that as the diffraction distance increases within a certain range, the near-field modulation increases rapidly. Near-field modulation is affected by CPP phase amplitude, minimum spatial period and spectral control, in which phase amplitude has a relatively high impact. In addition, the effect of doubling frequency CPP on near-field modulation is weaker than that of fundamental frequency CPP. The study of back near-field diffraction transmission of CPP is helpful for understanding the near-field intensity distribution of a phase optical device and provides some guidance on the arrangement of optical elements of a high-power laser system and the optimization of CPP.

Key words diffraction; continuous phase plate; simulated Brillouin scattering; near-field modulation; inertial confinement fusion

OCIS codes 050.1940; 100.2960; 230.1950

1 引 言

惯性约束核聚变装置对焦斑辐照的均匀性具有较高的要求,流体力学的不稳定性会使光强的不均

匀分布被放大,进而导致各种非线性效应^[1-2]。连续相位板(CPP)作为一种相位型衍射光学元件,通过对入射光的波前调制,能够有效控制焦斑的尺寸和旁瓣,同时实现入射光 98% 以上的能量利用^[3-4]。

收稿日期: 2020-06-22; 修回日期: 2020-07-13; 录用日期: 2020-07-31

基金项目: 中科院先导项目(XDA25020304)

* E-mail: slzhou@mail.shcnc.ac.cn

目前有大量文章研究了 CPP 对远场焦斑的影响, CPP 的设计已非常成熟并被广泛应用于 NIF、OMEGA、神光 II 和神光 III 等高功率激光装置中^[5-10]。但是,由于光强分布不均匀,靶面会产生受激布里渊散射(SBS)光和受激拉曼散射(SRS)光^[11-12],部分受激光后向传输进入光学系统,依次经过楔形透镜、倍频转换晶体、CPP 和基频反射镜等光学元件,光强分布受到调制。SRS 光和 SBS 光波长分别在 450~750 nm 和 350~353 nm 范围内,基频反射镜的损伤阈值随波长的减小而降低,因此经 CPP 调制的后向 SBS 光更容易造成传输镜损伤而影响其正常使用^[12]。以往在 CPP 设计时考虑了前向衍射传输特性^[4,13-14],而关于靶面后向激光传输特性的讨论鲜有报道。

针对后向 SBS 光波面复杂、波长与 CPP 不匹配、基频(1ω)反射镜对三倍频(3ω)光的损伤阈值低等问题,本文基于菲涅耳衍射理论,建立了后向 SBS 传输的近场衍射模型,理论分析并数值模拟了衍射距离和 CPP 设计参数等对后向近场衍射的影响;对比了 1ω CPP 元件与 2ω CPP 元件对后向近场衍射的调制,并结合实际高功率激光系统中光学元件的使用,分析了 CPP 元件对系统的影响约束。研究结果对相位型物体的近场衍射传输特性的理解分析、终端光学元件的排布和 CPP 的使用具有指导意义。

2 后向近场衍射传输特性理论分析

基于菲涅耳衍射理论,后向 SBS 光经 CPP 调制后的传输过程^[15]为

$$\mathbf{U}(x, y, d, t) = A \exp(ia\phi_{3\omega}) \otimes \mathbf{h}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{U}(x, y, d, t)$ 为 t 时刻下衍射距离为 d 时的衍射光场分布; \mathbf{h} 为传递函数; A 为后向 SBS 光传输到 CPP 所在平面处的光场复振幅; $\exp(ia\phi_{3\omega})$ 为后向 SBS 光经过 CPP 后引入的相位改变量,该相位量与光波长、CPP 厚度及材料等有关^[4]; a 为相位板引

入的幅度系数; $\phi_{3\omega}$ 为 3ω CPP 引入的相位延迟量; \otimes 表示卷积运算; (x, y) 为采样点坐标。

SBS 光是由靶面不均匀激光散斑点与等离子体相互作用产生的,受激光散斑和等离子体状态的影响。实际激光光束具有一定大小,能够激发出超过 10^4 个散斑点,因此靶面 SBS 光可以看作是由众多点光源组成的^[12]。某时刻 SBS 经过楔形透镜在前焦面处的光场分布可以表示为

$$A = \sum_m E_m \exp[-i(\omega_m t + \varphi_m)], \quad (2)$$

式中: E_m 为不同 SBS 点光源振幅,与入射激光振幅成正比; m 为 SBS 点光源编号; ω_m 为 SBS 光频率,其对应的波长分布范围为 350~353 nm^[11-12],相比于单色波,SBS 光场的相干性大大降低^[16]; φ_m 为初始相位。SBS 光的相位与靶面激光的相位具有共轭关系,入射激光经 CPP 调制后产生子波,子波在靶面上相干叠加,其相位分布均匀,因此相位 φ_m 在 $-\pi \sim \pi$ 范围内均匀分布。CPP 后向近场调制是波长、初始相位及振幅均不同的多光束的综合作用结果。

基于 G-S 算法迭代产生的 $\phi_{3\omega}$ 依赖于初始相位,初始相位具有随机性。利用波前畸变的低频模型,采用滤波函数去除随机相位的高频部分, $\phi_{3\omega}$ ^[4] 可表示为

$$\phi_{3\omega}(x_0, y_0) = g \times \Re \left\{ \mathcal{F}^{-1} \left[\mathcal{F}(\zeta) \times \exp\left(-\frac{f_{x_0}^2 + f_{y_0}^2}{1/L_{\text{cpp}}^2}\right) \right] \right\}, \quad (3)$$

式中: (x_0, y_0) 为 CPP 面坐标; g 为 CPP 相位幅度系数,需保证初始远场焦斑能量利用率达到 95%,目标焦斑越大, g 越大^[6]; $\Re(\cdot)$ 表示取实部; $\mathcal{F}(\cdot)$ 和 $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$ 分别为傅里叶变换和傅里叶逆变换; ζ 为随机相位; L_{cpp} 为 CPP 最小空间周期; (f_{x_0}, f_{y_0}) 为 CPP 频域面坐标。

那么,(1)式可以变换为

$$\mathbf{U}(x, y, d, t) = A \exp(ia\phi_{3\omega}) \otimes \mathbf{h} = \sum_m E_m \exp \left\{ -i(\omega_m t + \varphi_m) + iag \Re \left[\mathcal{F}^{-1} \left[\mathcal{F}(\zeta) \times \exp\left(-\frac{f_{x_0}^2 + f_{y_0}^2}{1/L_{\text{cpp}}^2}\right) \right] \right] \right\} \otimes \mathbf{h}. \quad (4)$$

在某时刻,近场衍射调制是具有不同空间分布的散斑复振幅叠加的结果;一段时间后,光学元件的损伤图为不同时刻近场调制强度的叠加:

$$I = \sum_t |\mathbf{U}(x, y, d, t)|^2. \quad (5)$$

在 CPP 和后向 SBS 光的共同作用下,近场衍射调制项为

$$\sum_m E_m \exp \left\{ -i(\omega_m t + \varphi_m) + iag \Re \left\{ \mathcal{F}^{-1} \left[\mathcal{F}(\zeta) \times \exp \left(-\frac{f_{x_0}^2 + f_{y_0}^2}{1/L_{\text{cpp}}^2} \right) \right] \right\} \right\}. \quad (6)$$

根据(6)式可知: g 、 a 和 L_{cpp} 等参数会影响后向近场衍射调制,当 g 和 a 越小, L_{cpp} 越大时,近场调制越弱。而 CPP 远场焦斑大小和 CPP 应用位置等会影响 g 和 a 的值,因此开展上述参量对后向 SBS 光束传输影响的数值模拟研究。

3 数值模拟

选取如下参数对 CPP 进行设计:CPP 的最小空

间周期为 8 mm,输入光场为 12 阶超高斯光束,1% 光强处的光束半径为 160 mm;靶面目标光场为 4 阶圆形超高斯光束,其 1% 光强处的焦斑半径为 150 μm (约为 63 倍衍射极限)。设计得到的相位板 CPP1 的相位分布及对应远场焦斑如图 1 所示。以顶部光强均方根误差(Rms)和能量利用率(Ratio)描述 CPP 对远场焦斑的整形匀滑能力^[4],计算得到,Rms 和 Ratio 分别为 58%和 98.6%。

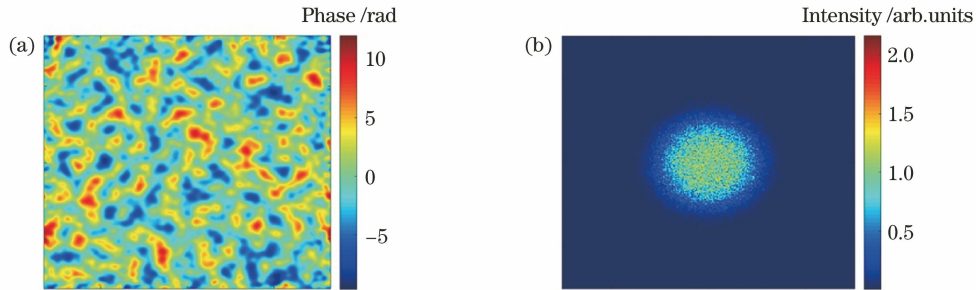


图 1 CPP1 的相位分布及远场焦斑。(a)相位分布;(b)远场焦斑

Fig. 1 Phase distribution of CPP1 and far-field focal spot. (a) Phase distribution; (b) far-field focal spot

以均方根梯度(GRMS)来表征 CPP 面型的起伏大小^[17-18],以近场光强最大值(I_{max})、通量对比度(Contrast)和近场衍射通量概率密度函数分布图来描述近场光强调制和分布^[19],近场评价函数计算区域大小为 270 mm × 270 mm。采用上述模型进行近场数值模拟,得到距离 CPP1 5 m 位置处的近场衍射结果及局部放大图,如图 2 所示,近场强度最大值为 1.2473,通量对比度为 5.82%。与前向激光

相比,不同散斑点激发得到不同波长的 SBS 光,其相位、传递函数及经过 CPP 的相位延迟均不同,从而不同散斑点的近场调制不同,整体近场调制是不同散斑点在一定时间下的作用结果。从图 2(a)、(b)所示的模拟结果可以看出,后向 SBS 光经过 CPP 后的衍射图案和 CPP 结构相似,与文献[12]中的实验结果一致,故采用上述模型分析经过聚焦透镜的后向 SBS 光的传输特性是可行的。

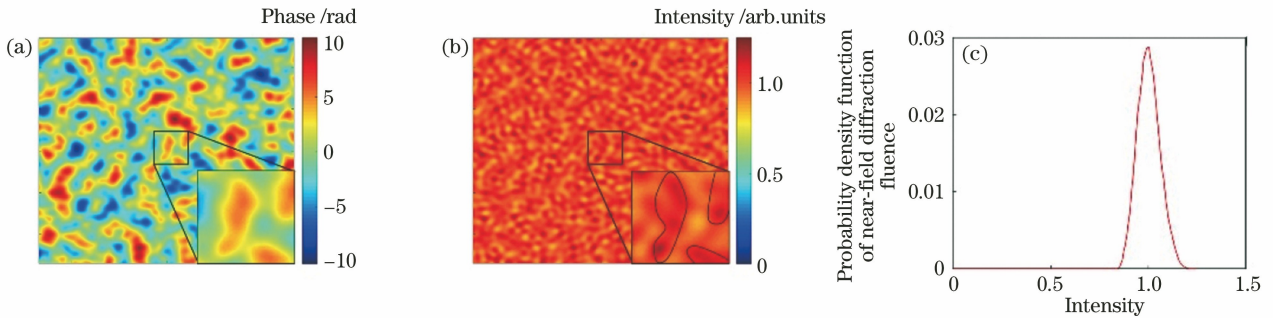


图 2 CPP 相位及后向 SBS 光的近场衍射结果。(a) CPP 相位;(b)近场衍射结果;(c)近场衍射通量概率密度函数

Fig. 2 CPP phase and near-field diffraction of backward SBS light. (a) CPP phase; (b) near-field diffraction; (c) probability density function of near-field diffraction fluence

3.1 衍射距离对后向近场衍射的影响

分别沿光束传输方向和垂直传输方向研究 SBS 光通过 CPP 后的传输情况,从而探究相位型光学元件的近场衍射传输规律并指导终端光学元件的光路

排布。以图 1(a)所示的 CPP1 为例,模拟结果如图 3 所示。以 CPP1 所在平面的中心为坐标原点,反向 SBS 光传输方向为 Z 轴方向,垂直传输方向的平面为 XOY。图 3(a)是 XOZ 平面上的一维近场衍

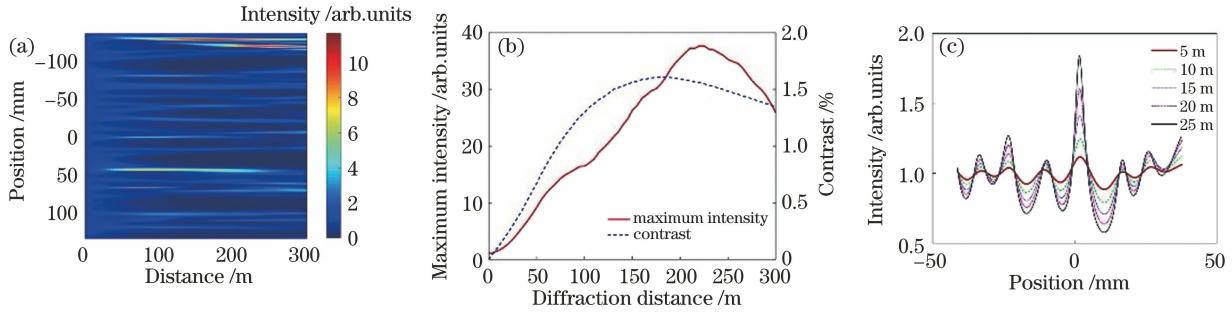


图 3 不同衍射距离下的近场衍射光强结果。(a)XOZ 平面上的一维近场衍射光强;(b)光强最大值和对比度;(c)局部光强对比图
Fig. 3 Near-field diffraction under different diffraction distances. (a) One-dimensional near-field diffraction intensity in XOZ plane; (b) maximum intensity and contrast; (c) local intensity comparison

射光强,图 3(b)为不同衍射距离下近场衍射面的光强最大值和对比度的变化,图 3(c)为不同衍射距离下沿着 X 轴的局部光强对比图。

从图 3(a)、(b)可以看出,调制的光强随衍射距离的增大先迅速增强,再保持不变,最后减小。由图 3(c)可以看出,在一定衍射距离下,衍射极值点总出现在特定的位置处,衍射距离小于 20 m 时衍射包络相近,随衍射距离的增大,衍射幅值增大;随着衍射距离的继续增大,近场包络会出现分裂,产生更多的起伏。与理想点源同轴相称成像的衍射规律相似,对于特定空间频率的物体,像的调制对比度随衍射距离的增大先增大后减小^[20]。在 CPP 设计中,侧重控制最大空间频率,从而 CPP 包含较宽的空间频率范围,使得图 3(b)所示的调制对比度在很长衍射距离内都是较大的。对于不同频率结构的 CPP,其近场调制增长速率不同,后向 SBS 光与 CPP 波长的不匹配进一步加剧了近场调制增长速率的差异。

因此,在保证光学元件的使用功能的条件下,光学元件应尽可能靠近 CPP 放置以减弱损伤。SBS 光经过焦斑半径为 300 μm 的 CPP 时,为保证 3ω 光近场通量对比度低于目标值(15%)^[19],光学元件需要放置在距离此 CPP 7 m 以内的位置。

3.2 CPP 设计参数对后向近场衍射的影响

CPP 的设计采用 G-S 迭代算法,相位板对初始相位有很大的依赖性,但施加不同约束时所得 CPP 的微小相位结构会存在差异,因此 L_{cpp} 和 g 值不同。模拟分析 CPP 的最小空间周期、目标焦斑尺寸和焦斑频谱控制等因素的影响,得到的结果如图 4 所示。其中, CPP1 的最小空间周期为 8 mm,目标焦斑半径为 150 μm ; CPP2 的最小空间周期为 16 mm,目标焦斑半径为 150 μm ; CPP3 的最小空间周期为 8 mm,目标焦斑半径为 300 μm ; CPP4 的最小空间周期为 8 mm,目标焦斑半径为 150 μm ,并对焦斑在 $0.01\sim 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ 范围内进行频谱控制。

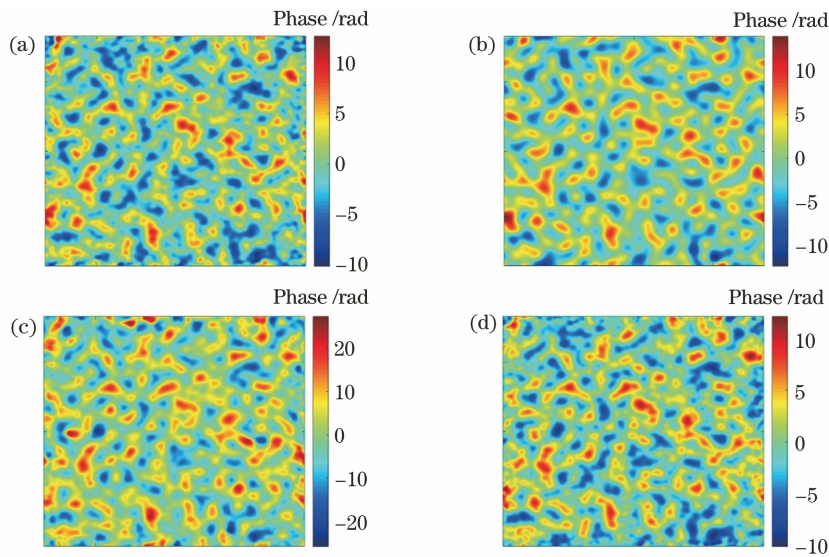


图 4 不同 CPP 的相位。(a) CPP1;(b) CPP2;(c) CPP3;(d) CPP4
Fig. 4 Different CPP phases. (a) CPP1; (b) CPP2; (c) CPP3; (d) CPP4

受初始相位影响,在相同初始相位和不同约束条件下得到的 CPP 是相似的,仅有细节处的差异,结果如图 4 所示。在距离不同 CPP 5 m 处的近场

衍射切面和近场衍射通量概率密度函数分布分别如图 5 和图 6 所示,表 1 详细描述了不同 CPP 的近/远场评价函数。

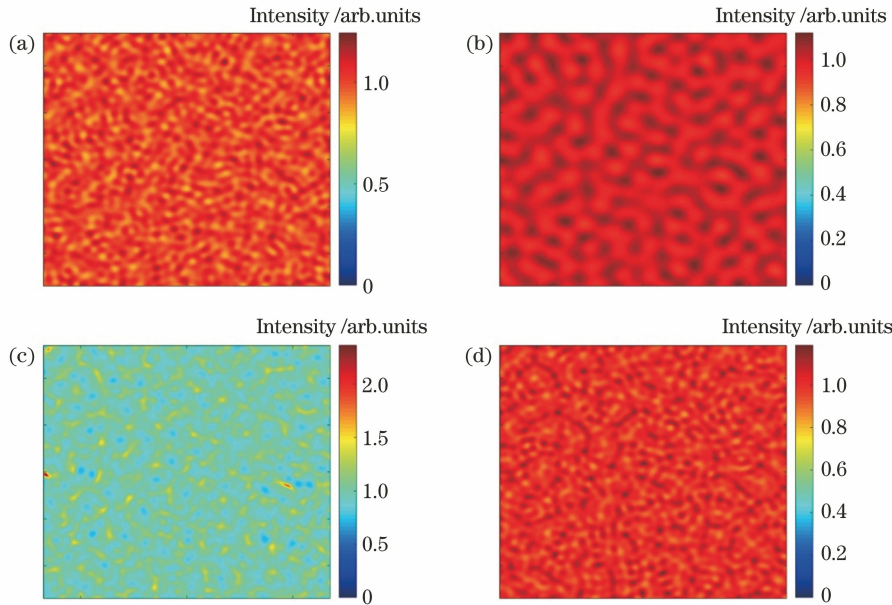


图 5 距离不同 CPP 5 m 处的后向近场衍射结果。(a) CPP1;(b) CPP2;(c) CPP3;(d) CPP4

Fig. 5 Back near-field diffraction at 5 m from different CPP. (a) CPP1; (b) CPP2; (c) CPP3; (d) CPP4

表 1 CPP 的评价函数

Table 1 Evaluation functions of CPP

CPP	L_{cpp}/mm	g	GRMS / ($\text{rad} \cdot \text{mm}^{-1}$)	Near-field		Far-field	
				Contrast / %	I_{max}	Rms / %	Ratio / %
CPP1	8	11.9	0.2948	5.82	1.2473	58.0	98.6
CPP2	16	13.2	0.3098	4.02	1.1208	81.9	98.8
CPP3	8	25.8	0.5436	10.68	2.4207	79.4	99.1
CPP4	8	11.4	0.2879	5.55	1.1953	61.3	99.3

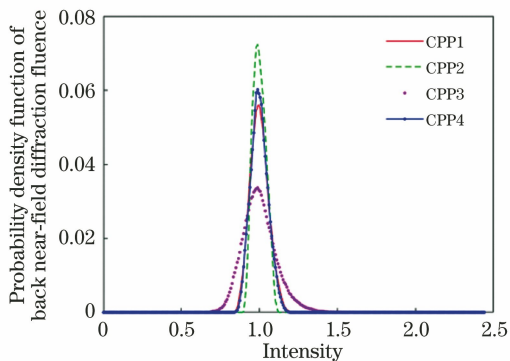


图 6 不同 CPP 的后向近场衍射通量概率密度函数

Fig. 6 Probability density functions of back near-field diffraction fluence under different CPPs

从图 5 可以看出,不同 CPP 的后向近场衍射包络是相似的, CPP1、CPP2 和 CPP4 的光强起伏较

小, CPP3 的光强起伏大。从图 6 可以看出, CPP3 近场光强值的分布较为离散,光强值分布跨度大; CPP1、CPP2 和 CPP4 近场光强值的分布较为集中。光强起伏较小、光强值分布集中说明近场调制弱,反之,则调制强。结合表 1 数据可以看出,增大 L_{cpp} 会减弱近场衍射调制效果,同时降低远场焦斑的均匀性;当增大远场焦斑尺寸时, CPP 的相位幅度系数 g 增大,近场调制得到明显增强,由于整形难度加大,远场焦斑的整形能力下降;频谱控制能够有效控制焦斑的中频段,所得 CPP 的 GRMS、近场对比度和光强最大值减小,说明 5 m 衍射距离下 CPP 中频段对 CPP 起伏和近场衍射影响较大。综上所述,通过增大 L_{cpp} 、减小目标焦斑尺寸和控制焦斑频谱可以减弱近场调制效果,其中目标焦斑尺寸对近场调制的影响较大。

3.3 CPP 应用位置对后向近场衍射的影响

在实际高功率激光装置中,根据 CPP 应用位置的不同,将 CPP 分为 1ω CPP、 2ω CPP 和 3ω CPP。由于元件损伤阈值和材料可选择性等原因,广泛使用的是 1ω CPP 和 2ω CPP。不同倍频 CPP 需要引入的相位延迟量之间的关系为

$$\phi_{3\omega} = 3\phi_{1\omega} = \frac{3}{2}\phi_{2\omega}, \quad (7)$$

式中: $\phi_{1\omega}$ 、 $\phi_{2\omega}$ 、 $\phi_{3\omega}$ 分别为 1ω CPP、 2ω CPP、 3ω CPP 需要引入的相位延迟量。与正向激光通过 CPP 引入的相位延迟不同,后向 SBS 光经过不同 CPP 后引入的相位延迟量为 $a\phi_{3\omega}$ 。以石英材料为例,入射光的折射率分别为 1.4767 (频率为 3ω), 1.4609 (频率为 2ω), 1.4498 (频率为 1ω)。波长范围为 $350 \sim 353$ nm 的 SBS 光通过 1ω CPP 和 2ω

CPP 时,对应有 $a = \frac{\lambda_{3\omega}}{\lambda} \times \frac{n-1}{n_{1\omega}-1}$ 和 $a = \frac{\lambda_{3\omega}}{\lambda} \times \frac{n-1}{n_{2\omega}-1}$,其中 $\lambda_{3\omega} = 351$ nm, n 为波长为 λ 的 SBS 光在相位板中的折射率, $n_{1\omega}$ 和 $n_{2\omega}$ 分别为波长为 1053 nm (频率为 1ω) 和 526 nm (频率为 2ω) 的前向光在相位板中的折射率。

SBS 光通过 1ω CPP 与 2ω CPP 时的后向近场衍射结果和近场衍射通量概率密度函数分布图如图 7 所示,可以看出,不同位置的 CPP 的近场调制结果相近,但整体上 2ω CPP 的后向近场光强分布比 1ω CPP 的集中。表 2 为 1ω CPP 和 2ω CPP 的评价函数,可以看出,与 2ω CPP 相比, 1ω CPP 的对比度和光强最大值分别大 5% 和 0.6%。

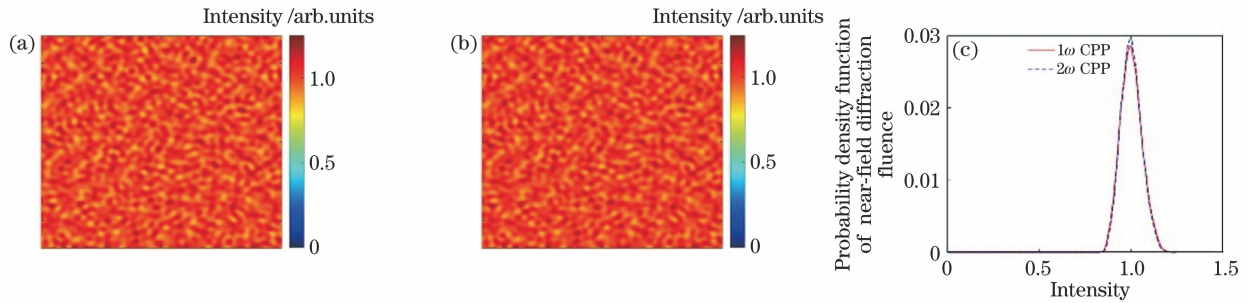


图 7 不同 CPP 的后向近场衍射结果及近场衍射通量概率密度函数分布图。(a) 1ω CPP, 后向近场衍射; (b) 2ω CPP, 后向近场衍射; (c) 近场衍射通量概率密度函数

Fig. 7 Back near-field diffraction results under different CPPs and probability density functions of near-field diffraction fluence. (a) 1ω CPP, back near-field diffraction; (b) 2ω CPP, back near-field diffraction; (c) probability density functions of near-field diffraction fluence

表 2 1ω CPP 和 2ω CPP 的评价函数

Table 2 Evaluation functions of 1ω CPP and 2ω CPP

CPP	GRMS / (rad · mm ⁻¹)	Near-field	
		Contrast / %	I _{max}
1ω CPP	0.2948	5.82	1.2473
2ω CPP	0.294	5.54	1.2394

4 结 论

靶面后向 SBS 光通过 CPP 在近场产生衍射调制,增大了光学元件的损伤风险。通过建立多光束综合作用的 SBS 光模型,理论分析和数值模拟了衍射距离、CPP 设计参数和 CPP 应用位置对近场衍射的影响。结果表明:在一定衍射距离内,增大衍射距离会导致近场衍射调制迅速增强,光学元件应靠近 CPP 放置;远场目标的焦斑尺寸对近场调制的影响较大,对于大目标焦斑, CPP 设计应考虑后向近场

调制约束,焦斑频谱控制可以实现对近场调制的控制;基频 CPP 的近场调制效果高于倍频 CPP。靶面后向 SBS 传输特性的分析对 CPP 的设计和使用及光路排布具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Kilkenny J D, Glendinning S G, Haan S W, et al. A review of the ablative stabilization of the Rayleigh-Taylor instability in regimes relevant to inertial confinement fusion[J]. Physics of Plasmas, 1994, 1 (5): 1379-1389.
- [2] Nakai S D, Mima K. Laser driven inertial fusion energy: present and prospective [J]. Reports on Progress in Physics, 2004, 67(3): 321-349.
- [3] Zhu Y C, Wu R, Zhang J Y, et al. Optimal design for continuous phase plate under segmental control across full-spectrum [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0723001.

- 朱应成, 邬融, 张军勇, 等. 全频段控制下连续相位板的优化设计[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0723001.
- [4] Li P, Jia H T, Wang F, et al. Analysis of continuous phase plates applying position for TIL facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(2): 318-323.
李平, 贾怀庭, 王芳, 等. 神光Ⅲ原型装置中连续相位板的应用位置分析[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 318-323.
- [5] 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.
- [6] Ma C, Su J Q, Su J Q, et al. Design of continuous phase plates for controlling spatial spectrum of focal spot[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(7): 1114-1118.
李平, 马驰, 粟敬钦, 等. 基于焦斑空间频谱控制的连续相位板设计[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(7): 1114-1118.
- [7] 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. 基于工艺连续相位板设计[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3179-3182.
- [8] Wen S L, Tang C X, Zhang Y H, et al. Effects of least spatial period on the fabrication and performance of continuous phase plate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0908001.
温圣林, 唐才学, 张远航, 等. 最小空间周期对连续相位板加工和性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0908001.
- [9] Xu M J, Dai Y F, Xie X H, et al. Error analysis of ion beam figuring for fabrication of continuous phase plates with small feature structures[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(12): 2975-2982.
徐明进, 戴一帆, 解旭辉, 等. 小特征尺寸连续相位板离子束修形的误差分析[J]. 光学精密工程, 2016, 24(12): 2975-2982.
- [10] Berger R L, Thomas C, Baker K L, et al. Stimulated backscatter of laser light from BigFoot hohlraums on the National Ignition Facility[J]. Physics of Plasmas, 2019, 26(1): 012709.
- [11] Moody J D, Datte P, Krauter K, et al. Backscatter measurements for NIF ignition targets[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 10D921.
- [12] Chapman T, Michel P, di Nicola J M, et al. Investigation and modeling of optics damage in high power laser systems caused by light backscattered in plasma at the target[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 125(3): 033101.
- [13] Marozas J A, Collins T B, Zuegel J D, et al. Continuous distributed phase-plate advances for high-energy laser systems[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 717: 012107.
- [14] Zhan J H, Yao X, Gao F H, et al. Study on intensity distribution inside the frequency conversion crystals for continuous phase plate front-located in inertial confinement fusion driver[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(1): 014205.
占江徽, 姚欣, 高福华, 等. 惯性约束聚变驱动器连续相位板前置时频率转换晶体内部光场研究[J]. 物理学报, 2011, 60(1): 014205.
- [15] Goodman J W. Introduction to Fourier optics[M]. Qin K C, Liu P S, Chen J B, et al, Transl. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2011.
Goodman Joseph W. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧, 等, 译. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [16] Deng X M, Yu W Y, Chen S S, et al. Output power increase of high power Nd:glass laser by bandwidth[J]. Acta Optica Sinica, 1983, 3(2): 97-101.
邓锡明, 余文炎, 陈时胜, 等. 用增加频带宽度的方法提高钕玻璃高功率激光器输出功率[J]. 光学学报, 1983, 3(2): 97-101.
- [17] Yang J L, Zhong Z Q, Weng X F, et al. Method of statistically characterizing target plane light field properties in inertial confinement fusion device[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(8): 084207.
杨钧兰, 钟哲强, 翁小凤, 等. 惯性约束聚变装置中靶面光场特性的统计表征方法[J]. 物理学报, 2019, 68(8): 084207.
- [18] Feng Y J, Lin Z X, Zhang R Z. The influence of root mean square phase gradient of continuous phase plate on smoothing focal spot[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(10): 104202.
冯友君, 林中校, 张蓉竹. 连续相位板均方根梯度对焦斑平滑特性的影响[J]. 物理学报, 2011, 60(10): 104202.
- [19] Haynam C, Wegner P J, Auerbach J M, et al. National Ignition Facility laser performance status[J]. Applied Optics, 2007, 46(16): 3276-3303.
- [20] Pogany A, Gao D, Wilkins S W. Contrast and resolution in imaging with a microfocus X-ray source[J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(7): 2774-2782.