

基于复合型光栅组合的多色集束匀滑方案

王健^{**}, 钟哲强, 张彬^{*}, 孙年春

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 提出了基于复合型光栅组合的多色集束匀滑方案, 可实现激光集束在靶面上平移和旋转两种运动方式的组合。建立了靶面散斑的横向扫动速度物理模型, 并推导出激光束横向扫动速度的解析表达式, 进而讨论了靶面横向扫动速度的变化规律。在此基础上, 分析了不同复合型光栅组合对靶面辐照均匀性的影响, 并对复合型光栅参数的选取进行了优化。结果表明, 与传统的线性光栅色散匀滑方案相比, 在使用复合型光栅时激光束靶面散斑的扫动速度和扫动方向更加复杂, 因而其匀滑效果更佳。与典型的束匀滑方案进行对比, 经过优化的基于复合型光栅组合的多色集束匀滑方案能够有效改善焦斑均匀性和抑制焦斑内部热斑比例。此外, 采用功率谱密度曲线对激光束纵向强度分布特性进行初步分析, 结果发现, 基于复合型光栅组合的多色集束匀滑方案能有效降低激光束纵截面峰值强度。

关键词 激光光学; 惯性约束聚变; 复合型光栅; 扫动速度; 功率谱密度; 成丝

中图分类号 TN241

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0814001

Beam Smoothing Scheme for Multi-Color Laser Quad Based on a Combination of Hybrid Gratings

Wang Jian^{**}, Zhong Zheqiang, Zhang Bin^{*}, Sun Nianchun

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

Abstract A beam smoothing scheme for multi-color laser quad based on combination of hybrid gratings is proposed, which can achieve a combination of transverse and rotary moving of the speckles on target plane. The physical model of the transverse moving speed of the speckles on target plane is built up, and the analytical expression for the transverse moving speed of the speckles on target plane is also derived. Furthermore, the variation of the transverse moving speed of the speckles on target plane is discussed. On the basis, the influences of different combinations of hybrid gratings on irradiation uniformity on target plane are analyzed, and the parameters of hybrid gratings are optimized. Results indicate that, compared with the traditional scheme of smoothing by spectral dispersion based on linear gratings, the moving speed and direction of the speckles on target plane are more complicated based on hybrid gratings, resulting in the further improvement of the smoothing effect. Compared to the typical schemes of beam smoothing, the optimized scheme of beam smoothing for multi-color laser quad based on the combination of hybrid gratings can effectively improve the irradiation uniformity and reduce the ratio of hot spots. Additionally, the power spectral density is proposed and used to preliminarily analyze the longitudinal intensity distribution characteristics of laser quad, and it is found that the beam smoothing for multi-color laser quad based on the combination of hybrid gratings can effectively decrease longitudinal peak intensity of laser quad.

Key words laser optics; inertial confinement fusion; hybrid grating; moving speed; power spectral density; filaments

OCIS codes 140.3290; 140.3295; 140.3300

1 引 言

激光聚变是指利用强激光直接或间接辐照氘氚

靶丸, 使燃料达到极高的温度和密度, 以实现聚变反应^[1]。目前, 实现激光聚变有两种驱动方式: 直接驱动^[2]和间接驱动^[3-4]。在这两种聚变驱动方式中, 靶

收稿日期: 2018-01-12; 修回日期: 2018-03-09; 录用日期: 2018-04-02

基金项目: 国家重大专项应用基础项目(JG2017149, JG2017029)、科技部创新人才推进计划重点领域创新团队(2014RA4051)

* E-mail: zhangbinff@sohu.com; ** E-mail: 13008198532@163.com

面辐照均匀性是实现靶丸均匀压缩和热核点火的关键因素之一^[5]。为了有效改善靶面的辐照均匀性,国内外学者开展了大量研究,已发展了多种空域^[6-8]和时域^[9-11]靶面均匀辐照技术。空域光束匀滑技术主要用来控制激光束的远场焦斑包络,而时域光束匀滑技术则主要用来减少焦斑内部散斑和降低高频调制。高功率激光驱动装置如美国国家点火装置(NIF)^[12]、法国兆焦耳激光装置(LMJ)^[13]和中国神光-III激光装置^[14],均联合使用多种束匀滑技术,即采用以光谱色散匀滑(SSD)为代表的时域束匀滑技术和以连续相位板(CPP)为代表的空域束匀滑技术分别对激光束进行时间匀滑和空间匀滑。近年来,Zhong等^[15]提出多色、多频光谱角色散匀滑方案,该方案能够在保持高效三倍频的情况下有效增大带宽,进一步改善靶面辐照均匀性。然而,该方案中相邻子光栅色散方向两两正交,仅能实现子束在光栅色散方向上的扫动(即 x 方向或 y 方向),导致靶面焦斑内部强度调制匀滑不够充分。Zhang等^[16]提出了星光栅、圆光栅 SSD 方案,但也只能实现单方向的色散,如圆光栅的匀滑方向为径向,其束匀滑效果相对较差,且在其圆周方向会出现衍射条纹,而星光栅的匀滑的方向沿圆周方向且匀滑效果相对较好,但加工困难。

笔者曾提出基于复合型光栅的 SSD 方案^[17],该光栅分为内、外两个不同的色散区域,通过不同的色

散区域对激光束进行不同方向的色散,可有效减少焦斑内强度调制,改善靶面的辐照均匀性。为进一步改善激光集束在靶面上的辐照均匀性,本文提出了基于复合型光栅组合的多色集束匀滑方案,建立了基于复合型光栅组合的多色集束匀滑物理模型和靶面散斑的横向扫动速度物理模型。在此基础上,推导出复合型光栅靶面散斑的横向扫动速度解析式,并对复合型光栅组合的多色集束方案的复合型光栅参数进行优化设计。最后,提出采用功率谱密度(PSD)对激光束纵向强度分布特性进行初步分析。

2 理论模型

2.1 基于复合型光栅组合的多色集束匀滑方案

以 NIF 装置为基础^[12],图 1(a)、(b)分别给出了基于复合型光栅组合的多色集束匀滑方案示意图及复合型光栅结构。激光集束由 2×2 阵列光源组成,各子光源中心波长不同,阵列光栅中各子光栅均采用复合型光栅。激光集束从左向右依次经过独立的电光调制器、复合型光栅、衰减片、主放大系统、三倍频组件、偏振控制板(PCP)和 CPP,最后,分别经楔形透镜聚焦到靶面。为避免复合型光栅不同色散区域衍射效率不同所引入的强度调制,在复合型光栅之后插入可编程衰减片,通过调整衰减片在不同区域的透过率可补偿激光束在经过复合型光栅之后内部和外部衍射效率差异引起的光强分布不均匀性。

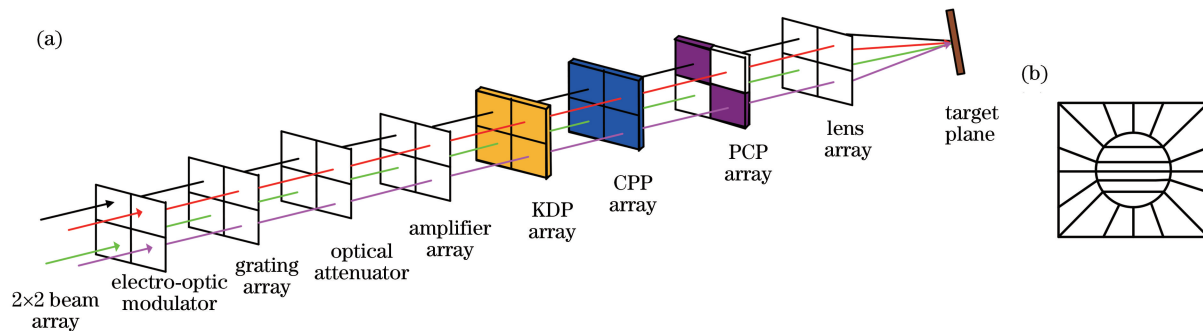


图 1 (a) 基于复合型光栅组合的多色集束匀滑方案; (b) 复合型光栅结构

Fig. 1 (a) Beam smoothing scheme for multi-color laser quad based on a combination of hybrid gratings; (b) structure of hybrid grating

在基于复合型光栅组合的多色集束匀滑方案中,各子光源中心波长不同,远场频率成分增加,使得各子束光场的相干性减弱,从而改善了靶面辐照均匀性。阵列光栅中各子光栅可相互独立进行设计,则当集束中不同子束经过不同的复合型光栅时,各子束焦斑内部散斑运动方式不同,导致各子束焦斑在靶面的强度分布也不相同。优化原则为:

使色散方向相同的两子束的焦斑光强分布的峰谷相对,而色散方向相反的子束非相干叠加。因此,各子束叠加后焦斑强度分布更均匀,从而进一步提高靶面辐照均匀性。

假设入射激光束为超高斯光束,激光集束中每一子束分别经过独立的电光调制器和光栅,第 m 个子光束近场光场分布可表示为

$$E_{0m}(x_m, y_m, t) = A_0[1 + a(x_m, y_m)] \exp[-(x_m/\omega_x)^{2N} - (y_m/\omega_y)^{2N}] \exp[i\Phi(x_m, y_m)] \times R_i E_0(x_m, y_m, t) \times \exp[i\omega_{0m}t + i\delta_m \sin \omega_m(t + \varepsilon_i)] + A_0[1 + a(x_m, y_m)] \exp[-(x_m/\omega_x)^{2N} - (y_m/\omega_y)^{2N}] \exp[i\Phi(x_m, y_m)] \times R_{ii} E_0(x_m, y_m, t) \exp[i\omega_{0m}t + i\delta_m \sin \omega_m(t + \varepsilon_{ii})], \quad (1)$$

式中： A_0 为归一化振幅； $a(x_m, y_m)$ 为随机振幅调制； ω_x, ω_y 为预放大系统中激光束的 $1/e$ 处束腰宽度； N 为空间超高斯阶数； $\Phi(x_m, y_m)$ 为初始相位分布； (x_m, y_m) 为近场坐标； ω_{0m} 为第 m 个子束的角频率； δ_m 和 ω_m 分别为第 m 个子束的调制深度和调制角频率， $\omega_m = 2\pi\nu_m$ ， ν_m 为调制频率； ε_i 为色散区域 i 的色散量， ε_{ii} 为色散区域 ii 的色散量； R_i, R_{ii} 分别用来表征激光束通过复合型光栅中不同的色散区域，当 $x^2 + y^2 < r^2$ 时， $R_i = 1, R_{ii} = 0$ ，而当 $x^2 + y^2 > r^2$ 时， $R_i = 0, R_{ii} = 1$ (r 为色散区域 i 的半径)。 ε_i 和 ε_{ii} 的表达式分别为

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \varepsilon_1 x, & \text{for } x \text{ direction} \\ \varepsilon_1 y, & \text{for } y \text{ direction} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ii} = \varepsilon_2 \alpha \sqrt{x^2 + y^2}, \text{ for the circumference,} \quad (3)$$

式中： $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别为一维线性色散、圆周方向色散的光栅角色散； α 为圆周方向色散区域的极角，且 $\alpha \in [0, 2\pi]$ ； (x, y) 为近场对应的坐标。 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 和 α 的表达式分别为

$$\varepsilon_1 = \frac{\lambda_m}{c} (d\theta_m/d\lambda_m), \quad (4)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\lambda_m}{c} \frac{M}{2\pi\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (5)$$

$$\alpha = \arctan(y/x), \quad (6)$$

式中： $d\theta_m/d\lambda_m$ 为一维线性色散区域的色散系数； λ_m 为第 m 个子束中心波长； c 为光速； M 为圆周方向色散区域的刻线数。

偏振控制板采用正交偏振控制板，经过偏振控制板的相邻子束为相互正交的线偏光。激光集束经过主放大系统、三倍频组件、CPP 和偏振控制板，最后，经楔形透镜聚焦到靶面。根据 Collins 公式，第

m 个子束的焦面光场分布可表示为

$$\mathbf{E}_{fm}(x_f, y_f) = \mathbf{e}_{x,y} \frac{B \exp(ik_m L)}{i\lambda_{3m} f} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E}_{0m} \times (x_m, y_m, t) \exp(i\phi_{\text{CPP}}) \exp\left[\frac{ik_m B}{f} (-x_0 x_f - y_0 y_f)\right] dx_0 dy_0, \quad (7)$$

式中： k_m 为集束中各子束波数， $k_m = 2\pi/\lambda_{3m}$ ， λ_{3m} 为经三倍频组件后第 m 个子束的中心波长； $L = 2f$ ， f 为透镜焦距； B 为预放大系统至主放大系统的扩束比； ϕ_{CPP} 为 CPP 的附加相位； $(x_0, y_0), (x_f, y_f)$ 分别为透镜前焦面和后焦面的坐标； $\mathbf{e}_{x,y}$ 为子束的偏振方向。

靶面的光强分布可表示为

$$I = \left| \sum_{m=1,4} \mathbf{E}_{fm}(x_f, y_f) \right|^2 + \left| \sum_{m=2,3} \mathbf{E}_{fm}(x_f, y_f) \right|^2. \quad (8)$$

为了对复合型光栅组合的多色集束匀滑方案的匀滑特性进行分析，采用焦斑光通量对比度 $C^{[18]}$ 来评价焦斑的均匀性，采用 FOPAI^[18] 曲线来表征焦斑内超过特定强度 I_0 的热斑的比例。

2.2 靶面散斑的横向扫动速度

SSD 的基本思路是利用光栅对展宽的光谱进行色散，不同频率的光色散角不同，导致不同频率的光在其色散方向上“运动”起来，因而在积分时间内靶面的焦斑得到了匀滑^[19]。然而，经复合型光栅的激光束内部色散区域和外部色散区域的扫动方向和扫动速度不同。为了分析复合型光栅扫动速度和扫动方式对复合型光栅匀滑效果的影响，建立了靶面散斑的横向扫动速度物理模型，激光束散斑在靶面的扫动方式如图 2(a) 所示，靶面散斑合成速度如图 2(b) 所示。

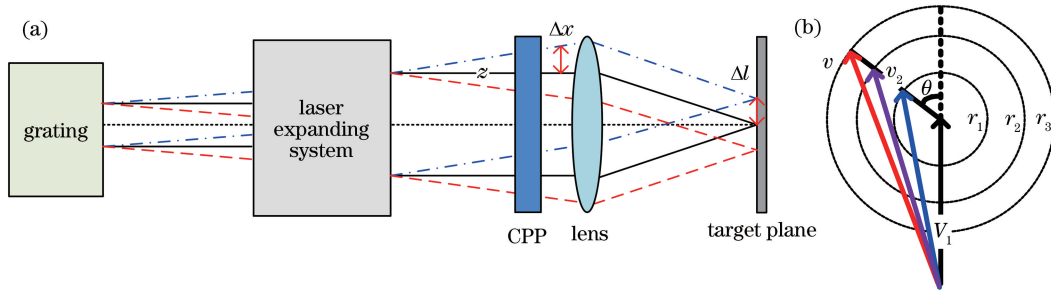


图 2 (a) 激光束散斑在靶面的横向扫动方式示意图；(b) 激光束靶面散斑的合成速度

Fig. 2 (a) Model of transverse moving speed of the speckles on target plane; (b) combined speed of the speckles on the target plane

激光束频率成分 $\omega(t)$ 与中心频率 ω_0 之间的横向偏移为^[18]

$$\Delta x = \frac{B \times 2\pi cz \times d\theta}{d\lambda} \frac{\omega(t)}{\omega_0[\omega_0 - \omega(t)]}, \quad (9)$$

式中: z 为激光束经光栅后传输到焦面的距离。

复合型光栅分为内外两个色散区域, 内部色散区域和外部色散区域的横向扫动速度不同, 经复合型光栅内部和外部色散区域后的近场横向扫动速度分别为^[20]

$$u_1 = \frac{d\Delta x}{dt} = B \times 2\pi cz \times \epsilon_1 \times \frac{\delta\omega_m^2 \sin[\omega_m(t - z/c + \epsilon_i)]}{\{\omega_0 - \delta\omega_m \cos[\omega_m(t - z/c + \epsilon_i)]\}^2}, \quad (10)$$

$$u_2 = \frac{d\Delta x}{dt} = B \times 2\pi cz \times \epsilon_2 \times \frac{\delta\omega_m^2 \sin[\omega_m(t - z/c + \epsilon_{ii})]}{\{\omega_0 - \delta\omega_m \cos[\omega_m(t - z/c + \epsilon_{ii})]\}^2}, \quad (11)$$

式中: u_1 为激光束经过内部色散区域后的横向扫动速度; u_2 为激光束经过外部色散区域后的横向扫动速度。

如图 2(a) 所示, 激光束经过 CPP 时, 为了便于讨论且不失一般性, 只考虑 CPP 的空间整形能力, CPP 的相位变化作用等效为曲率半径为 R_0 的球面波前^[21]。因此, CPP 和聚焦透镜的等效焦距为

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{f} - \frac{1}{R_0}. \quad (12)$$

当激光束依次经过三倍频组件、CPP 以及其他终端元件后, 最后经透镜聚焦到焦面时, 经复合型光栅内部和外部色散区域的激光束在焦面的横向扫动速度分别为

$$v_1 = \frac{d\Delta l}{dt} = f_1 \times B \times 2\pi cz \times \epsilon_1 \times \frac{\delta\omega_m^2 \sin[\omega_m(t - z/c + \epsilon_i/3)]}{\{3\omega_0 - \delta\omega_m \cos[\omega_m(t - z/c + \epsilon_i/3)]\}^2}, \quad (13)$$

$$v_2 = \frac{d\Delta l}{dt} = f_1 \times B \times 2\pi cz \times \epsilon_2 \times \frac{\delta\omega_m^2 \sin[\omega_m(t - z/c + \epsilon_{ii}/3)]}{\{3\omega_0 - \delta\omega_m \cos[\omega_m(t - z/c + \epsilon_{ii}/3)]\}^2}. \quad (14)$$

为了描述激光束散斑在靶面的横向扫动速度, 结合图 2(b) 以及 (2)、(3)、(13)、(14) 式, 激光束靶面散斑的横向扫动速度可表示为

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + 2v_1v_2\cos\theta}, \quad (15)$$

式中: θ 为内部色散区域散斑的横向扫动速度和外部色散区域散斑的横向扫动速度的夹角。

3 数值模拟与分析

数值模拟时选取的参数如下^[10,15,17]: 预放大系统中激光束的口径为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 主放大系统中的激光束口径为 $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$, 预放大系统至主放大系统的扩束比 $B=12$, 激光集束中各子束的中心波长分别为 $\lambda_1=1052.8 \text{ nm}$, $\lambda_2=1053 \text{ nm}$, $\lambda_3=1053.2 \text{ nm}$, $\lambda_4=1053.4 \text{ nm}$; 激光束空间超高斯阶数为 $N=6$; 近场的振幅调制深度为 1.2, 相位畸变峰谷(PV)值为 $2\lambda_0$ 。SSD 计算参数为: 调制频率 $\nu_m=17 \text{ GHz}$, 调制深度 $\delta=2.38$, 带宽 $\Delta\lambda=0.3 \text{ nm}$, 线性光栅色散系数 $d\theta_1/d\lambda_1=558 \mu\text{rad}/\text{nm}$, 聚焦透镜的焦距 $f=7.7 \text{ m}$ 。复合型光栅中内部色散区域面积占总色散区域面积的 40%。在对焦斑均匀性和内部热斑进行定量分析时, 针对焦斑内 86.5% 环能量比的区域进行分析。

3.1 靶面散斑的横向扫动特性

复合型光栅内部和外部色散区域的色散方式不同, 且外部色散区域的刻线密度随半径的增大而减小, 因而其靶面散斑的横向扫动速度更加复杂。为分析靶面散斑在某一方向上的合成速度, 假定复合型光栅外部色散区域的最大刻线密度等于内部色散区域的刻线密度, θ 为 45° 。图 3(a) 给出了内部和外部色散区域各自的靶面散斑横向扫动速度空间分布, 图 3(b) 给出了靶面散斑的合成速度空间分布。

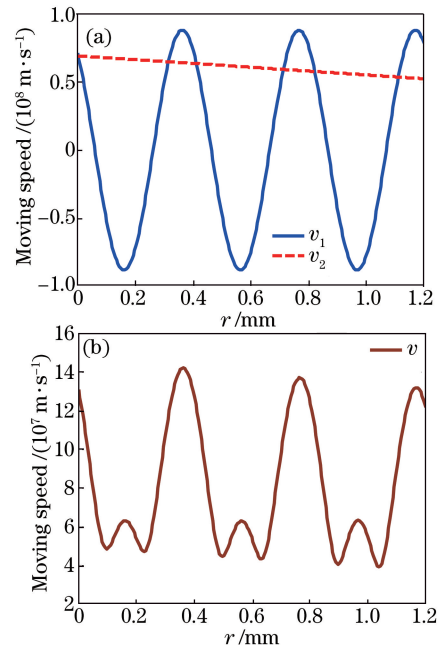


图 3 靶面散斑横向扫动速度。(a) v_1 和 v_2 ; (b) 合成速度 v
Fig. 3 Transverse moving speed of the speckles on target plane. (a) v_1 and v_2 ; (b) combined speed v

分析图 3(a)可知,在复合型光栅半径方向上,靶面散斑存在两种不同的横向扫动速度,内部色散区域的横向扫动速度为正弦变化,其扫动方向沿垂直于线性光栅刻线方向,而外部色散区域的扫动速度为线性变化,其扫动方向沿圆周方向。进一步分析图 3(a)和(b)可知,外部色散区域靶面散斑的横向扫动速度随外部色散区域半径的增大而减小,如(5)式和(14)式所示,且靶面散斑的合成扫动速度更大。与典型一维线性光栅焦斑内单一的扫动速度和扫动方向相比,复合型光栅靶面散斑的扫动速度和扫动方向更加多样化,如图 2(b)所示,可实现多维 SSD 的效果和减少焦斑内单一方向的强度调制,因而可进一步改善靶面辐照均匀性。

3.2 不同复合型光栅组合对集束匀滑效果的影响

优化集束中具有相同色散方向子束的光栅参数,使得各子束焦斑内强度分布均不相同,且各子束

焦斑内强度峰谷分布相互交错,从而可进一步改善靶面的辐照均匀性;但在优化光栅参数时,应在提升靶面辐照均匀性的条件下,同时考虑焦斑内散斑的扫动方向和扫动范围,以及焦斑尺寸的变化范围等,以选取最佳的光栅参数组合。表 1 给出了不同复合型光栅组合中子光栅单元的参数。其中,组合 a 至组合 d 均为复合型光栅,且相邻光栅的内部色散区域色散方向正交,不同组合复合型光栅参数不同;组合 e 中各子光栅均为线性光栅,其色散方向两两正交,各子光栅参数为优化后的参数,且色循环数均为 1。复合型光栅组合 a 内部色散区域色散系数选取的参数为典型线性光栅的参数,外部色散区域色散系数选取的参数为典型星光栅的参数^[16],而复合型光栅组合 b 至组合 d 参数是以组合 a 为基准进行优化选取。图 4(a)、(b)分别给出了不同复合型光栅组合的焦斑光通量对比度随积分时间的变化曲线及其 FOPAI 曲线。

表 1 不同复合型光栅组合子光栅单元参数

Table 1 Parameters of each grating in different combinations of hybrid gratings

Combination	$\frac{d\theta_1}{d\lambda_1}$	$\frac{d\theta_2}{d\lambda_2}$	$\frac{d\theta_3}{d\lambda_3}$	$\frac{d\theta_4}{d\lambda_4}$
a	558 ($M=20000$)	558 ($M=20000$)	558 ($M=20000$)	558 ($M=20000$)
b	558 ($M=20000$)	840 ($M=40000$)	558 ($M=20000$)	840 ($M=40000$)
c	840 ($M=40000$)	1120 ($M=60000$)	840 ($M=40000$)	1120 ($M=60000$)
d	1120 ($M=60000$)	1400 ($M=80000$)	1120 ($M=60000$)	1400 ($M=80000$)
e	558	558	698	698

从图 4(a)、(b)中可以看出,相较于组合 a,组合 b~d 的焦斑光通量对比度减小,FOPAI 曲线均向左移动,表明其匀滑效果更佳。这是由于组合 a 中具有相同色散方向和色散系数子束的焦斑强度分布基本相同,导致子束焦斑叠加后均匀性难以进一步改善,而组合 b~d 中,调整具有相同色散方向和色散系数子束对应的光栅参数,使得各子束焦斑内强

均匀性。此外,对于组合 d,当复合型光栅内部色散区域和外部色散区域的色散系数继续增加时,焦斑的光通量对比度略有上升且 FOPAI 曲线向右移动。这是因为当进一步增大复合型光栅的色散系数时,由于色循环效应的存在^[18],焦斑对比度不降反升。综合图 4(a)和(b),并通过线性光栅组合 e 的比较可知,经优化后线性光栅组合初始时刻的焦斑

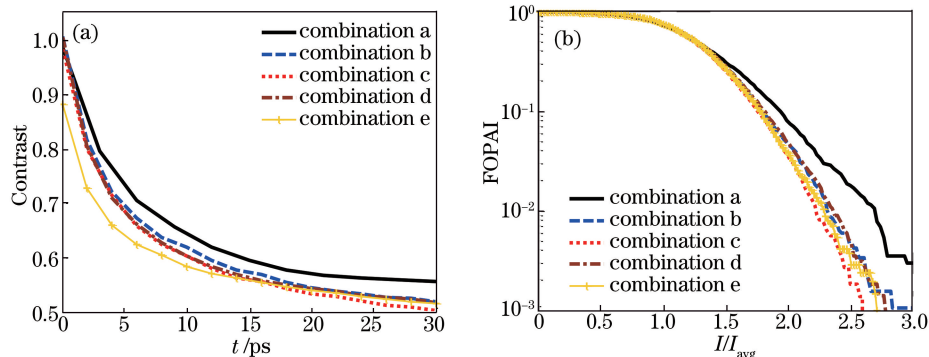


图 4 不同复合型光栅组合的匀滑特性。(a)光通量对比度随积分时间的变化;(b) FOPAI 曲线

Fig. 4 Smoothing effect of different combinations of hybrid gratings.

(a) Variation of luminous flux contrast with integration time; (b) FOPAI curves

均匀性优于复合型光栅组合的焦斑均匀性,但随着积分时间的增加(数十皮秒内),复合型光栅组合的匀滑效果逐渐优于线性光栅组合且能避免条纹状强度调制的产生。

3.3 远场焦斑匀滑特性及靶面纵向光强分布特性

为了更好地说明基于复合型光栅组合的多色集束匀滑方案的束匀滑效果,表 2 给出了三种典型阵列光栅排布方案子光栅单元参数,其中,方案 1 中各

表 2 三种典型阵列光栅排布方案子光栅单元参数

Table 2 Parameters of each grating in three typical schemes of sub grating element

Scheme	$\frac{d\theta_1}{d\lambda_1} / (\mu\text{rad} \cdot \text{nm}^{-1})$	$\frac{d\theta_2}{d\lambda_2} / (\mu\text{rad} \cdot \text{nm}^{-1})$	$\frac{d\theta_3}{d\lambda_3} / (\mu\text{rad} \cdot \text{nm}^{-1})$	$\frac{d\theta_4}{d\lambda_4} / (\mu\text{rad} \cdot \text{nm}^{-1})$	Dispersion direction
1	558	558	558	558	Same
2	558	558	698	698	Orthogonal
3	840($M=40000$)	1120($M=60000$)	840($M=40000$)	1120($M=60000$)	Orthogonal

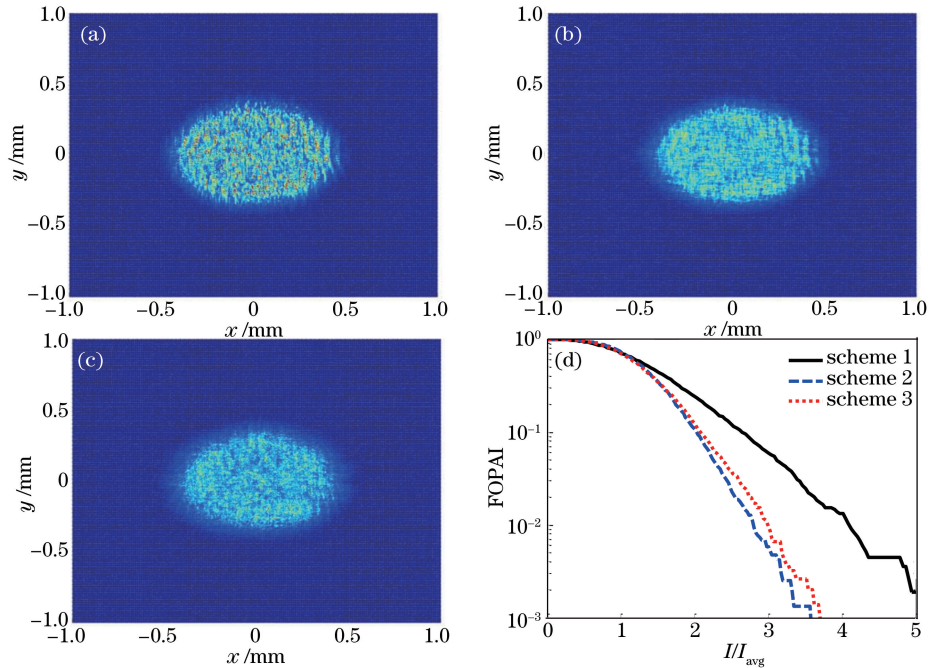


图 5 焦斑光强分布及其 FOPAI 曲线。(a)方案 1, $C=0.76$; (b)方案 2, $C=0.58$; (c)方案 3, $C=0.60$; (d) FOPAI 曲线

Fig. 5 Focused intensity distributions and related FOPAI curves. (a) Scheme 1, $C=0.76$;

(b) scheme 2, $C=0.58$; (c) scheme 3, $C=0.60$; (d) FOPAI curves

从图 5(a)~(c)中可以看出,方案 1 中存在明显的沿 y 方向的条纹状强度调制,而方案 2 和方案 3 中阵列光栅色散方向多样化,因而能避免沿单一方向的条纹状强度调制;与方案 1($C=0.76$)的光通量对比度进行比较,方案 2($C=0.58$)和方案 3($C=0.60$)的光通量对比度明显减小,这表明方案 2 和方案 3 在等离子体热匀滑时间内能够更为有效地改善焦斑均匀性。分析图 5(d)可知,与方案 1 相比,方案 2 和方案 3 的 FOPAI 曲线向左移动,表明方案 2 和方案 3 均能大幅度减小焦斑内部热斑比例。结合 3.2 节的分析可知,复合型光栅组合相比于线性光

子光栅均为线性光栅,其色散方向相同,且各子束中心波长相同,NIF 装置^[12]采用的是方案 1;方案 2 中各子光栅均为线性光栅,其色散方向两两正交,多频多色 SSD 方案^[15]采用的是方案 2;方案 3 中各子光栅均为复合型光栅,内部色散区域色散方向两两正交。考虑到等离子体热匀滑时间,假设积分时间 $\Delta t = 10$ ps,图 5(a)~(c)分别给出了三种方案匀滑的焦斑光强分布及其 FOPAI 曲线。

栅组合而言,其优势在于可从多方向抹平焦斑强度调制,但其初始匀滑效果略低于线性光栅组合,随着积分时间的增加,优化后的复合型光栅组合匀滑效果相对较好。

在实际工程应用中,集束在焦面及其附近的成丝特性会对激光与等离子体相互作用过程产生重要影响^[22],因此,有必要分析激光束在光传输方向(纵向)的分布特性。激光束内部的强度尖峰经过一段时间积累成高的通量,当高的通量超过阈值时就会在靶腔内产生明显的成丝效应,因而尖峰的强度和传输路径长度决定了其成丝增长特性。为此,可利

用 PSD^[23] 对靶面纵向光强分布进行分析,即通过分析不同传输路径长度空间频率的占比来对激光束成丝增长特性进行粗略表征。在真空腔条件下(即未

考虑腔内等离子状态),图 6(a)~(c)分别给出了方案 1~3 激光束在注入孔前后 5 mm 处传输的纵截面强度分布,图 6(d)进一步给出了其纵向 PSD 分布。

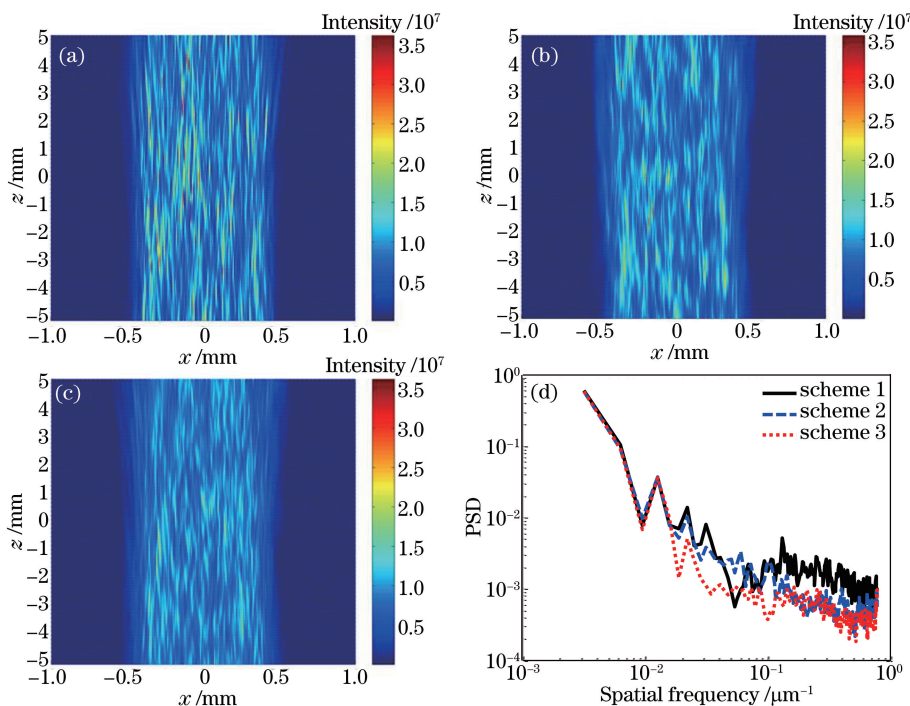


图 6 激光束传输纵截面强度分布图及其纵向 PSD。(a)方案 1; (b)方案 2; (c)方案 3; (d)纵向 PSD 曲线

Fig. 6 Intensity distributions of the propagation of longitudinal laser quad and related longitudinal PSD curves.

(a) Scheme 1; (b) scheme 2; (b) scheme 3; (d) longitudinal PSD curves

从图 6(a)~(c)中可以看出,方案 1、方案 2 和方案 3 的激光束的纵截面强度分布并不相同;与方案 1 相比,方案 2 和方案 3 中激光束在传输纵截面上峰值强度区域减少,且峰值强度明显减小。由图 6(d)可知,三种方案均能使所有的空间频率调制下降,但在 $10^{-2} \sim 10^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ 的空间频率区间,方案 3 的 PSD 曲线低于方案 1 和方案 2,在 $10^{-1} \sim 10^0 \mu\text{m}^{-1}$ 区间,方案 2 和方案 3 的 PSD 曲线均低于方案 1。进一步分析图 6 可知,方案 3 的纵向 PSD 曲线中高频段比例降低,表明经过优化的复合型光栅组合的多色集束匀滑方案可以改善激光束成丝不稳定性。

4 结 论

针对传统一维 SSD 技术中焦斑内散斑扫动方式单一的缺点,提出了基于复合型光栅组合的多色集束匀滑方案,并建立了靶面散斑的横向扫动速度物理模型。运用复合型光栅组合的多色集束匀滑方案,可同时实现光束的平移、旋转两种运动方式的组合。基于建立的靶面散斑横向扫动速度模型,推导出激光束横向扫动速度的解析表达式。与传统线性光栅单一方向的扫动方式相比,复合型光栅靶面散

斑存在两种不同的横向扫动速度,且扫动方向也不相同,从而实现多方向的色散方式,在达到较好匀滑效果的同时可抑制焦斑内单一方向的强度调制。针对复合型光栅组合的多色集束匀滑方案在集束中的运用,分析了不同复合型光栅组合对靶面辐照均匀性的影响,并对复合型光栅参数的选取进行了优化,结果表明复合型光栅参数存在优化选取问题。与优化后的线性光栅组合相比,复合型光栅组合初始时刻的焦斑均匀性略差,但随着积分时间的增加,复合型光栅组合的匀滑效果逐渐优于线性光栅组合。此外,对激光束在注入孔前后的纵向强度分布特性进行了粗略分析,结果表明经过优化的复合型光栅组合的多色集束匀滑方案能有效减少焦面附近的峰值强度区域和峰值强度。

参 考 文 献

- [1] Fan D Y, Zhang X M. Laser fusion and high power laser: history and progress[J]. Physics, 2010, 39 (9): 589-596.
范滇元, 张小民. 激光核聚变与高功率激光: 历史与进展[J]. 物理, 2010, 39(9): 589-596.
- [2] Schiavi A, Atzeni S, Marocchino A. Illumination

- stability for high-repetition-rate laser facilities in direct-drive inertial confinement fusion[J]. *Europhysics Letters*, 2011, 94(3): 35002.
- [3] Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. *Physics of Plasmas*, 1995, 2(11): 3933-4024.
- [4] Wen P, Li Z L, Zhong Z Q, *et al.* Study on propagation characteristics of laser quads in cylindrical hohlraum for indirect drive facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 36(1): 0114001.
文萍, 李泽龙, 钟哲强, 等. 间接驱动装置中柱形腔内激光束传输叠加特性研究[J]. *光学学报*, 2017, 36(1): 0114001.
- [5] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, *et al.* The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.
- [6] 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.
- [7] Dixit S N, Lawson J K, Manes K R, *et al.* Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(6): 417-419.
- [8] Néauport 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]. *Applied Optics*, 2003, 42(13): 2377-2382.
- [9] Skupsky S, Short R W, Kessler T, *et al.* Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light[J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(8): 3456-3462.
- [10] Hou P, Zhong Z Q, Zhang B. Analysis and optimization of radial smoothing based on optical Kerr effect for irradiation improvement[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 85: 48-54.
- [11] 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匀滑技术[J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1205003.
- [12] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, *et al.* National Ignition Facility laser performance status[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3276-3303.
- [13] Temporal M, Canaud B, Garbett W J, *et al.* Numerical analysis of the direct drive illumination uniformity for the Laser Mega Joule facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(1): 012710.
- [14] Zhang R, Jia H, Tian X, *et al.* Research of beam conditioning technologies using continuous phase plate, multi-FM smoothing by spectral dispersion and polarization smoothing[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2016, 85: 38-47.
- [15] Zhong Z Q, Zhang B. Beam smoothing characteristics of multi-central frequency and multi-color smoothing by spectral dispersion[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(10): 2020-2025.
- [16] Zhang R, Zhang X, Sui Z, *et al.* Research on target uniform irradiation method using linearly modulated light and special grating dispersion[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(7): 1073-1077.
- [17] Wang J, Hou P C, Zhang B. A new scheme of spectral dispersion smoothing based on hybrid grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(20): 204201.
王健, 侯鹏程, 张彬. 基于复合型光栅的光谱色散匀滑新方案[J]. *物理学报*, 2016, 65(20): 204201.
- [18] Wen P, Li Z L, Zhong Z Q, *et al.* Parameters optimization for multi-color multi-central frequency smoothing by spectral dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0614001.
文萍, 李泽龙, 钟哲强, 等. 多色、多频光谱角色散匀滑技术的参数优化[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0614001.
- [19] Rothenberg J E. Implementation of smoothing by spectral dispersion on Beamlet and NIF[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3492: 970-979.
- [20] Zhou B J, Zhong Z Q, Zhang B. Influence of beam moving characteristics on smoothing effect of focal spot[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61 (21): 214202.
周冰洁, 钟哲强, 张彬. 光束运动特性对焦斑束匀滑效果的影响[J]. *物理学报*, 2012, 61(21): 214202.
- [21] Zhong Z Q, Hou P C, Zhang B. A novel radial beam smoothing scheme based on optical Kerr effect[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(9): 094207.
钟哲强, 侯鹏程, 张彬. 基于光克尔效应的径向光束匀滑新方案[J]. *物理学报*, 2016, 65(9): 094207.
- [22] Divol L, Berger R L, Meezan N B, *et al.* Three-dimensional modeling of laser-plasma interaction: benchmarking our predictive modeling tools versus experiments[J]. *Physics of Plasmas*, 2008, 15(5): 085001.
- [23] Peng Z T, Jing F, Liu L Q, *et al.* Power spectra density estimation of quality of the laser beam passing through an self-focusing media[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 52(1): 87-90.
彭志涛, 景峰, 刘兰琴, 等. 自聚焦激光束光束质量评价的功率谱密度方法[J]. *物理学报*, 2005, 52(1): 87-90.