

基于宽带激光拍频的瞬时束匀滑技术

吴世江, 熊皓, 张寅瑞, 钟哲强, 张彬*

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 针对高功率激光装置对靶面辐照均匀性的需求,提出了一种基于宽带激光拍频的瞬时束匀滑技术。激光集束采用宽带激光,利用连续相位板对焦斑包络进行控制,并结合共轭螺旋相位板使得集束中各子束在焦平面处拍频产生旋转周期不同、位置各异的快速运动散斑。合理选择宽带光参数可使得散斑的旋转周期在皮秒至亚皮秒量级,从而达到瞬时匀滑焦斑的目的。通过建立基于宽带激光拍频的瞬时束匀滑技术物理模型,模拟分析了关键参数包括激光带宽和谱线类型对焦斑束匀滑特性的影响和规律,并与双频单色激光拍频技术作了比较分析。研究表明,通过合理选取光源谱线类型或增大激光带宽,所提技术可在降低系统要求的基础上增强对激光等离子体不稳定性的抑制,使焦斑实现瞬时匀滑并获得较好的均匀性。

关键词 激光光学; 惯性约束聚变; 束匀滑; 宽带激光; 激光等离子体不稳定性

中图分类号 TN241

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221519

1 引言

在激光驱动的惯性约束聚变(ICF)装置中,靶丸的均匀对称压缩对激光辐照均匀性提出了极高的要求^[1]。在激光辐照均匀性较差的情况下,点火容易因流体不稳定性及激光等离子体不稳定性(LPI)等非线性效应^[2]而失败。神光Ⅲ原型装置上开展的黑腔物理实验^[3]表明,LPI中背向受激布里渊散射(SBS)和背向受激拉曼散射(SRS)是造成ICF实验中能量损失的主要原因之一。为达到靶丸均匀对称压缩和LPI抑制的目的,已发展了多种束匀滑技术来改善激光辐照的均匀性,如:以连续相位板(CPP)、阵列透镜(LA)为代表的空域匀滑技术,可以有效控制焦斑包络和改善焦斑大尺寸均匀性^[4-5];以光谱角色散(SSD)、诱导空间非相干(ISI)为代表的时域匀滑技术^[6-9],可以在积分时间内抹平散斑,改善焦斑均匀性;控制光束偏振使光束非相干叠加以减少热斑的偏振匀滑(PS)技术^[10]。

目前,国际上主流的束匀滑方案是将PS、SSD和CPP联用^[11]。然而,受限于电光调制晶体的调制频率^[12],SSD的周期长达数十皮秒,难以实现对响应时间为数皮秒甚至亚皮秒的LPI的有效抑制。本课题组曾提出以径向匀滑(RS)^[13]技术和角向匀滑(AS)^[14]技术为代表的多种快速匀滑方案^[15-16]。RS技术利用光克尔效应对子束附加时变球面相位调制,使焦斑在皮秒时间尺度快速变化,但对泵浦光源要求苛刻,在工程

实现上还存在困难。AS技术利用具有差异空间相位调制的双频单色激光拍频,产生皮秒时间尺度快速旋转的动态图样,进而在积分时间内匀滑焦斑,但尚未考虑到对光束带宽的利用。Zhao等^[17]指出使用宽带激光更有利于抑制LPI,减少背向散射和超热电子的产生。中国工程物理研究院上海激光等离子体所在宽带激光领域开展了大量工作,通过采用超辐射源、光谱预补偿等方法在钹玻璃放大器上获得了高增益的宽带光输出,已可产生千焦耳级基频宽带激光^[18-21],为ICF装置中宽带光的使用提供了可能。由于大带宽激光在抑制SRS和SBS等LPI效应方面极具潜力^[22-24],美国罗切斯特大学激光能量学实验室(LLE)正致力于研发高功率、三倍频(波长为 $\lambda=351\text{ nm}$)和大带宽($\Delta\lambda/\lambda>1\%$,其中 $\Delta\lambda$ 为激光带宽)的新一代激光器^[25]。

考虑到宽带光在瞬时匀滑和LPI抑制中的潜在应用,提出了一种基于宽带激光拍频的瞬时束匀滑技术。该技术采用中心波长为351 nm的宽带光作为激光集束中的光源,结合共轭螺旋相位板(SPP)使得集束中各个子束在焦平面拍频产生位置各异、旋转周期不同的散斑。在充分利用光源的宽带特性,并采用CPP对焦斑包络进行控制后,可实现焦斑的瞬时匀滑。与传统的拍频技术相比,所提技术对子束的光程差和初始相位无严格要求,可避免对子束的选频和锁相,且进一步提高了焦斑的匀滑速率。通过相关物理模型的建立,研究了焦斑的瞬时匀滑特性,并进一步分析了光源

收稿日期: 2022-07-25; 修回日期: 2022-08-28; 录用日期: 2022-10-08; 网络首发日期: 2022-10-18

基金项目: 国家重大专项应用基础项目(JG2020376)

通信作者: *zhangbinff@sohu.com

带宽、子束谱线类型等关键参数对束匀滑特性的影响。

2 理论模型

以美国国家点火装置(NIF)为例,图 1 给出了基于宽带激光拍频的瞬时束匀滑技术的示意图。

如图 1 所示,在 2×2 激光集中,正交偏振控制板将带宽相同的 4 束宽带激光光子束划分为两两相干叠加

的子束对。子束 1 和子束 2 为一对,子束 3 和子束 4 为一对。每一子束对均采用相同 CPP 控制焦斑包络,并通过共轭 SPP 为子束附加不同的空间相位调制。值得指出的是,由于宽带激光丰富的频率成分和各子束间存在不同的空间相位调制,故各子束经楔形透镜后会在其焦平面拍频并产生旋转周期不同、位置各异的散斑,从而在皮秒至亚皮秒内提高靶面辐照均匀性。

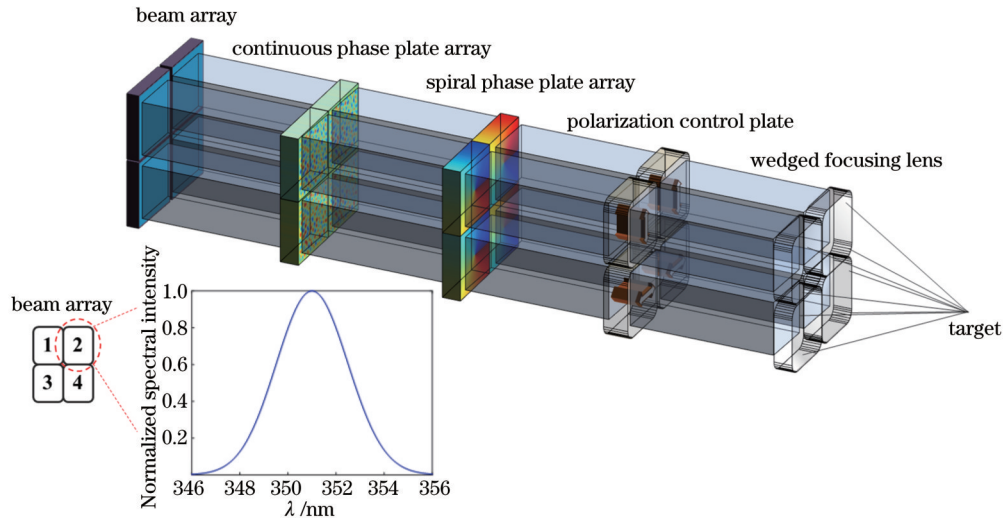


图 1 基于宽带激光拍频的瞬时束匀滑技术的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of instantaneous beam smoothing technique based on beat frequency of broadband laser

将瞬时宽带激光场表征为给定带宽内不同中心频率的单色激光场之和^[26],即

$$E \approx \sum_{n=1}^D A_n \exp[i(2\pi\nu_n t + \varphi_n)], \quad (1)$$

式中: D 为近似模拟连续光谱的离散谱线数(单色激光

数目); ν_n 为第 n 个单色激光的频率; A_n 和 φ_n 分别为单色激光场的振幅和初相。其中, ν_n 在光谱范围内等间隔选取, φ_n 为 $[0, 2\pi]$ 中的随机值。当光源频谱形状为高斯线型或平顶线型时,各单色激光的振幅 A_n ^[26]可表示为

$$A_n = \begin{cases} \sqrt{\frac{2 \ln 2}{\Delta\nu} \frac{d\nu}{\sqrt{\pi}} \exp\left[-4 \ln 2 \left(\frac{\nu_n - \nu_c}{\Delta\nu}\right)^2\right]}, & \text{spectral shape is Gaussian shape} \\ \sqrt{\frac{d\nu}{\Delta\nu} \text{rect}\left(\frac{\nu_n - \nu_c}{\Delta\nu}\right)}, & \text{spectral shape is flat top shape} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: ν_c 为宽带激光的中心频率; $\Delta\nu$ 为宽带激光的频带宽度(半峰全宽); $d\nu$ 为两相邻频率成分之间的间隔。对于 351 nm 中心波长的宽带激光,当带宽不大于 1% 且 $D \geq 50$ 时,利用式(1)所描述的光源可获得与连续频谱光源近似的相干性^[26],且靶面束匀滑效果受 D 值的影响远小于其他关键参数。

假设入射激光的空间分布为超高斯型,第 j 个宽带激光光子束的近场光场分布为

$$E_j(x, y, t) = \sum_{n=1}^D A_{j,n} \times \exp\left\{-\left[\frac{x^{(2N)}}{w_x^{(2N)}} + \frac{y^{(2N)}}{w_y^{(2N)}}\right]\right\} \times [i(2\pi\nu_{j,n} t + \varphi_{j,n})], \quad (3)$$

式中: (x, y) 为近场坐标; N 为激光束的超高斯阶数; w_x 和 w_y 为激光束在 x, y 方向的 $1/e$ 束腰半径; t 为时间变量。

子束经过相位板后将被附加上相应的相位调制,图 1 所示的宽带激光传输过程可以近似解耦为带宽内所有单色激光的独立传输和所得靶面光场的复振幅叠加^[27]。结合 Collins 公式,第 j 个宽带激光光子束在焦面的光场分布可表示为

$$E_{i,j}(x_t, y_t, t) = \sum_{n=1}^D \frac{A_{j,n}}{i\lambda_{j,n}f} \exp(ik_{j,n}z) \exp[i(2\pi\nu_{j,n}t + \varphi_{j,n})] \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\{i[\varphi_{\text{SPP},j}(x, y) + \varphi_{\text{CPP},j}(x, y)]\} \times \exp\left\{-\left[\frac{x^{(2N)}}{z\omega_x^{(2N)}} + \frac{y^{(2N)}}{z\omega_y^{(2N)}}\right]\right\} \times \exp\left[-\frac{ik_{j,n}}{f}(xx_t + yy_t)\right] dx dy, \quad (4)$$

式中: $\varphi_{\text{CPP},j}(x, y)$ 和 $\varphi_{\text{SPP},j}(x, y)$ 分别为 CPP 和 SPP 所附加的空间相位调制; (x_t, y_t) 为远场空间坐标; $\lambda_{j,n}$ 和 $k_{j,n}$ 分别为频率成分的波长和波数; f 为焦距。

在积分时间 Δt 内, 焦面光强分布可表示为

$$\bar{I}_t = \frac{1}{\Delta t} \sum_{j=1,3} \int_0^{\Delta t} |E_{i,j}(t) + E_{i,j+1}(t)|^2 dt. \quad (5)$$

$$I_{1,2} = (E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^* = \sum_{p=1}^D \sum_{q=1}^D A_{1,p} A_{1,q} \cos[2\pi(\nu_{1,p} - \nu_{1,q})t] + A_{2,p} A_{2,q} \cos[2\pi(\nu_{2,p} - \nu_{2,q})t] + 2A_{1,p} A_{2,q} \cos[2\pi(\nu_{1,p} - \nu_{2,q})t], \quad (6)$$

式中: p 和 q 表示两宽带子束中的某一频率成分。结合式(4)和式(6)可知, 空间相位差异和宽带子束丰富的频率成分会引起子束拍频, 从而在焦平面产生周期不同、位置各异的旋转散斑。其中, 任一散斑的旋转周期可以表示为

$$T_{i,p;j,q} = \frac{1}{(\nu_{i,p} - \nu_{j,q})} = \frac{\lambda_{i,p}\lambda_{j,q}}{c \cdot (\lambda_{i,p} - \lambda_{j,q})}, \quad (7)$$

式中: i 为干涉子束序号; c 为光速。式(7)表明, 散斑的旋转周期由各频率成分之间的频差(波长差)决定, 故合理选择带宽可缩短散斑的旋转周期至皮秒、亚皮秒量级, 进而实现焦斑的瞬时匀滑。

采用光通量对比度(C_o)曲线和 FOPAI(F_o)曲线对焦斑均匀性进行评价^[28], 二者的公式为

$$C_o = \frac{\sqrt{\sum_i \sum_j [I_{i,j}(x_t, y_t) - I_{\text{mean}}(x_t, y_t)]^2} / (N_x N_y)}{I_{\text{mean}}(x_t, y_t)}, \quad (8)$$

$$F_o = \frac{\int_{A'} I(x_t, y_t) dx dy}{\int_A I(x_t, y_t) dx dy}, \quad (9)$$

式中: N_x 和 N_y 分别为光场在 x 方向和 y 方向上的采样点数; $I_{\text{mean}}(x_t, y_t)$ 为焦面平均光强; $I_{i,j}(x_t, y_t)$ 为采样点处光强; A 为焦面观察区域; A' 为焦面观察区域中 $I(x, y) > I_{\text{mean}}$ 的区域。光通量对比度表征了焦斑的均匀性, 其值越小, 焦斑各点处的光强越接近光强平均值, 焦斑越均匀。FOPAI 表征了焦斑中的热斑占比, FOPAI 曲线左移表明热斑占比降低。

3 束匀滑特性分析

在进行数值模拟时, 使用参数为: 离散谱线数为 $D=71$; 子束超高斯阶数为 $N=6$; 子束 $1/e$ 束腰半径为 186 mm ; 透镜焦距为 7.7 m ; 鉴于 NIF 中利用温度调谐

为不失一般性, 以 $E_j(x, y, t) = \sum_{n=1}^D A_{j,n} \exp(i2\pi\nu_{j,n}t)$ 的形式表示子束 j 在焦面的光场以观察焦斑光强变化的时间特性。当两偏振相同的子束 ($j=1, 2$) 进行相干叠加时, 焦面处的光强可表示为

方法可实现不同环带激光亚纳米量级中心波长的调谐^[29], 利用双频单色激光拍频技术选取子束三倍频后的中心波长为 $\lambda_1 = \lambda_3 = 351.0 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = \lambda_4 = 351.1 \text{ nm}$; 对于宽带激光拍频技术, 为充分体现光源的宽带特性, 选取子束三倍频后的中心波长为 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 351.0 \text{ nm}$, 带宽为 $\Delta\lambda = 3.5 \text{ nm}$; 光源的频谱形状为高斯型; 光通量对比度积分区域取 80% 环围能量区域。

3.1 焦斑特性分析

为便于分析焦斑的运动特性, 暂时忽略 CPP 的空间相位整形作用, 以单一子束对为例, 计算了拓扑荷数为 $l = \pm 2$ 的 SPP 后的焦斑图样。

图 2(a) 和图 2(b) 分别给出了双频单色激光拍频技术 ($\lambda_1 = 351 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 351.1 \text{ nm}$) 和宽带激光拍频技术 ($\lambda_1 = \lambda_2 = 351 \text{ nm}$, $\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2 = 3.50 \text{ nm}$) 在 4 ps 积分时间内的焦斑光强分布。其中, $\Delta\lambda_{1,2} = \lambda_{1,2} \cdot \Delta\nu_{1,2} / \nu_{1,2}$ 为子束的波长宽度。可以看出, 在不使用 CPP 时, 双频单色激光拍频技术和宽带激光拍频技术产生的焦斑均会发生快速旋转, 但后者无显著周期, 且 4 瓣亮斑之间的暗区在部分时刻变得模糊, 甚至完全消失。结合式(7)可知, 焦斑暗区的消失现象是由多个频率两两组合拍频引起旋转周期不同, 导致光斑相互错位造成的。需要指出的是, 上述两种技术中焦斑光强的快速变化均有利于 LPI 中成丝的抑制^[30]。所提技术中因宽带光的引入, 旋转光斑在空间上的分布范围更大, 峰值强度更低, 故在抑制成丝方面更具优势。

进一步考虑 CPP 对各子束焦斑的整形作用, 图 3(a) 和图 3(b) 分别给出了集束情况下上述两种技术在 1 ps 积分时间内的远场焦斑图, 图 3(c)~(e) 则分别给出了两种技术的焦斑在不同积分时间内的光通量对比度曲线、 1 ps 积分时间的 FOPAI 曲线和功率谱密度 (PSD)^[8] 曲线。

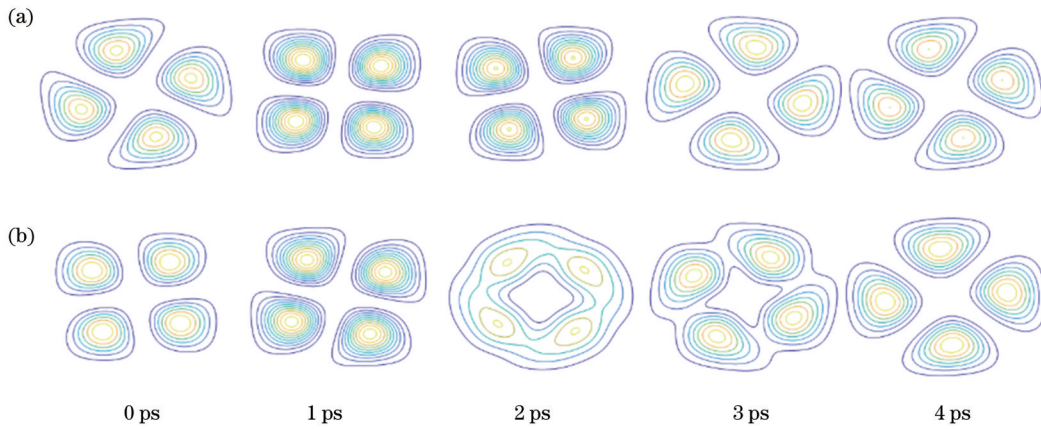


图 2 不使用 CPP 时不同技术的焦斑光强分布。(a) 双频单色激光拍频技术；(b) 宽带激光拍频技术；

Fig. 2 Focal spot intensity distributions obtained by different techniques without CPP. (a) Dual-frequency monochromatic laser beat frequency technique; (b) broadband laser beat frequency technique

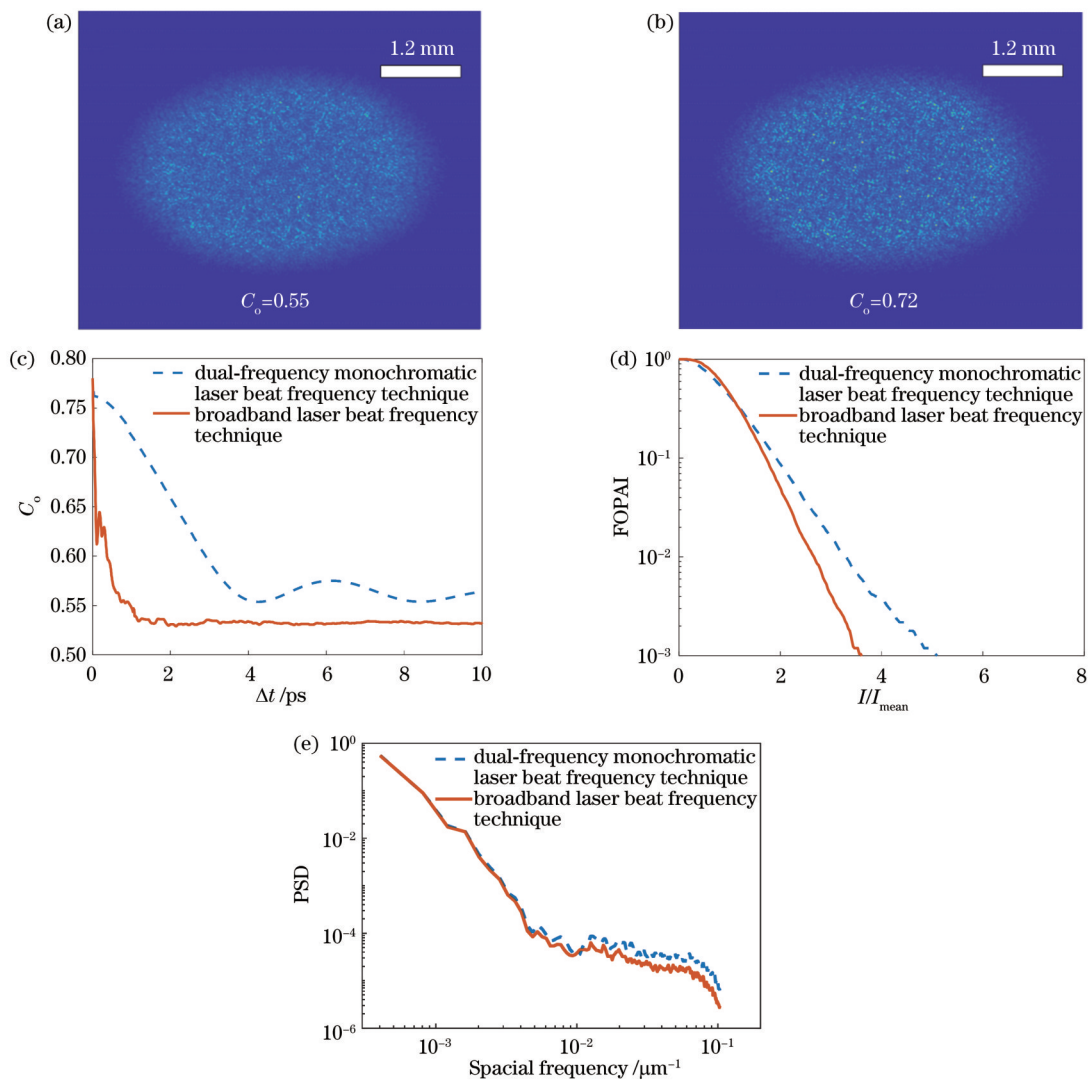


图 3 不同束匀滑技术的匀滑特性。(a) 宽带激光拍频技术得到的焦斑；(b) 双频单色激光拍频技术得到的焦斑；(c) 光通量对比度曲线；(d) FOPAI 曲线；(e) PSD 曲线

Fig. 3 Smoothing characteristics of different beam smoothing techniques. (a) Focal spot obtained by broadband laser beat frequency technique; (b) focal spot obtained by dual-frequency monochromatic laser beat frequency technique; (c) luminous flux contrast curve; (d) FOPAI curve; (e) PSD curve

对比图 3(a)和图 3(b)可知, 1 ps 时刻处两种技术的焦斑包络基本一致(均为椭圆光斑), 且宽带激光拍频技术得到的焦斑的均匀性更好, 表明宽带激光的使用不会破坏焦斑的包络。从图 3(c)可以看出: 宽带激光拍频技术因其宽带特性, 获得了亚皮秒的匀滑速率和较好的焦斑均匀性; 初始时刻宽带激光拍频技术的对比度曲线随时间的变化相对无序, 这是因为散斑除旋转运动外还会受到时间强度的调制, 这与文献[31]中初始相位随机的宽带光源在时域上表现为不同峰值和持续时间的时间散斑一致。

进一步观察 1 ps 积分时间内的 FOPAI 曲线可知, 实线较虚线明显左偏, 表明此时宽带激光拍频技术的高能散斑数更少。图 1(e)中的 PSD 曲线则表明, 宽带激光拍频技术中空间高频成分的功率占比更低, 焦斑的小尺度不均匀性降低。值得指出的是, 大带宽的宽带激光因不同频率成分独立, 相比于单色光而言, 不仅可使各频率成分的峰值强度有所下降, 还可有效破坏 SRS 和 SBS 等效应所要求的波矢匹配条件^[17], 有利于实现 LPI 抑制。

此外, 与双频单色激光拍频技术对激光相干性的要求不同, 所提技术不要求对干涉子束对的光程差和初始位相进行严格控制, 从而降低了对系统的要求, 提高了可行性。然而, 所提方法得到的焦斑的均匀性劣于采用阶梯反射镜的 ISI 方案^[9,21]。值得进一步指出的是, 时间积分后的光场最终趋向于各个独立子束非相干叠加的结果^[32], 即 n 个独立光束非相干叠加后对比度降为原来的 $1/\sqrt{n}$ 。因此, 增加集束中独立的子束数目(相当于增加非相干叠加的子束数目)可使所提技术的焦斑均匀性得到进一步改善。下面讨论关键参数对焦斑匀滑特性的影响和规律, 包括激光带宽和光源谱线类型。

3.2 激光带宽

在宽带激光拍频技术中, 不同的激光带宽决定了

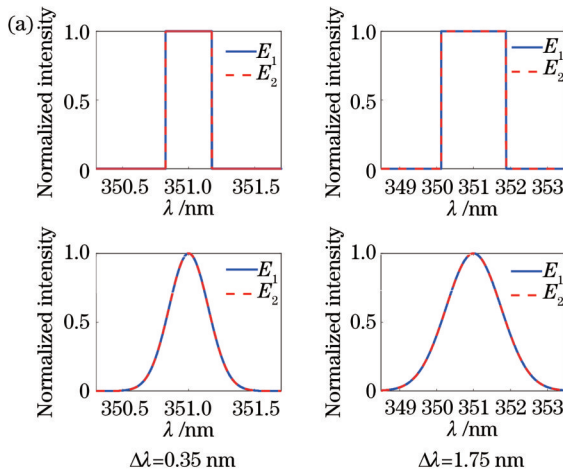


图 5 不同带宽时平顶线型和高斯线型宽带激光的频谱和光通量对比度曲线。(a) 频谱; (b) 光通量对比度曲线

Fig. 5 Spectra and luminous flux contrast curves for flat top and Gaussian broadband lasers under different bandwidths. (a) Spectra; (b) luminous flux contrast curves

焦斑的均匀性和匀滑速率。图 4 给出了高斯线型不同激光带宽下, 10 ps 积分时间内焦斑光通量对比度随时间的变化。

从图 4 可以看出, 焦斑的匀滑速率随激光带宽的增大而明显增大, 但稳定的光通量对比度略微降低, 表明增大光源带宽对提升焦斑匀滑速率作用明显, 但对稳定的焦斑均匀性影响较小。分析其原因在于: 1) 由式(7)可知, 光源带宽的增大会导致旋转周期更短的散斑产生, 根据能量守恒定律, 缓慢变化散斑的部分会有所减小, 故随着带宽的增大散斑向着更高的速度运动, 焦斑的匀滑速率得到显著提升; 2) 当带宽增大时, 旋转周期更短的散斑将会与旋转周期更长的散斑发生部分重叠或错位, 进而改善焦斑均匀性。然而, 由于光源的相对带宽($\Delta\lambda/\lambda$)较小, 各频率成分的焦斑分布差异不大, 故焦斑均匀性的总体改善程度较小。

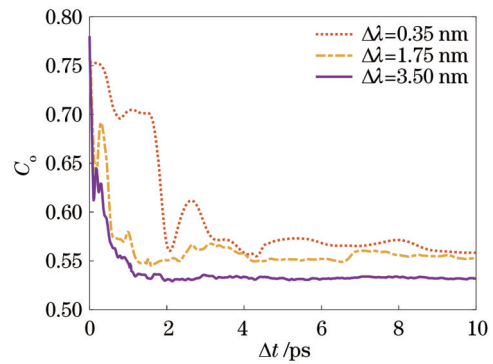
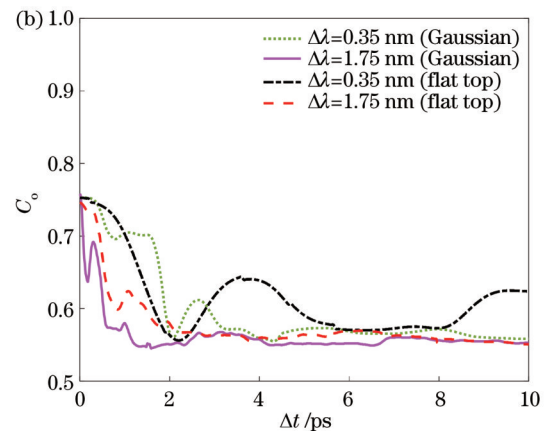


图 4 不同激光带宽下的光通量对比度曲线

Fig. 4 Luminous flux contrast curves under different laser bandwidths

3.3 谱线类型

在分析了激光带宽对焦斑的影响后, 进一步计算了不同谱线类型时焦斑的匀滑特性。图 5(a)给出了不同带宽时高斯线型和平顶线型光源的频谱图, 图 5(b)



给出了 10 ps 积分时间内相应的光通量对比度曲线。

从图 5(b)可以看出:当带宽为 $\Delta\lambda=0.35$ nm 时,高斯线型宽带激光的对比度曲线更快达到稳定匀滑(2 ps 左右),而此时平顶线型的对比度仍有较大起伏;在进一步增大光源带宽后,所有焦斑在积分时间内均达到稳定匀滑,且最终稳定的 C_v 值几乎相同,这表明光源类型的选择对焦斑最终的均匀性影响较小,但对焦斑的匀滑速率影响显著。分析光源频谱可知,这一差异结果应是两种光源谱线涵盖的光谱范围不同所致的。在光源带宽(半峰全宽)相同的情况下,高斯线型的谱线涵盖的光谱范围更广,在子束拍频时会产生旋转周期更短的散斑,达到类似于增大光源带宽的效果。然而,边频能量较低会导致焦斑的均匀性变化较小。因此,在选择光源类型时,应充分考虑光源的宽带特性,在带宽相同的情况下尽可能选择谱线范围更广的宽带光源,这样才能达到快速匀滑焦斑的目的。

4 结 论

针对高功率激光装置对靶面辐照均匀性的需求,提出了一种基于宽带激光拍频的瞬时匀滑技术。该技术采用宽带光作为集束光源,并通过共轭 SPP 和 CPP 的共同作用,使集束中各子束在靶面产生旋转周期不同、位置各异的快速运动散斑,从而使得焦斑在皮秒甚至亚皮秒时间尺度内达到稳定匀滑。与双频单色激光拍频技术相比,所提技术通过宽带光源自身内部不同频率成分的拍频叠加,使散斑在皮秒量级时间尺度内快速旋转,不仅可以实现焦斑的瞬时匀滑和更好的辐照均匀性,还有望增强对 LPI 的抑制。此外,所提技术不要求对种子光源的初始相位和光程差进行控制,且不需要对种子光源进行选频,故更有利于工程实现。在此基础上,模拟分析了关键参数对焦斑匀滑特性的影响。结果表明,采用高斯线型光源或增大激光带宽的方式可以加速焦斑匀滑,进而改善焦斑的均匀性。

参 考 文 献

- [1] Craxton R S, Anderson K S, Boehly T R, et al. Direct-drive inertial confinement fusion: a review[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(11): 110501.
- [2] Krueer W L. The physics of laser plasma interactions[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018: 74-93.
- [3] 杨冬, 李三伟, 李志超, 等. 神光 III 原型黑腔物理实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(3): 032014. Yang D, Li S W, Li Z C, et al. Hohlräum physics study on Shenguang-III prototype[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(3): 032014.
- [4] 朱应成, 郭融, 张军勇, 等. 全频段控制下连续相位板的优化设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0723001. Zhu Y C, Wu R, Zhang J Y, et al. Optimal design for continuous phase plate under segmental control across full-spectrum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0723001.
- [5] Deng X, Liang X, Chen Z, et al. Uniform illumination of large targets using a lens array[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(3): 377-381.
- [6] 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.
- [7] Lehmburg R H, Schmitt A J, Bodner S E. Theory of induced spatial incoherence[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(7): 2680-2701.
- [8] 张鑫, 熊皓, 钟哲强, 等. 诱导空间非相干和消衍射透镜阵列用方式束匀滑方案的腔壁辐照特性分析及优化[J]. *中国激光*, 2022, 49(4): 0405002. Zhang X, Xiong H, Zhong Z Q, et al. Analysis and optimization of irradiation characteristics of laser quads on hohlraum wall based on broadband laser beams smoothed using induced spatial incoherence and de-diffraction lens array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(4): 0405002.
- [9] 李福建, 高妍琦, 赵晓晖, 等. 诱导空间非相干束匀滑技术的近区特性及改善技术[J]. *物理学报*, 2018, 67(17): 175201. Li F J, Gao Y Q, Zhao X H, et al. Near-field character and improvement technology of induced spatial incoherence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(17): 175201.
- [10] Tsubakimoto K, Nakatsuka M, Nakano H, et al. Suppression of interference speckles produced by a random phase plate, using a polarization control plate[J]. *Optics Communications*, 1992, 91(1/2): 9-12.
- [11] Moses E I, Lindl J D, Spaeth M L, et al. Overview: development of the national ignition facility and the transition to a user facility for the ignition campaign and high energy density scientific research[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 1-24.
- [12] 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.
- [13] 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. 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.
- [14] 田博宇, 钟哲强, 隋展, 等. 基于涡旋光束的超快速角向集束匀滑方案[J]. *物理学报*, 2019, 68(2): 024207. Tian B Y, Zhong Z Q, Sui Z, et al. Ultrafast azimuthal beam smoothing scheme based on vortex beam[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(2): 024207.
- [15] 黄媛, 张寅瑞, 钟哲强, 等. 基于涡旋圆偏振光干涉的偏振快速旋转束匀滑方案[J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0905003. Huang Y, Zhang Y R, Zhong Z Q, et al. Rapid polarization rotation smoothing scheme based on interference of circularly polarized vortex beamlets[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0905003.
- [16] 邹冬岩, 熊皓, 钟哲强, 等. 基于相位板旋转排布的超快束匀滑方案[J]. *中国激光*, 2022, 49(4): 0405003. Zou D Y, Xiong H, Zhong Z Q, et al. Ultrafast beam smoothing scheme based on rotation arrangement of phase plates[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(4): 0405003.
- [17] Zhao Y, Weng S M, Chen M, et al. Effective suppression of parametric instabilities with decoupled broadband lasers in plasma[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(11): 112102.
- [18] Cui Y, Gao Y Q, Rao D X, et al. High-energy low-temporal-coherence instantaneous broadband pulse system[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2859-2862.
- [19] Ji L L, Zhao X H, Liu D, et al. High-efficiency second-harmonic generation of low-temporal-coherent light pulse[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4359-4362.
- [20] Zhao X H, Ji L L, Liu D, et al. Second-harmonic generation of temporally low-coherence light[J]. *APL Photonics*, 2020, 5(9): 091301.
- [21] Li F J, Gao Y Q, Ji L L, et al. Characteristics of the beam smoothing using the combination of induced spatial incoherence

- and continuous phase plate[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 145: 107537.
- [22] Dorrer C, Spilatro M, Herman S, et al. Broadband sum-frequency generation of spectrally incoherent pulses[J]. *Optics Express*, 2021, 29(11): 16135-16152.
- [23] Brandão B, Santos J E, Trines R M, et al. Bandwidth effects in stimulated Brillouin scattering driven by partially incoherent light [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2021, 63(9): 094003.
- [24] Dorrer C. Optical parametric amplification of spectrally incoherent pulses[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(3): 792-804.
- [25] Campbell E M, Sangster T C, Goncharov V N, et al. Direct-drive laser fusion: status, plans and future[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2021, 379(2189): 20200011.
- [26] Follett R K, Shaw J G, Myatt J F, et al. Thresholds of absolute instabilities driven by a broadband laser[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26(6): 062111.
- [27] 游开明, 文双春, 范滇元. 宽频带激光自由空间传输的调制特性研究[J]. *光学学报*, 2006, 26(7): 965-970.
- You K M, Wen S C, Fan D Y. Study on modulation property of broadband laser propagation in free space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(7): 965-970.
- [28] 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.
- [29] Wisoff P J, Bowers M W, Erbert G V, et al. NIF injection laser system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5341: 146-155.
- [30] Zhong Z Q, Xiong H, Sui Z, et al. Enhanced smoothing by spectral dispersion via insertion of complex coaxial vortex plate [J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(8): 085607.
- [31] Ma H H, Li X F, Weng S M, et al. Mitigating parametric instabilities in plasmas by sunlight-like lasers[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2021, 6(5): 055902.
- [32] 熊皓. 用于抑制 ICF 装置激光等离子体不稳定性的光场快速调控技术[D]. 成都: 四川大学, 2021: 27-32
- Xiong H. Ultrafast control of the laser field on the target plane for suppressing laser-plasma instabilities of ICF facilities[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021: 27-32.

Instantaneous Beam Smoothing Technique Based on Beat Frequency of Broadband Laser

Wu Shijiang, Xiong Hao, Zhang Yinrui, Zhong Zheqiang, Zhang Bin*

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

Abstract

Objective In laser-driven inertial confinement fusion (ICF) facilities, the illumination uniformity of the laser beam is critical to the success of implosion. Varieties of beam smoothing schemes have been developed to improve illumination uniformity on the target. Typical temporal and spatial smoothing schemes, such as the combination of smoothing by spectral dispersion (SSD) and continuous phase plate (CPP), cannot suppress laser plasma instabilities (LPIs) on picosecond timescales. As rapid temporal smoothing schemes, our previous radial smoothing (RS) and azimuthal smoothing (AS) schemes can reduce the smoothing time to the picosecond level. However, RS has strict requirements on the pump laser, while AS demands precise wavelength differences between the sub-beams. Many studies have shown that broadband laser is helpful to break the wave vector matching in LPIs. To achieve the suppression of LPIs with broadband light and fast beam smoothing, we propose an instantaneous beam smoothing scheme based on the beat frequency of broadband laser.

Methods Taking the National Ignition Facility (NIF) as a typical example, we build a physical model of the instantaneous beam smoothing scheme based on the beat frequency of broadband laser. In this scheme, four sub-beams successively propagate through a CPP array, a spiral phase plate (SPP) array, and a polarization control plate (PCP) array, and eventually focus on the target plane. It is noteworthy that four sub-beams are broadband laser. After passing through the SPP array and PCP array, four sub-beams are divided into two groups with orthogonal polarization. Meanwhile, every two sub-beams in a group have a conjugate spiral phase. Owing to the beat frequency of the rich frequency components of broadband laser and the conjugate spiral wavefront distributions, the speckles located at different positions on the target plane can rotate rapidly with different periods. In addition, the key factors of the proposed technique including bandwidth and spectrum type are analyzed in detail.

Results and Discussions The results show that both the proposed scheme and the previous scheme based on the beat frequency of dual-frequency monochromatic laser have the same intensity envelopes of focal spots. However, the proposed scheme exhibits a faster smoothing rate (on a sub-picosecond timescale), fewer hot spots, and better illumination uniformity (Fig. 3). The reason for this phenomenon is the beat frequency of different frequency components of broadband laser. It means that the hot spots have different displacements with each other. In other words, the peak power of the hot

spots decreases, and the illumination uniformity of the focal spots increases. In addition, with the increase in the bandwidth of the broadband laser, the smoothing rate can be significantly enhanced, while the illumination uniformity cannot be improved dramatically (Fig. 4). For instance, the focal spot is smoothed in a few picoseconds when $\Delta\lambda = 0.35$ nm but in sub-picosecond at $\Delta\lambda = 3.50$ nm. However, both of them have close C_0 . By means of shaping the spectrum type of broadband laser, the focal spot with Gaussian spectrum is smoothed more quickly than that with flat top spectrum (Fig. 5).

Conclusions To meet the requirements of illumination uniformity in laser-driven ICF facilities, we propose an instantaneous beam smoothing scheme based on the beat frequency of broadband laser. In this technique with broadband laser as sub-beams, speckles at different positions on the focal plane rotate rapidly with different periods. The proposed technique can shorten the smoothing time to picosecond and even the sub-picosecond timescale by choosing appropriate parameters of the broadband laser. Compared with the technique based on the beat frequency of dual-frequency monochromatic laser, the proposed technique has more advantages attributed to the beat frequency of rich frequency components of broadband laser. The speckles on the target plane rotate more quickly, which leads to instantaneous smoothing of the focal spot and better illumination uniformity. On this basis, the effects of the key factors including bandwidth and spectrum type are analyzed. The results show that the smoothing performance of the proposed technique can be further improved by increasing the bandwidth of the laser and adopting the Gaussian spectrum of the broadband laser.

Key words laser optics; inertial confinement fusion; beam smoothing; broadband laser; laser plasma instabilities