



·惯性约束聚变物理与技术·研究快报·

超热相干汤姆逊散射实验研究取得进展*

龚 韬¹, 陈朝鑫¹, 李志超¹, 郝 亮², 赵 航¹, 蒋小华¹, 潘凯强¹, 李 琦¹,
李三伟¹, 杨 冬¹, 王 峰¹, 杨家敏¹, 赵宗清¹, 张保汉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. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘 要: 在神光 III 原型装置上, 利用 8 束三倍频 (351.0 nm) 激光注入充气黑腔产生大尺度高温等离子体并激发高水平受激布里渊散射 (SBS) 过程。利用 1 束四倍频 (263.3 nm) 探针束和 1 套广角汤姆逊散射诊断系统, 获得了三倍频激光 SBS 过程驱动的离子声波的超热相干汤姆逊散射 (STS) 光谱。通过对 STS 光谱和背向 SBS 光谱进行联合分析, 揭示了 SBS 的时空演化过程。

关键词: 汤姆逊散射; 超热相干; 受激布里渊散射; 惯性约束聚变

中图分类号: O571.44; O534⁺.2; O437

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220167

Experimental study on super-thermal collective Thomson scattering

Gong Tao¹, Chen Chaoxin¹, Li Zhichao¹, Hao Liang², Zhao Hang¹, Jiang Xiaohua¹, Pan Kaiqiang¹, Li Qi¹,
Li Sanwei¹, Yang Dong¹, Wang Feng¹, Yang Jiamin¹, Zhao Zongqing¹, Zhang Baohan¹

(1. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: On Shenguang-III prototype facility, eight 3ω (351.0 nm) laser beams are used to produce laser-scale high-temperature plasmas as well as to excite strong stimulated Brillouin scattering (SBS). An additional 4ω (263.3 nm) laser beam, together with a large-aperture Thomson scattering diagnostic system, is applied to obtain the super-thermal collective Thomson scattering (STS) spectra of the ion acoustic waves driven by the SBS process of a 3ω laser beam. By comparing and analyzing the STS spectra and the backward SBS spectra, the temporal and spatial evolution of SBS is revealed.

Key words: Thomson scattering, super-thermal, stimulated Brillouin scattering, inertial confinement fusion

高强度激光在低密度等离子体中激发的参量不稳定性^[1-3]是惯性约束聚变(ICF)^[4-5]研究中无法回避的过程。它会降低激光能量耦合效率、破坏驱动对称性、预热聚变燃料,以及损伤驱动器光学元器件,因而被认为是实现 ICF 点火的两大风险之一(另一风险为流体力学不稳定性)。美国国家点火装置(NIF)近期的实验表明,在间接驱动 ICF 的低填充黑腔中参量不稳定性以受激布里渊散射(SBS)为主^[6],因此对 SBS 的研究目前备受关注。具体而言, SBS 指的是激光在等离子体中衰变成一支散射光和一支离子声波(IAW)的过程。在大型激光装置上,诊断背向(激光的反方向)散射光的能量和光谱是目前开展 SBS 实验研究的主要方法^[7]。但这是一种被动式诊断方法,只能获得沿着激光传播方向路径积分之后、从等离子体中出射的散射光,不具备空间分辨能力,因而限制了对 SBS 的深入理解。

相对而言,利用超热相干汤姆逊散射(STS)技术^[8-9]对 SBS 的另一产物(IAW)进行诊断,可以获得其局域空间位置的频谱信息,因此有望揭示 SBS 的细致时空演化行为。STS 的基本原理是:当电磁波(探针束)穿越等离子体时,会与在 IAW 中作集体运动的自由电子发生弹性散射;这些散射光相干叠加之后,便携带了 IAW 的信息;通过对诊断到的散射光进行解谱,即可反推出 IAW 的频率、波数、幅度等信息。这是一个三波耦合过程,探针束、

* 收稿日期:2022-05-10; 修订日期:2022-05-25

基金项目:中物院激光聚变研究中心青年人才基金项目(RCFPD3-2019-6);国家自然科学基金项目(11905204, 11975215, 11875241)

联系方式:龚 韬, gongtao5@mail.ustc.edu.cn。

通信作者:杨 冬, yangdong.caep@gmail.com;

李志超, limatu@163.com。

IAW 及散射光三者之间必须满足频率和波矢的匹配关系。考虑到 SBS 驱动的 IAW 具有特定的频率和波矢, STS 对探针束的频率和入射方向及散射光的收光诊断方向均有严格的要求^[10]。正因如此, STS 技术目前主要应用于小型激光装置的开放实验位型(如气袋靶、平面靶等)^[8-9, 11-13], 而对于大型激光装置上更接近于 ICF 点火条件的封闭实验位型(如充气腔靶), 则鲜有报道。考虑到我国 ICF 研究正在逐渐接近 ICF 点火条件, 发展 STS 技术并将其应用于充气腔靶等封闭实验位型, 对 SBS 的深入研究具有重要意义。

最近, 在我国神光 III 原型装置上完成了一次充气腔靶位型下的 STS 实验, 实验排布如图 1 所示。实验中, 腔轴竖直放置, 腔的直径和长度均为 1.4 mm, 上下两端均为敞口设计(即无激光注入孔), 侧壁有一个直径为 400 μm 的诊断孔, 用于 STS 探针束的注入。腔壁材料为金, 厚度为 60 μm 。腔壁外侧贴有聚酰亚胺薄膜, 腔内充 0.06 MPa 的 C_3H_{12} 气体。8 束三倍频 (351 nm) 激光分别从腔的上下两端注入腔内, 其能量约为 800 J/束, 波形为 2 ns 方波, 弹着点中心均位于腔腰偏下 200 μm 的平面内。其中 1 束激光作为相互作用束, 使用直径为 300 μm 的连续相位板 (CPP), 以获得约 8×10^{14} W/cm² 的平均光强, 从而激发高水平(散射光份额约为 8%)的 SBS; 另外 7 束激光作为加热束, 使用直径为 500 μm 的 CPP, 其平均光强约为 3×10^{14} W/cm²。相互作用束的光路上安装有背向散射光诊断系统, 用于获得背向 SBS 散射光的能量和时间分辨光谱。另外 1 束四倍频 (263.3 nm) 激光作为探针束, 从水平方向沿腔侧壁的诊断孔中心注入腔内, 其能量约为 60 J, 波形为 3 ns 方波, 焦斑直径约为 80 μm 。该探针束穿过相互作用束的激光通道, 并在两者的交叠区域发生 STS 过程, STS 散射光大致沿竖直向下的方向出射。1 套广角汤姆逊散射诊断系统^[10]从腔的正下方对上述交叠区域进行成像收光诊断, 以获得局域空间(体积约为 $\phi 80 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$)位置的 STS 光谱。

图 2 展示了实验中获得的 STS 光谱和 SBS 光谱。STS 光谱表明, 在其诊断的局域空间位置(如图 3 中绿色方块所示), SBS 主要在两个时段激发, 分别是激光脉冲早期的 0.3~0.6 ns, 以及激光脉冲晚期的 1.2~2.0 ns。SBS 光谱虽然也显示了类似的结果, 但如果将其时间行为与 STS 光谱的时间行为进行细致对比即可发现, 两者在早期存在明显差异, 如图 3 所示。SBS 散射光从 0.0 ns 时刻即开始增长, 并在 0.25 ns 时刻达到峰值, 其时间行为早于 STS 诊断到的 IAW, 其强度也高于 STS 散射光。考虑到 SBS 光谱表征的是整个相互作用束激光通道上的 SBS 过程, 上述差异表明, 在激光脉冲早期, SBS 主要发生在腔口附近。此时, STS 由于诊断位置更靠近腔壁, 因此未能诊断到增长最强的 IAW。而在激光脉冲晚期, STS 光谱与 SBS 光谱时间行为基本一致, 说明 STS 诊断到了增长最强的 IAW, 这意味着此时 SBS 主要发生在靠近腔壁的气体区。

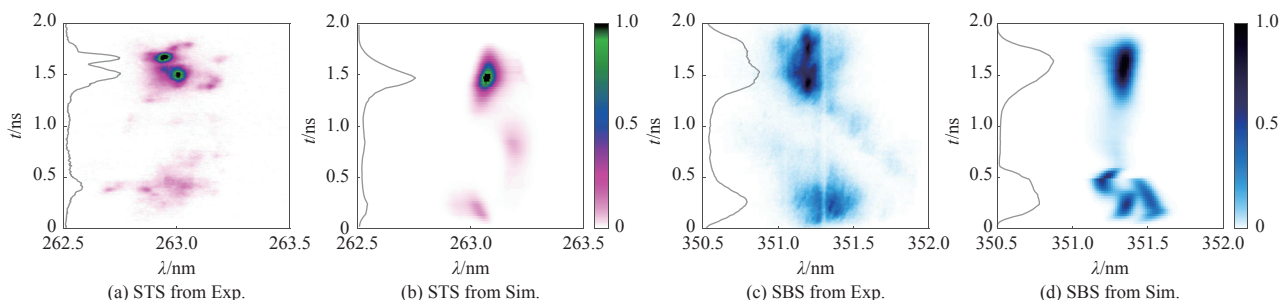


Fig. 2 STS spectra and SBS spectra obtained from experiments and simulations

图 2 实验诊断和模拟计算的 STS 光谱和 SBS 光谱

上述结论得到了数值模拟的证实。基于辐射流体模拟获得的等离子体状态参数, 进一步开展了 STS 光谱和 SBS 光谱的模拟计算, 结果再现了实验观测, 如图 2 所示。模拟显示, 充气黑腔内 SBS 的激发增长主要受等离子体流场均匀性的影响。早期(0.0~0.6 ns), 在激光烧蚀聚酰亚胺薄膜和激光加热导致的“排空”效应的共同作用下, 腔口附近的流场更加均匀, 更有利于 SBS 的激发增长; 中期(0.6~1.2 ns), 腔壁金等离子体的膨胀导致激光通道内

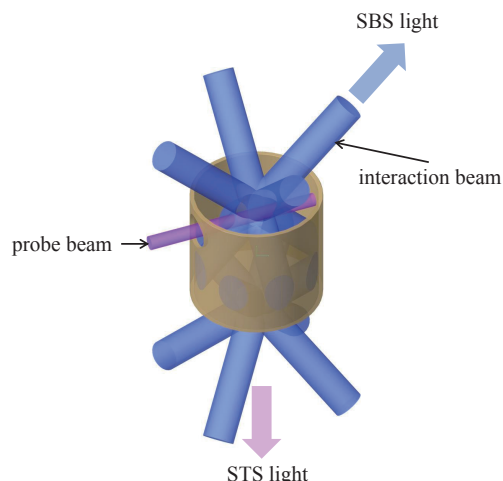


Fig. 1 Schematic diagram of the experiment setup

图 1 实验排布图

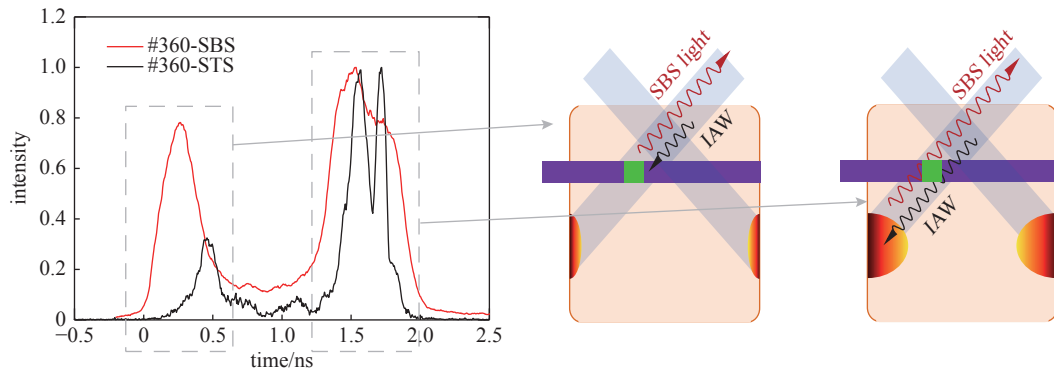


Fig. 3 Temporal behaviors of the STS spectra and the STS spectra, as well as the corresponding physical picture

图 3 STS 光谱和 SBS 光谱的时间行为及其对应的物理图像示意图

的流场极不均匀, SBS 被抑制; 晚期(1.2~2.0 ns), 受填充气体从腔轴反弹的影响, 靠近腔壁的区域出现较为均匀的流场分布, 因此 SBS 主要在该区域激发增长。

该研究首次在封闭位型的充气腔靶中获得了 SBS 驱动的 IAW 的 STS 光谱, 揭示了不同时段 SBS 的空间位置信息。实验结果得到了数值模拟的证实, 进一步提升了对充气腔靶内 SBS 时空演化的物理认识。STS 作为一种重要诊断技术, 将在后续 SBS 饱和机制的研究中发挥关键作用。

参考文献:

- [1] Kruer W L. The physics of laser plasma interactions[M]. Redwood: Addison-Wesley, 1988.
- [2] Yang Dong, Li Zhichao, Li Sanwei, et al. Laser plasma instability in indirect-drive inertial confinement fusion[J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 065203.
- [3] Gong Tao, Hao Liang, Li Zhichao, et al. Recent research progress of laser plasma interactions in Shenguang laser facilities[J]. *Matter Radiat Extremes*, 2019, 4: 055202.
- [4] Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. *Physics of Plasmas*, 1995, 2(11): 3933-4024.
- [5] Betti R, Hurricane O A. Inertial-confinement fusion with lasers[J]. *Nature Physics*, 2016, 12: 435.
- [6] Hall G N, Jones O S, Strozzio D J, et al. The relationship between gas fill density and hohlraum drive performance at the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24: 052706.
- [7] Zha Weiyi, Yang Dong, Xu Tao, et al. Backscatter spectra measurements of the two beams on the same cone on Shenguang-III laser facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89: 013501.
- [8] Glenzer S H, Divol L M, Berger R L, et al. Thomson scattering measurements of saturated ion waves in laser fusion plasmas[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(12): 2565.
- [9] Froula D H, Divol L, Glenzer S H, et al. Measurements of nonlinear growth of ion-acoustic waves in two-ion-species plasmas with Thomson scattering[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88: 105003.
- [10] Chen Chaoxin, Gong Tao, Li Zhichao, et al. Implementation of a large-aperture Thomson scattering system for diagnosing driven ion acoustic waves on Shenguang-III prototype laser facility[J]. *Journal of Instrumentation*, 2022, 17: P05017.
- [11] Froula D H, Divol L, MacKinnon A, et al. Direct observation of stimulated-Brillouin-scattering detuning by a velocity gradient[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90: 155003.
- [12] Froula D H, Divol L, Offenberger A, et al. Direct observation of the saturation of stimulated Brillouin scattering by ion-trapping-induced frequency shifts[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93: 035001.
- [13] Bandulet H C, Labaune C, Lewis K, et al. Thomson-scattering study of the subharmonic decay of ion-acoustic waves driven by the Brillouin instability[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93: 035002.