

文章编号: 1001-4322(2010)08-1891-05

神光 III 原型受激拉曼与受激布里渊散射份额测量*

李志超^{1,2}, 张小丁^{1,2}, 杨冬², 郑坚¹, 刘慎业²,
丁永坤², 李三伟², 蒋小华², 王哲斌², 章欢²

(1. 中国科学技术大学 近代物理系, 合肥 230026; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 激光注入率测量是黑腔耦合效率测量至关重要的一个环节, 主要通过散射光测量来实现。在神光 III 原型激光装置上进行的黑腔物理实验中, 利用 PIN 探头阵列进行了散射光角分布测量。通过拟合分析, 发现原型装置上激光等离子体非线性相互作用较神光 II 装置要强, 其中受激拉曼份额在 10% 量级, 受激布里渊散射在 20% 量级。将由此评估的激光靶耦合效率代入辐射温度定标率公式中, 得出的辐射温度值与实验中 Dante 测量值符合较好, 说明对参量过程份额的评估具有一定可靠性。

关键词: 激光等离子体; 受激布里渊散射; 受激拉曼散射; 能量耦合效率

中图分类号: O534.2; O437 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20102208.1891

激光等离子体相互作用^[1-5], 特别是非线性相互作用^[6-8]的研究一直是惯性约束聚变(ICF)^[9-12]黑腔物理^[13-14]研究中的重点。在黑腔物理研究过程中, 受激布里渊散射(SBS)^[15-16]和受激拉曼散射(SRS)^[17-19]会对入射激光造成较大份额的散射, 并产生多种对聚变不利的影响^[20-21]。因此, 必须精确评估和控制这些非线性过程的影响。在黑腔物理研究中, 首先要给出激光等离子体非线性相互作用产生的散射光份额和超热电子份额, 然后结合反照率给出激光腔靶耦合效率, 最后根据激光功率平衡^[22]给出黑腔辐射温度。黑腔散射光的测量有多种手段, 包括全口径背反系统^[23]、近背反系统^[24]和 PIN 阵列探测器等。本文介绍了神光 III 原型黑腔物理实验中, 利用 PIN 阵列探测器对原型黑腔散射光进行的测量, 并通过拟合外推, 对散射光份额进行了评估, 在能量耦合效率方面获得了一些比较重要的信息。

1 实验布局

实验在神光 III 原型装置^[25]上进行。采用单端注入的方式, 8 路激光从上方呈 45° 锥角入射。在 S4 路激光全口径的周围, 布置一个球壳型铝板, 在铝板上打孔以方便安装 PIN 探头。注入激光的 f 数为 5.4, 球壳上 PIN 分布成数列, 每列安装 6 个, 沿 θ 角分布, 其中最小角度为 10°, 最大 22.5°, 其它探头按间隔 2.5° 排布。 θ 以激光注入路径为极轴, 注入口中央位置为 0°。对于不同参量过程, 通过在 PIN 探头前加不同波段的带通滤片达到滤光目的, 对于某一系列探头, 全部安装同一类型的滤片, 以达到测量 SRS 或 SBS 角分布目的。

每路激光参数为三倍频/1 ns/800 J, 没有束匀滑。所用靶型为 Au 半腔靶, 腔尺寸 $\phi 1.0 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$, 激光注入孔(LEH)为 $\phi 0.65 \text{ mm}$, 腔壁厚度 35 μm 。激光在注入口聚焦入射, 焦斑尺寸为 250 $\mu\text{m} \times 350 \mu\text{m}$ 。

2 实验结果与分析

实验数据分为底部封底和不封底两种, 所获得的 PIN 角分布如图 1 和图 2 所示。由图 1 和图 2 可以看出, 相同角度的 SBS 数值要高于 SRS, 而且往小角度(即往全口径背反靠近)的增长趋势也是如此。由图 1 与图 2 比对, 封底的 SBS 数值要明显高于不封底的。

由不同角度的 PIN 角分布, 原则上可以拟合出 SBS 或 SRS 的角分布曲线, 然后外推到 $\theta < 10^\circ$ 范围, 再进行全角空间积分, 就可以得到 SBS 或 SRS 的总能量。由靠近极点的数个 PIN 探头数值, 采用线性外推, 给出的 $\theta < 10^\circ$ 的能量分布如图 3、图 4 所示, 然后对 $\theta < 10^\circ$ 的能量进行空间积分, 对 $10^\circ \sim 25^\circ$ 的能量按照 PIN 数据分段积分, 最后得到背反总能量。

由实验结果来看, 背反能量主要集中在 $\theta < 18^\circ$ 区域, 正好为拟合的线性分布区域, $\theta > 18^\circ$ 区域的能量份额

* 收稿日期: 2009-07-02; 修订日期: 2010-03-16

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 李志超(1982—), 男, 博士, 主要从事激光等离子体相互作用方面研究; lizhi@mail.ustc.edu.cn.

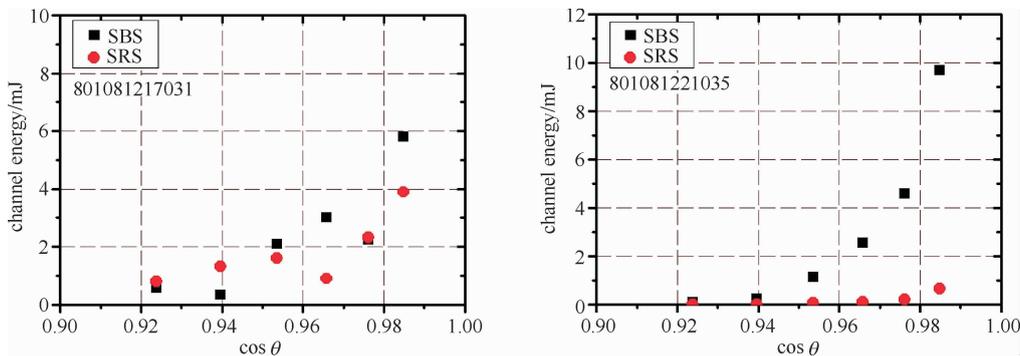


Fig. 1 PIN angular distribution in bottomless structure

图 1 不封底 PIN 角分布

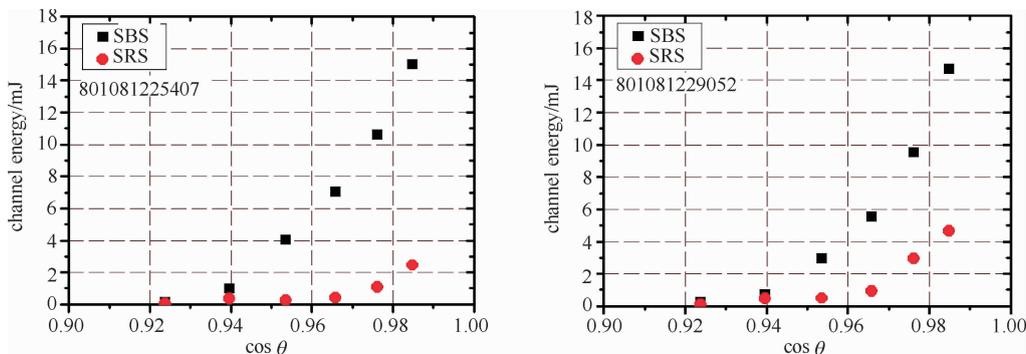


Fig. 2 PIN angular distribution in bottomed structure

图 2 封底 PIN 角分布

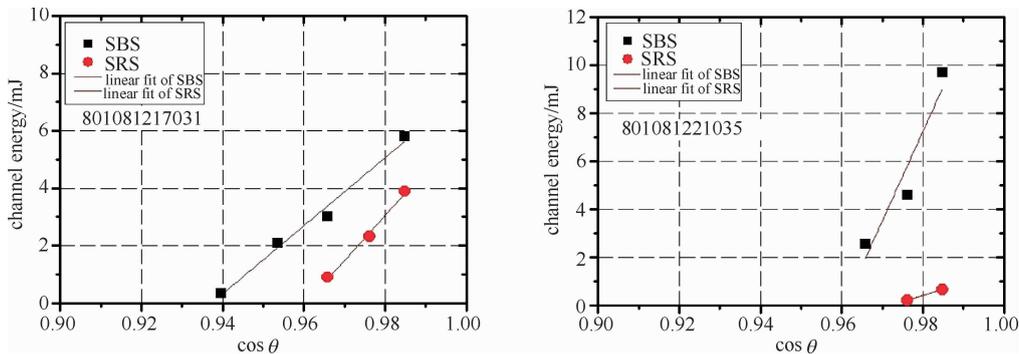


Fig. 3 PIN linear fit extrapolation in bottomless structure

图 3 不封底 PIN 拟合外推

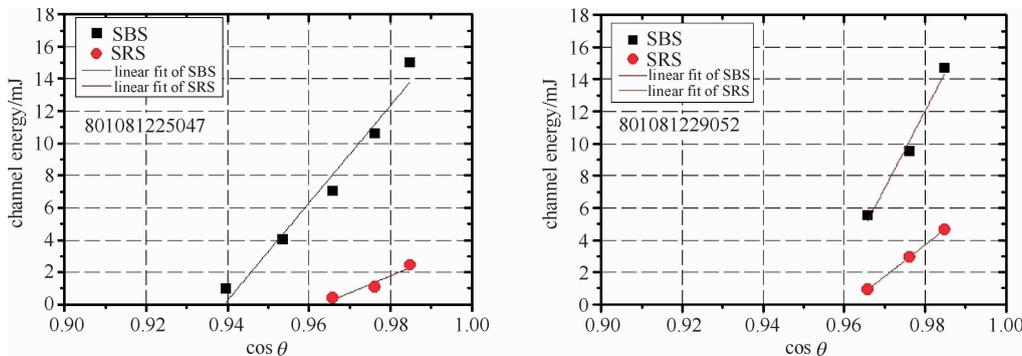


Fig. 4 PIN linear fit extrapolation in bottomed structure

图 4 封底 PIN 拟合外推

几乎可以忽略不计。因此,背反总能量可以用线性分布的积分来估算。采用线性拟合,假定探头所收集能量为 $I(\theta) = A\cos\theta + B$; S_0 为 PIN 探头收光面积,则所拟合的曲线数值为 $I(\theta)/S_0$; 设边界条件 $\cos\theta|_{\max} = 1, \cos\theta|_{\min} = M$, 则有

$$E_t = \int \frac{I(\theta)}{S_0} 2\pi R^2 \sin\theta d\theta = \frac{2\pi R^2}{S_0} \int (A \cos\theta + B) \sin\theta d\theta = \frac{2\pi R^2}{S_0} \left[\frac{1}{2} A (1 - M^2) + B(1 - M) \right] \quad (1)$$

式中: E_t 为拟合得到的散射光总能量; R 为探头离靶点的距离; A, B 为线性拟合的参数; M 为曲线拟合的边界。由 $R = 100 \text{ mm}$, $S_0 = \pi r^2$, $r = 3 \text{ mm}$, 代入式(1)得

$$E_t = 2.69 \times 10^5 \left[\frac{1}{2} A (1 - M^2) + B(1 - M) \right] \quad (2)$$

由线性外推可得到背反总能量, 背反能量份额与激光入射能量的关系如图 5 所示。从图 5 可以发现以下现象。

(1) 总体来看, 无论腔靶底部加不加封底, SBS 份额都比 SRS 份额要高出很多。SBS 份额集中分布在 $10\% \sim 30\%$ 区域, 而 SRS 份额则集中在 $1\% \sim 10\%$ 区域。大部分实验发次的激光在注入口的功率密度约为 $1 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$, 在没有束匀滑的情况下, 成丝效应非常明显, 足以激发参量过程, 特别是 SBS, 因为 SBS 阈值要低于 SRS。因为腔靶壁材料为 Au, 属于高 Z 元素, 激光与腔高 Z 等离子体相互作用, 其参量过程中 SRS 由于强碰撞阻尼会被大幅抑制, 而 SBS 对应的离子朗道阻尼则会弱得多, 因此 SBS 会有更大的增益。

(2) SBS 份额随激光入射能量的增加而增加, SRS 份额则不明显。这可能跟参量过程的竞争抑制有关, SBS 在丝内优先激发, 增长发展要强于 SRS, 其对泵浦激光的损耗也占主导地位。当激光功率密度随激光入射能量增加时, 丝化效应更加明显, SBS 会增长, 对泵浦激光的损耗也更加厉害。这样, 剩余泵浦源反而要弱于以前, SRS 的增益因此降低, 出现图 5 所示的情况。值得注意的是, 当激光注入能量增加到 800 J 左右时, 封底情况下的 SRS 份额有较显著的降低, SBS 份额则有一定程度增长, 这是对上述解释的一个佐证。

(3) 加封底后, 背反份额有显著增加, SBS 尤其明显。SBS 的显著差异可能是因为加封底后处于封闭位型, 对等离子体约束性增强, 等离子体尺度变大, 均匀性好, SBS 在这种条件下增益提高。同时, 在未加封底的情况下, 激光辐照在腔靶底部, 喷射的等离子体在流体作用下会向靶后运动, 即在激光路径上, 只有腔壁部分会有临界密度面反射, 而辐照到腔底的激光会穿过腔靶, 这从靶场地下室地面上的激光黑斑可以得到证明。加封底后, 等离子体约束在腔底, 在激光注入过程中, 腔底等离子体密度会很快超过临界密度, 反射也会随之变强。

由背反份额可以评估其对激光靶耦合效率的影响。从图 5 可以看到, SBS 份额大致为 20% , SRS 则为 10% , 背反总额在 30% 附近。这与神光 II 上得到的结果差异很大。在神光 II 双端对打状态下, 标准腔靶 SRS 份额约为 1% , SBS 为 5% , 超热电子为 3% , 非线性总份额在 10% 左右^[22,26]。根据实验和理论, 辐射温度定标律

$$T_r = 61.5 \left(\frac{\eta P}{S} t^{1/2} \right)^{4/13} \quad (3)$$

式中: η 为标准腔靶的耦合效率; P 为入射激光功率; S 为腔壁面积; t 为激光脉宽。对于神光 II, 标准腔靶的耦合效率 η 约 0.6 , 1.5 倍腔尺寸的腔靶耦合效率约为 0.75 , 实验测得的辐射温度与定标率有较好符合度, 如图 6 所示^[22,26]。在神光 III 原型实验中, 8 路单端并打状态下, 非线性总额约为 35% , 返照率假定为 0.8 , 半腔靶的激光耦合效率较低, 约为 0.5 ; 由定标率得辐射温度约为 230 eV , 在实验 Dante 测量值 220 eV ^[27] 的误差范围内^[28], 说明由 PIN 测量推断的背反份额具有一定可靠性。

3 结论

首次利用 PIN 阵列探测器对原型黑腔散射光进行了探测, 发现 SBS 份额在黑腔底部封底情况下是敞口的 2 倍以上。原型单端并束打靶位型下的参量过程要强于神

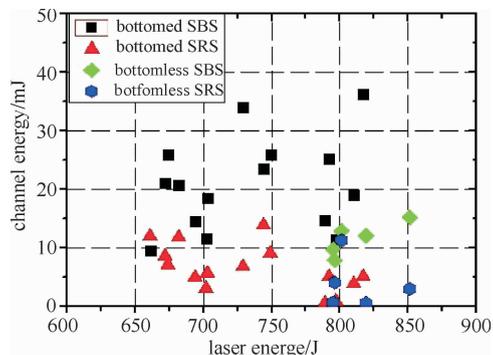


Fig. 5 Backscattered fraction vs laser energy
图 5 背反份额与激光入射能量的关系

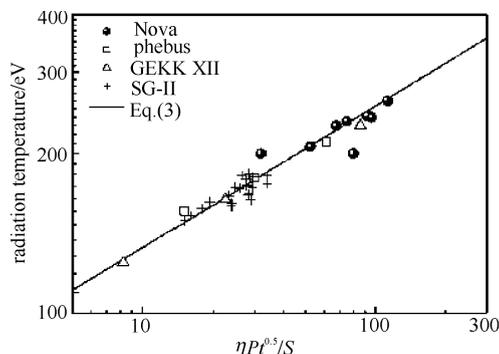


Fig. 6 Radiation temperature scaling law and results of experiment results
图 6 辐射温度定标律与实验数据的比对

光 II, 其中 SBS 约在 20%, SRS 约在 10%。由此评估的激光耦合效率约 0.5, 并由激光功率平衡, 得到的辐射温度在实验测量值的误差范围之内, 表明由 PIN 测量推断的背反份额具有一定可靠性。

致 谢 工作得到了中国工程物理研究院激光聚变研究中心神光 III 原型全体运行人员、制靶人员和其他诊断人员的大力协作, 在此向他们表示感谢。

参考文献:

- [1] Takabe T, Nagatomo H, Sunahara A, et al. Recent studies of laser produced plasmas[J]. *Plasma Phys Control Fusion*, 1999, **41**(3A):75-97.
- [2] Gabel E F, Failor B H, Busch G E, et al. Plasma evolution from laser-driven gold disks. I. Experiments and results[J]. *Phys Fluids B*, 1990, **2**(10):2437-2447.
- [3] Ress D, Suter L J, Gabel E F, et al. Plasma evolution from laser-driven gold disks. II. Computational design and analysis[J]. *Phys Fluids B*, 1990, **2**(10):2448-2455.
- [4] Wang Zhebin, Zheng Jian, Zhao Bin, et al. Thomson scattering from laser-produced gold plasmas in radiation conversion layer[J]. *Physics of Plasmas*, 2005, **12**:082703.
- [5] Froula D H, Divol L, Berger R L, et al. Direct measurements of an increased threshold of stimulated Brillouin scattering with polarization smoothing in ignition hohlraum plasmas[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **101**:115002.
- [6] Glenzer S H, Arnold P, Bardsley G, et al. Progress in long scale length laser-plasma interactions[J]. *Nucl Fusion*, 2004, **44**: S185-S190.
- [7] Hinkel D E, Callahan D A, Langdon A B, et al. Analyses of laser-plasma interactions in National Ignition Facility ignition targets[J]. *Phys Plasma*, 2008, **15**: 056314.
- [8] Steveson R M, Suter L J, Oades K, et al. Effects of plasma composition on backscatter, hot electron production, and propagation on underdense plasmas[J]. *Phys Plasma*, 2004, **11**(5): 2709-2715.
- [9] Lindle J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. *Phys Plasma*, 1995, **2**(11):3933-4024.
- [10] Lindle J, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Phys Plasma*, 2004, **11**(2): 339-491.
- [11] Nakai S, Takabe H. Principles of inertial confinement fusion-physics of implosion and the concept of inertial fusion energy[J]. *Rep Prog Phys*, 1996, **59**: 1071.
- [12] Nakai S, Mima K. Laser driven fusion energy: present and prospective[J]. *Rep Prog Phys*, 2004, **67**: 321-349.
- [13] Dewald E L, Suter L J, Landen O L, et al. Radiation-driven hydrodynamics of high-Z hohlraums on the National Ignition Facility[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, **95**: 215004.
- [14] Schein J, Jones O, Rosen M, et al. Demonstration of enhanced radiation drive in hohlraums made from a mixture of high-Z wall materials [J]. *Phys Rev Lett*, 2007, **98**: 175003.
- [15] Froula D H, Divol L, London R A, et al. Pushing the limits of plasma length in inertial-fusion laser-plasma interaction experiments[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **100**: 015002.
- [16] Neymayer P, Berger R L, Divol L, et al. Suppression of stimulated Brillouin scattering by increased Landau damping in multi-ion-species hohlraum plasmas[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **100**: 105001.
- [17] Montgomery D S, Cobble J A, Focia R J, et al. Recent Trident single hot spot experiments: evidence for kinetic effects and observation on Langmuir decay instability cascade[J]. *Phys Plasma*, 2002, **9**(5):2311-2320.
- [18] Russell D A, DuBois D F, Rose H a. Nonlinear saturation of stimulated Raman scattering in laser hot spots[J]. *Phys Plasma*, 1999, **6**: 1294
- [19] 王哲斌, 郑坚, 蒋小华, 等. 351 nm 激光入射大腔靶的受激 Raman 散射光谱[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(1):45-49. (Wang Zhebin, Zheng Jian, Jiang Xiaohua, et al. Stimulated Raman scattering from hohlraum irradiated with 351 nm laser light. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(1):45-49)
- [20] Fernández J C, Cobble J A, Failor B H, et al. Observed dependence of stimulated Raman scattering on ion-acoustic damping in hohlraum plasmas[J]. *Phys Rev Lett*, 1996, **77**(13):2702-2705.
- [21] Depierreux S, Fuchs J, Labaune C, et al. First observation of ion acoustic waves produced by the Langmuir decay instability[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **84**(13):2869-2872.
- [22] Jiang Shaoen, Sun Kexu, Ding Yongkun, et al. Radiation temperature scaling law for gold hohlraum heated with lasers at 0.35 μm wavelength[J]. *Chin Phys Lett*, 2005, **22**(9): 2328-2331.
- [23] Kirkwood R K, Back C A, Blain M A, et al. Imaging backscattered and near to backscattered light in ignition scale plasmas[J]. *Rev Sci Instrum*, 1997, **68**(1): 636-640.
- [24] Mackinnon A J, McCarville T, Piston K, et al. Implementation of a near backscattering imaging system on the National Ignition Facility [J]. *Rev Sci Instrum*, 2004, **75**(10): 4183-4186.

- [25] Zhang Xiaoming, Zheng Wanguo, Wei Xiaofeng, et al. Preliminary experimental results of Shenguang III technical integration experiment line[C]//Proc of SPIE. 2005, **5627**: 6-12.
- [26] Chang Tieqiang, Ding Yongkun, Lai Dongxian, et al. Laser hohlraum coupling efficiency on the Shenguang II facility[J]. *Phys Plasma*, 2002, **9**(11):4744-4748.
- [27] 李三伟, 易荣清, 蒋小华, 等. 神光Ⅲ原型 1 ns 激光驱动黑腔辐射温度实验研究[J]. 物理学报, 2009, **58**(5):3255-3261. (Li Sanwei, Yi Rongqing, Jiang Xiaohua, et al. Experimental study of radiation temperature for gold hohlraum heated with 1 ns, 0.35 μm lasers on SG-III prototype laser facility. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(5):3255-3261)
- [28] 孙可煦, 黄天暄, 丁永坤, 等. 黑腔辐射温度实验研究[J]. 物理学报, 2002, **51**(8):1750-1754. (Sun Kexu, Huang Tianxuan, Ding Yongkun, et al. Experimental research on radiation temperature for hohlraums. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(8):1750-1754)

Energy fraction measurements of stimulated Brillouin scattering and stimulated Raman scattering on Shenguang-III prototype laser facility

Li Zhichao^{1,2}, Zhang Xiaoding^{1,2}, Yang Dong², Zheng Jian¹, Liu Shenye²,
Ding Yongkun², Li Sanwei², Jiang Xiaohua², Wang Zhebin², Zhang Huan²

(1. *Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*
2. *Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-986, Mianyang 621900, China*)

Abstract: The measurement of the fraction of laser-entrance energy, which is carried out mainly through the measurement of scattering light, is very important in the measurement of coupling efficiency of the hohlraum. The angular distribution of scattering light is measured on the Shenguang-III prototype laser facility using the PIN detector array. It is demonstrated that the non-linear laser plasma interaction, in which the stimulated Raman scattering fraction is about 10% and the stimulated Brillouin scattering about 20%, is stronger than that on Shenguang-II laser facility. The laser target coupling efficiency thus evaluated is taken into the formula which describes the radiation temperature scaling law. The calculated radiation temperature agrees well with the experimental Dante results, which indicates that the evaluated energy fraction of back scattering light is reliable.

Key words: laser plasma; stimulated Brillouin scattering; stimulated Raman scattering; energy coupling efficiency