

神光 III 原型背向散射光特性研究

彭晓世 王 峰 杨 冬 徐 涛 魏惠月 刘慎业 梅 雨 刘永刚 陈 铭

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 为了验证束匀滑的物理效果并获得充气黑腔的辐射源特性,在神光III原型装置上利用背向散射测量系统对束匀滑和充气条件下的散射光能量份额及光谱进行了测量。散射光能量测量结果表明:当前实验条件下,束匀滑可有效抑制背向散射光份额,散射光份额由无束匀滑时的25%~35%降为2%~4%,充气黑腔中受激拉曼散射光份额明显增加,由真空腔的2%~4%增大至10%~13%。光谱测量结果表明:束匀滑后等离子体状态更均匀,充气黑腔的受激拉曼散射在激光作用前期就开始显著产生,而在真空黑腔中主要产生于激光作用的后期。

关键词 测量;束匀滑;背向散射;受激拉曼散射;等离子体

中图分类号 O536; O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0314004

Characteristics Study of the Backscattering Light on Shenguang-III Prototype

Peng Xiaoshi Wang Feng Yang Dong Xu Tao Wei Huiyue Liu Shenye
Mei Yu Liu Yonggang Chen Ming

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract In order to validate the effect of beam smoothing and to get the radiation characteristics of gas-filled hohlraum, the energy fraction of backscattering light and the streaked spectrum are measured by the backscattering measurement system on Shenguang-III prototype facility. The results indicate that in the current experimental conditions, beam smoothing can effectively inhibit the backscattering light fraction. The energy fraction of backscattering light is 25% ~ 35% without beam smoothing, and the energy fraction decreases to 2% ~ 4% with beam smoothing. The fraction of stimulated Raman scattering in gas-filled hohlraum increases markedly from 2% ~ 4% in empty hohlraum to 10% ~ 13%. The results of spectrum measurement indicate that beam smoothing can improve the uniformity of plasma. Stimulated Raman scattering occurs at the early stage of the laser effect for gas-filled hohlraum, but it occurs at the late stage for empty hohlraum.

Key words measurement; beam smoothing; backscattering; stimulated Raman scattering; plasma

OCIS codes 220.4830; 290.5820; 120.5820

1 引 言

在激光惯性约束聚变研究中,为创造点火需求的黑腔环境,要求较高功率密度的激光能在大尺度等离子体中有效传播,但这类条件下激发的各种参量不稳定性会降低激光吸收效率、破坏辐射场对称性和等熵压缩过程^[1-4]。束匀滑技术^[5-7]可以破坏激光在空间和时间上的相干性,进而抑制激光入射

腔靶过程中产生的有害参量过程。目前神光III原型装置在大能量输出条件下的物理实验已经开始显示出激光等离子体相互作用(LPI)参量不稳定性的负面效果,为了将束匀滑技术大规模应用于该激光装置,需要对束匀滑的物理效果进行验证。此外,在激光惯性约束聚变研究中实现等熵压缩并获得较高的内爆速度,需要比较长的激光作用时间。若使用真

收稿日期: 2013-10-17; 收到修改稿日期: 2013-11-04

基金项目: 激光聚变研究中心创新基金(CX08201202)

作者简介: 彭晓世(1981—),男,硕士,副研究员,主要从事惯性约束聚变物理诊断及设备研发方面的研究。

E-mail: xiaoshi1025@sohu.com

空黑腔,被烧蚀加热的腔壁等离子体由于在腔内不受任何束缚,会向腔轴和注入孔方向运动,破坏辐射对称性,部分腔壁烧蚀等离子体甚至能运动到腔轴附近,直接以流体相互作用的形式破坏靶丸的内爆压缩过程。在点火靶设计中对于长脉冲辐射源通常需要在黑腔中充入低密度低原子序数气体来抑制腔壁运动^[8-9],因此需要开展充气条件下的散射光特性研究。

本文利用最新研制的基于神光 III 原型装置的背向散射测量系统^[10-11]对束匀滑和充气条件下的散射光特性进行了研究。

2 实验用靶及实验布局

为达到验证束匀滑物理效果的目的,希望首先在未加束匀滑条件下测到较强的散射光信号,之后在加束匀滑后测到明显变弱的散射光信号。以往的双端驱动黑腔物理实验表明 $\Phi 1.0 \text{ mm} \times 2.1 \text{ mm}$ 的黑腔 X 光转换效率在大能量条件下有下降的趋势,其原因可能是较高的激光功率密度导致 LPI 参量过程较强,进而使散射光份额变大。因此,本次束匀滑效果验证实验中选择了尺寸为 $\Phi 1.0 \text{ mm} \times 2.1 \text{ mm}$ 的真空黑腔,腔壁厚度为 $25 \mu\text{m}$ 。由于束匀滑后光斑尺寸变大,为保证激光注入效率,黑腔注入孔由以往的 $\Phi 0.65 \text{ mm}$ 增大至 $\Phi 0.75 \text{ mm}$ 。为便于比较,充气黑腔尺寸与真空黑腔一致,也为 $\Phi 1.0 \text{ mm} \times 2.1 \text{ mm}$,腔壁厚度为 $25 \mu\text{m}$,注入孔为 $\Phi 0.8 \text{ mm}$,在黑腔中充入 0.73 atm ($1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$) (约 $20 \text{ }^\circ\text{C}$) 的 C_5H_{12} 气体,激光注入孔封口膜材料为聚酰亚胺,厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ 。

实验布局如图 1 所示,神光 III 原型八束激光分别从上、下两个方向相对腔轴成 45° 角方向注入腔内,激

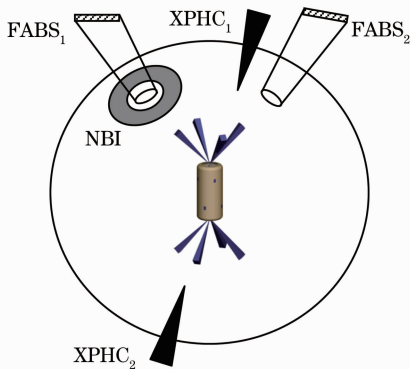


图 1 背向散射光测量实验布局

Fig. 1 Experimental arrangement for backscattering measurement

光焦点重合于注入孔中心。激光波长为 351 nm ,脉冲宽度为 1 ns ,能量有两档,分别为 $8 \times 260 \text{ J}$ 和 $8 \times 800 \text{ J}$,打靶方式分别为束匀滑和无束匀滑。两台 X 光针孔相机 (XPHC) 分别安装在靶室上、下半球,用于监测打靶激光的注入情况。两套全孔径背向散射测量系统 (FABS) 安装在终端光学组件后,利用打靶透镜进行散射光收集,用于测量打靶透镜范围内的受激拉曼散射 (SRS)、受激布里渊散射 (SBS) 散射光相关信息,包括能量、光谱和时间波形。一套近背向散射光测量系统 (NBI) 安装在 FABS 周围,用于测量打靶透镜范围外的 SRS、SBS 散射光能量。

3 背向散射测量系统

背向散射测量系统可用于测量背向散射光的光谱和能量信息,是用于研究激光和等离子体相互作用的主要诊断设备,其包含 FABS 和 NBI 两部分,分别用于测量打靶透镜范围内和打靶透镜附近的散射光。背向散射测量系统光路如图 2 所示。FABS 利用终端光学组件 (FOA) 对靶室中心 (TCC) 的散射光进行收集,随后进入长焦离轴抛物镜,再经多个反射镜组成的转折模块后进入二向色镜。二向色镜在 $330 \sim 400 \text{ nm}$ 波段反射率大于 98% , $415 \sim 950 \text{ nm}$ 波段透射率大于 93% ,可将散射光分为 SRS 和 SRS 两个支路。在 SRS 和 SRS 两支路中各放置一个空间滤波器,滤波小孔均位于离轴抛物镜焦点处,通过长焦离轴抛物镜和空间滤波器可消除来自终端光学组件内的平面元件表面反射光(需将元件倾斜放置)的影响。对于 SRS 支路,由于来自靶点的二倍频杂散光无法通过光路进行滤除,因此在 SRS 支路加装了陷波滤光片滤除杂散光。为测量散射光光谱,在 SRS 和 SBS 两个支路中分别利用分束镜进行了光束取样。在 FABS 中通过谱仪配条纹相机进行时间分辨的光谱测量,通过能量计进行背向散射光能量测量。NBI 利用靶室内安装在打靶透镜周围的环形离轴椭球镜进行散射光收集,通过成像方式将散射光传出靶室,由于物点和像点分别位于椭球的两个焦点上,收光系统具有较高的成像质量。从靶室中心点散射出的散射光通过靶室上的密封玻璃窗口后进入诊断包,在诊断包内通过楔形反射镜对散射光进行能量衰减后进入二向色镜,二向色镜将光路分成 SRS 和 SBS 两支路,在两支路中通过透镜成像控制散射光光束后再利用能量计进行能量测量。

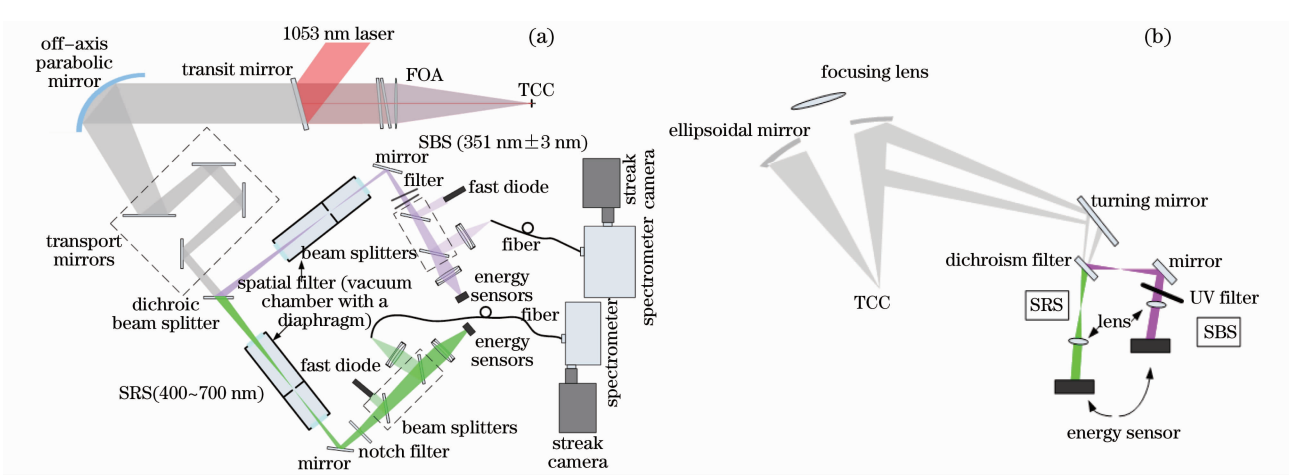


图 2 背向散射测量系统示意图。(a) 全孔径背向散射测量系统；(b) 近背向散射测量系统

Fig. 2 Schematic diagram of backscattering measurement system, (a) Full aperture backscattering measurement system; (b) near backscattering measurement system

4 实验结果及分析

为减少衍射导致的能量损失，提高元件的能量利用率，束匀滑使用的是相位连续变化的连续相位板(CPP)^[12-13]。实验中通过短脉冲激光打靶获得了不同光束特性条件下(聚焦和束匀滑)的 X 光焦斑图像，如图 3 所示。由于作用时间短，等离子体横向热传导尚未改变激光的能量沉积位置，可以认为 X 光发射区域与激光焦斑功率密度强区一致。高于特定功率密度的激光功率份额(FOPAI)可以表征不同功率的热斑占焦斑总功率的份额，为了定量比较各种光束条件下的激光焦斑质量，还对 X 光焦斑

数据进行了 FOPAI 分析，图 4 是焦斑的能量份额随激光功率密度的分析结果。由图 3 可知，使用 CPP 后的焦斑强度空间分布明显更均匀，但受限于主激光本身的光束质量及目前 CPP 加工的精度，束匀滑后焦斑还是存在少量比较明显的功率密度强区。由图 4 可知，聚焦时约 40% 激光能量处于功率密度大于 $3 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 的区域中，而束匀滑后功率密度大于 $1 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 的激光能量只占约 10%，利用 CPP 进行束匀滑后可有效降低激光焦斑中较高功率密度的能量份额，从而改善光强空间分布特性。

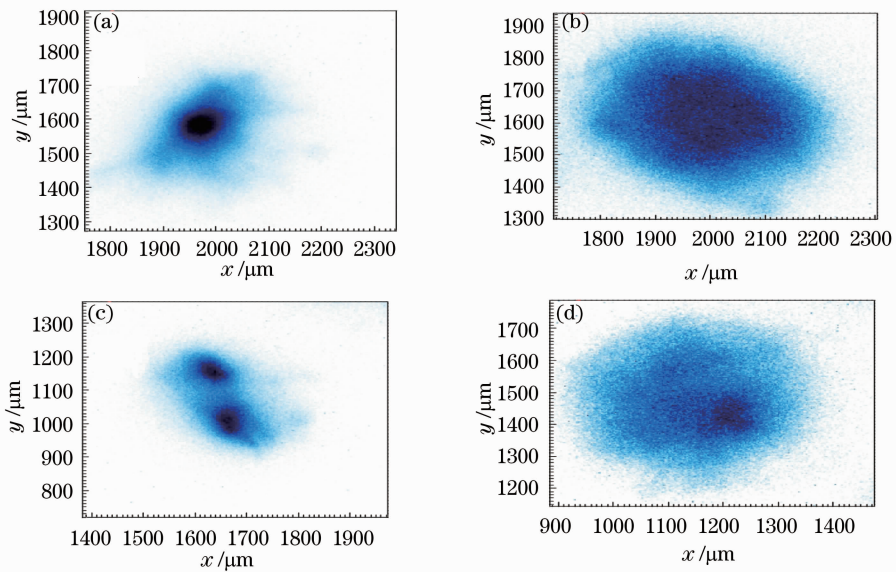


图 3 焦斑测量结果。(a)、(c) 聚焦；(b)、(d) 束匀滑

Fig. 3 Images of focal spot. (a), (c) Focus; (b), (d) smoothing

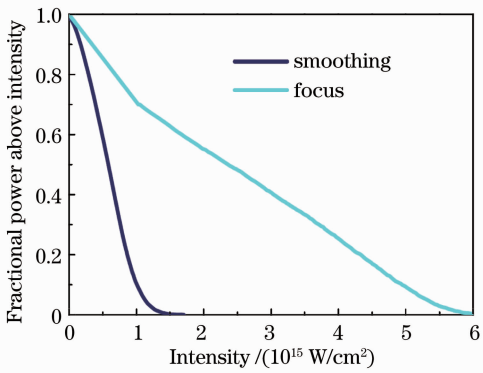


图 4 焦斑的 FOPAI 曲线

Fig. 4 FOPAI curves of focal spot

进行束匀滑物理效果验证时使用的是真空黑腔靶, 实验中对不同打靶方式(束匀滑和无束匀滑)和打靶能量条件下的散射光份额进行了测量, 散射光份额测量结果如图 5 所示。由图 5 可知, 小能量 (8×260 J) 打靶时, 未采用束匀滑措施时总的散射光份额为 4%~9%, SBS 散射光占主要部分, SRS 散射光份额小于 0.1%。束匀滑后, 总的散射光份额降至约 0.2%。大能量 (8×800 J) 打靶时, 无束匀滑时总的散射光份额为 25%~35%, SBS 散射光仍然占主要部分, SRS 散射光比例有所上升, 但份额小于 4%。大能量束匀滑后, 总散射光份额降至 2%~4%, 主要是 SBS 散射光, SRS 散射光小于 0.1%。

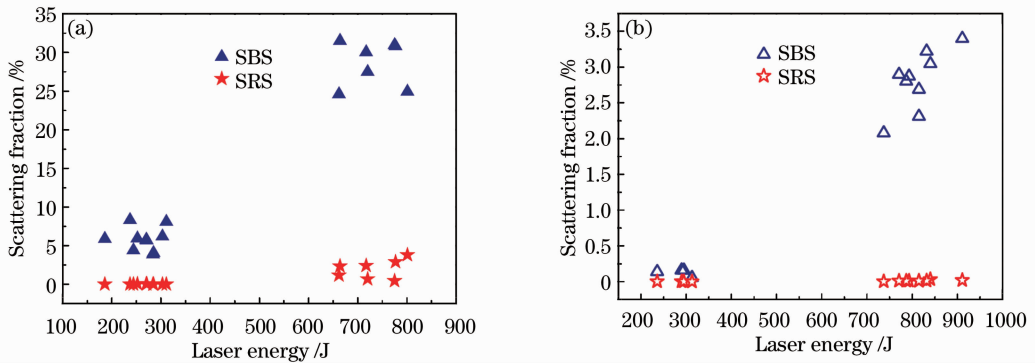


图 5 背向散射光能量份额测量结果。(a) 无束匀滑; (b) 束匀滑

Fig. 5 Experimental results of energy fraction of backscattering light measurement. (a) Without smoothing; (b) with smoothing

无论是大能量还是小能量打靶, 采用束匀滑措施后散射光份额均显著下降, 验证了束匀滑的物理效果, 显示出其抑制 LPI 的能力。无束匀滑时, 激光功率密度很高, 激光远场光束质量很差, 很大一部分激光处于高功率密度区域, 腔内 LPI 可能已经发展到了饱和阶段, 因此散射光份额较大。束匀滑后, 光束质量得到大幅改善, 处于高功率密度区域的激光大幅减少, 有效抑制了 LPI 及其相应的散射光。

实验中还利用 OMA150 谱仪配光学条纹相机对 SRS 的时间分辨光谱进行了测量, 束匀滑和无束匀滑条件下的 SRS 时间分辨光谱测量结果如图 6 所示, 自下而上进行扫描, 时间零点对应打靶激光前沿。由于在 SRS 支路加装了陷波片 (527 ± 5) nm 以消除来自靶点的二倍频杂散光, 因此图中 (527 ± 5) nm 处没有信号。

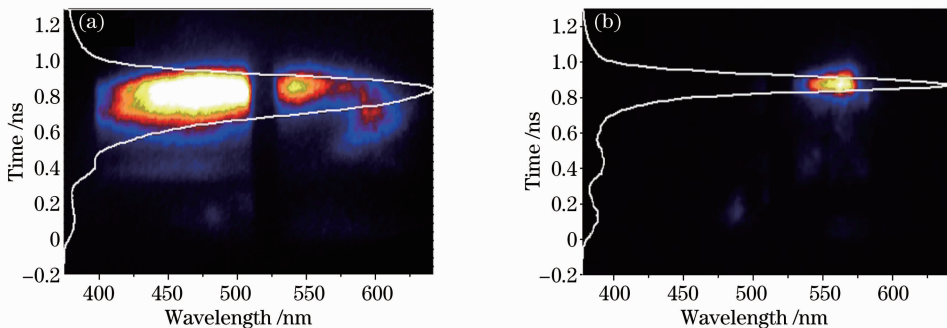


图 6 受激拉曼散射条纹谱测量结果。(a) 无束匀滑; (b) 束匀滑

Fig. 6 Experimental results of the streaked spectrum of stimulated Raman scattering. (a) Without smoothing; (b) with smoothing

由图 6 可知, SRS 散射光主要产生于激光作用的后期(0.7~1.0 ns), 未使用束匀滑时, SRS 光谱范围较宽, 约为 400~600 nm, 主要能量集中于短波长区域。束匀滑后的 SRS 光谱范围明显变窄, 光谱主要集中在 550 nm 附近。由于短波长的 SRS 散射光来自于 LPI 增长率比较小的等离子体低密度区域(420 nm 的 SRS 对应等离子体密度小于 0.01 倍临界密度的区域), 因此可以说, 由于未进行束匀滑时光束中处于较高功率密度的能量份额太多, LPI 在原本较难激发的等离子体低密度区域也得到了显著增长。束匀滑后 SRS 光谱明显变窄主要是由于束匀滑条件下的焦斑分布更为均匀, 打靶时产生的等离子体状态也更为稳定。使用束匀滑后, 由于功率密度降低, SRS 主要在增长率较大的高密度区域被激发。SRS 散射光主要产生于激光作用的后期, 可能是因为在真空黑腔中形成具有一定尺度且比较均匀的小于 1/4 临界密度区需要一定时间。

实验在神光 III 原型上开展了充气黑腔特性研究, 充气黑腔实验中散射光份额测量结果如图 7 所示。由图 7 可知, 充气黑腔中 SRS 散射光份额为 28%~35%, 与真空黑腔差别不大, 但 SRS 散射光份额有一定程度的增大, 从真空腔的 2%~4% 增大到充气腔的 10%~13%。因此充气黑腔散射光份额系统地比真空黑腔多约 8%, 这将导致峰值辐射温度降低约 4 eV。FABS 与 NBI 分别测到的能量如图 8 所示, 发现对于真空黑腔, 散射光主要分布于打靶透镜范围内, FABS 测到的散射光能量约占散射光总能量的 80%, 而在充气黑腔中, 分布在打靶透镜范围外的散射光增多, NBI 测到的散射光能量约为散射光总能量的 1/3。

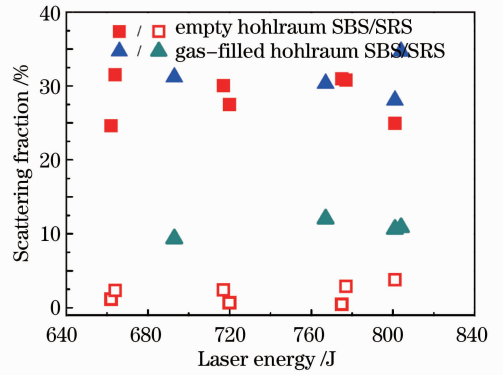


图 7 真空腔与充气腔的背向散射光能量份额
Fig. 7 Energy fractions of backscattering light for empty hohlraum and gas-filled hohlraum

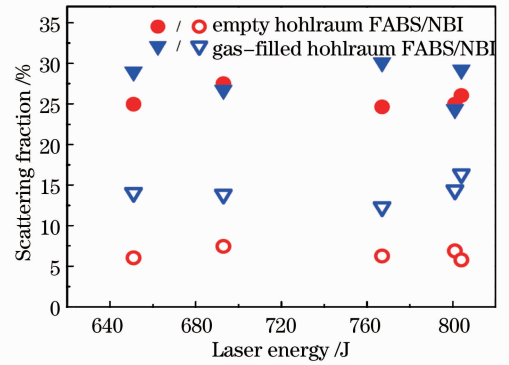


图 8 FABS 与 NBI 收集到的背向散射光能量份额
Fig. 8 Energy fractions of backscattering light collected by FABS and NBI

束匀滑和无束匀滑条件下充气黑腔的 SRS 时间分辨光谱测量结果如图 9 所示。由于前期的实验^[10]表明通过离轴抛物镜配空间滤波器能有效抑制来自终端光学组件内的反射光, 而来自靶点的二倍频杂散光也很弱, 因此进行充气黑腔的 SRS 光谱测量时取掉了光路中的陷波片, 所以图 9 中(527±5) nm

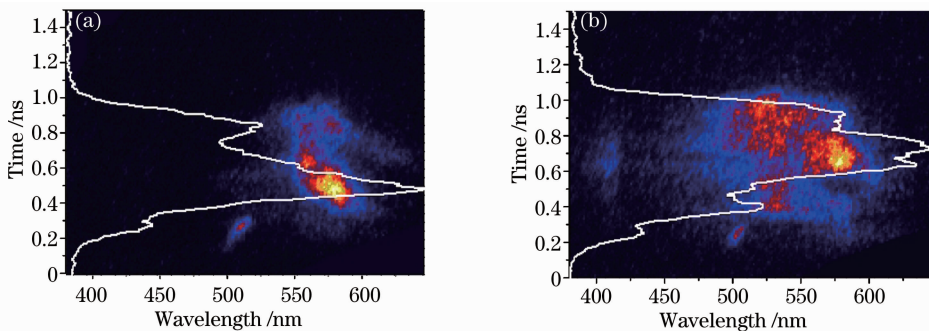


图 9 充气腔的受激拉曼散射条纹谱。(a)束匀滑; (b)无束匀滑

Fig. 9 Streaked spectra of stimulated Raman scattering at gas-filled hohlraum. (a) With smoothing; (b) without smoothing

处没有信号丢失。由图 9 可知,与真空黑腔中 SRS 散射光主要产生于激光作用的后期不同,充气黑腔中的 SRS 在激光作用前期(约 0.3 ns)就开始显著产生。对于充气黑腔,虽然激光在 10~20 ps 时间内就能烧穿封气膜,但是等离子体密度稀疏到临界密度以下还需要 200~300 ps,因此实际上激光从一开始进入腔内就激发起显著的 SRS。束匀滑条件下的 SRS 光谱宽度变窄,说明 SRS 是在状态较均匀的等离子体中被激发的,激光在等离子体中没有发生显著的成丝。

5 结 论

束匀滑技术可以破坏激光在空间和时间上的相干性,进而抑制激光入射腔靶过程中产生的有害参量过程。此外,在黑腔中充入低密度低原子序数气体可以抑制腔壁烧蚀等离子体的运动,进而抑制等离子体对辐射对称性和内爆压缩过程的破坏。为了验证束匀滑的物理效果,并获得充气黑腔的辐射源特性,利用最新研制的基于神光 III 原型装置的背向散射测量系统对束匀滑和充气条件下的散射光特性进行了研究。实验结果表明:在当前实验条件下,束匀滑后光束质量得到大幅改善,处于高功率密度区域的激光能量大幅降低,通过束匀滑可有效抑制背向散射光份额,散射光份额由无束匀滑时的 25%~35%降为 2%~4%。散射光谱测量表明束匀滑条件下等离子体状态更均匀。充气黑腔中的 SRS 散射光份额与真空黑腔差别不大,但 SRS 散射光份额从真空腔的 2%~5%增大到充气腔的 10%~13%,且充气黑腔中分布在打靶透镜范围外的散射光比例有所上升。此外,SRS 光谱测量结果表明:充气黑腔的 SRS 在激光作用前期就开始显著产生,而真空黑腔的 SRS 主要产生于激光作用的后期。

参 考 文 献

- 1 D H Froula, L Divol, R A London, *et al.*. Pushing the limits of plasma length in inertial-fusion laser-plasma interaction experiments [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(1): 015002.
- 2 D E Hinkel, D A Callahan, A B Langdon, *et al.*. Analyses of laser-plasma interactions in National Ignition Facility ignition

- targets [J]. *Phys Plasma*, 2008, 15(5): 056314.
- 3 Juan C Fernandez, Bruno S Bauer, James A Cobble, *et al.*. Measurements of laser-plasma instability relevant to ignition hohlraums [J]. *Phys Plasmas*, 1997, 4(5): 1849-1856.
- 4 Li Zhichao, Zhang Xiaoding, Yang Dong, *et al.*. Energy fraction measurements of stimulated Brillouin scattering and stimulated Raman scattering on Shenguang-III prototype laser facility [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(8): 1891-1895.
李志超, 张小丁, 杨冬, 等. 神光 III 原型受激拉曼与受激布里渊散射份额测量 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(8): 1891-1895.
- 5 Xie Jie, Fan Wei, Li Xuechun, *et al.*. Spatial laser beam shaping using binary panels [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1959-1966.
谢杰, 范薇, 李学春, 等. 二元振幅型面板用于光束空间整形 [J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1959-1966.
- 6 Y Lin, T J Kessler, G N Lawrence. Design of continuous surface-relief phase plates by surface-based simulated annealing to achieve control of focal-plane irradiance [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(20): 1703-1705.
- 7 Li Ping, Ma Chi, Su Jingqin, *et al.*. Analysis of laser optimized spectrum for smoothing the focused spot by temporal and spatial method [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(4): 534-538.
李平, 马驰, 粟敬钦, 等. 时域与空域结合实现光束匀滑的光谱优化分析 [J]. *中国激光*, 2008, 35(4): 534-538.
- 8 John Lindl. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain [J]. *Phys Plasmas*, 1995, 2(11): 3933-4024.
- 9 John D Lindl, Peter Amendt, Richard L Berger, *et al.*. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility [J]. *Phys Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.
- 10 Peng Xiaoshi, Wang Feng, Xu Tao, *et al.*. Development and application of full aperture backscattering station measurement system on Shenguang III prototype laser facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0812003.
彭晓世, 王峰, 徐涛, 等. 神光 III 原型全孔径背向散射测量系统研制及应用 [J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0812003.
- 11 Xu Tao, Peng Xiaoshi, Wei Huiyue, *et al.*. Near backscatter light diagnostic system on SG-III prototype laser facility [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(12): 2853-2857.
徐涛, 彭晓世, 魏惠月, 等. 神光 III 原型装置的近背向散射光诊断系统 [J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(12): 2853-2857.
- 12 Li Ping, Jia Huaiting, Wang Fang, *et al.*. Analysis of continuous phase plates applying position for TIL facility [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(2): 318-323.
李平, 贾怀庭, 王芳, 等. 神光 III 原型装置中连续相位板的应用位置分析 [J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 318-323.
- 13 Wen Shenglin, Xu Qiao, Ma Ping, *et al.*. Process-based design of continuous phase plates [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3179-3182.
温圣林, 许乔, 马平, 等. 基于工艺连续相位板设计 [J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 3179-3182.

栏目编辑: 史敏