

掺杂材料对激光等离子体 受激布里渊散射的影响*

蒋小华 丁永坤 赵雪薇 刘永刚 郑志坚

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都 610003)

郑 坚

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

摘 要 研究了激光等离子体背向受激布里渊散射光谱及反射率。当小能量短脉冲激光入射平面靶时, 激光等离子体发展不充分, 受激布里渊散射光谱结构相似, 受激布里渊散射的增长主要受等离子体尺度的影响, 随靶材料的有效原子序数的增加, 等离子体尺度变小, 受激布里渊散射反射率减少。

关键词 激光等离子体, 受激布里渊散射, 朗道阻尼, 对流增长。

1 引 言

受激布里渊散射(SBS)是激光等离子体中一个入射光波衰变为一个散射光波和一个离子声波的三波参量不稳定过程, 它可以发生在整个次临界密度区域^[1, 2]。在间接驱动的惯性约束聚变物理研究中, 它将带来两个方面的不利影响: 首先, 散射光波带走大部分的入射激光能量, 降低激光靶的耦合效率; 其次, 受激布里渊散射在整个次临界密度区域均能发生, 从而造成等离子体电子密度局部分布的变化, 引起激光等离子体 X 光转换位置及转换效率的不确定性, 最终造成对靶燃料辐照压缩的不均匀和不对称, 增加热核燃料的点火困难。因此, 在间接驱动的惯性约束聚变研究中, 抑制受激布里渊散射非线性参量不稳定过程的增长是非常有意义的。

近年来, 随着惯性约束聚变研究中短波长激光的使用, 各种非线性参量不稳定过程都得到了较好的抑制, 受激布里渊散射过程则已成为惯性约束聚变研究中影响激光等离子体作用的能量损失及其它有害过程的主要不稳定过程, 激光等离子体的耦合效率, 电子密度分布及软 X 光转换空间位置都将主要由受激布里渊散射决定, 因此, 在惯性约束聚变的短波长激光等离子体相互作用中研究受激布里渊散射的产生、发展, 找到受激布里渊散射的抑制方法是目前激光等离子体不稳定过程研究的主要课题^[3~ 5]。本文研究了 0.351 μm 激光与不同靶材

* 国家科委 863 高科技项目。

收稿日期: 1997-06-17

料相互作用的受激布里渊散射的散射光谱及反射率的变化关系。

2 实验条件和实验结果

实验是在核物理与化学研究所的“星光 II”装置上进行的。该装置为钕玻璃激光的三倍频输出，激光波长为 $0.351 \mu\text{m}$ ，输出激光能量约 40 J ，激光脉宽(HMFW)为 700 ps ，激光入射至靶面上的焦斑为 $\phi 200 \mu\text{m}$ ，平均功率密度为 $1 \sim 2 \times 10^{14} \text{ w/cm}^2$ ，激光以 45° 作用于 $\phi 600 \mu\text{m}$ 的平面盘靶，靶由 Au 盘、发泡 Au 盘(密度为 Au 材料的 $1/10$)、多层靶($8 \text{ nm Au} + 4 \text{ nm CH}$ 为一层，共十层)和 CH 靶($0.6 \mu\text{m CH} + \text{Au 盘}$)四种不同密度材料组成，在入射激光背向利用一台能量卡计测量受激布里渊散射的反射率，能量卡计的标定直接在光路上进行，保证能量卡计的精度 10% 。同时还利用一台光学多道分析仪(OMA 4)测量各种靶材料受激布里渊散射背向散射光的积分光谱，实验装置如图 1 所示。

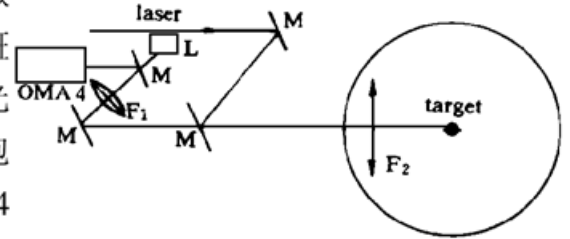


Fig. 1 Scheme of the experiment setup.
L: energy measurement; M: fraction mirror; F: lens

表 1 给出了 $0.351 \mu\text{m}$ 激光与不同靶材料相互作用时能量卡计测到的受激布里渊散射反射率。从表中可以看出，在“星光 II”入射条件下，受激布里渊散射的反射率随靶材料的有效原子序数的上升、靶材料的密度逐渐升高而降低。

Table 1. Fraction rate of SBS from different laser-plasma

target	Au disk	foam Au disk	multi-layers disk	CH($0.6 \mu\text{m}$) + Au disk
fraction rate (10^{-3})	2.88~ 4.44	4.69~ 7.64	5.16~ 8.92	21.7

图 2 则给出了 $0.351 \mu\text{m}$ 激光与不同靶材料相互作用时得到的受激布里渊散射背向散射光光谱，可以看出对于各种不同靶材料，其受激布里渊散射的光谱及谱的移动基本相似，受激布里渊散射光谱与靶材料没有明显的依赖关系。

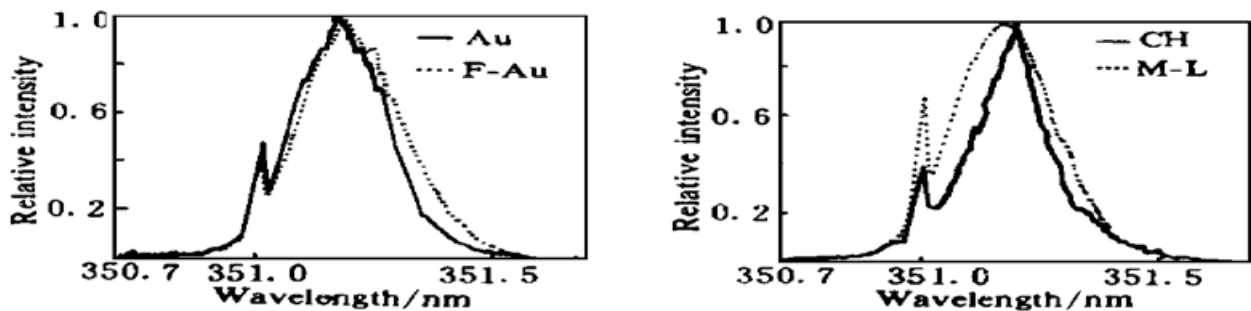


Fig. 2 Backward SBS spectra from different laser-plasma

3 分析和讨论

在激光等离子体相互作用中，受激布里渊散射的增长要求满足三波共振的匹配关系，即三波能量和动量守恒：

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \omega_s + \omega_i \\ k_0 &= k_s + k_i \end{aligned} \tag{1}$$

下标 0、s、i 分别代表入射光波、散射光波和离子声波，同时，三波在等离子体中还必须满足各自的色散关系：

$$\begin{aligned}\omega_{0,s}^2 &= \omega_{pe}^2 + k^2 c^2 \\ \omega_i &= k_i c_s\end{aligned}\quad (2)$$

ω_{pe} 为激光等离子体振荡频率， c_s 为离子声速。

三波共振条件的破坏会造成不稳定性的阻尼，从而抑制受激布里渊散射的增长，在均匀等离子体中，不稳定性的阻尼主要来自碰撞阻尼和朗道阻尼，碰撞阻尼将增加激光等离子体的逆韧致吸收及散射光的再吸收，从而减少入射激光和散射光的份额，破坏三波共振条件；离子声波的朗道阻尼则抑制离子声波的发展，同样也抑制了三波共振。因此，在惯性约束聚变研究中，合理设计靶材料结构，提高离子声波的朗道阻尼能有效地抑制受激布里渊散射的增长。而离子声波的朗道阻尼包括共振电子引起的阻尼和共振离子引起的阻尼，当离子温度 T_i 和电子温度 T_e 差别减少时，共振离子引起的阻尼很快增加，当 $T_i \sim T_e$ 时，离子声波能量波共振离子强烈吸收，离子声波的朗道阻尼最强，因此提高激光等离子体中离子温度能有效地抑制受激布里渊散射的增长^[6]。

同时，在惯性约束聚变研究产生的激光等离子体中，受激布里渊散射的共振三波以各自的群速度离开产生源区，而由于激光等离子体的电子密度分布的空间不均匀性，离开源区后，三波因频率波数关系不再满足各波在等离子体中的色散关系而被阻尼，三波共振条件被破坏，三波的增长被强烈地抑制，最终抑制了受激布里渊散射的增长。在非均匀等离子体中，受激布里渊散射的增长满足罗森布鲁斯(Rosenbluth)指数增长关系：

$$I_{SBS} = I_{noise} \exp(2\pi\gamma/k'v_{gs}v_{gi})$$

式中 γ 为受激布里渊散射的纯增长率， v_{gs} 和 v_{gi} 分别代表散射光波和离子声波的群速度，而

$$k' = \frac{\partial(k_0 - k_i - k_s)}{\partial x} \approx \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0 c L}$$

L 为等离子体的密度标长，因此受激布里渊散射的散射光份额随等离子体密度标长增加而指数增长。

离子声波的朗道阻尼和受激布里渊散射的对流增长决定着受激布里渊散射的增益，在“星光 II”装置激光等离子体相互作用实验中，对于 Au 靶材料中掺杂少量低 Z 材料 CH 的多层靶，CH 材料的掺入有助于提高等离子体的离子温度，增加离子声波的朗道阻尼，但由于“星光 II”装置输出条件(小能量、短脉冲)的限制，激光等离子体的形成不充分，等离子体的尺度较小，离子电子碰撞不够，离子电子温度平衡没有达到，朗道阻尼的变化较少，同时掺杂低 Z 材料却迅速提高了等离子体的离子声速，从而增加了等离子体的密度标长，受激布里渊散射的对流增长得到了放大，最终受激布里渊散射被增益。发泡 Au 盘靶中受激布里渊散射的增长则主要是对流增长，由于靶中小气泡的存在加快了等离子体的膨胀，等离子体尺度变大，受激布里渊散射的反射率也相应上升；而 CH 材料靶作用时，随着逆韧致吸收竞争的降低，同时由于离子声速的提高，受激布里渊散射反射率得到了极大的增益，比 Au 盘靶增长约一个量级。因此在小能量短脉冲的激光作用下，受激布里渊散射的对流增长起主导作用，随着靶材料的有效原子序数的降低，激光等离子体尺度变大，从而加剧了受激布里渊散射的增长。

由(1)、(2)式，激光等离子体中受激布里渊散射的散射光谱和等离子体的电子密度直接

相关, 受激布里渊散射的光谱结构依赖于等离子体的电子密度分布:

$$\frac{\omega_0 - \omega_s}{\omega_s} = 2 \frac{c_s}{c} \left(1 - \frac{n_e}{n_c} \right) \quad (3)$$

在“星光 II”装置激光作用条件下, 由于入射激光能量较小, 同时作用时间很短, 对于不同靶材料形成的等离子体尺度都较小, 等离子体的电子密度分布满足指数形式^[1], 受激布里渊散射的作用产生区域一致, 而此区域电子密度分布相似, 因而由等离子体电子密度决定的受激布里渊散射的光谱结构相似, 受激布里渊散射光谱对靶材料没有依赖关系。

小结 在小能量短脉冲激光入射条件下, 等离子体尺度较小, 靶材料主要影响等离子体的尺度, 采用掺杂低 Z 材料的靶将增大等离子体的尺度, 受激布里渊散射得到增益, 离子声波朗道阻尼的增加则被受激布里渊散射的对流增长所掩盖。

感谢“星光 II”装置运行小组及制靶人员的支持, 感谢丁耀南研究员的指导。

参 考 文 献

- [1] W. L. Kruer, *The Physics of Laser Plasma Interaction*, Canada: Addison Wesley, 1988. 87~ 88
- [2] C. S. Liu, M. N. Rosenbluth, R. B. White, Raman and Brillouin scattering of electromagnetic wave inhomogenous plasma. *Phys. Fluids*, 1974, **17**(6) : 1211~ 1219
- [3] R. G. Watt, J. Cobble, D. F. Dubois *et al.*, Dependence of stimulated Brillouin scattering on focusing optic F in long scale-length plasma. *Phys. Plasma*, 1996, **3**(3) : 1091~ 1095
- [4] V. V. Eliseev, W. Rozmus, V. Tikhonchuk *et al.*, Effect of diffraction on stimulated Brillouin scattering from a single laser hot spot. *Phys. Plasma*, 1996, **3**(10) : 3754~ 3760
- [5] J. D. Moody, H. A. Baldis, D. S. Montgomery *et al.*, Beam smoothing effects on the stimulated Brillouin scattering (SBS) instability in Nova exploding foil plasma. *Phys. Plasma*, 1995, **2**(11) : 4285~ 4296
- [6] 徐家鸾, 金尚宪, 等离子体物理学, 北京: 原子能出版社, 1981. 437~ 440

The Different Material Effect on Stimulated Brillouin Scattering in Laser-Plasma

Jiang Xiaohua Ding Yongkun Zhao Xuewei

Liu Yonggang Zheng Zhijian

(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

Zheng Jian

(China University of Science and Technology, Hefei 230026)

(Received 17 June 1997)

Abstract The spectra and reflectivity of stimulated Brillouin scattering was reported in laser-plasma. When the different material targets were irradiated by laser with low energy and short pulse, the spectra of SBS were the same. The reflectivity of SBS energy was mainly affected by the size of plasma. The reflectivity of SBS will decrease when high Z material targets were irradiated.

Key words laser-plasma, stimulated Brillouin scattering (SBS), Landau damp, convective growth.