

多色光谱色散匀滑技术参数对集束辐照特性的影响

宋鑫, 王健, 钟哲强, 张彬

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 针对惯性约束聚变装置中多色光谱色散匀滑技术在集束中的运用, 提出了对电光调制器、色散光栅和连续相位板(CPP)等主要单元器件进行独立设计和优化的思路。基于这一思路, 分别模拟和分析了电光调制器、色散光栅和 CPP 等单元器件的参数对集束辐照特性的影响。提出了优化的多色光谱色散匀滑方案参数, 并仿真了束匀滑参数对激光束纵向成丝特性的影响。结果表明, 通过优化不同子束的电光相位调制器和色散光栅参数, 可以进一步改善靶面的辐照均匀性。当集束中各子束采用不同的 CPPs 时, 焦斑均匀性得到有效改善, 热斑比例明显降低。采用功率谱密度对激光束的光束质量进行分析, 结果表明多色光谱色散匀滑方案能有效降低峰值强度, 使光强分布更加均匀, 从而有利于抑制激光束成丝。

关键词 激光光学; 多色; 调制频率; 色散光栅; 连续相位板; 均匀性

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0105002

Effects of Parameters in Smoothing of Multi-Color Spectral Dispersion on Laser-Quad Irradiation Characteristics

Song Xin, Wang Jian, Zhong Zheqiang, Zhang Bin

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

Abstract Aimed at the application of smoothing of multi-color spectral dispersion in inertial confinement fusion facilities, an independent design and optimization method for main unit components, including electro-optic modulators, dispersion gratings and continuous phase plates (CPP) and so forth, is proposed. The effects of parameters of electro-optic phase modulators, dispersion gratings and the CPP on the laser-quad irradiation characteristics are simulated and analyzed. The parameters of optimized smoothing of multi-color spectral dispersion are proposed, and the effect of the smoothing parameters on the characteristics of longitudinal filaments of lasers is simulated. Results indicate that the irradiation uniformity on the target surface can be further improved when we optimize the parameters of electro-optical modulator and dispersion grating of different sub-beams. When different CPPs are implemented for different sub-beams in the laser-quad, the focal-spot uniformity can be improved effectively and the proportion of hot spots can be decreased significantly. Moreover, the beam quality of the laser beam is analyzed by the power spectral density. The simulation results show that the smoothing of multi-color spectral dispersion can effectively decrease the peak intensity and make the light intensity distribution more uniform, which is benefit to suppress filaments of laser beams.

Key words laser optics; multi-color; modulation frequency; dispersion grating; continuous phase plate; uniformity

OCIS codes 140.3290; 140.3295; 140.3300; 140.3518

1 引言

在激光驱动的惯性约束聚变(ICF)装置研究中,

靶面辐照均匀性是决定靶丸是否均匀压缩和点火是否成功的关键因素之一。目前, 为改善靶面辐照均匀性, 发展了多种束匀滑技术, 主要包括以随机相位

收稿日期: 2017-07-31; 收到修改稿日期: 2017-09-26

基金项目: 国家重大科技专项(JG2015034, JG2017034)、科技部创新人才推进计划重点领域创新团队资助项目(2014RA4051)

作者简介: 宋鑫(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事强激光的传输与控制方面的研究。E-mail: scusongxin@163.com

导师简介: 张彬(1969—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事强激光的传输与控制方面的研究。

E-mail: zhangbinff@sohu.com(通信联系人)

板^[1-2]和连续相位板(CPP)^[3-6]为代表的空域束匀滑技术,以光谱色散匀滑(SSD)^[7]和诱导空间非相干^[8]为代表的时域束匀滑技术,以及偏振匀滑(PS)技术^[9-10]等。在实际高功率激光驱动器中,往往联合使用多种束匀滑技术,从而更有效地改善了激光束辐照均匀性。例如,美国国家点火装置(NIF)^[11]将 SSD、CPP 和 PS 技术相结合,法国兆焦耳激光装置^[12]则采用纵向光谱色散匀滑和 CPP 技术联用的束匀滑方案。其中,SSD 主要由电光调制器和衍射光栅组成,其基本原理是利用电光调制器将单色光展宽为小宽带光,小宽带光经衍射光栅后发生色散,不同频率的光沿光栅色散方向进行扫动,再利用时间积分效果提高靶面辐照均匀性。然而,在现有的 SSD 方案中,光源带宽受限于高效三倍频而无法通过进一步增加带宽的方式来提高靶面辐照均匀性。为了在保持高效三倍频的前提下增大带宽,Pennington 等^[13]提出了四色打靶方案。在此基础上,钟哲强等^[14]进一步提出了多频、多色 SSD 方案,多频 SSD 是通过多个子光源在时域上非相干叠加的方式增大带宽,多色 SSD 使用多个在时间上同步的阵列光源,而各个子光源的中心频率不同。文萍等^[15]讨论了多频、多色 SSD 方案的主要参数(如多频波长差、多色波长差、色循环数和带宽等)对靶面辐照均匀性的影响及其规律。

值得指出的是,在之前的研究中,不同子束虽存

在波长差,但其 CPP 是相同的,导致子束的焦斑具有相似的包络和强度分布。通过对电光调制器、色散光栅和 CPP 等单元器件参数进行独立设计和优化,可以使相同光栅色散方向的子束峰谷相互错开,因而集束焦斑均匀性更佳。进一步的分析表明,如果对集束中不同子束分别进行 CPP 设计和优化,则能够进一步改善不同子束叠加后的焦斑均匀性。

本文建立了多色 SSD 方案的理论模型,针对该方案中电光调制器、色散光栅和 CPP 等单元器件对靶面辐照均匀性的影响进行讨论和分析,提出了优化的多色 SSD 方案参数,并仿真分析了束匀滑参数对激光束纵向成丝特性的影响。

2 理论模型

图 1 为多色 SSD 方案示意图。与美国 NIF 类似,激光集束为 2×2 子束,集束中每一子束分别经过独立的电光调制器、色散光栅、主放大系统、三倍频组件(KDP)、CPP 和偏振控制板(PCP),最后经楔形透镜聚焦。由于多色 SSD 方案中各子束相互独立,通过对其电光调制器、色散光栅和 CPP 等单元器件单独进行优化设计,可使各子束焦斑强度分布互相交错,从而进一步改善靶面辐照均匀性。为便于讨论而不失一般性,阵列光栅中相邻子光栅色散方向两两正交,PCP 采用正交 PCP。

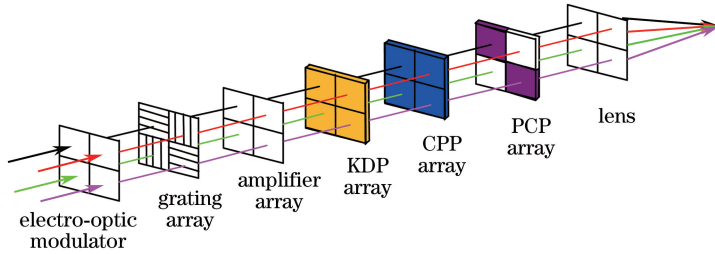


图 1 多色 SSD 方案示意图

Fig. 1 Schematic of multi-color SSD scheme

集束中每一子束的中心波长不同,其初始光场分布为具有相位畸变的超高斯光束,通过电光调制器和色散光栅(以 x 色散方向为例)后,第 m 个子束经光栅色散后的光场表达式为

$$E_m(x_m, y_m, t) = A_0 [1 + a(x_m, y_m)] \times \exp[-(x_m/\omega_x)^{2N} - (y_m/\omega_y)^{2N} + i\varphi_m(x_m, y_m)] \times \exp[i\omega_m t + i\delta_m \sin v_m(t + \varepsilon_m x_m)], \quad (1)$$

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束腰宽度; N 为空间超高斯阶数; $\varphi(x_m, y_m)$ 为初始相位畸变; ω_m 为第 m 个子光源的中心角频率, $\omega_m = 2\pi c/\lambda_m$, c 为

光速, λ_m 为第 m 个子束的中心波长; δ_m 和 v_m 分别为调制深度和调制角频率, $v_m = 2\pi\nu_m$, ν_m 为调制频率。带宽 $\Delta\lambda_m$ ^[7] 的表达式为

$$\Delta\lambda_m = 2\delta_m \nu_m \lambda_m^2 / c. \quad (2)$$

光栅角色散 ε_m ^[7] 的表达式为

$$\varepsilon_m = 2\pi \frac{d\theta_m}{d\lambda_m} \frac{\omega_m}{v_m}, \quad (3)$$

式中 $d\theta_m/d\lambda_m$ 为第 m 个子光栅的色散系数。

色循环数^[7]指的是在光束截面上频率成分分布的周期,其定义为

$$N_{cm} = \left(D \frac{d\theta_m}{d\lambda_m} \right) \frac{\lambda_m}{c} \nu_m, \quad (4)$$

式中 D 为预放光束口径。

激光束依次经过主放大系统、KDP、CPP、PCP 后,最后经楔形透镜聚焦到靶面上,由柯林斯公式可得第 m 个子束在焦面上的光场为

$$\mathbf{E}_{f_m}(x_f, y_f, t) = \mathbf{e}_{x,y} \frac{M \exp(ik'_m L)}{iF\lambda'_m} \iint E_m(x_m, y_m, t) \exp(i\phi_m) \times \exp\left[i \frac{2\pi M}{\lambda'_m F} (-x_f x_m - y_f y_m)\right] dx_m dy_m, \quad (5)$$

式中 M 为预放大系统到主放大系统的扩束比; $L = 2F$, F 为聚焦透镜焦距; $k'_m = 2\pi/\lambda'_m$ 为三倍频光波矢, λ'_m 为三倍频光波长, $\lambda'_m = \lambda_m/3$; ϕ_m 为第 m 个 CPP 的附加相位; (x_f, y_f) 为远场坐标; (x_m, y_m) 为近场坐标; t 为时间; $\mathbf{e}_{x,y}$ 为 x, y 方向的单位矢量。

靶面的总光强分布^[16]为

$$I = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \left[\left| \sum_{m=1,4} \mathbf{E}_{f_m}(x_f, y_f, t) \right|^2 + \left| \sum_{m=2,3} \mathbf{E}_{f_m}(x_f, y_f, t) \right|^2 \right] dt, \quad (6)$$

式中 Δt 为积分时间。

3 计算模拟与分析

基于所建立的多色 SSD 方案的理论模型,对该方案中的电光调制器、色散光栅和 CPP 等单元器件的参数对靶面辐照均匀性的影响进行讨论和分析。数值模拟时采用的参数如下:集束中各子束中心波长依次为 1052.9, 1053.1, 1052.7, 1053.3 nm。各子束为超高斯光束,阶数 $N = 6$ 。初始相位畸变 $\varphi(x_m, y_m)$ 的

峰值^[17]为 2λ , 随机振幅调制^[17]的调制深度为 1.2。预放大系统中激光束的口径^[17] $2\omega_x = 30$ mm; 预放大系统至主放大系统的扩束比 $M = 12$ 。楔形透镜焦距 $f = 7.7$ m。SSD 参数^[17]为:调制深度 $\delta_m = 2.38$, 调制频率 $\nu_m = 17$ GHz, 带宽 $\Delta\lambda_m = 0.3$ nm, 光栅色散系数 $d\theta/d\lambda = 558 \mu\text{rad}\cdot\text{nm}^{-1}$ 。在对焦斑均匀性和内部热斑进行分析时,选取焦斑能量占总能量的 80%。需要进一步指出的是,由于激光等离子体非线性作用(散射、偏折和成丝等)的时间尺度在 $10 \sim 20$ ps^[18] 范围内,因而选择积分时间 $\Delta t = 10$ ps。在对靶面均匀性进行评价时,采用光通量对比度 C ^[14] 来表征靶面光强的均匀性,超阈值强度概率密度(FOPAI)曲线^[19]表征不同峰值热斑占总功率的份额。

3.1 子束色散系数对集束远场均匀性的影响

由(2)、(4)式可知,在保证带宽和色循环数一定的情况下,随着光栅色散系数的改变,调制频率和调制深度也会发生变化。光栅色散系数的改变会引起焦斑扫动范围^[7]的变化,而调制频率的改变则会引起焦斑扫动速度^[20]的变化。因此,通过优化集束中具有相同色散方向子束的光栅色散系数和调制频率,可以进一步改善靶面的辐照均匀性。在各子束带宽为 0.3 nm、色循环数为 1 时,不同光栅的色散系数组合如表 1 所示,为了明确色散系数与调制频率和调制深度的关系,不同光栅色散系数组合下各子束的调制频率和调制深度如表 2 所示。不同子束光栅色散系数组合下的远场焦斑光通量对比度随积分时间的变化曲线及其对应的 FOPAI 曲线分别如图 2(a)、(b)所示。

表 1 不同光栅的色散系数组合

Table 1 Combinations of dispersion coefficients of different gratings

Dispersion coefficient combination	$d\theta_1/d\lambda_1 / (\mu\text{rad}\cdot\text{nm}^{-1})$	$d\theta_2/d\lambda_2 / (\mu\text{rad}\cdot\text{nm}^{-1})$	$d\theta_3/d\lambda_3 / (\mu\text{rad}\cdot\text{nm}^{-1})$	$d\theta_4/d\lambda_4 / (\mu\text{rad}\cdot\text{nm}^{-1})$
a	558	558	278	278
b	558	558	418	418
c	558	558	558	558
d	558	558	698	698
e	558	558	838	838

表 2 不同光栅色散系数组合下各子束的调制频率和调制深度

Table 2 Modulation frequency and modulation depth of different grating dispersion coefficient combinations

Dispersion coefficient combination	ν_m / GHz				δ_m			
	ν_1	ν_2	ν_3	ν_4	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
a	17.0	17.0	34.0	34.0	2.38	2.38	1.19	1.19
b	17.0	17.0	22.7	22.7	2.38	2.38	1.79	1.79
c	17.0	17.0	17.0	17.0	2.38	2.38	2.38	2.38
d	17.0	17.0	13.6	13.6	2.38	2.38	2.98	2.98
e	17.0	17.0	11.3	11.3	2.38	2.38	3.59	3.59

在表 1 所示的各子束的色散系数组合中,通过使相同色散方向两子束的光栅色散系数不同,实现对集束的优化。与典型组合 c 相比,组合 a、b 减小了子束 3 和子束 4 的光栅色散系数,而组合 d、e 增大了子束 3 和子束 4 的光栅色散系数。

由图 2(a)可见,对于集束而言,在子束光栅色散系数为组合 a~e 的情况下,其光通量对比度均随积分时间先减小,而后逐渐趋于稳定。在初始时刻,组合 a、b 和组合 d、e 的光通量对比度明显小于组合 c,这是因为相同色散方向子束的色散系数不同引起集

束中各子束焦斑内斑纹分布不同,因而各子束焦斑叠加后的强度分布更加均匀。分析图 2(a)可知,随着不同子束之间光栅色散系数差的增加,焦斑光通量对比度先减小后增大。由图 2(b)可知,随着不同子束之间光栅色散系数差的增加,焦斑中热斑比例先减小后增大,说明光栅色散系数存在最佳值。这是由于相同色散方向子束的光栅色散系数不同时,两子束焦斑强度调制的峰谷错开,则靶面的辐照均匀性得到改善。然而,随着子束之间光栅色散系数的进一步增大,两子束焦斑强度调制偏离增大,最终导致均匀性变差。

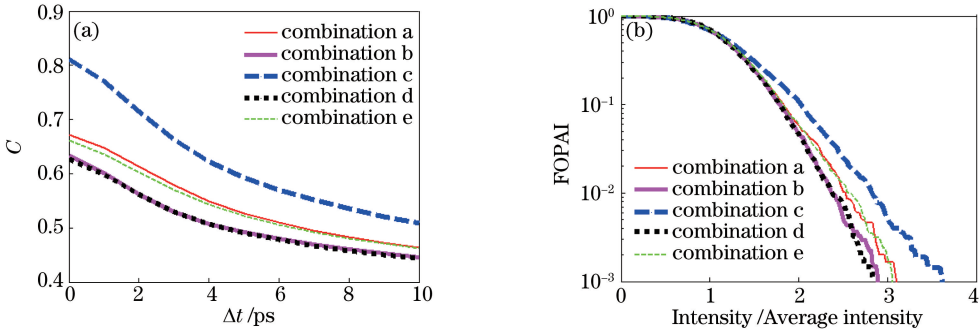


图 2 不同子束光栅色散系数组合下的(a)焦斑光通量对比度随积分时间变化曲线及(b) FOPAI 曲线

Fig. 2 (a) Variation in contrast of focal-spot luminous flux with integral time and (b) FOPAI curves under different dispersion coefficient combinations of sub-beams gratings

3.2 子束 CPP 对集束远场均匀性的影响

CPP 作为相位调制元器件,主要用来控制激光束的远场焦斑轮廓,而其焦斑局部强度分布并不相同^[4]。因此,可以通过对集束中各子束采用不同的 CPP,以进一步改善远场辐照均匀性。采用改进的盖斯贝格-撒克斯通算法^[21],在其他边界条件相同的情况下,针对不同的中心波长设计了不同的 CPP,各子束通过不同 CPP 后虽具有相似的包络和均匀性,但是其强度分布各不相同。CPP 对焦斑的影响如图 3 所示。图 3(a)为色散方向相同的两子束(子束 2 和子束 3)使用不同 CPP 时的焦斑强度分布。图 3(b)为集束中各子束分别采用相同 CPP 和不同 CPP 时的集束焦斑光强分布,与之对应的 FOPAI 曲线和 C 如图 3(c)所示。

由图 3(a)可见,不同子束经不同的 CPP 整形后,焦斑包络基本相同,但其局部强度分布不同且峰

谷值相互错开;使用相同 CPP 时,不同子束的焦斑强度分布基本相同。由图 3(b)可以看出,集束中子束采用不同 CPP 时的焦斑峰值强度明显下降,且焦斑强度分布更为均匀。由图 3(c)可进一步得知,集束中子束采用不同 CPP 时焦斑的 FOPAI 曲线向左移动,表明其热斑所占比例明显减小。

在实际工程应用中,为使集束的靶面辐照均匀性更佳,可对各子束中的电光调制器、色散光栅和 CPP 等主要单元器件进行独立设计和优化。例如,各子束采用不同的调制频率和 CPP,可使焦斑包络相似而局部强度分布不同。表 3 为多色 SSD 方案的关键单元参数,各子束带宽为 0.3 nm,色循环数为 1。图 4 为不同组合方案的集束焦斑光强分布以及相应的 FOPAI 曲线。由图 4 可以看出,当对集束中各子束进行独立设计和优化时,其均匀性远优于各子束采用相同参数的情况。

表 3 多色 SSD 方案的关键单元参数

Table 3 Key unit parameters of multi-color SSD scheme

Dispersion coefficient combination	$d\theta_1/d\lambda_1 / (\mu\text{rad}\cdot\text{nm}^{-1})$	$d\theta_2/d\lambda_2 / (\mu\text{rad}\cdot\text{nm}^{-1})$	$d\theta_3/d\lambda_3 / (\mu\text{rad}\cdot\text{nm}^{-1})$	$d\theta_4/d\lambda_4 / (\mu\text{rad}\cdot\text{nm}^{-1})$	Type of CPP
α	558	558	558	558	same CPPs
β	558	558	418	418	same CPPs
γ	558	558	418	418	different CPPs

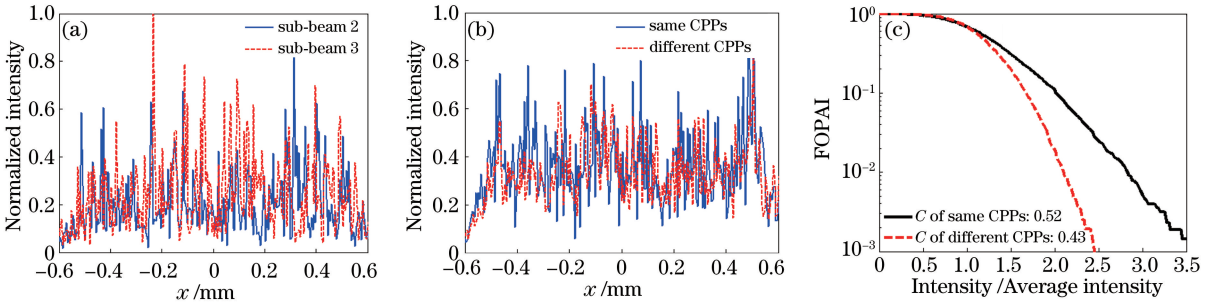


图 3 CPP 对焦斑的影响。(a)色散方向相同的两子束使用不同 CPP 时焦斑的一维分布;(b)集束中各子束分别采用相同 CPP 和不同 CPP 时的焦斑光强分布;(c)不同 C 下的 FOPAI 曲线

Fig. 3 Effect of CPP on focal spot. (a) One-dimensional distribution of focal spots of two sub-beams with same dispersion direction using different CPPs; (b) intensity distribution of focal spots of laser-quad when sub-beams use same CPPs and different CPPs; (c) FOPAI curves under different C

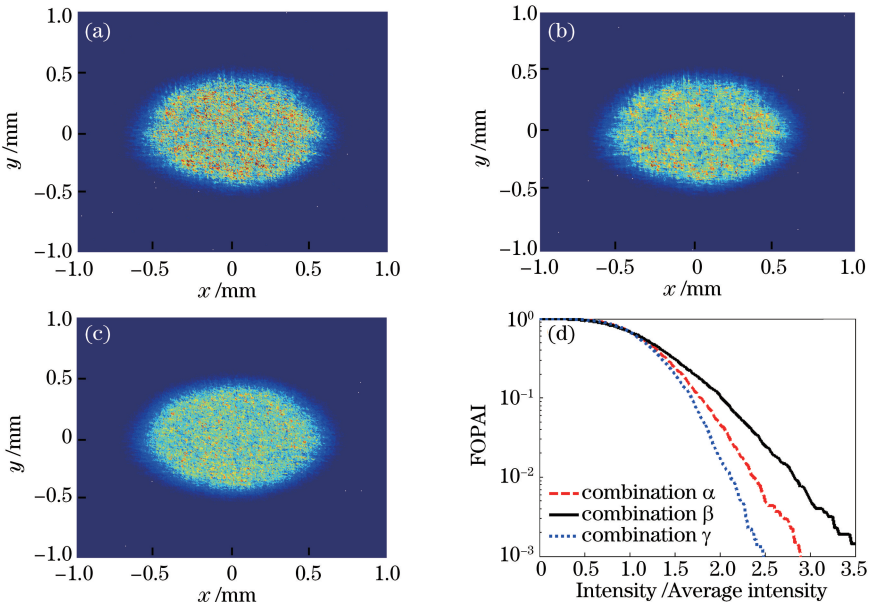


图 4 不同组合方案的集束焦斑光强分布以及相应的 FOPAI 曲线。

(a)组合 α , $C=0.52$; (b)组合 β , $C=0.45$; (c)组合 γ , $C=0.43$; (d) FOPAI 曲线

Fig. 4 Intensity distributions of focal spot of laser-quad for different combinations and corresponding FOPAI curves.

(a) Combination α , $C=0.52$; (b) combination β , $C=0.45$; (c) combination γ , $C=0.43$; (d) FOPAI curves

值得指出的是,集束在焦面及其附近的成丝特性对于激光-等离子体相互作用过程极其重要^[22]。因此,在对集束中各子束进行独立设计和优化的基础上,进一步对靶面光强在光传输方向(纵向)上的分布特性进行数值模拟,并采用其功率谱密度(PSD)粗略表征激光束成丝增长的情况。激光束内部的强度尖峰经过一段时间后积累成高的通量,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 对靶面纵向光强分布进行分析,即利用傅里叶变换定量给出光强的空间频谱分布,并确定不同传输路径长度的占

比^[23],从而通过分析不同传输路径长度的占比对激光束成丝增长特性进行粗略的表征。图 5 为不同组合的激光束纵向传输截面图及相应的纵向 PSD 曲线。图 5(a)~(c)分别给出了表 3 所列 3 种方案中激光束在真空腔中注入孔前后 5 mm 传输的纵向截面图,图 5(d)进一步给出了其纵向 PSD 分布。

从图 5(a)~(c)中可以看出,与组合 α 相比,当采用组合 β 、 γ 时,集束在焦面附近的峰值强度区域明显减少,峰值强度明显减小。进一步对图 5(d)中不同组合下的纵向 PSD 曲线进行分析可知:在空间频率小于 $10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ 时,3 种组合方式的 PSD 曲线一致;在空间频率范围为 $10^{-3} \sim$

$10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ 时,组合 γ 的 PSD 曲线低于组合 α 和组合 β ;在空间频率范围为 $10^{-2} \sim 10^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ 时,组合 β 和组合 γ 两者的 PSD 曲线相近但低于组合 α 。总之,组合 β 、 γ 两者的纵向 PSD 曲线的中高频段

比例减小,光束能量分布更均匀,且峰值光强明显减小,说明优化后的方案有利于降低激光成丝不稳定性。由此可见,对集束中各子束进行单独优化和设计的方式是有效的。

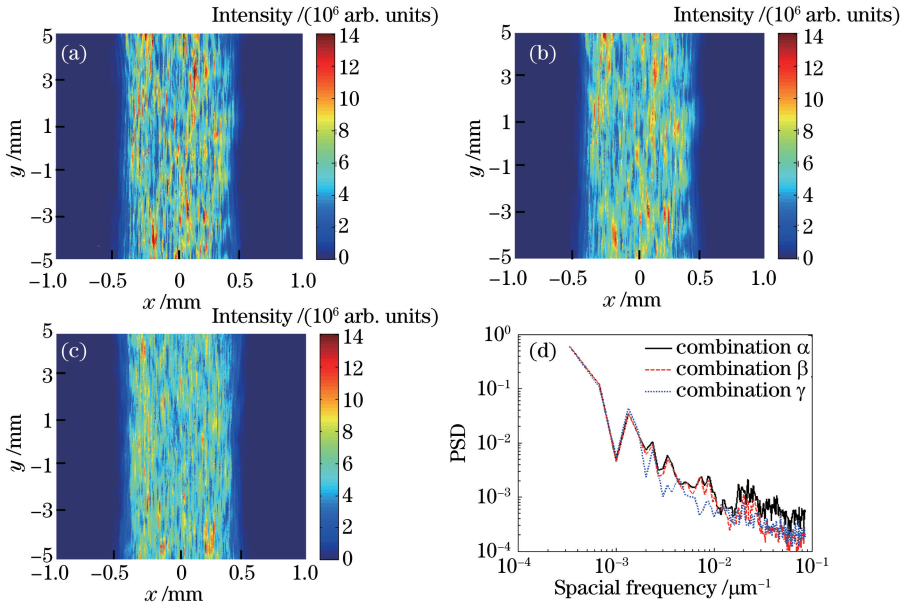


图 5 不同组合的激光束纵向传输截面图及相应的纵向 PSD 曲线。(a)组合 α ;
(b)组合 β ;(c)组合 γ ;(d)不同组合的纵向 PSD 曲线

Fig. 5 Longitudinal transmission cross-sections of laser beams for different combinations and corresponding longitudinal PSD curves. (a) Combination α ; (b) combination β ; (c) combination γ ; (d) longitudinal PSD curves of different combinations

4 结 论

针对 ICF 装置 2×2 集束中多色 SSD 技术的应用,数值模拟和分析了电光调制器、色散光栅和 CPP 等单元器件参数对集束靶面辐照特性的影响。结果表明,对电光调制器和色散光栅参数进行优化后,集束焦斑光通量对比度随子束间调制频率和色散系数差的增大先减小后增大,这使各子束焦斑在靶面交错叠加,从而使焦斑均匀性得到改善。然而,随着调制频率和色散系数差的进一步增大,远场焦斑逐渐偏离理想包络。当集束中各子束采用不同的 CPP 时,各子束叠加后的焦斑强度分布更加均匀,远场光场均匀性得到进一步改善。在此基础上,采用 PSD 对光束纵向光强分布进行了分析,优化设计后的方案能够使光强分布更均匀,从而有利于抑制激光束成丝。所提对单元器件参数进行优化设计的思路可以为 ICF 装置中 3×3 集束、 4×4 集束等更多集束聚焦打靶方案的优化设计提供一定的参考。

参 考 文 献

[1] Li P, Ma C, Su J Q, *et al.* Analysis of laser

optimized spectrum for smoothing the focused spot by temporal and special method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(4): 534-538.

李平, 马驰, 粟敬钦, 等. 时域与空域结合实现光束匀滑的光谱优化分析[J]. 中国激光, 2008, 35(4): 534-538.

[2] Dixit S N, Thomas I M, Woods B W, *et al.* Random phase plates for beam smoothing on the Nova laser[J]. Applied Optics, 1993, 32(14): 2543-2554.

[3] Yang C L, Yan H, Wang J, *et al.* A novel design method for continuous-phase plate[J]. Optics Express, 2013, 21(9): 11171-11180.

[4] Xiao Q Y, Lü C, Zhang R Z. Influence of surface characteristics of continuous phase plate on far field distribution[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(10): 102003.

肖谦裔, 吕晨, 张蓉竹. 连续相位板面形特性对远场分布的影响[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(10): 102003.

[5] Wen S G, 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.
- [6] Feng Y J, Wang Z. Influence of different distorted wavefronts on continuous phase plate smoothing focal spot[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 072204.
冯友君, 王忠. 不同波前畸变对连续相位板焦斑的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 072204.
- [7] Zhang R. Research on precise control technologies of intensity distribution on target of high power laser facilities[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
张锐. 高功率激光装置靶面光强分布精密控制技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [8] Lehmberg R H, Schmitt A J, Bodner S E. Theory of induced spatial incoherence[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(7): 2680-2701.
- [9] Regan S P, Marozas J A, Craxton R S, *et al.* Performance of 1-THz-bandwidth, two-dimensional smoothing by spectral dispersion and polarization smoothing of high-power, solid-state laser beams[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, 22(5): 998-1002.
- [10] 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匀滑特性[J]. *中国激光*, 2000, 27(7): 627-632.
- [11] 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.
- [12] Fleurot N, Cavailler C, Bourgade J L. The Laser Mégajoule (LMJ) Project dedicated to inertial confinement fusion: Development and construction status[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2005, 74(1/2/3/4): 147-154.
- [13] Pennington D M, Hennesian M A, Wilcox R B, *et al.* Four-color beam smoothing irradiation system for laser-plasma interaction experiments at LLNL [C]. SPIE, 1995, 2633: 228256.
- [14] Zhong Z Q, Zhou B J, Ye R, *et al.* A novel scheme of beam smoothing using multi-central frequency and multi-color smoothing by spectral dispersion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(3): 035201.
钟哲强, 周冰洁, 叶荣, 等. 多频多色光谱角色散束匀滑新方案[J]. *物理学报*, 2014, 63(3): 035201.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [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): 0204201.
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): 0204201.
- [18] 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.
- [19] Williams E A. New findings on the control of filamentation of intense laser beams propagating in underdense plasma[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13(5): 056310.
- [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] 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.
- [22] Key M H, Campbell E M, Cowan T E, *et al.* The potential of fast ignition and related experiments with a petawatt laser facility[J]. *Journal of Fusion Energy*, 1998, 17(3): 231-236.
- [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*, 2003, 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*, 2003, 52(1): 87-90.