

文章编号: 1001—4322(2000)01—048—03

激光等离子体的受激 Brillouin 散射*

蒋小华, 郑志坚, 李文洪, 刘永刚

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 高温高密度等离子体物理实验室, 绵阳 919-218 信箱, 621900)

郑 坚, 王以超

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥, 230027)

摘 要: 研究了激光等离子体背向和侧向受激 Brillouin 散射光谱结构。激光等离子体相互作用时, 受激 Brillouin 散射光谱受激光等离子体状态的影响而产生 Doppler 效应。当激光以 45° 射不同材料的平面靶时, 等离子体运动产生不同的二维效应, 高 Z 材料产生的等离子体冕区主要沿靶法向运动, 受激 Brillouin 散射光谱在侧向产生较大蓝移, 而低 Z 材料则主要在激光入射方向产生较大蓝移。

关键词: 激光等离子体; 受激 Brillouin 散射; Doppler 效应

中图分类号: O437.2 **文献标识码:** A

受激 Brillouin 散射(SBS)是激光等离子体中一个入射激光光波衰变为一个散射光波和一个离子声波的参量不稳定过程, 它可发生在激光等离子体的整个次临界区^[1,2]。在惯性约束聚变物理研究中, SBS 会带来不利的影响, 另外它的发生和激光等离子体的状态密切相关, 由 SBS 产生的散射光将为诊断激光等离子体状态提供依据^[1,3]。选择合适的激光-靶耦合方式控制激光等离子体状态的演变, 将能有效降低聚变对激光器件的要求。因此, 通过对不同角度的 SBS 光谱结构的观测, 来研究 $0.351\mu\text{m}$ 激光与不同靶材作用对 SBS 光谱结构的影响。

1 实验条件和结果

星光 II 钽玻璃激光装置以三倍频输出, 激光输出波长为 $0.351\mu\text{m}$, 激光输出能量为 70J, 激光脉冲宽度为 800ps, 激光入射靶面功率密度约为 $1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 激光以 45° 射 $600\mu\text{m}$ 的平面盘靶, 靶材料分别为 CH, CH + Au 的多层靶(10 层 8nmAu + 3nmCH) 及 Au, 实验利用两台 OMA 4 光谱仪分别在激光背向和侧向 30° 探测了 SBS 的光谱结构。实验布置如图 1 所示。

图 2 给出 $0.351\mu\text{m}$ 激光作用平面 CH 材料靶时, 在激光入射背向和侧向得到的红移 SBS 光谱, 在两方向上散射光谱结构完全一致, 只是相对有一个平移, 其中背向散射光谱相对侧向有 0.4nm 的蓝移。

图 3 和图 4 是 $0.351\mu\text{m}$ 激光与 Au 盘靶和多层靶作用时, 在背向和侧向得到的散射光谱, 与 CH 靶作用一样, 各方向散射光谱结构相似, 只是散射光谱变窄, 但是侧向光谱相对背向出现了约 0.1nm 的蓝移。

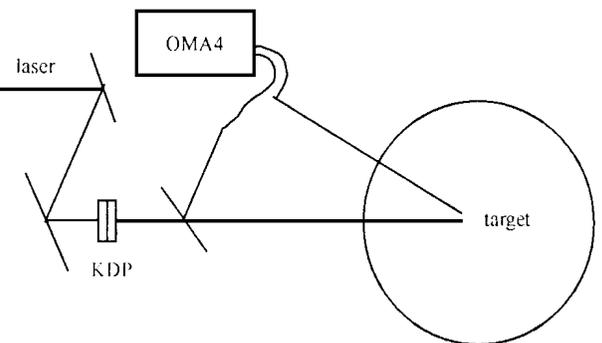


Fig 1 Experiment setups
图 1 实验装置布置图

* 国家自然科学基金资助课题(19735002)

1999 年 7 月 28 日收到原稿, 2000 年 2 月 12 日收到修改稿。

蒋小华, 男, 1968 年 8 月出生, 硕士, 助研

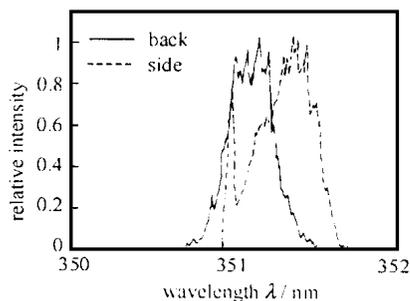


Fig. 2 Back and side scattering spectra in CH plasma

图 2 CH 材料中的背向和侧向 SBS 光谱

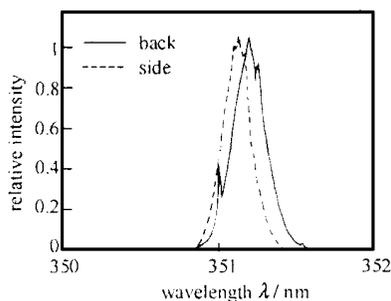


Fig. 3 Back and side scattering spectra in Au plasma

图 2 Au 材料中的背向和侧向 SBS 光谱

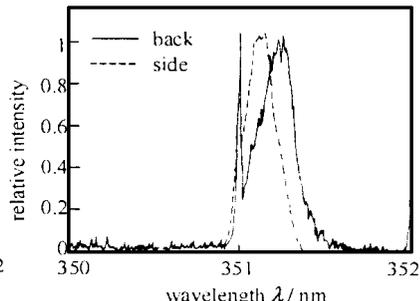


Fig. 4 Back and side scattering spectra in multilayer plasma

图 4 多层靶中的背向和侧向 SBS 光谱

2 分析和讨论

在激光等离子体相互作用中, SBS 的三波非线性过程满足能量动量守恒关系 $\omega = \omega_s + \omega_i$, $k_0 = k_s + k_i$, 下标 $0, s, i$ 分别代表入射光波、散射光波和离子声波, 同时, 三波色散关系满足 $\omega_{h,s}^2 = \omega_{pe}^2 + k_{0,s}^2 c^2$, $\omega_i^2 = k_i^2 c_s^2$, ω_{pe} 为激光等离子体频率, c_s 为激光等离子体中的离子声速。

由于 $\omega \ll \omega_s$, 散射光波将带走大部分的入射激光能量离开激光等离子体。同时, 由于三波匹配关系和色散关系的约束, 散射光谱的结构将反映三波共振区域的激光等离子体状态。在远离激光等离子体临界密度 (n_c) 区域内, 三波共振耦合的散射光波沿不同方向传播的光谱结构相似, 且与激光等离子体的电子密度、温度有关, 即 $(\omega_s - \omega)/\omega_s = (2c_s/c)(1 - n/n_c)^{1/2}$ 。

在激光等离子体相互作用中, 受入射激光作用及等离子体热膨胀的影响, 激光等离子体将以一定流速 u 通过三波共振区的密度面, 将给散射光带来 Doppler 频移 $\Delta\omega = k_s u$ 。

在远离激光等离子体的临界密度区域激发的 SBS 光谱结构, 主要由三波共振区域的电子密度分布决定, 等离子体的流体运动则仅带来光谱的平移。从图 2 可以看出, 0.351 μm 激光与 CH 靶作用时, 沿背向和侧向激发的 SBS 光谱结构一致, 即 SBS 在同一区域内被激发获得增益后, 沿各自波矢方向离开等离子体。但由于激光等离子体流体运动的非各向同性, 等离子体运动的 Doppler 效应导致侧向散射光波和背向散射光波有一个相对平移。

比较图 2 和图 3 可以看到, 激光等离子体流体运动给 SBS 带来不同的 Doppler 频移, 当 0.351 μm 激光与高 Z 材料靶作用时, Doppler 效应给侧向 SBS 光谱带来更多的蓝移, 而当 0.351 μm 激光与低 Z 材料作用时, 则给背向 SBS 光谱带来更多的蓝移。这表明星光 II 装置条件下, 激光以 45° 入射靶面时等离子体状态二维效应比较严重, 等离子体沿不同方向运动速度不同, 由 Doppler 频移公式, 在激光与低 Z 的 CH 材料靶作用时, 靶背向运动为等离子体的主要方向, 背向和侧向 30° 的等离子体运动速度差为 3.4×10^7 cm/s, 而激光与高 Z 的 Au 盘靶作用时则相反, 两者速度差为 1.1×10^7 cm/s。在激光等离子体相互作用过程中, 等离子体运动主要由入射激光作用和等离子体的热膨胀运动决定。

入射激光作用产生等离子体, 激光动量转化为等离子体动量, 而由于前面靶—等离子体反作用, 等离子体将沿入射激光反方向运动。同时, 激光与等离子体相互作用时, 等离子体吸收激光能量, 形成的高温等离子体将产生热压力, 驱动等离子体作各向同性的热膨胀, 当等离子体离平面靶靶面较近时, 由于受到靶平面约束, 等离子体热膨胀将主要沿平面靶法向进行, 形成等离子体沿法向流动, 离靶面越近, 影响越大。

当激光垂直入射靶面时, 激光压力和等离子体热膨胀方向一致, 等离子体电子密度状态基本满足一维分布, 而当激光斜入射靶面时, 两者方向不同, 等离子体电子密度状态将偏离一维分布, 等离子体的流动速度将具有二维效应, 同时在等离子体离靶面不同的地方, 靶面对等离子体状态的影响不同, 等离子体沿不同方向流动的速度也不一样。当激光 45° 作用于低 Z 的 CH 平面靶时, 等离子体电子密度尺度较

大 ($L = c_s t$), SBS 三波共振区域离靶面相对较远, 靶面对等离子体运动影响较少。同时, 等离子体电子温度较低, 等离子体的热压力也较小, 等离子体运动速度沿入射激光方向较大, 在背向给 SBS 光谱带来更大的蓝移, 而激光 45° 与高 Z 的 Au 靶作用时, 等离子体尺度相对较少, SBS 三波共振区离靶面较近, 等离子体沿靶面法向热膨胀速度较大, 则在法向方向带来 SBS 的极大蓝移, 而在背向蓝移较小。对于掺杂少量低 Z 元素的多层靶 (图 4), 由于 CH 原子数比较少, 激光等离子体状态主要由高 Z 材料 Au 决定, SBS 光谱结构及蓝移现象均与 Au 一致。

3 结 论

激光以 45° 入射平面靶时, 激光等离子体的二维效应较严重, SBS 光谱与等离子体状态关系密切。在星光 II 装置输出条件下, 激光与低 Z 材料耦合时, SBS 光谱较宽, 冕区激光等离子体在背向有极大的流体速度, 从而给 SBS 带来极大蓝移; 而与高 Z 材料作用时, 冕区等离子体主要沿法向运动。

致 谢 感谢星光 II 装置运行小组和制靶小组人员的辛勤劳动。

参考文献

- 1 Kruer W L. The physics of laser plasma interaction. Canada: Addison Wesley, 1988
- 2 Liu C S, et al. Raman and Brillouin scattering of electromagnetic wave inhomogeneous plasma. *Physics Fluids*, 1974, **17**(6): 1211~1219
- 3 常铁强等. 激光等离子体相互作用与核聚变. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1991

STIMULATED BRILLOUIN SCATTERING IN PLASMA PRODUCED BY 0.351 μ m LASER

J IANG Xiao-hua, ZHENG Zhi-jian, LI Wen-hong, LIU Yong-gang
*Laboratory for Laser Fusion, Institute of Nuclear Physics and Chemistry,
CAEP, P. O. Box 919-218 Mianyang 621900*
ZHENG Jian, WANG Yi-chao
China University of Science and Technology, Hefei 230027

ABSTRACT: Stimulated Brillouin Scattering (SBS) spectra are reported from different angle in plasma produced by 0.351 μ m laser. SBS spectra are affected by 2-D plasma. When laser irradiates disk target at 45°, backscattering is more blue shift in low Z plasma, but sidescattering are more blue shift in high Z plasma.

KEY WORDS: laser plasma; stimulated Brillouin scattering; Doppler shift