

高功率激光驱动器光束匀滑技术研究 (特邀)

高妍琦, 李福建, 季来林, 赵晓晖, 夏 兰, 冯 伟, 刘 栋, 史海涛,
刘佳妮, 饶大幸, 崔 勇, 马伟新, 隋 展

(中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘 要: 激光驱动惯性约束聚变的打靶过程中, 光场不同空间频率的不均匀性会引起内爆的流体力学不稳定性、印痕效应和激光等离子体不稳定性。这些不稳定过程将最终影响内爆压缩倍率, 从而影响到点火。为了控制焦斑不均匀性进而抑制不稳定过程, 人们提出了束匀滑技术: 通过光场调控控制焦斑分布特性, 进而控制束靶耦合过程。束匀滑可分为空间域匀滑和时间域匀滑。空间域匀滑通过控制波前形态获得平整的焦斑包络, 降低低频不均匀性。时间域匀滑通过控制光束的相干性减弱激光焦斑中的散斑, 进而减弱中高频不均匀性。随着抑制更高激光功率密度条件下激光等离子体相互作用的需求愈发紧迫, 涌现出一些新型的束匀滑方法。文中介绍了束匀滑技术在大型激光装置上的使用情况, 并对目前提出的各种束匀滑技术进行了总结和分析。

关键词: 高功率激光驱动器; 光束匀滑; 诱导空间非相干; 谱色散匀滑; 偏振匀滑; 连续相位板; 透镜阵列

中图分类号: TN241 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20201074

Research of beam smoothing technology in high power laser driver (*Invited*)

Gao Yanqi, Li Fujian, Ji Lailin, Zhao Xiaohui, Xia Lan, Feng Wei, Liu Dong, Shi Haitao,
Liu Jiani, Rao Daxing, Cui Yong, Ma Weixin, Sui Zhan

(Shanghai Institute of Laser Plasmas, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800)

Abstract: In the process of laser driven inertial confinement fusion, the inhomogeneity of light field with different spatial frequencies will cause the hydrodynamic instability, imprinting and laser plasma instability in implosion. These instabilities will eventually affect the compression ratio of implosion, thus affecting the ignition. In order to control the focal spot nonuniformity and suppress instabilities, beam smoothing technology was proposed to control the beam target coupling process through light field control. Beam smoothing can be divided into spatial smoothing and temporal smoothing. Spatial smoothing can reduce the low-frequency inhomogeneity by controlling the wavefront shape. Temporal smoothing reduces the speckle in the focal spot by controlling the coherence of the laser beam, and then reduces the medium and high frequency inhomogeneity. With the increasing demand for laser-plasmas instability suppression at higher laser power density, some new beam smoothing methods have emerged. The application of beam smoothing technology in large laser facilities was introduced, and the currently proposed beam smoothing technologies were summarized and analyzed.

Key words: high power laser driver; beam smoothing; induced spatial incoherence; smoothing by spectrum dispersion; polarization smoothing; continuous phase plate; lens array

收稿日期: 2020-09-01; 修订日期: 2020-10-29

基金项目: 科学挑战计划 (TZ2016005); 国家自然科学基金 (11604317, 11604318, 11804321)

作者简介: 高妍琦 (1983-), 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事高功率激光驱动器技术等方面的研究。Email: liufenggyq@siom.ac.cn

0 引言

在激光驱动惯性约束核聚变 (Inertial Confinement Fusion, ICF) 中, 激光辐照强度的均匀性是至关重要的。激光辐照强度的不均匀性, 可按空间频率分为低、中、高频不均匀性^[1]。其中, 低频不均匀性将导致不同位置靶丸燃料内爆的速度不同, 从而引起流体不稳定性使靶丸偏离球形, 最终导致燃料压缩不充分^[2]。而中高频不均匀性能通过印痕效应为流体不稳定性过程提供种子^[3]; 能导致等离子体不稳定性^[4], 包括成丝不稳定性, 生成超热电子并影响激光吸收的受激拉曼散射 (Stimulated Raman Scattering, SRS), 导致反向散射的受激布里渊散射 (Stimulated Brillouin Scattering, SBS) 等。为了抑制这些不稳定过程, 直接驱动要求在空间上, 模数在 10~20 之间的辐射压不均匀性控制优于 1%~2%^[5]; 在时间上, 为了控制印痕效应和激光等离子体不稳定性 (Laser Plasmas Instability, LPI) 过程, 激光辐照的不均匀性应当在几皮秒内迅速下降。实际的高功率激光受放大、传输和终端光路中多种因素 (元件面型、热畸变、气流扰动、损伤点等) 影响, 其焦斑形态不均匀且不稳定, 不符合 ICF 对激光驱动的要求。为了得到稳定、均匀的焦斑, 人们提出了多种束匀滑方法。按照基本原理的不同, 可以分为空间域匀滑方法和时间域匀滑方法。

1 空间域匀滑

空间域匀滑方法主要指通过相位调控获得具有指定包络形态的焦斑的方法。简单的离焦也能够改变激光光斑形态, 然而这种方法得到的焦斑受波前畸变影响较大, 并且不能完全改变光斑形态。空间域匀滑的基本物理思想是通过控制波前形态进而控制焦斑, 如图 1 所示。整体上, 根据菲涅尔衍射公式, 激光焦斑形态与近场分布互为傅里叶变换, 因此可以通过近场波面整体形态的改变从而控制焦斑形态。而局部来看, 为了减弱波前畸变的影响, 所引入的波前调控必须使在特征尺度内, 波前畸变能够被忽略, 这要求空间域匀滑方法所引入的相位变化梯度 (Gradient Root Mean Square, GRMS) 大于波前畸变的 GRMS。实际焦斑是理想焦斑和波前畸变点焦的卷积, 只要使用空间域匀滑后的理想焦斑具有足够尺寸, 波前畸变

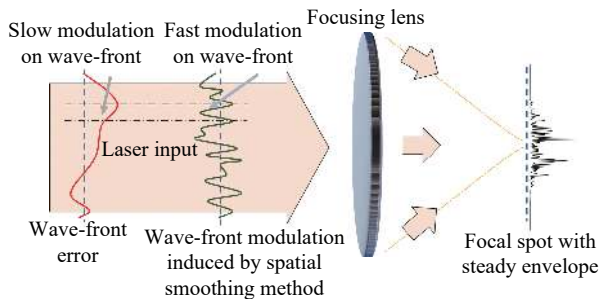


图 1 空间域匀滑原理

Fig.1 Scheme of spatial smoothing

对焦斑包络的影响就不明显。空间域匀滑方法主要包括连续相位板 (Continuous Phase Plate, CPP)、透镜阵列 (Lens Array, LA)。

1.1 连续相位板

连续相位板 (CPP)^[6] 能够灵活地调整焦斑形态, 被广泛应用于高功率激光装置中。CPP 的具体问题是在互为傅里叶变换对的近场和远场强度分布已知的条件下, 如何恢复出近场和远场的相位分布。典型的 CPP 面型如图 2 所示。通过磁流变抛光^[7]、等离子体刻蚀等方式可以将设计的相位分布加工为透射元件的面型分布, 进而作用在激光光束上。

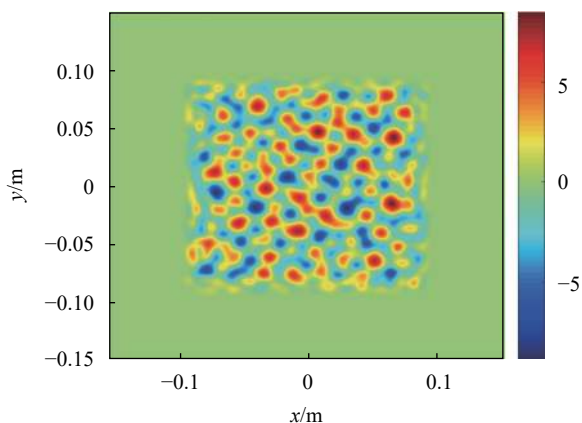


图 2 连续相位板面型示例。此相位板能够获得 32 倍衍射极限直径的圆形平顶焦斑

Fig.2 Demonstration of continuous phase plate (CPP). The CPP could obtain circular focal spot with diameter of 32 times of diffraction limitation

1978 年, Kato 等提出了随机相位板^[8] (Random Phase Plate, RPP), RPP 一般由几百个 0 或 π 相位延迟的小块随机排布而成, 能够获得具有高斯型包络的焦斑, 并且对波前畸变不敏感。然而 RPP 存在着衍射效

率低、焦斑形态不可控等问题。1994 年, Dixit 等提出了基于 Gerchberg-Saxton (G-S) 算法^[9]的相息相位板 (Kinoform Phase Plate, KPP)^[10]作为 RPP 的改进, 获得了焦斑包络控制的能力; 然而其结果中存在不连续线, 无法实际制作, 并导致部分能量被散射到焦斑之外, 成为噪声。1995 年, Lin 等^[11]报道了利用 G-S 算法获得的分布相位板 (Distributed Phase Plate, DPP), 利用空间周期变化的傅里叶光栅和随机相位组合作为迭代的初始面型, 并控制迭代次数, 大幅度减少了相位板中的奇点。1996 年 Dixit 等^[6]提出在 G-S 算法中, 通过控制远场缓变避免出现相位奇点, 从而获得了完全连续的相位板。2003 年 Neauport 等^[12]报道了 LMJ 上基于改进 G-S 方法的设计结果, 通过强制相位分布缓慢变化避免了不连续线的产生, 此外还使用了额外的远场补偿以减弱大尺度的焦斑不均匀性。2007 年 Marozas^[13]提出了一种改进的 G-S 方法, 通过滤波和解包算法, 获得了具有高通特性的 CPP (High-pass CPP), 其远场包络形态与目标函数符合较好, 同时低频不均匀性能够得到一定程度的抑制; 2016 年 Marozas 等^[14]在一篇会议报告上, 给出了在具有波前畸变的情况下的焦斑 PSD, 结果表明此时的 High-pass CPP 相比于 Goodman 散斑模型^[15], 仍然具有较低的中低频不均匀性。2008 年, 李平等^[16]提出了另一种改进 G-S 算法, 在迭代中加入了权重因子以保证相位分布缓慢变化, 通过迭代前后的相位差与 2π 的大小关系直接判断相位变化, 进而简化解包过程。2016 年, 雷泽民等^[17]提出了用光场传输公式替换 G-S 方法中的傅里叶变换的改进方法, 该方法能够灵活改变目标面位置、分辨率, 代价是计算量的大幅度增加。

光束经过 CPP 调制后, 近场将随传输而发生强度调制。2011 年温圣林等^[18]人分析了光束经 CPP 前后面干涉和传输对近场均匀性的影响, 指出为了控制 CPP 后的近场调制度, 需要对 CPP 镀增透膜, 并保证传输距离小于 1.5 m。

CPP 的设计属于相位恢复问题的一种。更深入的 CPP 设计理论有望在信息光学、全息术等领域获得应用, 仍然有待人们进一步研究。

1.2 透镜阵列

1986 年, 邓锡铭等^[19]提出了透镜阵列 (LA) 用于高功率激光焦斑的形态控制, 其原理如图 3 所示。光

束分为子束, 经过透镜阵列子透镜和主透镜后, 其理想焦点前移至 E 面上, 在主透镜焦平面 C 面上形成准近场光斑。不同子束在 C 面上相干叠加, 最终获得具有周期调制散斑的准近场图样。理想情况下, LA 焦斑可用 LA 子束的准近场分布 E_s 表示:

$$E(\vec{r}) = \sum_{j,k} E_s(\vec{r}) e^{-\frac{ik}{2L}(\vec{r}\cdot\vec{T}_{j,k})} = E_s(\vec{r}) D(\vec{r})$$

$$D(\vec{r}) = \sum_{j,k} e^{-\frac{ik}{2L}(\vec{r}\cdot\vec{T}_{j,k})} \quad (1)$$

式中: j, k 是 LA 子束的编号; $T_{j,k}$ 是编号为 j, k 的子束的近场位移矢量; r 是远场坐标。 $D(r)$ 的形式被称为二维 Dirichlet 核, 其形态类似于二维梳状函数, 其单个周期的形态类似于 sinc 函数。根据函数 $D(r)$ 的性质, LA 方法的散斑尺度由全光束衍射极限决定, 而散斑空间间隔由子透镜衍射极限决定, 理论上其焦斑强度峰值将大大高于 CPP 散斑, 然而因光学系统波前畸变的影响, 实际上两者差别不大。此外 LA 使用时一般会适当离焦, 使不同子束的非涅尔衍射包络交错开, 这也会改变散斑形态, 但一般不会改变其周期性。

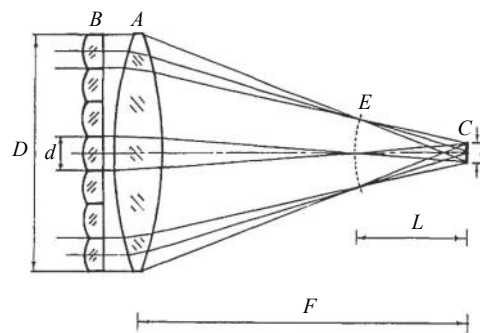


图 3 透镜阵列示意图

Fig.3 Demonstration of lens array

2007 年, 郑建洲等^[20]提出了焦斑可调的 LA 模式, 使用了额外的透镜阵列, 通过改变两组透镜阵列、主透镜之间的距离控制焦斑的尺寸, 分析表明这种方法能够获得 mm 到百 μm 量级的可调焦斑, 能够满足 ICF 的焦斑尺寸需求。

2 时间域匀滑

空间域方法的使用能够改善激光能量沉积的大尺度均匀性, 一般认为等离子体热传导能够大幅度减弱能量沉积的高频不均匀性。然而印痕阶段, 尚未生成足够密度的等离子体, 此时的高频不均匀性将直接

影响靶丸的外表面形态,成为 RT 不稳定性的种子^[21]。此外,激光等离子体不稳定性也会受到高频不均匀性的影响^[22]。因此高频不均匀性的控制仍然是必要的。然而激光的高频不均匀性即激光散斑,无法彻底消除^[23]。只能通过降低激光的空间相干性,在足够积分时间后减弱激光散斑。因此时间域方法通过对光束近场相干性进行调控从而控制焦斑相干性,进而降低高频不均匀性。

时间域匀滑方法的原理如图 4 所示,空间低相干光的瞬时波面随时间不断变化,从而获得动态的焦斑,并在足够积分时间后减弱焦斑中的散斑。相干性的降低依赖于引入带宽,带宽小于激光带宽的不稳定过程可以通过时间域匀滑方式得到抑制^[24]。然而 LPI 的抑制除了受到激光带宽影响外,还依赖于激光调制的形式。激光带宽并不能直接改变焦斑形态,宽带激光如果具有高空间相干性,则焦斑仍然会存在稳定的随机散斑,而这些随机散斑将引起成丝不稳定性进而引起 SBS、SRS 等其他 LPI 过程^[25]。成丝不稳定性的抑制需要激光散斑在几十 ps 内迅速变化,并具有均匀的时间积分效果。这除了需要足够激光带宽以外,还需要合理设计时间域匀滑方法才能实现这种效果。典型的,单调制的谱色散匀滑方法即使获得 1 THz 量级的激光带宽^[26],但因其时空调制速度较慢,焦斑匀滑速度慢于同带宽下的理想随机时空散斑匀滑速度。

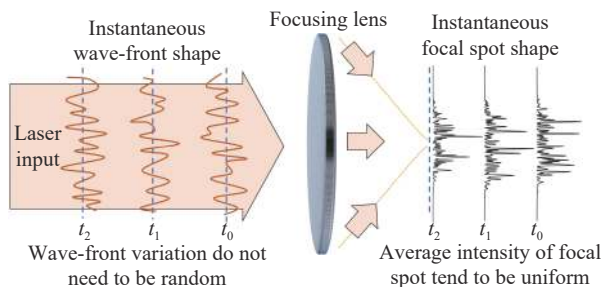


图 4 时间域匀滑原理

Fig.4 Scheme of temporal smoothing

一般认为散斑演化的特征时间 $T_c \sim 1/\Delta v$ ^[27],基于随机散斑假设,可以获得焦斑不均匀性的时间演变公式^[27-29]:

$$\frac{\sigma_0^2 - \sigma_{inf}^2}{\sigma_T^2 - \sigma_{inf}^2} = \frac{T}{T_c} \quad (2)$$

式中: σ_0 表示初始焦斑强度分布的均方根 (Root Mean Square, RMS); σ_{inf} 表示无穷长积分时间后的焦斑 RMS; σ_T 表示 T 积分时间后的焦斑 RMS。由公式 (2) 可知,焦斑不均匀性降低的速度取决于相干时间,即激光带宽。公式 (2) 基于焦斑演化完全随机的假设,但多数束匀滑方案的焦斑演化并不是完全随机的,这导致实际的焦斑不均匀性降低速度较慢,散斑演化的特征时间也偏大。单纯从焦斑匀滑速度来看,这种情况下激光的带宽实际上并没有完全得到利用。

时间域束匀滑方法主要包括: 偏振匀滑 (Polarization Smoothing, PS), 诱导空间非相干 (Induced Spatial Incoherence, ISI), 角色散匀滑 (Angular Dispersion of the Spectrum, ADSP), 谱色散匀滑 (Smoothing by Spectral Dispersion, SSD), 径向匀滑 (Radial Smoothing, RS), 角向匀滑 (Azimuthal Smoothing, AS), 随机脉冲序列 (Spike Train of Uneven Duration and Delay, STUD)。这些方法多数无法控制焦斑形态,因此一般与空间域方法联合使用。

2.1 偏振匀滑

偏振匀滑 (PS)^[30] 通过两种偏振光束的组合使用减弱焦斑中的散斑。两种偏振的焦斑不相干叠加,从而使瞬时散斑的 RMS 下降至 0.707 倍;此外 PS 方法的焦斑偏振具有一定的空间分布。物理实验证明 PS 方法能够抑制 SBS 和 SRS^[31]。虽然 PS 也通过降低光场相干性来减弱散斑,但它并不是一般意义上的时间域方法,其匀滑效果与时间无关。PS 可以分为偏振控制板 (Polarization Control Plate, PCP) 和双折射楔 (Birefringent Wedge, BW)^[32] 两种方案。

偏振控制板 (PCP) 由 Tsubakimoto 等^[30] 于 1992 年提出。类似于随机相位板,PCP 也需要对光束近场分块,并分别使用 1/2 波片调整偏振方向,从而使子光束之间的可干涉数目减少一半。如图 5(a) 所示,方形近场被分割为若干小块,白块仍然保持原偏振态,而斜线块则通过 1/2 波片将偏振旋转 90°。液晶也能够用于制作 PCP^[33],但液晶材料多数用于基频光,且其透过率和抗损伤能力较差。偏振组束可以看成一种特殊的 PCP,已经在美国国家点火装置 (National Ignition Facility, NIF) 等装置上广泛应用^[34-35]。1993 年 Skupsky 等^[36] 提出过一种完全消散斑的 PCP 方法,需要精确设计不同块之间的相位延迟,然而这种方法对

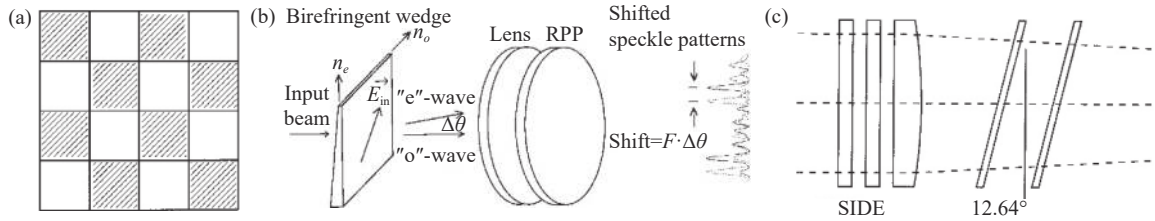


图 5 (a) 偏振控制板; (b) 双折射楔; (c) 汇聚光束的平板偏振匀滑

Fig.5 (a) Polarization control plate; (b) Birefringent wedge; (c) Polarization smoothing in a convergent beam by birefringent plane

波前畸变极敏感。事实上仅仅通过两种不同偏振态的焦斑强度叠加消除焦斑不均匀性在现实中是不可能的,这可以通过统计光学^[37]说明:在波前畸变作用下,焦斑的分布必然服从随机散斑规律,其强度直方图为负指数图,平顶焦斑直方图则为狄拉克函数;而两个服从负指数分布的焦斑叠加不可能获得服从狄拉克函数的平顶焦斑。

双折射楔 (BW)^[32] 方案利用单轴晶体快慢光折射率不同的特点,通过磷酸二氢钾 (Potassium Dihydrogen Phosphate, KDP) 楔板直接将入射的线偏振激光分为偏振方向正交,并且具有一定角度差的两束激光,如图 5(b) 所示。两束激光的焦斑在焦平面上强度叠加,其形态接近,但位置存在偏移,只要保证偏移量大于激光散斑的相干长度 (与衍射极限同量级),即能够达到减弱焦斑散斑的效果。

2005 年 Munro 等^[38] 针对 NIF, 进一步提出, 如果将偏振元件置于终端聚焦透镜之后的汇聚光路段, 则可以通过平行晶体板获得单束偏振匀滑效果, 如图 5(c) 所示; 2015 年, Huang Xiaoxia 等^[39] 人报道了汇聚光束偏振匀滑实验效果, 结果表明此方法可以安全地使用在 SG-III 上。

2015 年, 任广森等^[40] 分析了径向偏振调制对聚焦光斑匀滑及偏振特性的影响, 结果表明, 无论是

径向偏振调制还是 PCP, 抑或是 BW 方案, 不同 PS 设计本质上具有一致性, 光束的匀滑及偏振特性差别较小。

2.2 诱导空间非相干

诱导空间非相干 (ISI) 方法由 Lehmborg 等^[27, 41] 在 1983 年提出。ISI 需要使用在具有一定带宽的激光上, 利用宽带激光具有一定相干时间的特点, 在光束近场分块引入时间延迟, 从而消除子光束间的相干性。这些不相干子光束的远场在焦平面不相干地叠加, 从而在一定积分时间内消除散斑。ISI 方法可以通过调整子束的传播方向来控制远场形态^[27], 这种方式虽然具有灵活性的调整能力, 但其实验实现太过繁琐。更容易的方式是将 ISI 与 LA^[42] 或 CPP^[29] 联用。

ISI 方法首先被用在美国的 Pharos III 钕玻璃激光上^[43], 通过使用方向垂直的两块阶梯状反射楔板来引入时间延迟, 如图 6(a) 所示。其光束相干时间接近 2 ps, 阶梯高度也是 2 ps。互相垂直的两组楔板将光束分割为约 350 束子光束。事实上 Pharos III 的 ISI 台阶高度与相干时间接近, 很难保证完全消除残余干涉; 另一方面, 通过双阶梯板引入时间延迟使近场相干度分布具有高度周期性。这样的情况下焦斑可能会出现较弱的周期性残余干涉条纹。Pharos III 上的物理实验表明 ISI 在小于 0.15% 带宽的情况下已经能够大

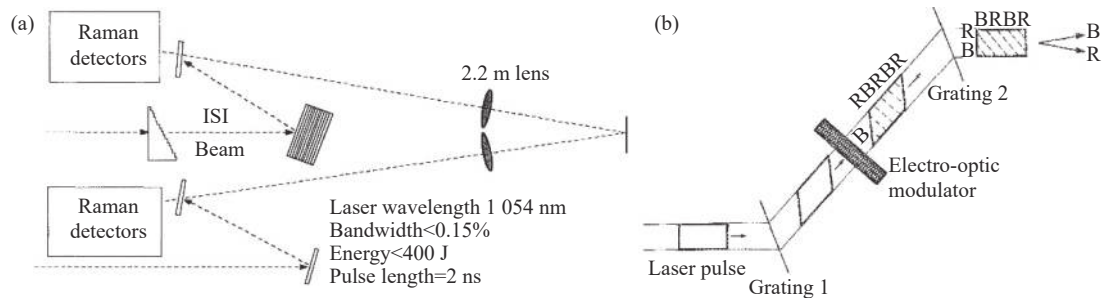


图 6 (a) Pharos III 上的双台阶板 ISI 方法, 通过方向垂直的台阶楔板引入分块的时间延时; (b) SSD 方法

Fig.6 (a) ISI on Pharos III by using two stair plate, time delay is seperately induced by using vertical stair-shaped echelon; (b) Method of SSD

幅度抑制 SBS、SRS 等 LPI 过程和流体力学不稳定性过程。ISI+RPP 的组合也在英国的 VULCAN 激光上使用过^[25], 实验结果表明 ISI+RPP 能够在低 ISI 分割数情况下大幅度改善焦斑形态的不规则; ISI+RPP 的组合能够抑制发展时间在 25 ps 左右成丝不稳定性, 进而抑制成丝后局部强点引起的 SRS 和 SBS。最近, ISI+LA^[44] 和 ISI+CPP 的组合被使用在上海激光等离子体研究所的“昆吾”宽带二倍频激光器上, 获得了高均匀性的激光焦斑, 并证明了 ISI 方法对 SBS、SRS 具有明显抑制效果。

ISI 的近场低相干是通过台阶板引入的, 台阶板的硬边衍射不利于光学元件安全, 同时衍射损耗也限制 ISI 近场不相干子束的数目无法任意增加。如果光束本身就具有空间低相干性, 就能避免台阶板的使用, 这就是无楔板的诱导空间非相干 (Echelon Free Induced Spatial Incoherence, EF-ISI)^[27]。EF-ISI 中使用了具有低空间相干性的扩展光源, 通过空间小孔或可变透过率元件在物面取出具有合适形态的低相干光源, 再通过像传递系统, 将物 (小孔) 以合适的放缩倍率传递至像面 (靶面); 传递过程中增加合适的激光放大器。法国的 Phebus 激光使用钽玻璃放大器对多模光纤端面发出的光进行放大^[45]。然而实验发现空间低相干激光的增益能力较低, 其饱和通量约为窄带光的一半, 分析表明这可能由空间低相干引起的局部自聚焦强点产生的双光子吸收导致^[46]。美国的 NIKE 使用电子束泵浦的 KrF 放大器放大 248 nm 波长激光^[47], 获得了 1% 的单束不均匀性和 1~3 THz 的带宽。国内建成的天光一号 KrF 激光器^[48], 也通过 EF-ISI 方法获得了均匀性极好的焦斑。

虽然使用 EF-ISI 方法的 KrF 激光器能获得大带宽、均匀性极好的焦斑, 但 KrF 激光器造价较高, 结构复杂, 不便于大规模工程集成。而使用钽玻璃等固体增益介质的 EF-ISI 的放大、频率转换能力较差, 使得难以获得高能量输出。因此 EF-ISI 目前并未在高功率激光装置上广泛使用。

2.3 角色散匀滑

角色散匀滑 (ADSP) 由 Nakano 等^[49] 于 1993 年提出, 被使用在 Gekko XII 的部分相干光上。通过光栅引入角色散, 使不同波长的焦斑在某方向上散开, 从而在强度叠加后改善焦斑的强度均匀性。然而文中

认为激光的散斑会因角色散而在一倍相干时间内多次发生重构的观点有待进一步考证。相干时间内散斑模式应当相对稳定, 否则就与相干时间的定义相矛盾。角色散能够进一步改善焦斑的均匀性, 但对于部分相干光的焦斑的时间特性的影响的研究并未见报道。角色散一般只能产生一维匀滑效果, 如何实现二维角色散匀滑仍然有待研究。

2.4 谱色散匀滑

谱色散匀滑 (SSD) 由 Skupsky 等^[23] 于 1989 年提出, 通过光栅对和电光调制器的组合使用获得在时间和空间上具有周期频率调制的脉冲, 如图 6(b) 所示, 能够获得动态的焦斑, 同时避免下游光学元件发生 SBS 过程。色循环数是指光束等时间面上的瞬时频率循环数目, 等价于光束的空间角色散量。因为周期性调制, SSD 的光谱具有离散结构。在低色循环数下, SSD 焦斑在空间相应方向将随时间扫动 (扫动周期等于调制周期)^[50-51], 从而在时间积分后降低焦斑的不均匀性。高色循环数下, SSD 的焦斑由若干扫动的子焦斑相干叠加得到, 在瞬时散斑上存在周期性的干涉条纹。SSD 焦斑 RMS 的精确演化不服从公式 (2) (SSD 瞬时焦斑不是随机变化而是周期性变化的); 因摆动长度有限, SSD 焦斑残留不均匀性偏高。二维 SSD^[52](1995)、三向 SSD^[53](2002) 通过增加具有不同频率和方向的时空调制, 能够使焦斑发生二维的扫动。如果认为 SSD 光谱较密集, 近似为连续谱, 则 SSD 方法的焦斑均匀性可通过下面的公式估计:

$$RMS \approx \begin{cases} \sqrt{\frac{\theta_{DL}}{\theta_{AD}}}, & 1D - SSD \\ \sqrt{\frac{\theta_{DL}^2}{\theta_{AD,x} \times \theta_{AD,y}}}, & 2D - SSD \text{ or } 3D - SSD \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ_{DL} = 波长/近场宽度, 是焦斑的衍射角; θ_{AD} 、 $\theta_{AD,x}$ 、 $\theta_{AD,y}$ 是 SSD 或高维 SSD 在某方向上的色散角。

高维 SSD 能获得更高的焦斑均匀性, 这种效果是通过使瞬时焦斑的扫动方向随时间变化实现的。但如果只关注短时特性, 其间多维 SSD 的扫动方向变化不大, 焦斑的时空演化特性则与普通 SSD 相同。多维 SSD 不同方向的调制频率具有较大的最小公倍数, 因此焦斑不是完全周期性的。但其近场信息不具有多样性, 意味着其焦斑演化随机性较低。多频

SSD^[54](Multiple-Frequency Modulation Smoothing by Spectral Dispersion, Multi-FM-SSD, 2007) 串联使用了多个不同频率的电光调制器,从而随时间改变焦斑扫描速度。这些改进并没有改变 SSD 焦斑的根本演化特性。事实上,多维 SSD 的焦斑重构速度取决于调制周期,然而现有的电光调制周期一般在几十 ps 左右,因此焦斑形态在短时间内并无根本性变化,而只是通过移动或改变重叠方式获得动态焦斑;从焦斑所包含信息的角度来看,几十 ps 内焦斑所包含的信息并没有发生变化。高维 SSD 时间域散斑尺寸由焦斑平移速度和空间散斑尺寸决定,一般大于相应带宽下的相干时间,因此其焦斑不均匀性降低的速度较慢,激光的带宽没有完全获得利用。物理实验表明高维 SSD 在直接驱动过程中,主要优势在于能够降低印痕效应,而对后续的不稳定性过程的抑制能力基本等同于一维 SSD^[55]。相比之下高维 SSD 的植入代价较高,因此在 NIF 只使用了一维 SSD。

SSD 的使用中可能会出现幅频调制的现象^[56],导致激光脉冲的时间波形出现周期性调制。这种现象是由激光系统的色散、增益窄化导致的,可以通过光谱滤波、色散补偿等手段改善。

2000 年 Holstein 等^[57]报道了使用聚焦光栅的纵向 SSD 方法 (Longitudinal Smoothing by Spectral Dispersion, L-SSD),这种方法与传统 SSD 的区别在于,通过聚焦光栅在聚焦光束的同时引入色散,不同频率光的焦距有所不同,其光斑在靶面不相干叠加,从而减弱散斑;2019 年 Duluc 等^[58]理论上比较了 LSSD 和传统 SSD 的光场演化和 SBS 抑制能力,结果表明在相同的纵向散斑特征尺寸下两种方法的 SBS 增长率相当,但 LSSD 的 SBS 饱和强度更高,这可能因为该方案焦区存在较多的局域强点。

2011 年张锐等^[59]提出了使用特殊光栅的 SSD 方法,研究表明使用星光栅的 SSD 具有二维匀滑效果。然而特殊光栅的制作难度限制了这些方法的实际应用。

2014 年,Emeril 等^[60]提出了多色组束的 star-driver 方案,通过使用万量级数目的多色光束,结合 2D-SSD 获得高均匀性的靶面辐照用于直接驱动,研究表明这种设计能够获得 1% 以下的辐照不均匀性^[5],足够的带宽使其能够抑制直接驱动中的各种

LPI 过程^[61-62]。

2014 年,钟哲强等^[63]针对 NIF 的四束组束方式,进一步提出了多色、多频、多向的 SSD 组束的匀滑方式,通过在组束的四束激光上使用不同中心频率、不同调制频率、不同色散方向的一维 SSD 获得更快的匀滑速度和接近 2D-SSD 的匀滑效果。

2.5 径向匀滑

2014 年,钟哲强等^[64]提出了基于光克尔效应的径向匀滑 (RS) 方案。如图 7(a) 所示,使激光与高斯脉冲序列同时通过光克尔介质,利用三阶非线性效应在激光上增加随时间周期性变化的额外聚焦相位,从而使焦斑随时间发生周期性的散焦。光克尔介质的使用实际上相当于在光束近场不同半径处改变了调制幅度,而传统 SSD 则是在近场不同位置使用不同的调制初始相位因子。可以预期径向匀滑方案的效果将类似于 LSSD,但超短脉冲的使用使得径向匀滑可以将调制周期减小到 ps 量级(受限于光克尔介质的相应时间),从而获得更快的匀滑速度和更大的调制带宽。然而为了产生足够的非线性折射率所需的高强度、周期性高斯脉冲序列难以物理实现,限制了这种方法的实际使用。此外近场中心处调制幅度接近于 0,意味着这部分所对应的焦斑并没有得到足够的匀滑效果。

2016 年,侯鹏程等^[65]对 RS 方法进行了优化设计,指出合理安排高斯脉冲序列与主脉冲的时间关系能够最优化焦斑均匀性,而高斯脉冲序列的脉冲能量起伏会导致束匀滑效果变差。

2017 年,翁小凤等^[66]分析了 RS 方案中激光在非线性质中小尺度自聚焦对焦斑均匀性的影响,结果表明应当控制泵浦高斯脉冲序列的光束质量和强度以及光克尔介质的厚度以避免焦斑均匀性的下降。

2.6 角向匀滑

2018 年,钟哲强等^[67-70]提出了使用涡旋光束的具有超快匀滑速度的角向匀滑 (AS) 方法。AS 方法通过使用螺旋相位板获得涡旋光束,通过偏振控制和双波长组束叠加获得动态焦斑,如图 7(b) 所示。理想情况下,AS 能够获得快速旋转的点焦,其旋转周期由组束的波长差决定,实际上是一种拍频。在使用 CPP 的情况下,焦斑形态也会以相同周期快速变化。AS 方法实际上是作为 RS 方法的补充被提出的,不使

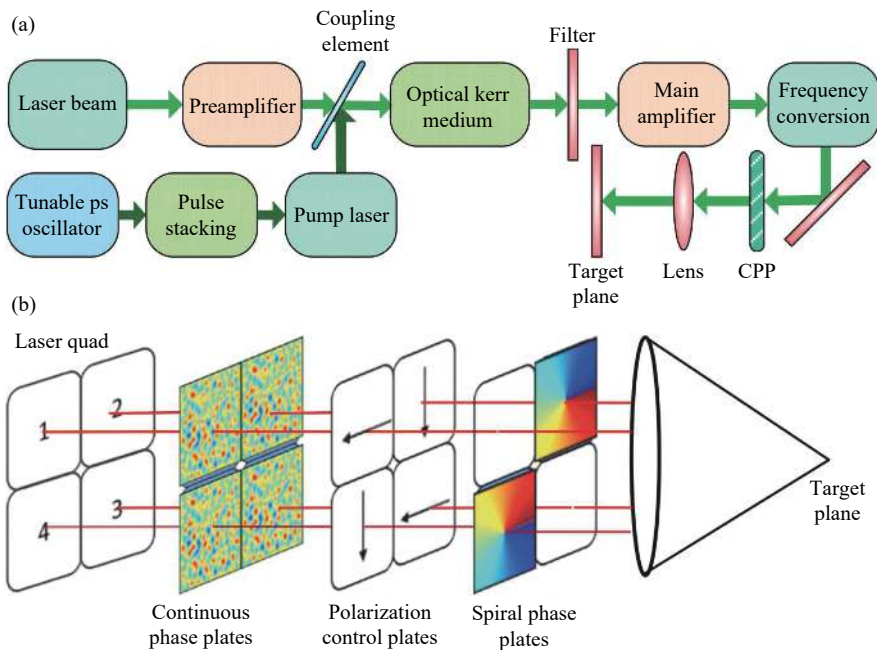


图 7 (a)RS 束匀滑方法示意图; (b)AS 束匀滑方法示意图

Fig.7 (a) Demonstration of RS for beam smoothing; (b) AS method for beam smoothing

用 CPP 的情况下, RS 有径向匀滑效果, AS 具有角向匀滑效果。2019 年 YiMuyu 等^[71]理论上分析了 AS+RS+SSD+CPP 的组合方法效果, 结果表明这样的组合能够在几 ps 内快速降低焦斑不均匀性。AS 方法的意义主要在于能够获得动态旋转的点焦, 在使用 CPP 的情况下其效果类似于多色光的不相干叠加。2020 年黄媛等^[72]提出了使用径向偏振光的改进 AS 方法, 通过偏振控制元件将线偏振光转换为圆偏振光, 从而进一步改善焦斑的均匀性。

2.7 STUD

2012 年 Afeyan 等^[73-74]报道了使用离散、非等间隔的随机脉冲序列 (spike trains of uneven duration and delay pulse, STUD) 打靶的束匀滑方案。按设想, STUD 脉冲应当由许多短脉冲序列构成, 并具有一定的占空比和强度变化; 此外焦斑的空间形态也需不断随时间变化。针对这种特殊脉冲进行的理论模拟表明 STUD 具有占空比的特性使它大幅度减小 SRS、SBS 等 LPI 过程^[75-76]。然而 STUD 脉冲的完全实现具有相当的困难, 已经提出通过使用时域透镜^[77]、脉冲堆积等方案获得 STUD 脉冲的方案。然而这些设计都只限于近场, 在聚焦后的远场维持光场的高占空比特性同时保证焦斑空间匀滑是极困难的。此外, STUD 的高占空比特性使它难以获得高效的放大, 且

对光学元件安全不利。

3 大型激光装置中匀滑技术的应用

3.1 NIF 和 OMEGA

美国的国家点火装置 (NIF) 上使用了 SSD+CPP+PS^[34] 的束匀滑方案。NIF 透镜焦距为 7.7 m, 近场宽度约 0.34 m, 对应的散斑尺寸为 $\lambda F/D=7.9 \mu\text{m}$ 。除了为了抑制 SBS 使用的 30 GHz 带宽 (3 GHz 调制频率) 外, SSD 主要通过使用 17 GHz 的调制实现, 其基频带宽为 45 GHz。每组 2×2 组束的激光中有两束通过置于最后的半波片将偏振旋转 90°, 从而实现偏振匀滑。不同锥角的光束所使用的 CPP 规格有所不同, 单束焦斑的椭圆率是 0.58 或 0.72, 焦斑长轴在 1.2~1.8 mm 之间。为减小 CPP 对三倍频效率的影响, NIF 目前将 CPP 置于二倍频段。

美国的 OMEGA 激光器具有 2D-SSD+CPP/DPP+PS 的束匀滑能力。2004 年 Regan 等^[26]报道了带宽达到 1 THz 的 2D-SSD, 使用了基频上 10.4、3.3 GHz 的调制频率, 14.3、6.15 rad 的调制深度, 0.300 ns/m 和 1.13 ns/m 的调制倾斜参数。OMEGA 焦距为 180 cm, 近场直径 27.5 cm。其色散幅度约为 72 倍和 38 倍散斑尺度, 可以预期其焦斑不均匀性约为 $1/\sqrt{72 \times 38}=0.019$ 。实验上观测到了 2.7% 的焦斑不均匀性 ($k>$

0.04 μm^{-1})。2013 年报道了 multi-FM-SSD 在 OMEGA-EP 上的使用^[78]。OMEGA-EP 的长脉冲在时间上分为预脉冲和主脉冲。预脉冲使用了具有更大带宽的 multi-FM-SSD, 包含三个串联的、位于基频段的正弦调制, 获得了带宽约 0.5 THz 的三倍频脉冲。主脉冲被调制展宽约 0.1 THz, 主要用于避免 SBS 损伤光学件。使用更大带宽的预脉冲主要为了减弱激光的印痕效应, 2016 年 OMEGA-EP 上的物理实验^[79]表明, multi-FM-SSD 成功将印痕效应减弱 50%。

3.2 SG-II 和 SG-III

国内的神光二 (SG-II) 激光器具有 SSD+LA^[80] 和 SSD+CPP(DPP)^[81-82] 的束匀滑能力。SSD 包含 3 GHz 和 10 GHz 的调制器, 最高能得到 270 GHz 带宽的三倍频脉冲, 其色散角达到 24.9 倍衍射极限。在 SSD+LA 中, 为获得高均匀性的焦斑, LA 方法需要使用软边避免焦斑中的菲涅尔衍射^[83], 这将导致透过率下降至 80%。在 SSD+DPP 中, 实验结果显示 SSD 将焦斑不均匀性从 60% 下降到了 16%^[81]。

国内的神光三 (SG-III) 激光器在性能升级后使用了 SSD+CPP+PS 的束匀滑方案^[35]。SSD 包含调制频率 2.488 GHz、带宽 0.15 nm 的用于横向 SBS 抑制的调制模块和调制频率 19.9 GHz、带宽 0.3 nm 的用于

束匀滑的调制模块。SG-III 上使用了单束的汇聚光路 PS 技术, 通过在汇聚光路段安装双折射平板实现。

3.3 LMJ

法国的 LMJ 激光器使用了 LSSD+CPP 的束匀滑方案^[84], 其最大特点在于使用了衍射聚焦光栅对三倍频光进行聚焦, 并同时引入轴向色散。衍射聚焦光栅对角度敏感, 容易损伤。此方案在光路最后引入色散, 虽然便于传输光路、频率转换过程的设计, 但对终端的调试、维护却是极不便的。

3.4 NIKE

美国 NIKE 激光器是基于 EF-ISI 设计的 KrF 激光器。通过分时复用, 将 4 ns 的脉冲拉长至 120 ns、240 ns^[47] 分别通过电子束泵浦的 KrF 放大器提取能量, 再通过延时元件将脉冲恢复至 4 ns。NIKE 的束匀滑示意图如图 8 所示, 通过物面小孔直接获得圆形、均匀的空间低相干光源, 再通过像传递将其传递至靶面。为避免增益不均匀对焦斑均匀性的影响, 放大器被置于像面的傅里叶变换平面上。通过 EF-ISI 技术 NIKE 获得了不均匀性约 1% 的圆形焦斑, 可以获得 1~3 THz 的带宽。实验证明 NIKE 激光焦斑的高均匀性和大带宽能够大幅度改善印痕效应^[85]。

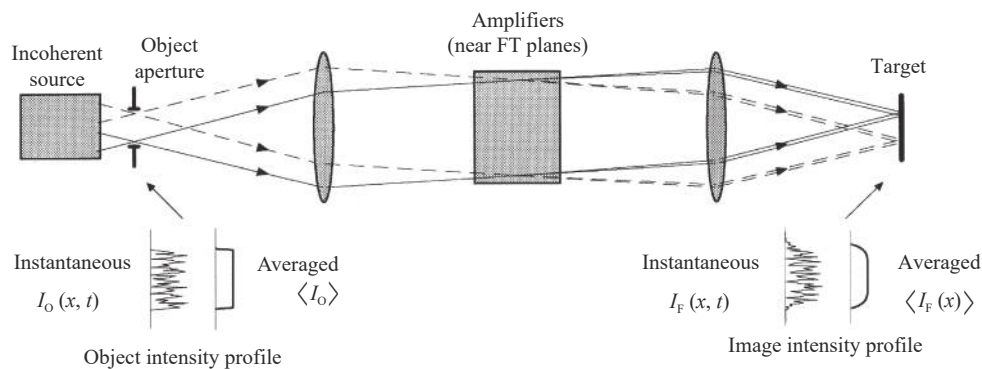


图 8 NIKE 激光器的 EF-ISI 示意图

Fig.8 Demonstration of EF-ISI on NIKE laser facility

3.5 昆吾

上海激光等离子体研究所最近研制成功的宽带二倍频“昆吾”激光器^[86-87]具有 ISI+LA、ISI+CPP 的束匀滑能力。“昆吾”激光器通过使用超辐射源^[87]、光谱预补偿^[88]等方法在钽玻璃放大器上获得了高增益的宽带光输出, 并通过低掺钕 KDP 等方法实现了高效

宽带频率转换^[89-90], 其二倍频输出带宽能够达到 3.28 THz, 并同时具备窄带、STUD 等多种光源的输出能力。“昆吾”的光束近场具有高空间相干性和低时间相干性, 能够避免空间低相干引起的增益能力不足。目前已经开展了一系列物理实验, 实验结果表明低相干光的使用能够大幅度抑制 SBS、SRS 等过程。

一般认为 ISI 方法的焦斑残留不均匀性与 ISI 分割数目有关,对于近场分割数为 $M \times N$ 的 ISI,其不均匀性可通过如下公式估计:

$$RMS \approx \sqrt{\frac{1}{M \times N}} \quad (4)$$

公式 (4) 的成立条件是 ISI 不同子束的焦斑形态统计上彼此无关。只使用 ISI 时,子束焦斑形态并不是随机的,因此焦斑不均匀性一般不符合公式 (4)。ISI+CPP(RPP) 方法中, CPP(RPP) 使不同子束的波前分布不同,其互相干函数接近为 0,此时公式 (4) 成立。ISI+LA 方法中,所有子束具有相同的波前分布和焦斑,焦斑形态接近为子束准近场,焦斑的不均匀性主要来自于子束准近场的菲涅尔衍射,不受 ISI 分割数目影响。

ISI+LA 焦斑中的衍射不均匀性可以通过使用软边光阑获得改善。通过软边光阑或相位光阑将子束调整为超高斯软边形态,就可以避免焦斑中的硬边衍射^[9],从而获得几乎完全平整的焦斑强度分布。LA 方法与其他空间方法的最大差异在于其周期性,ISI+LA 的瞬时焦斑也是周期性的,虽然散斑形态会随时间快速变化,但散斑空间周期是稳定的。

ISI+CPP 焦斑的不均匀性则需要通过增加 ISI 分

割数来降低。通过 CPP 模拟退火优化能获得均匀性极好的焦斑,然而这种效果对波前畸变很敏感,无法实际应用。根据公式 (4),增加 ISI 分割数可以降低焦斑不均匀性。但为了获得 1% 的不均匀性,需要使用 1 万个不相干子束,在现有规模的装置上并不现实。

理论模拟表明,尽管 ISI+LA 和 ISI+CPP 都能够获得具有高均匀性的时间积分焦斑,但这两者的空间相关性和时空演化特性有所不同。ISI+LA 的焦斑空间上具有周期性的高相干点;其瞬时焦斑强度在空间上具有周期性分布;在长时间窗口下,其匀滑速度一般低于激光带宽所对应的最大匀滑速度。ISI+CPP 的焦斑在时空上都具有低相干性;其焦区强度分布的时空演化完全随机,符合随机散斑规律;其匀滑速度一般是相应激光带宽下的最大值。

“昆吾”的 ISI 分割数目从 3×3 到 8×8 可选,并具有 LA 或 CPP 两种空间域匀滑能力。实测焦斑如图 9 所示,其中图 9(a) 是宽带光 CPP 焦斑,图 9(b) 是使用 8×8 的 ISI+CPP 的焦斑。ISI+CPP 焦斑中心区域的 RMS 被降低到 13%,而公式 (4) 的预测值为 $1/8=12.5\%$ 。匀滑效果主要作用在中、高频不均匀性上,仍需要对束匀滑方法进行优化以控制低频不均匀性。

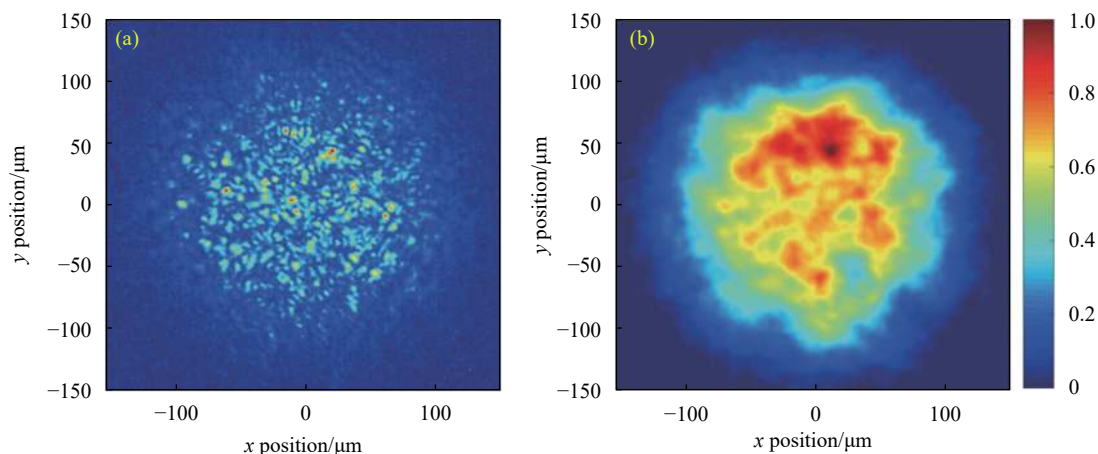


图 9 “昆吾”激光器的宽带焦点。(a) 使用了 CPP, (b) 使用了 ISI+CPP

Fig.9 Broadband focal spot of “KunWu” facility. (a) With CPP, (b) with ISI+CPP

4 总 结

束匀滑技术自被提出以来已经发展了 40 年。空间域方法中,随着光学制造和设计能力的提升,设计自由度大、衍射效率高的 CPP 已经成为高功率激光

焦点整形的主流手段;时间域方法,则因高功率激光技术路线的发展,选择了更有利于激光器放大、频率转换过程的 SSD 技术成为目前的主流技术。SSD+CPP+PS 的组合使单束激光的焦斑不均匀性最低降低到了 2.7%。另一方面,具有连续谱的宽带激光技术

路线也具有相当的潜力, EF-ISI 甚至获得了 1% 不均匀性的激光焦斑。最近国内学者提出的 RS、AS 等新型束匀滑方法更让人眼前一亮。

束匀滑技术是针对不稳定过程提出的控制手段, 焦区光场作为物理研究的输入条件, 其精确演化特性十分重要。而目前的束匀滑技术研究多数集中在长时间积分的焦斑不均匀性控制上, 对于具体的焦斑时间演化特性、焦斑相干性研究较少。与物理过程研究密切结合的束匀滑研究, 往往对计算能力或实验条件要求较高, 目前仍然较少。从控制印痕效应、LPI 过程的角度来看, 更大带宽的激光必然是高功率激光器的发展方向, 相应的束匀滑技术仍有待进一步优化和发展。

参考文献:

- [1] Skupsky S, Lee K. Uniformity of energy deposition for laser driven fusion [J]. *J Appl Phys*, 1983, 54(7): 3662-3671.
- [2] Desselberger M, Willi O, Savage M, et al. Measurement of the Rayleigh-Taylor instability in targets driven by optically smoothed laser beams [J]. *Phys Rev Lett*, 1990, 65(24): 2997-3000.
- [3] Hu S, Michel D T, Davis A K, et al. Understanding the effects of laser imprint on plastic-target implosions on OMEGA [J]. *Phys Plasmas*, 2016, 23(10): 102701.
- [4] Lindl J, Landen O, Edwards J, et al. Review of the national ignition campaign 2009-2012 [J]. *Phys Plasmas*, 2014, 21(2): 020501.
- [5] Eimerl D, Skupsky S, Myatt J, et al. A stardriver-class laser achieving 1 % beam uniformity in 1 ns [J]. *Journal of Fusion Energy*, 2016, 35(2): 459-469.
- [6] Dixit S, Feit M, Perry M, et al. Designing fully continuous phase screens for tailoring focal-plane irradiance profiles [J]. *Opt Lett*, 1996, 21: 1715-7.
- [7] Menapace J, Dixit S, Genin F, et al. Magnetorheological finishing for imprinting continuous phase plate structure onto optical surfaces[C]//SPIE, 2004, 5273: 220-230.
- [8] Kato Y, Mima K, Miyanaga N, et al. Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma-instability suppression [J]. *Phys Rev Lett*, 1984, 53(11): 1057-1060.
- [9] Gerchberg R W, Saxton W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1971, 35: 237-250.
- [10] Dixit S N, Lawson J K, Manes K R, et al. Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control [J]. *Opt Lett*, 1994, 19(6): 417-419.
- [11] Lin Y, Kessler T, Lawrence G. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profiles [J]. *Opt Lett*, 1995, 20: 764-766.
- [12] Neauport 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]. *Appl Opt*, 2003, 42(13): 2377-2382.
- [13] 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]. *JOSA A*, 2007, 24(1): 74.
- [14] 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: Conference Series*, 2016: 717.
- [15] Goodman J W. *Statistical Optics*[M]. Newyork: John Wiley & Sons, 2015.
- [16] Li Ping, Ma Chi, Li Jingqin, et al. Design of continuous phase plates for controlling spatial spectrum of focal spot [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(7): 1114. (in Chinese)
- [17] Lei Z M, Sun X Y, Lv F N, et al. Application of optical diffraction method in designing phase plates [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(11): 114201.
- [18] Wen Shenglin, Hou Jing, Yang Chunlin, et al. Uniformity of near-field caused by continuous phase plates for beam smoothing [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(6): 1543. (in Chinese)
- [19] Deng X, Liang X, Chen Z, et al. Uniform illumination of large targets using a lens array [J]. *Appl Opt*, 1986, 25(3): 377-381.
- [20] Zheng Jianzhou, Yu Qingxu, Lu Yongjun, et al. Improved lens arrays optical system with controllable focuswidth for uniform irradiation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(3): 331-336. (in Chinese)
- [21] Craxton R S, Anderson K S, Boehly T R, et al. Direct-drive inertial confinement fusion: A review [J]. *Phys Plasmas*, 2015, 22(11): 110501.
- [22] Campbell M, Goncharov V, Sangster T, et al. Laser-direct-drive program: Promise, challenge, and path forward [J]. *Matter Radiat Extrem*, 2017, 2(2): 1-18.
- [23] Skupsky S, Short R W, Kessler T, et al. Improved laser - beam uniformity using the angular dispersion of frequency - modulated light [J]. *J Appl Phys.*, 1989, 66(8): 3456-3462.

- [24] Yang Dong, Li Zhichao, Li Sanwei, et al. Laser plasma instability in indirect-drive inertial confinement fusion [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2018, 48(6): 21-36. (in Chinese)
- [25] Willi O, Afshar-Rad T, Coe S, et al. Study of instabilities in long scale-length plasmas with and without laser-beam-smoothing techniques [J]. *Physics of Fluids B: Plasma Physics*, 1990, 2(6): 1318.
- [26] Regan S, Marozas J, Craxton 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]. *J Opt Soc Am B-Opt Physics*, 2005, 22(5): 998.
- [27] Lehmborg R H, Schmitt A J, Bodner S E. Theory of induced spatial incoherence [J]. *J Appl Phys*, 1987, 62(7): 2680-2701.
- [28] Regan S, Marozas J, Kelly J, et al. Experimental investigation of smoothing by spectral dispersion [J]. *J Opt Soc Am B-Opt Physics*, 2000, 17: 1483-1489.
- [29] Li F, Gao Y, Zhao X, et al. Induced spatial incoherence combined with continuous phase plate for the improved beam smoothing effect [J]. *Opt Eng*, 2018, 57(6): 066117.
- [30] Tsubakimoto K, Nakatsuka M, Nakano H, et al. Suppression of interference speckles produced by a random phase plate, using a polarization control plate [J]. *Opt Commun*, 1992, 91(1-2): 9-12.
- [31] Fuchs J, Labaune C, Depierreux S, et al. Modification of spatial and temporal gains of stimulated Brillouin and Raman scattering by polarization smoothing [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(14): 3089-3092.
- [32] Rothenberg J E. Polarization beam smoothing for inertial confinement fusion [J]. *J Appl Phys*, 2000, 87: 3654-3662.
- [33] Wang Y, Wang F, Zhang Y, et al. Polarization smoothing for single beam by a nematic liquid crystal scrambler [J]. *Appl Opt*, 2017, 56: 8087.
- [34] Spaeth M, Manes K, Kalantar D, et al. Description of the NIF Laser [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69: 25-145.
- [35] Zheng W, Wei X, Zhu Q, et al. Laser performance upgrade for precise ICF experiment in SG-III Laser Facility [J]. *Matter Radiat Extrem*, 2017, 2(5): 243-255.
- [36] Skupsky S, Kessler T. Speckle - free phase plate (diffuser) for far - field applications [J]. *J Appl Phys*, 1993, 74: 4310-4316.
- [37] Dainty J. Laser Speckle and Related Phenomena[M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1975.
- [38] Munro D, Dixit S, Langdon A, et al. Polarization smoothing in a convergent beam [J]. *Appl Opt*, 2005, 43: 6639-47.
- [39] Huang X, Jia H, Zhou W, et al. Experimental demonstration of polarization smoothing in a convergent beam [J]. *Appl Opt*, 2015, 54: 9786.
- [40] Ren Guangsen, Sun Quan, Wu Wuming, et al. Effect of radial polarization modulation on smoothing and polarization properties of focal speckle [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(12): 122008. (in Chinese)
- [41] Lehmborg R H, Obenschain S P. Use of induced spatial incoherence for uniform illumination of laser fusion targets [J]. *Opt Commun*, 1983, 46(1): 27-31.
- [42] Zhao X, Gao Y, Li F, et al. Beam smoothing by a diffraction-weakened lens array combining with induced spatial incoherence [J]. *Appl Opt*, 2019, 58(8): 2121-2126.
- [43] Obenschain S P, Pawley C J, Mostovych A N, et al. Reduction of Raman scattering in a plasma to convective levels using induced spatial incoherence [J]. *Phys Rev Lett*, 1989, 62(7): 768-771.
- [44] Li F, Gao Y, Zhao X, et al. Experiment and theory of beam smoothing using induced spatial incoherence with a lens array [J]. *Appl Opt*, 2020, 59(10): 2976-2982.
- [45] Veron D, Ayrat H, Gouédard C, et al. Optical spatial smoothing of Nd-glass laser beam [J]. *Opt Commun*, 1988, 65(1): 42-46.
- [46] Donnat P, Gouédard C, Veron D, et al. Induced spatial incoherence and nonlinear effects in Nd: glass amplifiers [J]. *Opt Lett*, 1992, 17(5): 331-333.
- [47] Obenschain S P, Bodner S E, Colombant D, et al. The Nike KrF laser facility: Performance and initial target experiments [J]. *Phys Plasmas*, 1996, 3(5): 2098-2107.
- [48] Xiang Y, Star G, Tong X, et al. Beam-smoothing investigation on "Heaven I"-art. no. 62795Z[C]//SPIE, 2007, 6279: 62795Z.
- [49] Nakano H, Tsubakimoto K, Miyanaga N, et al. Spectrally dispersed amplified spontaneous emission for improving irradiation uniformity into high power Nd: glass laser system [J]. *J Appl Phys*, 1993, 73(5): 2122-2131.
- [50] Zhou Bingjie, Zhong Zheqiang, Zhang Bin. Influence of beam moving characteristics on smoothing effect of focal spot [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(21): 214202. (in Chinese)
- [51] Zheng Tianran, Zhang Yong, Di Yongchao, et al. Theoretical research of "intensity sweep" laser beam smoothing characteristics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 111405. (in Chinese)
- [52] Rothenberg J. Two-dimensional beam smoothing by spectral dispersion for direct-drive inertial confinement fusion[C]//SPIE, 1995, 2633.
- [53] Miyaji G, Miyanaga N, Urushihara S, et al. Three-directional spectral dispersion for smoothing of a laser irradiance profile [J]. *Opt Lett*, 2002, 27: 725-7.

- [54] Marozas J, Zuegel J, Collins T. Alternative laser-speckle-smoothing schemes for NIF direct-drive-ignition designs[C]//49th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, 2007.
- [55] Zhou Yuliang, Sun Zhzn, Liu Lanqin, et al. Research on beam smoothing technology for high-oower laser system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011(10): 41-48. (in Chinese)
- [56] Kelly J, Shvydky A, Marozas J, et al. Simulations of the propagation of multiple-FM smoothing by spectral dispersion on OMEGA EP[C]//SPIE, 2013, 8602: 86020D.
- [57] Holstein P A, André M, Casanova M, et al. Target design for the LMJ [J]. *Applied Physics*, 2000, 1: 693-704.
- [58] Duluc M, Penninckx D, Loiseau P, et al. Comparison of longitudinal and transverse smoothing by spectral dispersion on stimulated Brillouin backscattering in inertial confinement fusion plasmas [J]. *Phys Plasmas*, 2019, 26(4): 042707.
- [59] Zhang R, Zhang X, Sui Z, et al. Research on target uniform irradiation method using linearly modulated light and special grating dispersion [J]. *Opt Laser Technol*, 2011, 43(7): 1073-1077.
- [60] Eimerl D, Campbell E M, Krupke W F, et al. StarDriver: a flexible laser driver for inertial confinement fusion and high energy density physics [J]. *Journal of Fusion Energy*, 2014, 33(5): 476-488.
- [61] Eimerl D, Skupsky S, Campbell M. StarDriver: Recent results on beam smoothing and LPI mitigation [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 717: 012015.
- [62] Eimerl D. StarDriver: recent results on beam smoothing and 2 ω pe mitigation [J]. *Journal of Lasers, Optics & Photonics*, 2016, 3(1): 1000130.
- [63] 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 Physica Sinica*, 2014, 63(3): 035201. (in Chinese)
- [64] Zhong Z, Hou P, Zhang B. Radial smoothing for improving laser-beam irradiance uniformity [J]. *Opt Lett*, 2015, 40: 5850.
- [65] Hou P, Zhong Z, Zhang B. Analysis and optimization of radial smoothing based on optical Kerr effect for irradiation improvement [J]. *Opt Laser Technol*, 2016, 85: 48-54.
- [66] Weng X, Li T, Zhong Z, et al. Analysis of illumination uniformity affected by small-scale self-focusing of a pump beam in the radial smoothing scheme [J]. *Appl Opt*, 2017, 56: 8902.
- [67] Zhong Z, Yi M, Sui Z, et al. Ultrafast smoothing scheme for improving illumination uniformities of laser quads [J]. *Opt Lett*, 2018, 43: 3285.
- [68] Tian Boyu, Zhong Zheqiang, Sui Zhan, et al. Ultrafast azimuthal beam smoothing scheme based on vortex beam [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(2): 024207. (in Chinese)
- [69] Zhong Zheqiang, Zhang Bin. Conjugate rotation smoothing scheme for laser quad based on dual-frequency laser and spiral phase plate [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(1): 11012. (in Chinese)
- [70] Xiong Hao, Zhong Zheqiang, Zhang Bin, et al. Ultrafast smoothing scheme based on dynamic interference structure between beamlets of laser quad [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(6): 064206. (in Chinese)
- [71] Yi M, Zhong Z, Zhang B, et al. Combined implementation of smoothing technologies for improving illumination uniformity of laser quad in multi-directions [J]. *Journal of Modern Optics*, 2019, 66: 1-8.
- [72] Huang Yuan, Zhang Yinrui, Zhong Zheqiang, et al. Rapid Polarization rotation smoothing scheme based on interference of circularly polarized vortex beamlet [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0905003. (in Chinese)
- [73] Afeyan B, Hüller S. Optimal control of laser plasma instabilities using Spike Trains of Uneven Duration and Delay (STUD pulses) for ICF and IFE[C]//EPJ Web of Conferences, 2012: 59.
- [74] Afeyan B, Hüller S. Optimal control of laser-plasma instabilities using Spike Trains of Uneven Duration and Delay: STUD pulses[C]//IEEE International Conference on Plasma Science, 2013, arXiv:1304.3960
- [75] Hüller S, Afeyan B. Simulations of drastically reduced SBS with laser pulses composed of a Spike Train of Uneven Duration and Delay (STUD pulses)[C]//EPJ Web of Conferences, 2012: 59.
- [76] Albright B, Yin L, Afeyan B. Control of stimulated Raman scattering in the strongly nonlinear and kinetic regime using Spike Trains of Uneven Duration and Delay: STUD pulses [J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 64(4): 043804.
- [77] Li Y, Wang S, Xu J, et al. Precise manipulation on spike train of uneven duration or delay pulses with a time grating system [J]. *Opt Express*, 2015, 23: 29484.
- [78] Kruschwitz B, Kelly J, Dorrer C, et al. Commissioning of a multiple-frequency modulation smoothing by spectral dispersion demonstration system on OMEGA EP[C]//SPIE, 2013, 8602: 86020E.
- [79] Hohenberger M, Shvydky A, Marozas J, 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.
- [80] Zhou S, Lin Z, Jiang X. Beam smoothing by lens array with spectral dispersion [J]. *Opt Commun*, 2007, 272(1): 186-191.

- [81] Jiang Y, Wu R, Zhou S, et al. Performance of smoothing by spectral dispersion combined with distributed phase plate on SG-II[C]//SPIE, 2013, 8904: 890403.
- [82] Feng Wen, Li Qinghui, Zhou Shenlei, et al. Experimental study of two-dimensional smoothing by spectral dispersion with distributed phase plates [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 053001. (in Chinese)
- [83] Jiang Xiujuan, Zhou Shenlei, Lin Zunqi, et al. Improving of the irradiation uniformity on targets with a diffraction-weakened lens array and spectral dispersion smoothing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(11): 5824.
- [84] Beau V, Valla D, Daurios J, et al. Metrology of focusing gratings and continuous phase plates for LIL and LMJ lasers[C]//SPIE, 2004, 5252.
- [85] Pawley C, Gerber K, Lehmborg R, et al. Measurements of laser-imprinted perturbations and Rayleigh–Taylor growth with the Nike KrF laser [J]. *Phys Plasmas*, 1997, 4: 1969-1977.
- [86] Gao Y, Cui Y, Ji L, et al. Development of low-coherence high-power laser drivers for inertial confinement fusion [J]. *Matter Radiat Extrem*, 2020, 5(6): 065201.
- [87] Rao D, Gao Y, Cui Y, et al. 1 μJ nanosecond low-coherent laser source with precise temporal shaping and spectral control [J]. *Opt Laser Technol*, 2020, 122: 105850.
- [88] Cui Y, Gao Y, Rao D, et al. High-energy low-temporal-coherence instantaneous broadband pulse system [J]. *Opt Lett*, 2019, 44(11): 2859-2862.
- [89] Ji L, Zhao X, Liu D, et al. High-efficiency second-harmonic generation of low-temporal-coherent light pulse [J]. *Opt Lett*, 2019, 44(17): 4359-4362.
- [90] Zhao X, Ji L, Liu D, et al. Second-harmonic generation of temporally low-coherence light [J]. *APL Photonics*, 2020, 5(9): 091301.
- [91] Qiu Yue, Qian Liejia, Huang Hongyi, et al. Improve illumination uniformity by suppressing the diffraction of a lens array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1995, 22(1): 27-31. (in Chinese)