

基于集束多频调制的光谱色散匀滑技术

郑天然^{1,2}, 张颖¹, 耿远超¹, 黄晚晴¹, 刘兰琴¹, 孙喜博¹, 王文义¹, 李平¹, 张锐¹, 粟敬钦¹

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

²中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

摘要 在激光驱动惯性约束聚变研究中, 激光等离子体相互作用是影响点火的重要原因之一; 为了抑制激光等离子体的不稳定性, 诸多光束匀滑技术应运而生, 并得到广泛应用。为了获得更匀滑的焦斑, 提出集束多频调制光谱色散匀滑(SSD)技术, 并对其进行了理论研究; 该技术采用多束激光集束聚焦打靶, 利用单频调制单光束, 利用不同的频率调制不同的子束。结果表明, 该技术可以有效抑制多光束干涉导致的强度调制, 改善了远场光强分布的均匀性, 并且在采用更接近实际情况的色循环数时, 具有比传统多频调制 SSD 技术更好的匀滑效果。

关键词 激光光学; 集束聚焦; 多频调制; 光谱色散匀滑; 惯性约束聚变; 辐照均匀性

中图分类号 TN241

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1205003

Smoothing by Spectral Dispersion Technology Based on Bundle Multiple-Frequency Modulation

Zheng Tianran^{1,2}, Zhang Ying¹, Geng Yuanchao¹, Huang Wanqing¹, Liu Lanqin¹,
Sun Xibo¹, Wang Wenyi¹, Li Ping¹, Zhang Rui¹, Su Jingqin¹

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract In the research on laser driven inertial confinement fusion, laser-plasma interaction (LPI) is a key issue of affecting ignition. Many beam smoothing technologies are proposed and adopted to suppress the instability of laser-plasma. To obtain a smoother focal spot, the smoothing by spectral dispersion (SSD) technology based on bundle multiple-frequency modulation is proposed and studied theoretically. The technology adopts one modulation frequency in one single beam, and then a bundle of multiple beams with different modulation frequencies focuses on one point. The results indicate that intensity modulation caused by interference of multiple beams can be suppressed and the uniformity of far field intensity distribution can be improved by the proposed technology. Compared with the traditional multiple-frequency modulation SSD technology, the proposed technology has a better smoothing performance when the color cycle number is closer to practical situation.

Key words laser optics; beam array focus; multiple-frequency modulation; smoothing by spectral dispersion; inertial confinement fusion; illumination uniformity

OCIS codes 140.3295; 140.3290; 140.3518

1 引言

在惯性约束聚变研究中, 激光等离子体相互作用(LPI)^[1]是影响点火的重要原因之一。激光等离子体不稳定性产生的主要原因之一是激光辐照的不均匀性, 因此改善激光远场分布的均匀性对激光惯性约束聚

收稿日期: 2017-07-14; 收到修改稿日期: 2017-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(61475145)、中国工程物理研究院科学技术发展基金(2014A0401018)、等离子体重点实验室基金(9140C680604150C68299)

作者简介: 郑天然(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率激光技术方面的研究。E-mail: 541756848@qq.com

导师简介: 张颖(1981—), 女, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事高功率激光技术方面的研究。

E-mail: zhangying@tsinghua.org.cn(通信联系人)

变研究具有重要意义。

高功率激光驱动装置通常采用随机相位板(RPP)^[2]、连续相位板(CPP)^[3]等空间相位调制元件控制靶面的光强分布。相位板将激光束分割成众多子束,这些子束的相干叠加会使得靶面光强存在大量高峰值功率的散斑结构,引起激光自聚焦,并加剧了等离子体的不稳定,从而增强了受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)等非线性效应^[4]。为了抑制激光散斑的影响,需要应用时域匀滑技术。光谱色散匀滑(SSD)^[5]技术作为一种具有较高三倍频效率的时域匀滑技术得到了广泛应用;偏振匀滑(PS)技术^[6-7]具有结构简单和能够瞬时匀滑的特点,也被应用于主要的激光驱动装置中。目前,国内外激光驱动装置大都采用 SSD、相位板与 PS 联用的技术路线,例如:美国的国家点火装置(NIF)采用一维 SSD、CPP 结合双折射楔镜或偏振控制板的光束匀滑技术^[8-9];法国的兆焦耳装置(LMJ)采用 CPP 结合聚焦光栅的纵向 SSD 技术^[10];为了抑制激光传输过程中的受激布里渊散射并改善焦斑的均匀性,我国的神光 III 主机装置采用多频调制 SSD 结合 CPP、PS 的技术路线^[11];针对 NIF 极向直接驱动预脉冲对焦斑均匀性的要求,罗切斯特大学激光力能学实验室(LLE)在 OMEGA EP 的第 4 束上搭建了多频调制 SSD 的原型系统,并将其与 CPP 结合使用,明显改善了焦斑的均匀性^[12-13]。国内外针对光束匀滑技术开展了大量的理论与实验研究,包括 CPP 的面型设计与性能分析^[14-17]、多方向 SSD^[18-19]、多频调制 SSD^[12-13]、CPP 与 SSD 耦合^[20-21]、新颖的束匀滑^[22-24]等方法。但目前的研究大多是针对单束激光进行讨论的,而在实际的激光驱动装置中,可能采用多束激光聚焦于同一点,即等效于单束输出的集束打靶方式。更多激光束集束聚焦打靶是高功率激光驱动装置的发展趋势,例如:美国的 NIF 与法国的 LMJ 均采用 4 束集束聚焦打靶^[25-26]。Temporal 等^[27]针对高功率激光能源研究装置(HiPER)分析了 32 个方向上 9 束激光集束聚焦的辐照均匀性。在集束聚焦方式中,子束的相干叠加会引起靶面光强的干涉调制,导致靶面光强分布的均匀性变差,因此,对于进一步改善集束聚焦方式下靶面光场分布的均匀性需要进行深入研究。

本文针对集束聚焦方式提出了采用不同调制频率子束的集束多频调制 SSD 技术,该技术可以有效降低子束间的干涉调制,改善靶面的辐照均匀性,获得了比传统多频调制 SSD 技术更好的匀滑效果。

2 理论模型

2.1 SSD 技术原理

SSD 技术利用窄带光调制展宽产生宽带光,经光栅色散后使靶面光斑在小范围内快速移动,配合使用相位板使光斑在平均时间内得到匀滑。图 1 所示为 SSD 示意图。激光脉冲依次经过调制器、光栅、CPP,最后经聚焦透镜会聚到靶面上。

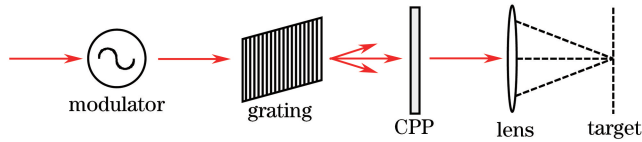


图 1 SSD 示意图

Fig. 1 Diagram of SSD

采用正弦调频与线性光栅的 SSD 光束在聚焦透镜前的电场分布 E 可以表示为^[5]

$$E = E_0(x, y) \exp[i\beta \sin(2\pi f_m t + \alpha y)] \exp(i\varphi_{\text{CPP}}), \quad (1)$$

式中 x 为光栅刻线方向, y 为色散方向, $E_0(x, y)$ 为振幅分布, β 为调制深度, f_m 为调制频率, t 为时间, φ_{CPP} 为 CPP 的相位分布, $\alpha = 2\pi(\Delta\theta/\Delta\lambda)(f_m/\nu_0)$ 为光谱角色散, $\Delta\theta/\Delta\lambda$ 为光栅色散系数, ν_0 为激光频率。

为了描述色散在光束截面上的重复性,一般引入色循环数 N_c ^[5,20], 定义其为光束截面上频率重复分布的周期,即 $N_c = t_d f_m = (D\Delta\theta/\Delta\lambda)\lambda f_m/c$, 其中 t_d 为光束在截面上的时间延迟, D 为近场口径, c 为光速, λ 为波长, 因此光谱角色散也可表示为 $\alpha = 2\pi N_c/D$ 。

远场光斑的电场分布 E_{FF} 为近场电场分布 E 的傅里叶变换, 即

$$E_{\text{FF}} = \mathfrak{F}[E_0(x, y)] \otimes \mathfrak{F}\{\exp[i\beta \sin(2\pi f_m t + \alpha y)]\} \otimes \mathfrak{F}[\exp(i\varphi_{\text{CPP}})], \quad (2)$$

式中 \otimes 为卷积运算符号, \mathfrak{F} 为傅里叶变换。由(2)式可知,远场光斑的电场分布 E_{FF} 等于两个部分的卷积。将 $\mathfrak{F}[E_0(x,y)]$ 考虑为 δ 函数,并令 $E_{\text{CPP}}(f_y) = \mathfrak{F}[\exp(i\varphi_{\text{CPP}})]$,其中 f_y 为 y 方向的空间频率,则 E_{FF} 可以表示为级数形式^[20]:

$$E_{\text{FF}} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta) E_{\text{CPP}}\left(f_y - \frac{n\alpha}{2\pi}\right) \exp\left(-i \frac{4\pi^2 f_{\text{m}t}}{\alpha} f_y\right), \quad (3)$$

式中为 $J_n(\beta)$ 为贝塞尔函数, n 为贝塞尔函数的阶数。

每一个频率对应一个 CPP 焦斑,各频率对应的焦斑位置在色散方向上各不相同,且有一个相对幅度 $J_n^{[5]}$,因此远场电场分布可以看作是由多个 CPP 焦斑叠加而成的, CPP 焦斑的数量与光谱成分的数量相同。对于上述正弦调频脉冲, CPP 焦斑的数量约为 2β 。各焦斑的相位不同,且随时间而变化,将 $\mathfrak{F}[E_0(x,y)]$ 考虑为 δ 函数时,可以认为这些焦斑是相互独立的, SSD 的匀滑效果 $\delta_{\text{rms}} = 1/\sqrt{2\beta}$ 。在实际情况下, $\mathfrak{F}[E_0(x,y)]$ 具有一定的尺度,只有当相邻焦斑位移大于 $\mathfrak{F}[E_0(x,y)]$ 的尺度时,才认为焦斑之间是相互独立的,因此在给定带宽和光栅参数的情况下,有效的焦斑数量即有效光谱数量存在上限。

考虑方形光束, $\mathfrak{F}[E_0(x,y)]$ 为辛格函数(sinc 函数)形式,其尺度为 $\lambda F/D$,其中 λ 为波长, F 为焦距。当带宽为 $\Delta\nu$ 时,总光谱角色散 $\alpha_{\text{tot}} = 2\pi(\Delta\theta/\Delta\lambda)(\Delta\nu/\nu_0)$,在焦平面上的总空间位移 $\Delta y_{\text{tot}} = (\Delta\theta/\Delta\lambda)(\Delta\nu/\nu_0)\lambda F$,最大有效焦斑数量为

$$N_{\text{max}} = D(\Delta\theta/\Delta\lambda)(\Delta\nu/\nu_0) = 2\beta N_c. \quad (4)$$

可见,具有匀滑效果的有效焦斑数量 $N = \min\{2\beta, 2\beta N_c\}$, SSD 的匀滑效果 $\delta_{\text{rms}} = 1/\sqrt{N}$ 。

2.2 集束多频调制 SSD 技术

高功率激光驱动装置可能采用 4 束或更多束激光集束聚焦打靶。为不失一般性,考虑 2 束子束叠加的情况。此时 2 束子束的近场振幅分布分别为 $E_0(x-x_0, y-y_0)$ 和 $E_0(x+x_0, y+y_0)$,其中 x_0 为 x 方向的空间平移量, y_0 为 y 方向的空间平移量,与前述推导过程相同,可得 2 束子束采用相同 CPP 时相干叠加的远场电场分布:

$$E_{\text{FF}} = 2\cos[2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)] \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta) E_{\text{CPP}}\left(f_y - \frac{n\alpha}{2\pi}\right) \exp\left(-i \frac{4\pi^2 f_{\text{m}t}}{\alpha} f_y\right), \quad (5)$$

式中 f_x 为 x 方向的空间频率。对比(5)式与(3)式可以看出,在单束匀滑焦斑的基础上,2 束子束叠加引入了一个余弦形式的振幅调制。

对于传统的多频调制 SSD 技术,单光束近场电场分布为

$$E = E_0(x,y) \exp\left[i \sum_{k=1}^N \beta_k \sin(2\pi f_{\text{m}k} t + \alpha_k y)\right], \quad (6)$$

式中 k 为调制器序数, β_k 为第 k 个调制器的调制深度, $f_{\text{m}k}$ 为第 k 个调制器的调制频率, α_k 为第 k 个调制器对应的光角色散。与前述推导过程类似,可得到采用相同 CPP 时 2 束子束叠加的远场电场分布:

$$E_{\text{FF}} = 2\cos[2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)] \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta_1) \delta\left(f_y - \frac{n\alpha_1}{2\pi}\right) \exp\left(-i \frac{4\pi^2 f_{\text{m}1} t}{\alpha_1} f_y\right) \otimes \cdots \otimes \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta_k) \delta\left(f_y - \frac{n\alpha_k}{2\pi}\right) \exp\left(-i \frac{4\pi^2 f_{\text{m}k} t}{\alpha_k} f_y\right) \otimes E_{\text{CPP}}(f_y), \quad (7)$$

单光束的匀滑效果 $\delta_{\text{rms}} = 1/\sqrt{N} = 1/\sqrt{\min\left\{\prod_{k=1}^n 2\beta_k, \sum_{k=1}^n 2\beta_k N_{ck}\right\}}$,余弦项表示 2 束子束干涉引入的振幅调制。

图 2 所示为集束多频调制 SSD 技术示意图,其中 WFL 为楔形聚焦透镜。单光束采用单频调制 SSD 技术,在相同带宽的条件下,采用不同调制频率的子束实现靶面光斑的匀滑。

对于集束多频调制 SSD 技术,2 束子束的远场电场分布分别为

$$E_{\text{FF1}} = \exp[-i2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)] \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta_1) E_{\text{CPP}}\left(f_y - \frac{n\alpha_1}{2\pi}\right) \exp\left(-i \frac{4\pi^2 f_{\text{m}1} t}{\alpha_1} f_y\right), \quad (8)$$

$$E_{\text{FF2}} = \exp[i2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)] \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta_2) E_{\text{CPP}}\left(f_y - \frac{n\alpha_2}{2\pi}\right) \exp\left(-i \frac{4\pi^2 f_{\text{m}2} t}{\alpha_2} f_y\right). \quad (9)$$

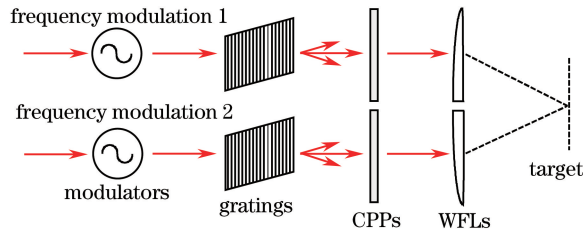


图 2 集束多频调制 SSD 技术示意图

Fig. 2 Diagram of bundle multiple-frequency modulation SSD technology

由于 2 束子束采用的调制频率不同,因此光谱成分不同,在 2 束子束间焦斑的叠加部分具有不同的频率,在时间积分上等效为非相干叠加,此时可以认为 2 束子束焦斑之间是不相关的。当 2 束子束光谱成分完全不同时,总的匀滑效果 $\delta_{rms} = 1/\sqrt{N_1 + N_2}$, 其中 N_1 和 N_2 分别为 2 束子束的有效焦斑数量,这说明集束多频调制 SSD 技术可以突破单光束最大有效光谱数量的限制,获得更好的匀滑效果。

3 匀滑效果分析

对于大型固体激光装置而言,由于光束的能量放大、倍频效率以及脉宽等的限制,波长带宽范围十分有限,并且物理研究对光谱宽度有一定的要求,因此在本课题组的数值模拟中系统的总带宽均相同。对于神光 III 主机装置^[11,28],输出激光中心波长为 351 nm,对应的带宽负载上限为 0.15 nm(模拟中取 0.1 nm),近场电场分布为方形超高斯分布,直径为 36 cm。由于神光 III 主机装置未采用集束聚焦打靶的方式,因此采用与 NIF 结构相似的参数^[29],选取 2×2 集束系统对角线上的 2 束相干子束,子束中心在 2 个垂直方向上的距离均为子束直径的 1.25 倍,近场光强分布如图 3 所示。此外,考虑到色散对过孔的影响,除特殊说明外,模拟中均采用相同的光栅参数,以保证过孔能力相同。图 4 所示为单频调制 SSD、传统多频调制 SSD 以及集束多频调制 SSD 技术调制频率的应用位置示意图。

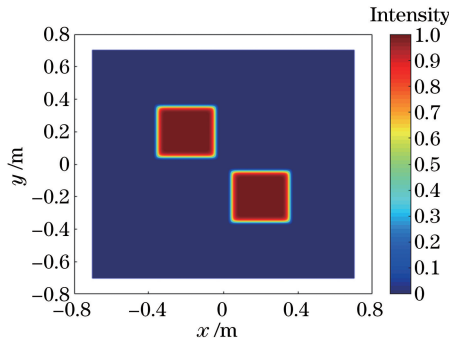


图 3 近场光强分布

Fig. 3 Distribution of near-field intensity

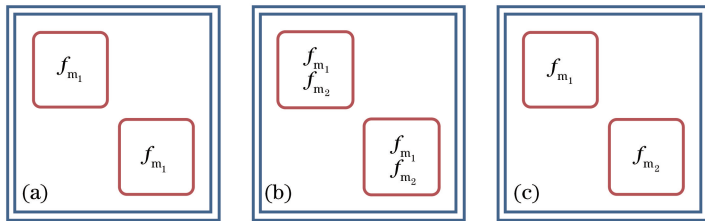


图 4 调制频率应用位置示意图。(a)单频调制 SSD 技术;(b)传统多频调制 SSD 技术;(c)集束多频调制 SSD 技术

Fig. 4 Diagrams of modulation frequency position. (a) Single-frequency modulation SSD technology, (b) traditional multiple-frequency modulation SSD technology; (c) bundle multiple-frequency modulation SSD technology

在实际的激光驱动装置中,一般通过对不同子束应用优化目标相同但细节分布不同的 CPP 技术来改善焦斑的均匀性。图 5 所示为采用不同 CPP 时单频调制 SSD 和集束多频调制 SSD 技术的焦斑方均根值

(RMS)随时间的变化,其中集束多频调制 SSD 技术的子束 1 的调制频率为 12.175 GHz,对应的色循环数为 1.2,子束 2 的调制频率分别为 10.146,8.697,7.610 GHz,对应的色循环数分别为 1,0.86,0.75,对应各调制频率,调制周期为 80~130 ps。由图 5 可知,单频调制 SSD 技术的焦斑 RMS 在一个调制周期时达到最小,并在最小值附近保持稳定,集束多频调制 SSD 技术的焦斑 RMS 在一个调制周期时小于单频调制 SSD 技术的焦斑 RMS,且仍在继续减小;采用集束多频调制 SSD 技术的靶面 RMS 比单频调制 SSD 技术的靶面 RMS 显著减小,相比于采用子束 1 调制频率的单频调制 SSD 技术,RMS 分别减小了 33.92%,35.69%和 36.38%,相比于采用子束 2 调制频率的单频调制 SSD 技术,RMS 分别减小了 31.65%,32.27%和 33.39%。

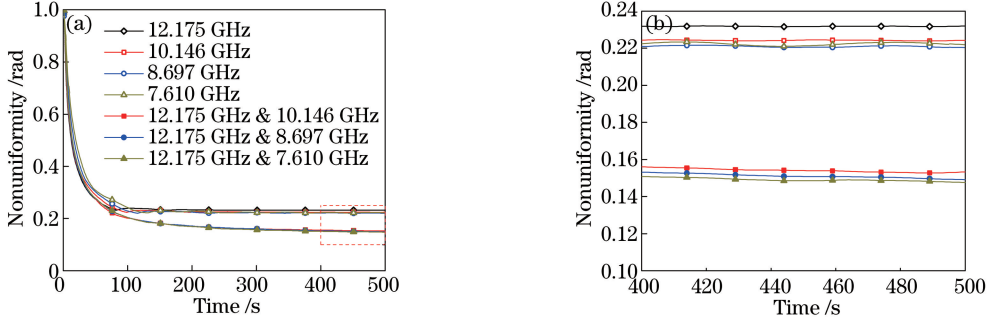


图 5 单频调制 SSD 和集束多频调制 SSD 技术焦斑光强不均匀度与时间的关系。(a) 0~500 ps;(b) 400~500 ps
Fig. 5 Relationships between nonuniformity of focal spot intensity and time for single-frequency modulation SSD technology and bundle multiple-frequency modulation SSD technology. (a) 0-500 ps; (b) 400-500 ps

当调制频率为 12.175,10.146 GHz,且对应的色循环数为 1.2 和 1 时,在相干和非相干条件下,传统多频调制 SSD 技术与集束多频调制 SSD 技术的焦斑 RMS 随时间的变化如图 6 所示。由图 6 可知,与传统多频调制 SSD 技术相比,集束多频调制 SSD 技术的焦斑 RMS 明显减小,约减小了 34.03%;此外,两种方法在非相干条件下的匀滑效果差别不大,但在相干条件下却存在着明显的区别,说明采用不同的 CPP 时,子束间的干涉仍会影响靶面光强分布的均匀性,而集束多频调制可以进一步减弱子束间的相干调制,增加有效光谱数量,获得更好的匀滑效果。

色循环数是 SSD 技术的重要参数,与焦斑轮廓、光束传输放大、激光过孔等有密切关系。以上给出的是在光栅参数相同的条件下,色循环数约为 1 时的结果。在改变光栅参数的条件下,传统多频调制 SSD 与集束多频调制 SSD 匀滑时间为 500 ps 时不均匀度随色循环数的变化如图 7 所示,图 8 为 2 种方法的光谱分布。由图 7 和图 8 可知,在色循环数较大时,传统多频调制 SSD 的匀滑效果优于集束多频调制 SSD 的匀滑效果,原因在于传统多频调制 SSD 的光谱成分比集束多频调制 SSD 的光谱成分丰富得多,光谱成分得到充分利用。当色循环数较小时,集束多频调制 SSD 的匀滑效果优于传统多频调制 SSD 的匀滑效果。这是因为

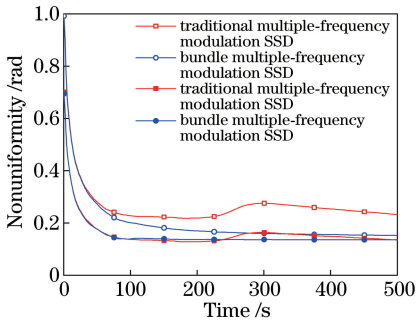


图 6 传统多频调制 SSD 与集束多频调制 SSD 技术焦斑光强不均匀度随时间的变化
Fig. 6 Variations of nonuniformity of focal spot intensity with time for traditional multiple-frequency modulation SSD technology and bundle multiple-frequency modulation SSD technology

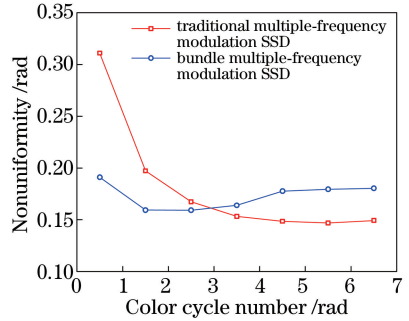


图 7 传统多频调制 SSD 与集束多频调制 SSD 技术焦斑光强不均匀度与色循环数的关系
Fig. 7 Relationships between nonuniformity of focal spot and color cycle number for traditional multiple-frequency modulation SSD technology and bundle multiple-frequency modulation SSD technology

传统多频调制 SSD 的光谱成分没有得到充分利用,并且 2 束子束的频率成分完全相同,子束具有很强的相干性,而集束多频调制 2 束子束的频率成分不同,因此子束间的相干程度显著降低,所有频率成分均能得到充分利用。

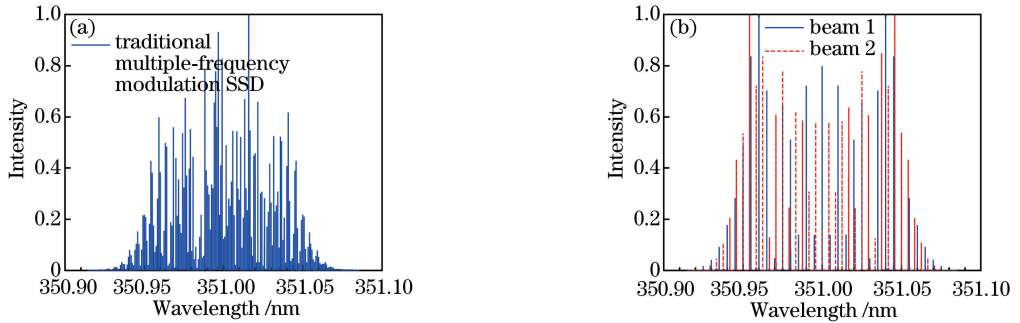


图 8 (a)传统多频调制 SSD 与(b)集束多频调制 SSD 技术的光谱分布

Fig. 8 Spectrum distributions for (a) traditional multiple-frequency modulation SSD technology and (b) bundle multiple-frequency modulation SSD technology

当色循环数较大时,在传统多频调制 SSD 技术的基础上,通过对子束应用全部或部分不同的调制频率,使 2 束子束的光谱分布不同,可以将传统多频调制 SSD 技术与集束多频调制 SSD 技术结合起来进一步改善远场分布的均匀性,图 9 所示为传统、集束多频调制 SSD 技术结合使用时调制频率应用位置的示意图。图 10 给出了匀滑时间为 500 ps 时传统多频调制 SSD 技术以及传统、集束多频调制 SSD 技术结合使用时的匀滑焦斑。由图 10 可知,传统多频调制 SSD 技术的焦斑光强 RMS 为 0.1468,结合使用时的焦斑光强 RMS 为 0.1140,比前者约减小了 22.34%。

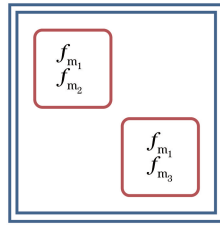


图 9 传统多频调制 SSD 与集束多频调制 SSD 技术结合使用的调制频率应用位置示意图

Fig. 9 Diagram of modulation frequency position for traditional multiple-frequency modulation SSD technology combined with bundle multiple-frequency modulation SSD technology

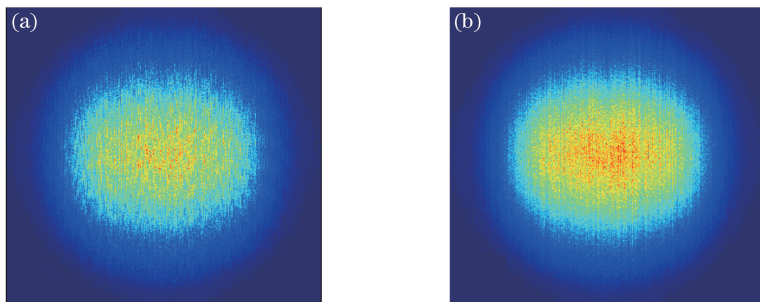


图 10 匀滑时间为 500 ps 时的焦斑。(a)传统多频调制 SSD 技术;(b)传统多频调制 SSD 与集束多频调制 SSD 技术结合使用

Fig. 10 Focal spot at smoothing time of 500 ps. (a) Traditional multiple-frequency modulation SSD technology;

(b) traditional multiple-frequency modulation SSD technology combined with bundle multiple-frequency modulation SSD technology

4 结 论

针对高功率激光驱动装置集束聚焦方式需要进一步改善靶面辐照均匀性,以及解决激光等离子体相互

作用问题的需求,提出了一种集束多频调制 SSD 技术,并与传统多频调制 SSD 技术进行了对比分析。提出的集束多频调制 SSD 技术在 SSD 技术的基础上对集束聚焦中的各子束应用不同的调制频率,从而丰富了光谱成分,并进一步降低了靶面光强分布的不均匀度。相比于传统多频调制 SSD 技术,所提技术的特点在于子束采用单频调制 SSD 技术,结构简单,减少了调制器的使用,在降低系统复杂程度的同时节约了成本,当子束增多时,该特点更加明显。相比于单频调制 SSD 技术,所提技术显著抑制了子束间的干涉调制,明显改善靶面光强分布的均匀性,RMS 减小了 32%~36%;与传统多频调制 SSD 技术相比,所提技术使得子束间的干涉调制程度明显降低,且在色循环数接近于 1 时,即在更接近 SSD 技术实际应用的条件下,采用相同调制频率的集束多频调制 SSD 技术时 RMS 约减小了 34.03%,在色循环数较大时,所提技术与传统多频调制 SSD 技术的结合使用可使 RMS 进一步减小 22.34%。

参 考 文 献

- [1] Kirkwood R K, Moody J D, Kline J, *et al.* A review of laser-plasma interaction physics of indirect-drive fusion[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2013, 55(10): 103001.
- [2] 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.
- [3] Lin Y, Kessler T J, Lawrence G N. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profiles[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(7): 764-766.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester. Phase conversion using distributed polarization rotation[R]. *LLE Review*, 1990, 45: 1-12.
- [7] Dixit S N, Munro D, Murray J R, *et al.* Polarization smoothing on the National Ignition Facility[C]. *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 2006, 133(1): 717-720.
- [8] 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.
- [9] Spaeth M L, Manes K R, Bowers M, *et al.* National Ignition Facility laser system performance[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 366-394.
- [10] Walraet F, Riazuelo G, Bonnaud G. Propagation in a plasma of a laser beam smoothed by longitudinal spectral dispersion[J]. *Physics of Plasmas*, 2003, 10(3): 811-819.
- [11] Zhang R, Jia H T, Tian X C, *et al.* Research of beam conditioning technologies using continuous phase plate, Multi-FM smoothing by spectral dispersion and polarization smoothing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 85: 38-47.
- [12] Kruschwitz B E, Kelly J H, Dorrer C, *et al.* Commissioning of a multiple-frequency modulation smoothing by spectral dispersion demonstration system on OMEGA EP[C]. *SPIE*, 2013, 8602: 86020E.
- [13] Hohenberger M, Shvydky A, Marozas J A, *et al.* Optical smoothing of laser imprinting in planar-target experiments on OMEGA EP using multi-FM 1-D smoothing by spectral dispersion[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(9): 092702.
- [14] 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.
- [15] Marozas J A, Collins T J B, Zuegel J D, *et al.* Continuous distributed phase-plate advances for high-energy laser systems[J]. *Journal of Physics*, 2016, 717(1): 012107.
- [16] 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.
- [17] Wen Shenglin, Tang Caixue, Zhang Yuanhang, *et al.* Effects of least spatial period on the fabrication and performance of continuous phase plate[J]. *Chinese J 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.
- [18] Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester. Two-dimensional SSD on OMEGA[R]. *LLE Review*, 1996,

- 69: 1-10.
- [19] Miyaji G, Miyanaga N, Urushihara S, *et al.* Three-directional spectral dispersion for smoothing of a laser irradiance profile[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(9): 725-727.
- [20] 李平. 高功率固体激光驱动器靶面光强时空耦合控制技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2008.
- [21] Li Ping, Su Jingqin, Ma Chi, *et al.* Effect of smoothing by spectral dispersion on the spatial spectrum of focal spot[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(9): 6210-6215.
李平, 粟敬钦, 马驰, 等. 光谱色散匀滑对焦斑光强频谱的影响[J]. *物理学报*, 2009, 58(9): 6210-6215.
- [22] Zhong Zheqiang, Hou Pengcheng, Zhang Bin. 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.
- [23] Li Tengfei, Hou Pengcheng, Zhang Bin. Parameters optimization for radial smoothing based on optical Kerr effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1114002.
李腾飞, 侯鹏程, 张彬. 基于光克尔效应的径向匀滑方案参数优化[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1114002.
- [24] Wen Ping, Li Zelong, Zhong Zheqiang, *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.
- [25] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, *et al.* Description of the NIF laser[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.
- [26] Temporal M, Canaud B, Garbett W J, *et al.* Numerical analysis of the direct drive illumination uniformity for the Laser MegaJoule facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(1): 012710.
- [27] Temporal M, Canaud B, le Garrec B J. Irradiation uniformity and zooming performances for a capsule directly driven by a 32×9 laser beams configuration[J]. *Physics of Plasmas*, 2010, 17(2): 022701.
- [28] Li Fuquan, Han Wei, Wang Fang, *et al.* Research status of final optics assembly in high-power laser facility[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 060002.
李富全, 韩伟, 王芳, 等. 高功率激光驱动器终端光学组件研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 060002.
- [29] Baisden P A, Atherton L J, Hawley R A, *et al.* Large optics for the National Ignition Facility[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 295-351.