

多色、多频光谱角色散匀滑技术的参数优化

文 萍 李泽龙 钟哲强 张 彬

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 针对多色、多频光谱角色散束匀滑方案,数值模拟和分析了多色波长差、多频波长差、带宽和色循环数等主要参数对远场光场均匀性的影响,进而对相关参数进行了优化。结果表明,随着多色波长差的增加,远场焦斑均匀性呈先变好后降低的趋势,即存在最佳波长差;当多频波长差和带宽增加时,远场光场均匀性均得到改善,但考虑高效三倍频的影响,多频波长差和带宽均不宜取太大。当光栅色散系数不变时,远场光强对比度随色循环数的增大呈先减小后增大的趋势,即存在最佳色循环数的选择问题,但最佳色循环数并不为1,而是随着光源参数和光栅参数的变化而有所变化。

关键词 激光光学; 惯性约束聚变; 多色、多频光谱角色散; 色循环数; 均匀性

中图分类号 TN241 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0614001

Parameters Optimization for Multi-color Multi-central Frequency Smoothing by Spectral Dispersion

Wen Ping Li Zelong Zhong Zheqiang Zhang Bin

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

Abstract Focused on the scheme of the multi-color and multi-central frequency smoothing by spectral dispersion, the effects of the main parameters on the target uniformity are numerically simulated and analyzed, including the multi-color wavelength difference, the multi-central frequency wavelength difference, the bandwidth and the number of color cycle. And then, the parameters are further optimized. The results show that the target uniformity is first improved and then degraded with the increase of the multi-color wavelength difference, which means that there is an optimized multi-color wavelength difference. When the multi-central frequency wavelength difference and the bandwidth increase, the target uniformity is improved. However, neither of these two parameters could be too large since they are limited by the high efficiency of the third harmonic generation. For the given grating dispersion, the contrast of far field first decreases and then increases with the increase of the color cycle number. Therefore, the optimization is required under further analysis. The preliminary analysis indicates that the best color cycle number is not just to be one any more and changes with the parameters of the laser source and the grating.

Key words laser optics; inertial confinement fusion; multi-color and multi-central frequency smoothing by spectral dispersion; the number of color cycle; uniformity

OCIS codes 140.3295; 140.3290; 140.3518

1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)高功率激光驱动器中,为了实现靶丸的有效压缩,不仅对靶丸自身对称性有苛刻要求,而且对于靶面辐照的均匀性也有很高的要求。为了满足靶面辐照的均匀性要求,国内外提出了多种束匀

收稿日期: 2014-10-23; 收到修改稿日期: 2015-01-25

基金项目: 国家重大专项应用基础项目(JG2013102)

作者简介: 文 萍(1990—),女,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: 627499435@qq.com

导师简介: 张 彬(1969—),女,博士,教授,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)

滑技术,大体上可以归结为时间和空间匀滑技术两大类^[1-4]。空间匀滑技术主要包括:连续相位板(CPP)^[5-6]、随机相位板(RPP)^[7-8]、列阵透镜(LA)^[9-10]、偏振光控制板(PCP)^[11]等;时间匀滑技术主要包括:部分相干光(PCL)^[12]、光谱角色散匀滑(SSD)^[10,13]等。其中,Skupsky等^[14]提出的(SSD)技术应用于ICF驱动器的前端,主要包括宽频带光源和色散元件。宽频带光源是利用电光相位调制器将窄带激光脉冲展宽成小宽带脉冲;色散元件为衍射光栅。不同频率的激光经过衍射光栅后在空间上展开,由于其衍射角不同,致使不同波长的激光对应的焦斑产生快速扫动变化,从而达到匀滑靶面光场的效果^[13]。然而,SSD技术受限于高效三倍频,难以通过增大带宽来进一步提高靶面辐照均匀性。为了既能有效增大带宽又能保持三倍频的高效率,Pennington等^[15]在1995年提出了四色打靶方案,即采用4个在时间上同步,中心频率存在一定偏差的子脉冲作为光源,通过增加频谱成分,进一步提高靶面辐照的均匀性。2012年,Neauport等^[16]针对现有的美国国家点火装置(NIF)结构,提出多级相位调制技术,即利用多级频率调制器分别对激光脉冲进行调制,使光束截面内的频谱成分增加,达到平滑频谱包络的效果。2013年,钟哲强等^[17]在此基础上提出多色、多频SSD方案。其中,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,并使光束的自聚焦点在垂直于光束传输方向的横截面上相互错开,以降低局部尖峰通量,从而抑制小尺度自聚焦的增长,提高系统负载能力;而多色SSD是采用多个在时间上同步的阵列光源,通过在空域上谋求增大带宽的方式,以更好地改善远场辐照均匀性。该方案中SSD的参数对束匀滑效果的影响很重要,因而研究其主要参数对靶面辐照均匀性的影响,对于该方案在未来工程中的实施具有重要意义,但目前尚缺乏对多色、多频SSD技术方案相关参数优化问题的讨论。

为了进一步深化多色、多频SSD技术的研究,本文针对多色、多频“SSD+CPP+PCP”束匀滑方案,对多色、多频光谱角色散的主要参数,包括多色波长差、多频波长差、带宽和色循环数等对靶面辐照均匀性的影响进行数值模拟和分析,并对其进行优化,为该技术方案在ICF研究中的应用提供参考。

2 理论模型

2.1 多色、多频“SSD+CPP+PCP”物理模型

多色、多频“SSD+CPP+PCP”束匀滑方案如图1所示(以四色、三频为例)。考虑到实际工程应用中,需要尽可能降低系统成本,提高系统工程可实现性,因而不同波长差的多色子脉冲在空间上采用2×2的排列方式较佳。图1中的2×2阵列光源由4个在时间上同步、中心波长存在一定偏差的子脉冲组成,这4个子脉冲在空间上按阵列形式排布,且分别对其进行独立的时间位相调制、光谱角色散、频率转换等,这种技术即为多色SSD^[17]。图1中每一个阵列子单元由3个在时间上同步、中心频率不同的激光脉冲组成,此即为多频SSD技术。

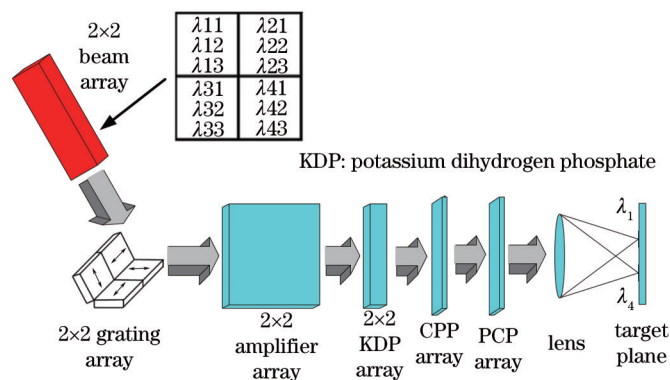


图1 多色、多频“SSD+CPP+PCP”束匀滑方案示意图

Fig.1 Schematic illustration of multi-color, multi-central frequency smoothing by "SSD + CPP + PCP"

假设入射激光束为超高斯平顶光束,其中子光束光场复振幅分布可表示为

$$A(x_m, y_m, t) = \exp[-(x_m/W)^{2N} - (y_m/W)^{2N}] \exp[-(t/\tau)^{2N}], \quad (1)$$

式中 W 为束腰半径; τ 为激光脉宽; N 为超高斯的阶数。

图1中,2×2阵列光源的各子光束的中心频率有所不同,而每一子束又是多频SSD光束。第 mn 个子光源的光场表达式为^[17]

$$E_{mn}(x_m, y_m, t) = A(x_m, y_m, t) \exp[i\Phi(x_m, y_m)] \exp[i(\omega_{0mn}t + \delta_{mn} \sin \omega_{mn}t + \varphi_{mn})], \quad (2)$$

式中 m, n 表示阵列光源中第 m 行第 n 列处的子光源; ω_{0mn} 为第 mn 个子光源的中心角频率; δ_{mn} 为电光调制的调制深度; $\Phi(x_m, y_m)$ 为激光初始波前分布; ω_{mn} 为调制角频率; $\omega_{mn} = 2\pi\nu_{mn}$, ν_{mn} 为调制频率; φ_{mn} 为附加初始相位; λ_{0mn} 为子光源的中心波长; 光谱带宽近似为 $\Delta\nu_{mn} = 2\delta_{mn}\nu_{mn}^2/c$, 即子光源带宽由 δ_{mn} 、 ν_{mn} 、 λ_{0mn} 决定^[18]。

图 1 中的阵列光栅由相互独立的子光栅组成, 子光栅的摆放不同, 色散方向也不同, 因而色散存在多种情况。本文以色散两两正交的情况为例进行讨论, 沿 x, y 方向色散的子光源光场分布可分别表示为

$$E'_{mn}(x_m, y_m, t) = \begin{cases} A(x_m, y_m, t) \exp[i\Phi(x_m, y_m)] \exp[i(\omega_{0mn}t + \delta_{mn} \sin \omega_{mn}(t + \xi_m x_m) + \varphi_{mn})] \\ A(x_m, y_m, t) \exp[i\Phi(x_m, y_m)] \exp[i(\omega_{0mn}t + \delta_{mn} \sin \omega_{mn}(t + \xi_n y_m) + \varphi_{mn})] \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $\xi_m = d\theta/d\lambda \cdot \lambda_{0mn}/c$, $d\theta/d\lambda$ 为对应子光栅的色散系数; $E'_{mn}(x_m, y_m, t)$ 为经过 SSD 后的光场, SSD 在两个正交方向均引入了光谱角色散。

图 1 中, CPP 为纯相位组件, 通过改变光场的位相, 达到对焦面光场分布进行控制的目的。经过 CPP 后的光场分布为

$$E''_{mn}(x_m, y_m, t) = E'_{mn} \exp(i\phi_{\text{cpp}}), \quad (4)$$

式中 ϕ_{cpp} 为 CPP 对光场的附加相位。

图 1 中, 采用 PCP 代替双折射楔 (PS) 是由于 PS 在全口径下会产生横向受激拉曼散射 (TSRS) 效应, 进而造成能量损失问题^[19]。PCP 采用互补型正交偏振控制板^[20], 当激光束通过互补型正交偏振控制板后, 产生偏振方向互相正交的子光束, 两者在焦面上非相干叠加, 则经过 PCP 后 x, y 方向的偏振光分别为

$$\begin{bmatrix} E'_x(x, y, t) \\ E'_y(x, y, t) \end{bmatrix} = \sum_{p=1}^k \sum_{q=1}^l E''_{mn}(x_m, y_m, t) \text{rect}\left(\frac{x - pD/k}{D/k}\right) \text{rect}\left(\frac{y - qD/l}{D/l}\right) \begin{bmatrix} T_{pqx} \exp(i\varphi_{pqx}) e_x \\ T_{pqy} \exp(i\varphi_{pqy}) e_y \end{bmatrix}. \quad (5)$$

以 $E'_x(x, y, t)$ 为例, 其在后焦面的光场分布可由 Collins 公式计算得到, 即

$$E'_x(x, y) = \frac{\exp(ikL)}{i\lambda f} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_x \times \exp\left\{\frac{ik}{2f}[-2(xx_0 + yy_0)]\right\} dx_0 dy_0, \quad (6)$$

式中 $L=2f$, f 为聚焦透镜的焦距; $k=2\pi/\lambda$, λ 为光波长; (x, y) 和 (x_0, y_0) 分别为透镜后焦面和前焦面的坐标。同理可得 $E'_y(x, y, t)$ 。

于是, 焦面处的总光强为

$$I = |E'_x|^2 + |E'_y|^2. \quad (7)$$

2.2 远场匀滑特性的评价参数

焦斑均匀性的评价参数——光通量对比度 C 定义为^[21]

$$C = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j [I_{ij}(x, y) - \bar{I}(x, y)]^2}{N_x N_y}} / \bar{I}(x, y), \quad (8)$$

式中 $I_{ij}(x, y)$ 和 $\bar{I}(x, y)$ 分别为焦斑各点的光强及其平均值; N_x, N_y 为取样点数。(8)式表明, 光通量对比度 C 越小, 则远场焦斑包络上各点的光强值和光强的平均值相差越小, 焦斑光强分布越均匀。

焦斑均匀性的评价参数——超过光强的统计曲线 (FOPAI) 的定义为^[18]

$$V_{\text{FOPAI}} = \frac{\int_S I(x, y) dx dy}{\int_S I(x, y) dx dy}, \quad (9)$$

式中 I_{avg} 为焦斑的平均强度。

值得指出的是, 光通量对比度 C 用来表征靶面光强的均匀性, 而 FOPAI 则表征的是不同峰值热斑占总功率的份额。

3 数值模拟和分析

为了讨论方便而又不失一般性, 以四色、三频“SSD+CPP+PCP”方案为例, 利用(1)~(9)式对 2×2 集束通过

多色、多频“SSD+CPP+PCP”束匀滑系统后在远场焦面处的光场特性进行数值模拟和分析。为了便于讨论,PCP阵列中每一个偏振控制板设定为 8×8 单元互补的正交偏振控制板,即多色中每一色PCP单元数为4,取单频调制带宽 $\Delta\nu_{mn}=0.3$ nm,调制频率 $\nu_{mn}=18$ GHz,色散系数 $d\theta/d\lambda=8.779\times 10^4$ $\mu\text{rad}/\text{nm}$,每一色子束的光束直径 $D=2W=180$ mm,超高斯阶数 $N=6$,聚焦透镜焦距 $f=4$ m。

3.1 多色波长差对远场光场的均匀性的影响

图2给出了相同参数下的常规SSD(单色、单频SSD)^[22]及多色多频SSD的远场焦斑分布,进一步对图2(a)~(d)中的焦斑分布求FOPAI曲线,其结果如图3所示。

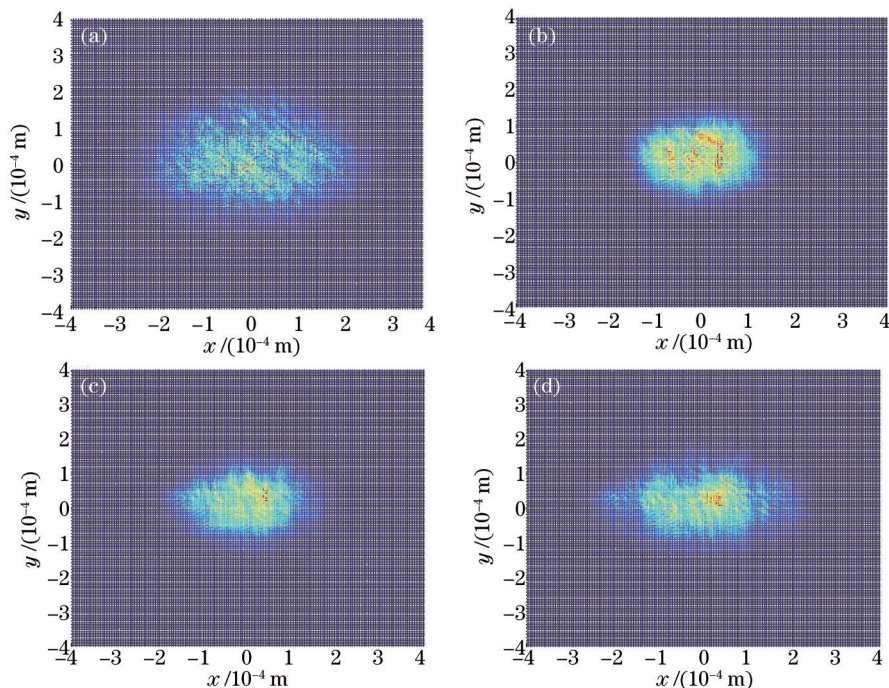


图2 多色波长差对远场光斑的影响。(a) 常规SSD, $C=1.09$; (b)多色 $\delta\lambda=0$,多频 $\Delta\lambda=0$, $C=0.84$;
(c) 多色 $\delta\lambda=0.1$ nm,多频 $\Delta\lambda=0$, $C=0.76$; (d) 多色 $\delta\lambda=0.2$ nm,多频 $\Delta\lambda=0$, $C=0.81$

Fig.2 Influence of multi-color wavelength difference on focal spot distribution. (a) Conventional SSD, $C=1.09$;
(b) multi-color $\delta\lambda=0$, multi-central frequency $\Delta\lambda=0$, $C=0.84$; (c) multi-color $\delta\lambda=0.1$ nm, multi-central frequency $\Delta\lambda=0$, $C=0.76$;
(d) multi-color $\delta\lambda=0.2$ nm, multi-central frequency $\Delta\lambda=0$, $C=0.81$

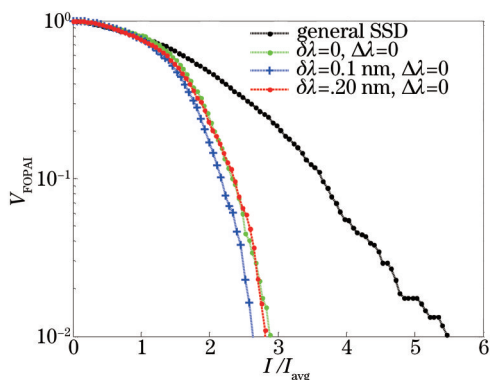


图3 多色波长差对FOPAI的影响

Fig.3 Influences of multi-color wavelength difference on FOPAI

从图2可以看出,加入多色技术以后,远场焦斑的光通量对比度明显减小,焦斑均匀性明显改善,焦斑能量更为集中。这是由于多色技术对每一色激光分别进行调制,通过改变各色中心波长,增加了远场的频率成分,使远场光场叠加更为杂乱,远场分布更加匀滑。此外,由于各色波长不同,因而其通过光栅时色散角不同,致使各色光场分布在焦面存在一定偏移,使得远场均匀性得到进一步改善。然而,进一步分析图2可

知,随着多色波长差的增大,远场光通量对比度呈现先减小而后增大的趋势,表明焦斑均匀性先变好而后又有所降低。从图3可以看出,随着多色波长差的增大,远场光场的FOPAI曲线先左移后右移,表明远场焦斑中热斑所占的比例先降低后增加。这是因为多色波长差不同时,远场焦斑为各色焦斑的叠加,因而焦斑均匀性得到改善。然而,当多色波长差过大时,远场焦斑偏移增大,进而致使叠加后的焦斑偏移理想包络,其远场均匀性又逐渐变差。由此可见,在实际应用中,存在多色波长差的优化选择问题。在本方案中,多色波长差取 $\delta\lambda=0.1\text{ nm}$ 为宜。

3.2 多频波长差对远场光场均匀性的影响

取多色波长差 $\delta\lambda=0.1\text{ nm}$,进一步对多频波长差的影响进行分析,计算结果如图4所示。

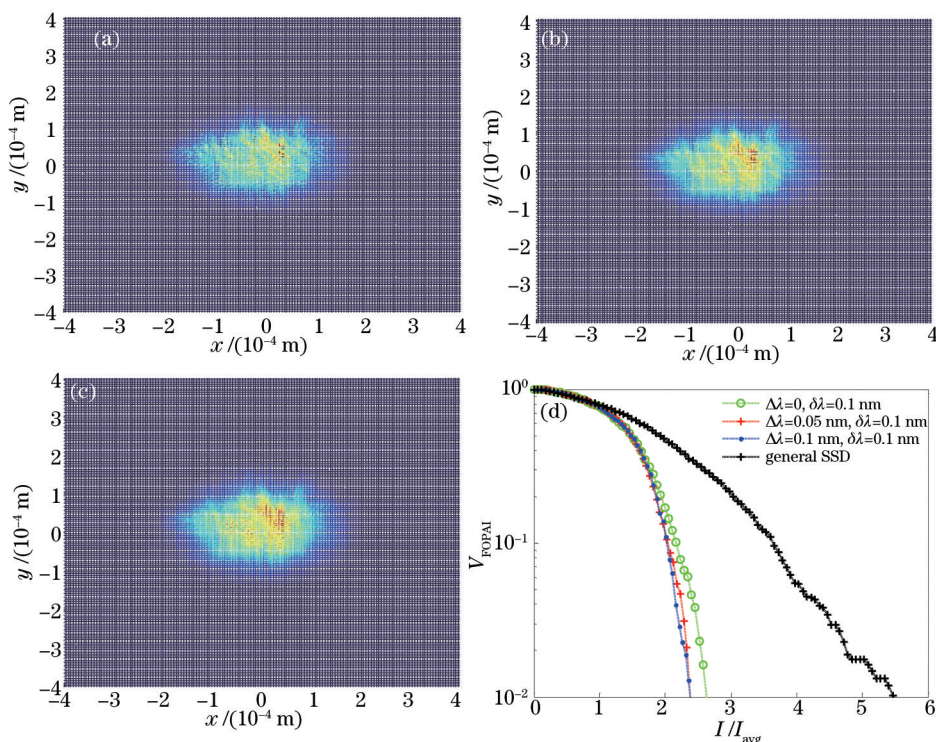


图4 多频波长差对远场均匀性的影响。(a) 多频 $\Delta\lambda=0, C=0.76$; (b) 多频 $\Delta\lambda=0.05\text{ nm}, C=0.74$;
(c) 多频 $\Delta\lambda=0.1\text{ nm}, C=0.73$; (d) 多频间波长差对光场FOPAI影响

Fig.4 Influence of multi-central frequency wavelength difference on the far field uniformity. (a) Multi-central frequency $\Delta\lambda=0, C=0.76$;
(b) multi-central frequency $\Delta\lambda=0.05\text{ nm}, C=0.74$; (c) multi-central frequency $\Delta\lambda=0.1\text{ nm}, C=0.73$;
(d) influence of multi-central frequency wavelength difference on FOPAI

图4(a)~(c)表示不同多频波长差时的远场焦斑分布,(d)为不同多频波长差时焦面光场的FOPAI曲线。从图4(a)~(c)可以看出,增加多频波长差时,远场光通量对比度略有减小,说明远场焦斑均匀性有所改善。分析图4(d)可知,随着多频波长差的增加,远场光场的FOPAI曲线左移,说明光斑上某点的光强值与光强的平均值之比逐渐减小,且越来越接近1,即光强值与光强平均值接近的点逐渐增加,表明焦面光场中热斑的比例降低,均匀性得到改善。这是由于各子脉冲中心频率不同,且经位相调制后的频谱彼此错开,因而在非相干叠加时,分立的频谱可以相互填充。并且,在相同的光束截面内频谱成分增加且相对强度降低,使得频谱包络变得更加平滑,从而达到匀滑焦斑的目的。

由此可见,仅从束匀滑的角度考虑,多频波长差越大越好。然而,考虑到三倍频晶体的转换效率要受到带宽的限制,因而多频波长差不宜过大。在本方案中,多频波长差取 $\Delta\lambda=0.05\text{ nm}$ 为宜。

进一步比较图2和图4可知,多频SSD技术对靶面辐照均匀性的改善作用要明显比多色SSD技术小。然而,多频的引入会使激光束在近场的能量分布更为均匀,对小尺度自聚焦的抑制作用更为有效^[21]。当多频之间的波长差 $\Delta\lambda=0.1\text{ nm}$,激光束经衍射光栅色散,经前端扩束20倍后传输100 m时,在本文所给参数条件下,

由光栅色散及光传输公式可估算得到两子束的自聚焦焦点横向相互错开约 $90\ \mu\text{m}$ 。

3.3 带宽对远场均匀性的影响

当多色波长差、多频波长差、色循环数一定时,随着带宽的变化远场均匀性也会发生变化。取多色波长差 $\delta\lambda=0.1\ \text{nm}$,多频波长差 $\Delta\lambda=0.05\ \text{nm}$,色循环数为 $N_c=1$,焦斑均匀性随带宽的变化如图 5 所示。

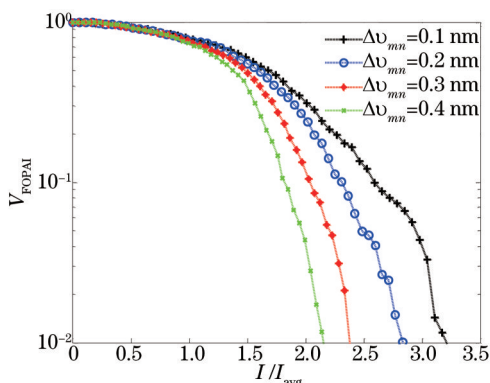


图 5 带宽对远场 FOPAI 的影响

Fig.5 Influence of bandwidth on FOPAI

从图 5 可以看出,随着带宽的增加,远场热斑的比例逐渐降低,焦斑的均匀性得到明显改善。这是由于随着带宽增大,对应的频谱成分增多,致使焦面不同频率产生的散斑也增多。这些频率不同的散斑强度分布不同,其非相干叠加后能有效改善靶面辐照均匀性,使束匀滑效果得到明显改善。此外,适当的带宽还有利于 SSD 光束抑制小尺度自聚焦。然而,由于受高效三倍频的限制,带宽不宜过大^[23-24],在本方案中取 $0.3\ \text{nm}$ 。

3.4 色循环数对远场光场均匀性的影响

色循环数指的是光束截面内频率成分分布的周期性,即光脉冲的频率重复分布了几个周期该脉冲就有几个色循环^[1,5]。当多色、多频波长差一定时,色循环数选取不同,也将导致远场光场的均匀性有所不同。为了进一步分析色循环数对焦斑特性的影响,取多色间波长间隔 $\delta\lambda=0.1\ \text{nm}$,多频波长间隔 $\Delta\lambda=0.05\ \text{nm}$,每一色光束调制带宽取 $\Delta\nu_{min}=0.3\ \text{nm}$ 。图 6 给出了色散系数分别为 $d\theta/d\lambda=8.779\times 10^4\ \mu\text{rad}/\text{nm}$ 和 $d\theta/d\lambda=9.295\times 10^4\ \mu\text{rad}/\text{nm}$ 时,光通量对比度 C 随色循环数的变化。

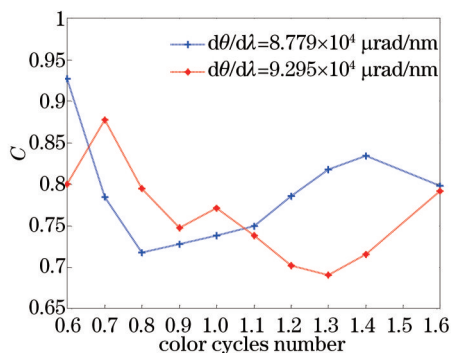


图 6 不同色循环数对均匀性的影响

Fig.6 Influence of color cycle number on the far field uniformity

从图 6 可以看出,随着色循环数的增加,远场光通量对比度整体上呈现先减小后增大的趋势。这是由于当色散系数一定时,随着色循环数的增大,调制频率增大,进而导致光束在焦面上产生更快的运动变化,致使焦面光强对比度呈下降趋势。同时,随着色循环数的增加,在同一光束截面内相同频率成分的空间偏移量减小,进而通过干涉而造成空间干涉调制强度的增加。因此,当色循环数过大时,光束截面上相同的频率成分增加,使得光束之间发生干涉,进而会降低靶面均匀性。

与常规的 SSD 相比,多色、多频 SSD 在色散系数不同时,其最佳色循环数并不相同,且并不为 1。这是由于多色、多频各子束间存在重复的频率成分,而各频率成分在光束截面内分布的周期性将受这些重复频率的影响,即使当色循环数为 1 时,光束截面内仍有相同的频率成分。由此可见,多色、多频 SSD 方案的最佳色

循环数不再为1,而是在1的附近随光源参数有所变化。例如,当 $d\theta/d\lambda=8.779\times 10^4 \mu\text{rad}/\text{nm}$ 时,最佳色循环数为0.8左右。特别地,当多色中心波长差与多频波长差均为零时,其最佳色循环数为1。因此,在实际应用中,需要根据具体的光源参数及光栅参数来确定最佳的色循环数。

4 结 论

多色、多频“SSD+CPP+PCP”束匀滑方案在提高系统的负载能力和提升靶面辐照均匀性方面具有明显优势,且在技术上是可实现的,因而在未来惯性约束聚变束匀滑技术中具有潜在的价值。本文针对多色、多频“SSD+CPP+PCP”束匀滑方案,数值模拟和分析了多色波长差、多频波长差、带宽和色循环数等参数对远场光场均匀性的影响,并讨论了其主要参数的优化选取问题。结果表明,多色波长的存在,会导致经光栅后的不同波长色散角不同,致使各色光场在焦面上存在一定偏移,从而对靶面均匀性有改善作用。然而,如果多色波长差过大,则会导致远场焦斑偏离理想包络,因此,在实际应用中,存在多色波长差的优化选择问题;增加多频波长差,远场光场均匀性有所改善,但多频对靶面均匀性的改善作用比多色的小,但多频的引入会使近场自聚焦焦点运动起来,可达到提高系统负载能力的目的。此外,随着带宽的增大,远场焦斑均匀性将明显改善。然而,进一步考虑到高效三倍频的限制,多频波长差和带宽均不宜选取过大;当色循环数增大时,远场光强对比度总体上呈先减小后增大的趋势。然而,与常规SSD方案不同,多色、多频SSD方案的最佳色循环数不再为1,而是在1的附近随光源参数的不同而有所变化。

参 考 文 献

- Zhang Rui, Li Ping, Su Jingqin, *et al.*. Experimental research of target uniform illumination using smoothing by spectral dispersion and continuous phase plate[J]. *Acta Phys Sin*, 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.
- Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan. Effect of smoothing by spectral dispersion on performance of diffractive optical element for beam smoothing[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(6): 750-753.
谭峭峰, 严瑛白, 金国藩. 光谱色散匀滑技术对衍射光学器件束匀滑性能的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(6): 750-753.
- Zhang Rui. 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[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- Peng Xiaoshi, Wang Feng, Yang Dong, *et al.*. Characteristics study of the backscattering light on Shenguang-III prototype[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0314004.
彭晓世, 王 峰, 杨 冬, 等. 神光III原型背向散射光特性研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0314004.
- Wen Shenglin, Xu Qiao, Ma Ping, *et al.*. Process-based design of continuous phase plates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3180-3182.
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): 3180-3182.
- Wen Shenglin, Yan Hao, Zhang Yuanhang, *et al.*. Calculation and Experiment of the focal spot caused by continuous phase plate with Incident wavefront distortion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0314001.
温圣林, 颜 浩, 张远航, 等. 波前畸变下连续相位板焦斑的计算与实验[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0314001.
- M M Marinak, G D Kerbel, N A Gentile, *et al.*. Three-dimensional HYDRA simulations of national ignition facility targets[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(5): 2275-2280.
- Chen Bo, Wang Hanzi, Wei Hui, *et al.*. Design of fully continuous phase plates for beam smoothing in ICF[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(4): 481-484.
陈 波, 王菡子, 韦 辉, 等. 用于惯性约束聚变束匀滑的完全连续相位板设计方法[J]. *光学学报*, 2001, 21(4): 481-484.
- Ximing Deng, Xiangchun Liang, Zezun Chen, *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(3): 377-381.
- Jiang Xiujian, Li Jinghui, Li Huagang, *et al.*. Smoothing of small on-target spots produced by frequency-tripled beams using lens array and spectral dispersion[J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(12): 124202.
江秀娟, 李菁辉, 李华刚, 等. 采用透镜列阵与光谱色散改善三倍频小焦斑辐照均匀性[J]. *物理学报*, 2012, 61(12): 124202.

- 11 Xiao Jun, Lü Baida. Characteristics of polarization control plate smoothing interference speckles[J]. Chinese J Laser, 2000, 27(7): 628-632.
肖俊, 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): 628-632.
- 12 Zhou Yuliang, Sui Zhan, Liu Lanqin, *et al.*. Research on beam smoothing technology for high-power laser system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 101407.
周煜梁, 隋展, 刘兰琴, 等. 高功率激光装置光束匀滑技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 101407.
- 13 Cheng Wenyong, Zhang Xiaomin, Su Jingqin, *et al.*. Suppression of small-scale self focusing of high power laser using moving beam[J]. Acta Phys Sin, 2009, 58(10): 7012-7016.
程文雍, 张小民, 粟敬钦, 等. 利用运动光束抑制高功率激光小尺度自聚焦[J]. 物理学报, 2009, 58(10): 7012-7016.
- 14 S Skupsky, R W Short, T Kessler, *et al.*. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light[J]. Journal of Applied Physics, 1989, 66(8): 3456-3462.
- 15 D M Pennington, M A Henesian, R B Wilcox, *et al.*. A Four-color beam smoothing irradiation system for laser-plasma interaction experiments at LLNL[C]. SPIE, 1995, 2633: 214-229.
- 16 Jerome Neauport, Xavier Ribeyre, Jerome Daurios, *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.
- 17 Zhong Zheqiang, Zhou Bingjie, Ye Rong, *et al.*. A novel scheme of beam smoothing using multi-central frequency and multi-color smoothing by spectral dispersion[J]. Acta Phys Sin, 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.
- 18 Jiang X, Li J. An evaluation of target irradiation uniformity based on spatial-spectrum analysis[J]. Optik, 2012, 123(16): 1411-1414.
- 19 Lawrence Livermore National Laboratory Polar Drive Ignition Campaign Conceptual Design[R]. Laboratory for Laser Energetics and Lawrence Livermore National Laboratory. 2012, LLNL-TR-553311: 91.
- 20 Li Zelong, Zhong Zheqiang, Zhang Bin. Study on multi-beam superposition using complementary polarization control plates[J]. Acta Phys Sin, 2014, 63(9): 095204.
李泽龙, 钟哲强, 张彬. 基于互补型偏振控制板的多光束叠加特性研究[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 095204.
- 21 Zhou Bingjie, Zhong Zheqiang, Zhang Bin. Influence of beam moving characteristics on smoothing effect of focal spot[J]. Acta Phys Sin, 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.
- 22 Regan S P, Marozas J A, Kelly J H, *et al.*. Experimental investigation of smoothing by spectral dispersion[J]. J Opt Sci Am B, 2000, 17(9): 1483-1489.
- 23 Li Keyu, Feng Bin, Wang Fang, *et al.*. Harmonic conversion rule for Gaussian pulse with nonideal conditions[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0819001.
李恪宇, 冯斌, 王芳, 等. 高斯脉冲非理想条件下的谐波转换规律[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0819001.
- 24 Rothenberg J E, Auerbach J M, Moran B D, *et al.*. Implementation of smoothing by spectral dispersion on beamlet and NIF[C]. SPIE, 1999, 3492: 970-979.

栏目编辑: 张雁