

多频多色光谱角色散束匀滑新方案*

钟哲强 周冰洁 叶荣 张彬†

(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

(2013年9月4日收到; 2013年9月24日收到修改稿)

典型的光谱角色散技术中, 由于光束带宽受限于高效三倍频, 因而无法通过增大带宽来进一步改善焦斑均匀性. 结合对四色打靶方案和多级相位调制技术的综合分析, 提出了多频、多色光谱角色散束匀滑新方案. 该方案能在保持高效三倍频基础上, 获得带宽有所加宽, 光谱包络近似连续的光源, 且在远场匀滑上具有更为独特的优势. 结果表明, 采用束匀滑新方案后, 虽然焦斑会有所增大, 但其均匀性却得到明显改善; 与典型的束匀滑方案相比, 该方案能更为有效地抑制热斑, 且达到最佳匀滑效果所需的时间有所减短. 此外, 通过对阵列光栅中子光栅刻线方向的自由组合可以实现多维光谱角色散的效果.

关键词: 多频、多色, 光谱角色散, 连续光谱, 远场均匀性

PACS: 52.57.-z, 42.25.Fx, 42.68.Ay, 42.40.My

DOI: 10.7498/aps.63.035201

1 引言

在惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 驱动器中, 为实现对靶面的均匀辐照发展了多种束匀滑技术, 包括光谱角色散匀滑 (smoothing by spectral dispersion, SSD)^[1]、相位板^[2-4]以及偏振匀滑 (polarization smoothing, PS)^[5]等. 其中, SSD技术是1989年由Skupsky等提出, 并在OMEGA、NIF等装置上得到了应用^[6,7]. SSD单元包含有相位调制器和衍射光栅, 通过对种子光进行时间位相调制, 从而使激光产生光谱角色散, 导致不同频率的光在其色散方向上运动起来^[8]. 在近场传输放大过程中, 光束运动使自聚焦点运动起来, 从而减小时间积分通量, 以避免光学组件损伤^[8]; 在远场靶面, 焦斑图样产生动态变化, 在时间积分效果上可消除高频强度调制. 然而, 基于正弦位相调制的SSD技术, 其脉冲光谱较窄(0.3 nm)且呈现中心低两侧高的分布, 造成其束匀滑效果不够理想^[9,10], 并且受限于高效三倍频, 无法通过增大带宽进一步改善靶面辐照均匀性. 早在1995年, Pennington等^[11]就提出了四色打靶方案, 能在保持高效三倍

频的前提下有效增大带宽, 从而提高靶面均匀性, 以抑制激光等离子体相互作用导致的背向受激布里渊散射. 2012年, Collins等^[12]在现有NIF装置结构的基础上, 提出多级相位调制技术, 即利用多级频率调制器 (multiple frequency modulators, MFM) 分别对栅栏脉冲进行调制, 从而对靶丸进行预处理, 以实现冲击点火.

通过对小宽带SSD体制特点的综合分析, 借鉴用于冲击点火和激光等离子体不稳定性 (laser plasma instabilities, LPI) 控制^[13-15]的物理思想, 本文提出一种能通过增大带宽来提高系统负载能力、改善靶面辐照均匀性的束匀滑新方案——多频、多色SSD (Multi-central frequency, Multi-color SSD), 并从光谱分布、远场均匀性等方面对该方案进行了分析和讨论.

2 多频、多色光谱角色散方案

多频、多色SSD方案可分为多频SSD和多色SSD两部分. 多频SSD光源是指多个在时间上同步且不相干, 但中心频率存在一定偏差的种子光脉冲分别进行正弦时间位相调制后, 再通过合束器

* 四川省教育厅创新团队计划 (批准号: 13Td0048) 和四川大学优秀青年学者计划 (批准号: 2011-2-B17) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhangbinff@sohu.com

对其进行合束后, 得到多中心频率光源, 简称多频 SSD 光源, 如图 1 所示. 该多频光源与小宽带 SSD(单中心频率 SSD) 光源相比, 其优势在于多个子脉冲非相干叠加, 各子脉冲的频谱在频域上堆叠、相互填充, 可以有效地增大带宽, 并使离散谱线加密, 从而由离散光谱扩展为近似连续光谱.

借鉴于文献 [11] 中四色打靶的思想, 多色 SSD 是指多个在时间上同步、中心波长存在一定偏差的脉冲在空间上按阵列形式排布, 分别进行正弦相位调制、光谱角色散、频率转换等过程, 最后在远场聚焦打靶. “多频、多色 SSD 方案” 则是指在多色 SSD 束匀滑的基础上, 阵列子光源采用多频 SSD 光源而得到. 图 2 给出了多频、多色 SSD 束匀滑方案示意图.

如图 2 所示, 从左到右依次是三频四色正弦位相调制光源组成的阵列光源、 2×2 阵列光栅、放大

器、 2×2 KDP 晶体阵列、连续相位板 (continuous phase plate, CPP)、偏振匀滑器件, 最后经透镜聚焦. 其中, 阵列光栅由四块子光栅按 V 形排列组成, 每块子光栅具有独立的刻线密度和方向, 若子光栅色散方向不同, 可使子光束沿不同的色散方向扫动, 从而可以产生多方向色散的效果. 阵列光栅的 V 形排列结构在减少光栅给脉冲带来的时间延迟的同时, 也会导致光束出现一个短暂的人字形失真 [11].

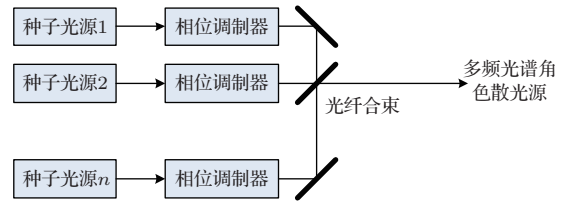


图 1 多频 SSD 光源示意图

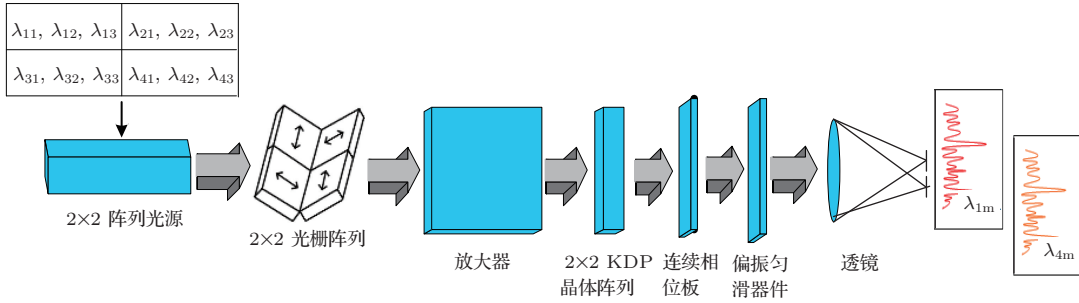


图 2 多频、多色 SSD 束匀滑方案

3 理论模型

阵列光源为各个子光源的非相干叠加, 第 mn 个子光源的光场表达式为

$$E_{mn}(x_m, y_m, t) = A(x_m, y_m, t) \exp[i\Phi(x_m, y_m)] \times \exp[i(\omega_{0mn}t + \delta_{mn} \sin \omega_{mn}t + \varphi_{mn})], \quad (1)$$

其中, m, n 分别表示阵列光源中第 mn 个子光源,

$$A(x_m, y_m, t) = \exp[-(x_m/w)^N - (y_m/w)^N] \times \exp[-(t/\tau)^M]$$

为光场的时空振幅分布, w 为束腰半径, τ 为脉宽, N, M 为超高斯的阶数; $\Phi(x_m, y_m)$ 为初始的波前分布; ω_{0mn} 第 mn 个子光源的中心角频率, $\delta_{mn}, \omega_{mn}, \varphi_{mn}$ 分别为电光调制的调制深度、调制角频率和附加初始相位, $\omega_{mn} = 2\pi\nu_{mn}$, ν_{mn} 为调制频率. 光谱带宽近似为 $\Delta\lambda_{mn} = 2\delta\nu_{mn} \cdot \lambda_{0mn}^2/c$, λ_{0mn} 为子光

源的中心波长, 即子光源带宽由 δ_{mn}, ν_{mn} 和 λ_{0mn} 决定 [1].

经过阵列光栅时, 由于每块子光栅相互独立, 色散方向可以有不同组合, 因而存在多种情况. 为了讨论方便而又不失一般性, 本文仅考虑色散方向相同、两两正交两种典型例 (且只考虑一维 SSD), 沿 x, y 方向色散的子光源光场分布可分别表示为

$$E'_{mnx}(x_m, y_m, t) = A(x_m, y_m, t) \exp[i\Phi(x_m, y_m)] \exp[i(\omega_{0mn}t + \delta_{mn} \sin \omega_{mn}(t + \xi_m x_m) + \varphi_{mn})], \quad (2a)$$

$$E'_{mny}(x_m, y_m, t) = A(x_m, y_m, t) \exp[i\Phi(x_m, y_m)] \exp[i(\omega_{0mn}t + \delta_{mn} \sin \omega_{mn}(t + \xi_m y_m) + \varphi_{mn})], \quad (2b)$$

式中, $E'_{mnx}(x_m, y_m, t), E'_{mny}(x_m, y_m, t)$ 分别为近场沿 x, y 方向色散的光场分布, $\xi_m = d\theta/d\lambda \cdot \lambda_{0mn}/c$, $d\theta/d\lambda$ 为对应子光栅的色散系数.

图2中, CPP是纯相位组件, 仅改变光场的位相, PS是利用双折射光楔产生两束方向正交的具有一定角偏差的偏振光束, 两者在焦面上形成相同的焦斑图样非相干叠加. 设透镜前 f 处为物面, 透镜后焦面为观察面, 则焦面上的光强分布可表示为

$$I_f(x_f, y_f, t) = \sum_m \sum_n \left| \mathbf{e}_x \times \iint_{\forall \text{space}} E'_{mnx}(x_m, y_m, t) e^{i\phi_{\text{CPP}}} \times \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_f x_m + y_f y_m) \right] dx_m dy_m \right|^2 + \left| \mathbf{e}_y \times \iint_{\forall \text{space}} E'_{mny}(x_m, y_m, t) e^{i\phi_{\text{CPP}}} \times \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_f x_m + y_f y_m) \right] dx_m dy_m \right|^2, \quad (3a)$$

$$I_f(x_f, y_f, t) = \sum_{m=\text{odd}} \sum_n \left| \mathbf{e}_x \times \iint_{\forall \text{space}} E'_{mnx}(x_m, y_m, t) e^{i\phi_{\text{CPP}}} \times \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_f x_m + y_f y_m) \right] dx_m dy_m \right|^2 + \left| \mathbf{e}_y \times \iint_{\forall \text{space}} E'_{mny}(x_m, y_m, t) e^{i\phi_{\text{CPP}}} \times \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_f x_m + y_f y_m) \right] dx_m dy_m \right|^2 + \sum_{m=\text{even}} \sum_n \left| \mathbf{e}_x \times \iint_{\forall \text{space}} E'_{mny}(x_m, y_m, t) e^{i\phi_{\text{CPP}}} \times \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_f x_m + y_f y_m) \right] dx_m dy_m \right|^2 + \left| \mathbf{e}_y \times \iint_{\forall \text{space}} E'_{mny}(x_m, y_m, t) e^{i\phi_{\text{CPP}}} \times \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_f x_m + y_f y_m) \right] dx_m dy_m \right|^2, \quad (3b)$$

其中, ϕ_{CPP} 为CPP对光场的附加位相, $I_f(x_f, y_f, t)$ 表示远场瞬时光强, (x_m, y_m) 和 (x_f, y_f) 分别为近场和远场对应空间坐标; $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y$ 分别表示 x, y 方向单位矢量. (3a)式为色散方向相同时(以 x 方向为例)焦斑强度分布, (3b)式为色散方向两两正交时(以奇数对应沿 x 方向色散, 偶数对应沿 y 方向色散为例)焦斑强度分布. 特别地, 当 $m = n = 1$ 时, (3)式表示的是典型SSD+CPP+PS

方案得到的焦斑强度分布.

4 数值模拟和分析

4.1 光源光谱分布

利用(1)式数值模拟得到单频SSD、多频SSD、多色SSD与多频多色SSD光源的光谱分布, 以三频、四色为例(即 $m = 1, 2, 3, 4, n = 1, 2, 3$), 取参数 $\delta_{mn} = 12.3, \nu_{mn} = 3.3$ GHz, 即子光源带宽 $\Delta\lambda_{mn} = 0.3$ nm; 取多频SSD间中心波长差 $\delta\lambda_{0m} = 0.05$ nm, 多色SSD间中心波长差 $\delta\lambda_{0n} = 0.4$ nm, 各光谱如图3所示.

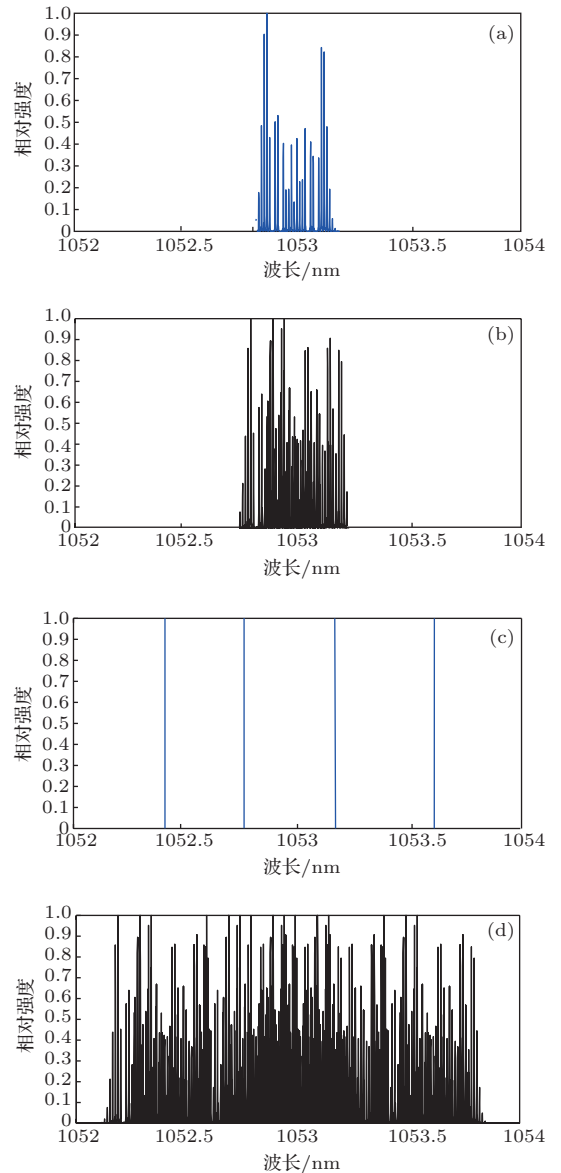


图3 光源光谱分布 (a) 小宽带SSD; (b) 多频SSD; (c) 多色SSD; (d) 多频、多色SSD

从图 3 可以看出, 对于多频、多色 SSD 方案, 由于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 光源, 因而可致使各子束光谱相互填充. 由此可见, 通过合理选择阵列子光束带宽 ($\Delta\lambda_{mn}$) 和中心波长差 ($\delta\lambda_{0m}, \delta\lambda_{0n}$), 可获得带宽有所加宽, 且光谱包络近似连续的光源.

多频、多色 SSD 方案能通过合理的选取参数获得光谱包络近似连续的光源, 且在保证高效三倍频的基础上有效增大带宽. 因此, 该方案比单频 SSD 方案在近场的运动特性及远场匀滑效果上均具有更为独特的优势. 在这一新型束匀滑方案中, 利用最少的种子光源和位相调制器得到光谱近似连续的光源, 并尽可能降低系统成本, 提高工程可实现性是方案优化的立足点. 通过分析和比较, 选择三频、四色 SSD 是比较合适的.

4.2 远场匀滑特性

为了定量描述焦斑的匀滑效果, 引入衍射焦斑包络上斑纹的光通量对比度 C ^[16] 为

$$C = \frac{\sqrt{\sum_i \sum_j [I_{i,j}(x, y) - \bar{I}(x, y)]^2 / N_x N_y}}{\bar{I}(x, y)}, \quad (4)$$

式中, $I_{i,j}(x, y)$ 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. (4) 式表明, 光通量对比度 C 越小, 焦斑光强包络上各点的光强值越接近光强平均值, 则焦斑光强分布越均匀.

对光斑中超过某热斑强度的统计曲线 FOPAI (fractional power above intensity) 的定义为^[7]

$$\text{FOPAI}(I_0) = \frac{\int_{I(x,y) > I_0}^A I(x, y) dx dy}{\int_A I(x, y) dx dy}, \quad (5)$$

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.

在对远场匀滑效果进行分析时, 利用 (3) 式对单频 SSD+CPP+PS、多频、多色 SSD+CPP+PS (阵列光栅色散方向为相同、两两正交两种情况, 且只考虑一维 SSD) 束匀滑方案分别进行数值模拟, 得到的焦斑分布如图 4 所示. 在多频、多色 SSD 中每个子脉冲与单频 SSD 的调制参数一致, 取总的光束口径为 $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$, $\lambda_{0mn} = 351 \text{ nm}$, 脉宽 $\tau = 3 \text{ ns}$; 光栅色散系数

$d\theta/d\lambda = 2156.8 \text{ } \mu\text{rad/nm}$, $\delta_{mn} = 12.3$, $\nu_{mn} = 3.3 \text{ GHz}$, 色循环数为 1, $\delta\lambda_{0m} = 0.4 \text{ nm}$, $\delta\lambda_{0n} = 0.05 \text{ nm}$, 积分时间 $\Delta t = 10 \text{ ps}$.

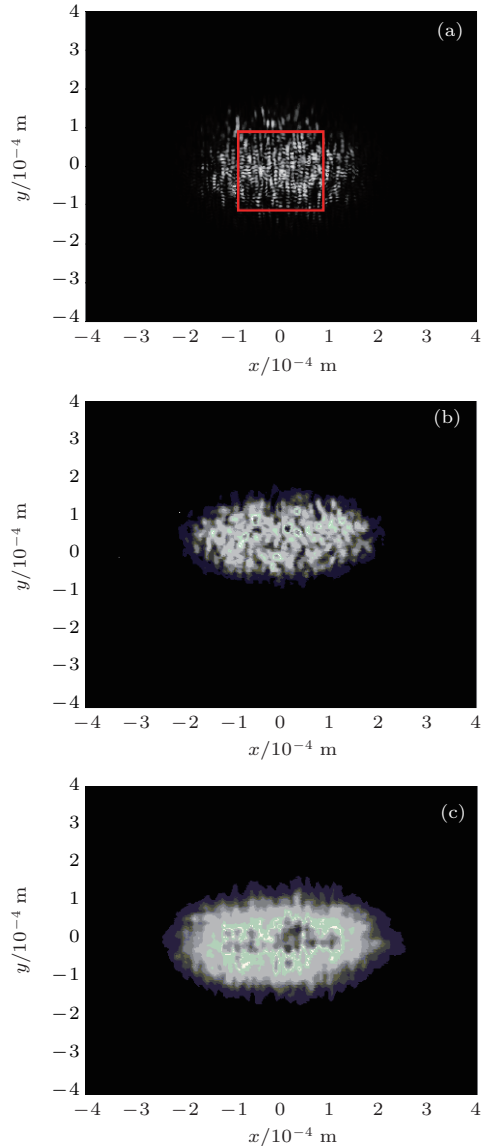


图 4 不同匀滑方案时, 焦斑强度分布, 矩形区域为观察区域 (a) 单频 SSD+CPP+PS 焦斑, $C = 0.710$; (b) 多频、多色 SSD+CPP+PS 焦斑 (阵列光栅色散方向相同), $C = 0.583$; (c) 多频、多色 SSD+CPP+PS 焦斑 (阵列光栅色散方向两两正交), $C = 0.457$

从图 4 可以看出, 与单频 SSD+CPP+PS 方案相比, 多频、多色 SSD+CPP+PS 方案中光源带宽更宽, 因而焦斑尺寸更大, 但其均匀性更好. 比较图 4 (a), (b) 可知, 采用单频 SSD+CPP+PS 匀滑方案得到的焦斑中心区域仍然存在着明显的强度调制, 其光通量对比度为 0.710; 而多频、多色 SSD+CPP+PS (阵列光栅色散方向相同) 匀滑方案下焦斑内的调制起伏比单频 SSD 小, 其光通量对比度

为0.583. 进一步比较图4(b), (c)可知, 阵列光栅色散方向两两正交时, 焦斑光通量对比度要比单一色散方向更小, 这是因为沿正交方向色散时, 焦斑可以看作是分别沿两正交方向色散后聚焦光斑的非相干叠加. 由此可见, 阵列光栅色散方向两两正交时, 既可避免焦斑尺寸过大, 降低了堵孔现象发生的可能性, 又使子光束焦斑在靶面非相干叠加, 从而进一步改善焦斑不均匀性. 此外, 还可以通过对阵列光栅中子光栅刻线方向的自由组合, 在不增加系统复杂性的前提下, 可以实现多维光谱角色散的效果.

图5(a)为单频SSD+CPP+PS与多频、多色SSD+CPP+PS方案得到的焦斑光通量对比度随积分时间的变化曲线, 图5(b)则为进一步利用(5)式对图4中所示的三种束匀滑方案得到的焦斑进行计算得到的FOPAI曲线.

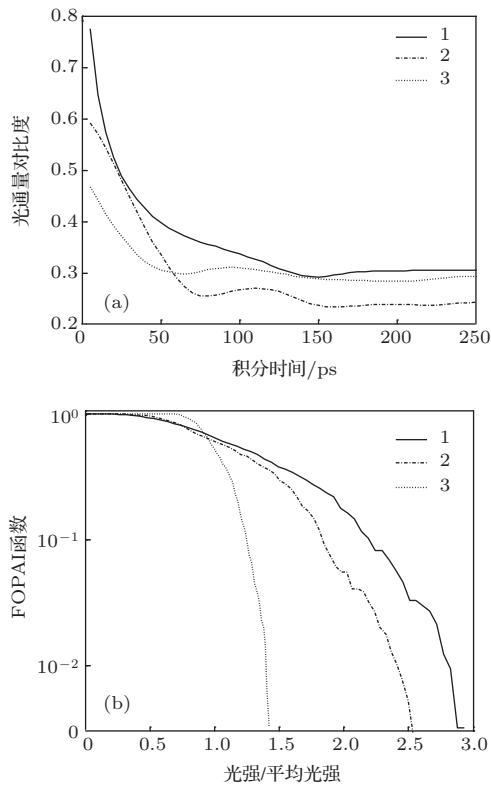


图5 三种方案比较(1为单频SSD+CPP+PS, 2为多频、多色SSD+CPP+PS(阵列光栅色散方向相同), 3为多频、多色SSD+CPP+PS(阵列光栅色散方向两两正交))
 (a) 焦斑对比度随时间变化曲线; (b) FOPAI曲线

从图5(a)可以看出, 在上述三种方案下, 焦斑光通量对比度随时间先减小, 最后趋于稳定. 多频、多色SSD+CPP+PS方案在远场的束匀滑效果较单频SSD+CPP+PS方案有很大改善, 且达到最佳匀滑效果所需的时间有所减短, 即多频、多色SSD+CPP+PS的匀滑速度比较快, 可使焦斑在更短

的时间内达到要求的焦斑均匀性. 此外, 阵列光栅色散方向两两正交时可以获得更好、更快的远场匀滑效果. 分析图5(b)可知, 与单频SSD+CPP+PS相比, 多频、多色SSD+CPP+PS方案得到的焦斑光强变化范围更小, 集中在更小的范围内. 当阵列光栅色散方向两两正交时, 对热斑的抹平效果更好, 从而更有效地减少热斑, 抑制等离子体成丝等效应.

在多频、多色SSD方案中, 与四色打靶不同的是每一阵列光源均为多频SSD光源. 文献[11]指出, 对于四色打靶方案, 通过对 2×2 KDP晶体阵列中每一块频率转换单元分别进行调整, 使光谱角色散后的每一子束均能满足位相匹配条件, 从而可分别获得高的频率转换效率, 进而在高频率转换效率前提下, 可适当增大光源带宽. 文献[17]通过理论分析和实验验证了三倍频效率随SSD光源带宽变化规律, 其结果表明只要保证多频SSD光源带宽在与单频SSD相差不大, 就可以保证整个系统的高效三倍频.

对于多频、多色SSD方案来说, 由于子光源非相干, 光束在近场的总体运动可分解为各子光源的运动. 在脉冲总功率密度相同、光束口径不变的前提下, 各子光源的运动使得每一个自聚焦焦点在近场相互错开, 并对光脉冲总能量进行了分摊, 其对应的局部尖峰通量也低于单频SSD[18]. 因此, 多频、多色SSD在近场的能量分布更为均匀, 对小尺度自聚焦的抑制作用比单频SSD更为有效.

5 结 论

为了在保持较高的三倍频转换效率的同时能有效改善远场束匀滑效果, 需要寻求新的束匀滑方案. 多频SSD是在频域上通过非相干叠加的方式增大带宽, 而多色SSD则是在空域上谋求增大带宽的方式. 与单频SSD相比, 多频、多色SSD在保持高效三倍频的基础上获得相对平滑、连续的光谱分布. 在远场这一新束匀滑方案的效果较单频SSD+CPP+PS方案有很大改善, 且达到最佳匀滑效果所需的时间有所减短. 此外, 通过阵列光栅色散方向的自由组合可以实现多方向上的光谱角色散, 从而能更好地抹平远场分布, 抑制热斑.

感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心提供的CPP数据.

参考文献

- [1] Skupsky S, Short R W, Kessler T, Craxton R S, Letzring S, Soures J M 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 3456
- [2] Kato Y, Mima K, Miyanaga N, Arinaga S, Kitagawa Y, Naktsuka M, Yamanka C 1984 *Phys. Rev. Lett.* **53** 1057
- [3] Dixit S N, Thomas I M, Woods B W, Morgan A J, Henesian M A, Wegner P J, Powell H T 1993 *Applied Optics* **32** 2543
- [4] Geng Y C, Liu L Q, Wang W Y, Zhang Y, Huang W Q, Su J Q, Li P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 145201 (in Chinese)[耿远超, 刘兰琴, 王文义, 张颖, 黄晚晴, 粟敬钦, 李平 2013 物理学报 **62** 145201]
- [5] Tsubakimoto K, Nakatsuka M, Nakano H, Kanabe T, Jitsuno T, Nakai S 1992 *Opt. Commun.* **1** 9
- [6] Two-Dimensional SSD on OMEGA 1996 *LLE Rev.* **69** 1
- [7] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, Bowers M W, Dixit S N, Erbert G V, Heestand G M, Henesian M A, Hermann M R, Jancaitis K S, Manes K R, Marshall C D, Mehta N C, Menapace J, Moses E, Murray J R, Nostrand M C, Orth C D, Patterson R, Sacks R A, Shaw M J, Spaeth M, Sutton S B, Williams W H, Widmayer C C, White R K, Yang S T, Van Wouterghem B M 2007 *Applied Optics* **46** 3276
- [8] Cheng W Y, Zhang X M, Su J Q, Zhao S Z, Dong J, Li P, Zhou L D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7012 (in Chinese)[程文雍, 张小民, 粟敬钦, 赵圣之, 董军, 李平, 周丽丹 2009 物理学报 **58** 7012]
- [9] Jiang X J, Zhou S L, Lin Z Q, Zhu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4595 (in Chinese)[江秀娟, 周申蕾, 林尊琪, 朱俭 2006 物理学报 **55** 4595]
- [10] Li P, Su J Q, Ma C, Zhang R, Jing F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6210 (in Chinese)[李平, 粟敬钦, 马驰, 张锐, 景峰 2009 物理学报 **58** 6210]
- [11] Pennington D M, Henesian M A, Wilcox R B, Wilcox R B, Weiland T L, Eimerl D, Ehrlich R B, Laumann C W, Miller J L 1992 *Proceedings of the 1st Annual International Conference on Solid-State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion Monterey California, American, May 30-June 2, 1995*
- [12] Collins T J B, Marozas J A, Anderson K S, Betti R, Craxton R S, Delettrez J A, Goncharov V N, Harding D R, Marshall F J, McCrory R L, Meyerhofer D D, McKenty P W, Radha P B, Shvydky A, Skupsky S, Zuegel J D 2012 *Physics of Plasmas* **19** 056308
- [13] Betti R, Zhou C D, Anderson K S, Perkins L J, Theobald W, Solodov A A 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 155001
- [14] Baton S D, Koenig M, Brambrink E, Schlenvoigt H P, Rousseaux C, Debras G, Laffite S, Loiseau P, Philippe F, Ribeyre X, Schurtz G 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 195002
- [15] Schmitt A J, Betti J W, Obenschain S P, Zalesak S T, Fyfe D E, Betti R Direct drive fusion energy Shock Ignition Designs for Sub-MJ Lasers 2008 (9)
- [16] Li K 2007 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: Sichuan University) (in Chinese) [李琨 2007 博士学位论文(成都: 四川大学)]
- [17] Rothenberg J E, Auerbach J M, Moran B D, Murray J E, Weiland T L, Wegner P J Implementation of smoothing by spectral dispersion on beamlet and NIF. LLNL, UCRL-JC-129771
- [18] Zhou B J, Zhong Z Q, Zhang B 2012 **61** 214202 (in Chinese) [周冰洁, 钟哲强, 张彬 2012 物理学报 **61** 214202]

A novel scheme of beam smoothing using multi-central frequency and multi-color smoothing by spectral dispersion*

Zhong Zhe-Qiang Zhou Bing-Jie Ye Rong Zhang Bin[†]

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(Received 4 September 2013; revised manuscript received 24 September 2013)

Abstract

In typical techniques of smoothing by spectral dispersion (SSD), illumination uniformity cannot be further improved by increasing the pulse bandwidth due to the limitation of high-efficiency frequency tripling. Combined with the analysis of the schemes of four-color beam smoothing and multi-frequency modulator SSD, a novel scheme of beam smoothing using multi-central frequency and multi-color smoothing by spectral dispersion has been proposed, which not only can achieve high-efficiency frequency tripling, but also can obtain laser beams with nearly continuous spectrum and exhibit some specific advantages in far-field smoothing. Results show that the focal spot will be enlarged slightly but obviously further smoothed by the use of the new scheme. Compared to the typical SSD technique, the new scheme can decrease hot spots effectively and achieve the best irradiation in less time. Moreover, with independent combination of dispersion directions in each quadrant of grating array, a multi-dimensional smoothing on focal spot can be realized.

Keywords: multi-central frequency and multi-color, smoothing by spectral dispersion, continuous spectrum, illumination uniformity in far field

PACS: 52.57.-z, 42.25.Fx, 42.68.Ay, 42.40.My

DOI: [10.7498/aps.63.035201](https://doi.org/10.7498/aps.63.035201)

* Project supported by the Program for Innovation Team of the Education Department of Sichuan Province, China (Grant No. 13Td0048), and the Excellent Youth Talents of Sichuan University, China (Grant No. 2011-2-B17).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangbinff@sohu.com