

文章编号: 1001-4322(2006)07-1113-04

2 ns, 351 nm 激光黑腔靶受激 Raman 散射实验研究*

王传珂, 蒋小华, 刘慎业, 况龙钰, 王哲斌, 刘永刚, 李三伟, 李文洪

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心 高温高密度等离子体国家重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 介绍了在神光 II 装置上开展的长脉冲 2 ns, 351 nm 激光与黑腔靶相互作用的实验, 报道了受激 Raman 散射光时间分辨谱图及能量测量的实验结果。长脉冲 2 ns 激光注入小腔靶($\phi 700 \mu\text{m} \times 1 250 \mu\text{m}$)时, 激光辐照缝靶产生的 SRS 光能量是激光与全腔靶作用产生的 SRS 光能量的 1.3 倍。在 2 ns 激光与不同尺寸黑腔靶作用的情况下, 激光辐照小腔靶产生的 SRS 光能量比标准腔靶($\phi 800 \mu\text{m} \times 1 350 \mu\text{m}$)产生的 SRS 光能量高 1.6 倍。由于激光功率密度下降, 2 ns 激光打靶 SRS 散射光要弱于短脉冲 1 ns 激光打靶, 但持续时间稍长。实验结果表明: 长脉冲 2 ns 激光与标准腔靶相互作用时, 等离子体“堵腔效应”比较严重, 标准腔靶尺寸不再合适。

关键词: 激光等离子体; 受激 Raman 散射; 腔靶; 堵腔效应

中图分类号: O437.3 **文献标识码:** A

受激 Raman 散射(以下简称 SRS)是激光等离子体中一束入射激光(电磁波)被电子群散射衰变为一束散射光波(电磁波)和一束电子等离子体波的三波参量过程^[1-2]。在惯性约束聚变物理研究中, SRS 主要会带来两个方面的不利影响: 一方面散射光携带入射激光能量离开等离子体, 降低激光等离子体耦合效率; 另一方面电子等离子体波通过 Landau 阻尼或波破产生超热电子, 预热靶燃料, 影响对靶丸的等熵压缩和对称压缩^[3]。因此, 研究激光等离子体中 SRS 产生的物理机制及演变规律, 寻求抑制 SRS 的有效方法, 就能提高激光吸收效率, 这对于实现点火和高增益聚变是非常重要的。

为了考察未来神光 III 激光装置采用长脉冲激光打靶的优缺点, 探索长脉冲激光与黑腔靶的耦合规律, 确定长脉冲激光与腔靶的耦合效率和辐射场的干净性, 首次在神光 II 装置上开展了长脉冲 2 ns 激光与黑腔靶相互作用实验研究。本文着重研究了长脉冲 2 ns, 351 nm 激光与腔靶耦合时受激 Raman 散射光谱特征及能量, 探索减少散射的措施, 为改进腔靶的设计提供参考。

1 实验条件和布局

实验在神光 II 激光装置上进行。该激光装置可以同时输出 8 路三倍频激光, 总输出功率大约 3×10^{12} W。实验中 8 路激光分南北 2 簇从内接于靶室的立方体的 8 个顶点通过打靶透镜独立地向心汇聚到靶上, 脉宽 2 ns 或 1 ns、三倍频、焦后 $400 \mu\text{m}$ 注入。腔靶轴线沿南北方向放置, 南注入口位于基准位置, 实验中使用缝靶和全腔靶 2 种类型, 全腔靶又采用了小腔靶和标准腔靶 2 种尺寸, 靶类型及尺寸参见表 1。

表 1 激光背向 SRS 散射光光强测量结果

Table 1 Energy of SRS from backscattered light

no. of shot	energy of the 4th laser/J	SRS energy of the 4th laser/J	pulse duration /ns	size of hohlraum
shot 134	321.27	3.891	2	slot hohlraum (small, $\phi 700 \mu\text{m} \times 1 250 \mu\text{m}$)
shot 138	329.77	1.157	2	hohlraum (standard, $\phi 800 \mu\text{m} \times 1 350 \mu\text{m}$)
shot 142	317.85	2.973	2	hohlraum (small, $\phi 700 \mu\text{m} \times 1 250 \mu\text{m}$)
shot 144	255.14	1.277	1	hohlraum (standard, $\phi 800 \mu\text{m} \times 1 350 \mu\text{m}$)

采用焦距为 150 mm 的光学多道分析器(OMA150)和 C979 型光学条纹相机耦合, 组成时间分辨的 SRS 光谱测量系统^[4-5], 测量第 4 路激光背向 SRS 光谱。如图 1 所示, SRS 光谱测量信号由打靶透镜收集, 通过光纤耦合到 SRS 光谱测量系统, 光谱信号由 PI 公司生产的 1242×1152 型 CCD 记录。同时在每路伺服反射镜

* 收稿日期: 2006-03-15; 修订日期: 2006-05-10

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 王传珂(1981—), 男, 山东兖州人, 硕士, 研究实习员, 主要从事激光等离子体相互作用研究; wck810818@126.com。

后加收光系统,用激光能量卡计对背向 SRS 散射光能量进行积分测量。三倍频激光注入腔靶,SRS 散射光谱波长在 450~650 nm。为消除其它散射光信号干扰,在能量卡计前设计带宽 450~650 nm 的干涉滤光片。第 4 路激光背向 SRS 散射能量积分测量结果见表 1。

2 实验结果与分析

激光(三倍频)与大尺度腔靶耦合产生超热电子的主要机制是受激 Raman 散射。这个过程发生在 $n_c/4$ 密度区以下, n_c 为等离子体临界密度。除了产生超热电子预热靶芯、影响对称性、降低压缩度之外,还散射激光能量。根据理论和实验研究知道,Raman 超热电子和 Raman 散射光能量近似相等^[6]。

图 2 给出实验测得的 SRS 光谱时间分辨图像,纵坐标为时间方向,从上到下扫描;横坐标为波长方向,从右到左为短波到长波方向。时间分辨谱图中的 526 nm 锐光来源于入射激光在倍频过程中产生的二倍频光,它是激光辐射过程中打在腔靶的入射口边缘或者屏蔽片上后沿光路反射进入谱仪的,因此在时间上要早于散射光。实验中一般用它作相对时间和绝对波长的定标^[7]。从 SRS 时间分辨谱图中可以看出,在激光作用前期,没有 SRS 散射光出现,之后散射光谱在长波方向出现,并随时间逐渐向短波方向移动,直到 SRS 散射光结束。

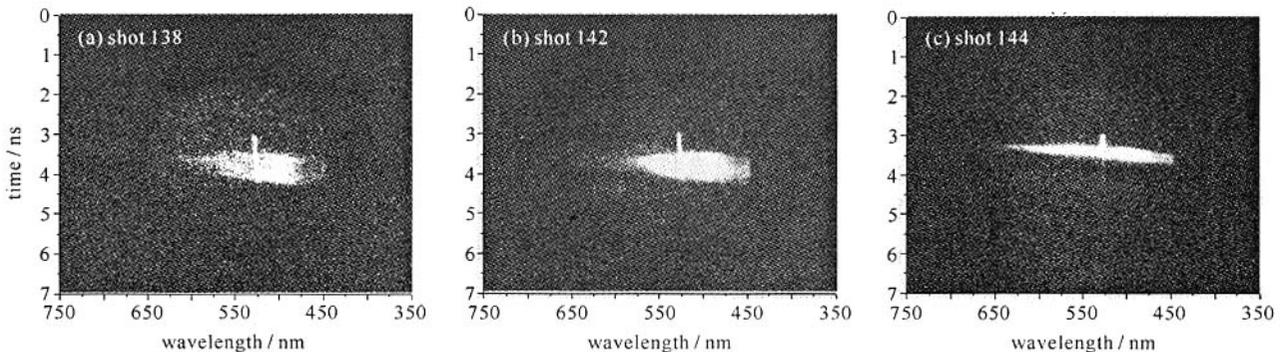


Fig. 2 Time-resolved spectra of scattered light by SRS

图 2 实验测得的时间分辨 SRS 谱图

2.1 SRS 散射光强与靶类型的关系

由于靶型对等离子体的约束作用,SRS 能量份额和靶类型的关系部分地反映了它和等离子体尺度的依赖关系。对比 134 发次(缝靶)和 142 发次(全腔靶)背向 SRS 散射光能量测量结果(见表 1)可以看出,在长脉冲 2 ns 激光与小腔靶($\phi 700 \mu\text{m} \times 1\,250 \mu\text{m}$)相互作用的实验条件下,缝靶产生的 SRS 散射光是全腔靶的 1.3 倍。这是因为激光与腔靶相互作用会烧蚀出等离子体,这些等离子体将向腔的轴心运动,而激光不能通过密度高于临界密度的等离子体,所以等离子体在向轴心运动的过程中,激光实际通过的孔径不断减小,影响激光的注入,出现“堵腔效应”。由于激光辐照缝靶时,没有第 2 路和第 6 路激光注入,同时腔靶壁开有($300 \mu\text{m} \times 1\,250 \mu\text{m}$)的长缝,因此产生的等离子体密度梯度比激光辐照全腔靶时要缓,等离子体尺度变长,从而使得打靶产生的 SRS 光强于全腔靶。

2.2 SRS 散射光强与靶尺寸的关系

由表 1 背向 SRS 能量测量结果可以看出:在激光能量大致相同、激光脉宽同为 2 ns 的情况下,142 发次(小腔靶)的背向 SRS 散射光能量比 138 发次(标准腔靶)产生的 SRS 散射光能量高 1.6 倍。从图 3(a)138 发次和 142 发次 SRS 的时间积分对比中可以看到一致的结果。

由于 SRS 是三波作用过程,入射光波共振地衰变为散射光波和电子等离子体波,发生在 $0.25n_c$ 密度以下的等离子体冕区,腔尺寸越小,腔内等离子体堵腔越严重。对于小腔靶而言,由于尺寸较小,腔壁与腔轴心间距变小,等离子体密度会升高甚至超越临界密度,使得激光无法继续注入,产生等离子体“堵腔”,散射光在入射激

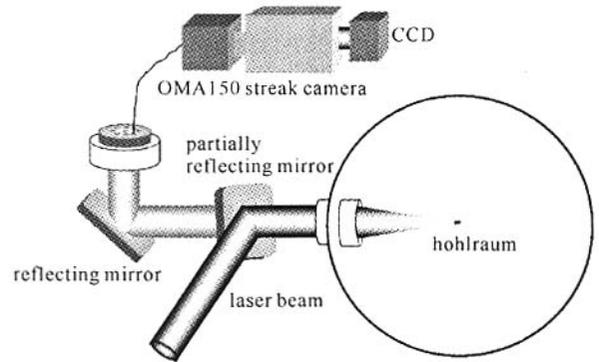


Fig. 1 Experimental arrangement for the measurement of SRS

图 1 SRS 散射光谱测量实验排布

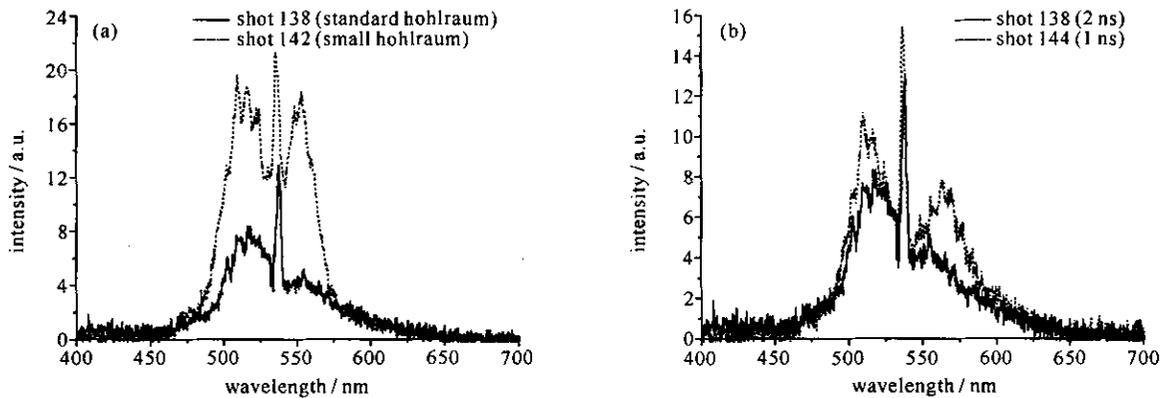


Fig. 3 Integral spectra scattered by SRS

图 3 SRS 散射光时间积分谱

光的前沿就出现了,所以测得的 SRS 能量份额较大。而标准腔靶尺寸较大,“堵腔效应”较弱,激光更容易注入腔靶,散射光在入射激光的中期,也就是峰值时刻才出现,因而其光强较弱。

2.3 SRS 散射光强与激光脉宽的关系

对比 138 发次(2 ns)和 144 发次(1 ns)SRS 能量测量结果(表 1)可以看出,在激光打靶能量相差不大、靶型同为标准腔靶($\phi 800 \mu\text{m} \times 1350 \mu\text{m}$)的情况下,长脉冲 2 ns 激光打靶产生的 SRS 散射光能量比短脉冲 1 ns 激光打靶要稍弱,约为后者的 2/3。这是因为激光的功率密度与脉宽成反比,长脉冲 2 ns 激光打靶的功率密度要小于短脉冲激光打靶时的功率密度。在本次实验中长脉冲 2 ns 激光功率密度 $I_1 \approx 9 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$,较之短脉冲 1 ns 激光功率密度 $I_2 \approx 1.4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 下降了约 1/3,因而散射光强变弱。

由 SRS 散射光时间分辨谱测量结果(图 2(b)和(c))可以看出,短脉冲 1 ns 激光与标准腔靶相互作用时,SRS 散射光谱在 460~610 nm 范围内,对应密度区在 $0.06 \sim 0.18 n_c$,持续时间约 700 ps。长脉冲 2 ns 激光与腔靶相互作用时,SRS 散射光谱在 480~580 nm 范围内,对应密度区在 $0.07 \sim 0.15 n_c$,持续时间约 1.3 ns。结合图 3(b)SRS 的时间积分谱可以看出:在短波波段,长脉冲 2 ns 与短脉冲 1 ns 打靶两者产生的散射光截止波长大致相同;但在长波波段,短脉冲 1 ns 激光打靶产生的 SRS 散射光比长脉冲 2 ns 激光打靶时有明显的红移。SRS 散射光谱在短波截止主要由细丝内的 Landau 阻尼决定,其短波截止可以用来诊断等离子体电子温度;SRS 长波域的截止可能是更高密度区存在陡峭密度面所致^[6-7],根据 SRS 光谱可以分析等离子体晕区电子密度分布。

3 结 论

在神光 II 装置上开展了长脉冲 2 ns, 351 nm 激光与黑腔靶相互作用的实验,采用光学多道谱仪耦合光学条纹相机测量了受激 Raman 散射光谱,采用激光能量卡计对背向 SRS 散射光能量进行积分测量。长脉冲 2 ns 激光注入小腔靶($\phi 700 \mu\text{m} \times 1250 \mu\text{m}$)时,激光辐照缝靶产生的 SRS 光能量是激光与全腔靶作用产生的 SRS 光能量的 1.3 倍。在 2 ns 激光与不同尺寸黑腔靶作用的情况下,激光辐照小腔靶产生的 SRS 光能量比标准腔靶($\phi 800 \mu\text{m} \times 1350 \mu\text{m}$)产生的 SRS 光能量高 1.6 倍。由于激光功率密度下降,2 ns 激光打靶 SRS 散射光要弱于短脉冲 1 ns 激光打靶,但持续时间稍长。实验结果表明:长脉冲 2 ns 激光与标准腔靶相互作用时,等离子体“堵腔效应”比较严重,标准腔靶尺寸不再合适。

严重的等离子体堵腔将降低激光-靶耦合效率。如何修改与优化靶型是下一步研究的重点。增大腔靶尺寸可以使激光有效地在黑腔腔壁处吸收,达到减小“堵腔效应”的目的,但随着腔靶尺寸的增加,黑腔辐射温度将显著降低。在黑腔中填充低 Z 气体,一方面可以控制腔壁等离子体运动,减小“堵腔效应”,另一方面可以减小激光沿光路的能量衰减,保证激光在腔壁处有效吸收,从而提高辐射场对称性的可控性。继续研究长脉冲 2 ns 三倍频激光与腔靶耦合时等离子体堵腔原因,寻找减小等离子体“堵腔效应”的方法将是我们以后研究工作的方向。

参考文献:

- [1] Lindl J D. 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):3933-4025.
- [2] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Phys Plasmas*, 2004, **11**(2):339-391.
- [3] Baldis H S, Campbell E M, Krueer W L. Physics of laser plasmas[M]. New York: North-Holland, 1991.
- [4] 王哲斌. 紫外激光入射腔靶的受激 Raman 散射[D]. 合肥: 中国科技大学, 2003:79-84. (Wang Z B. Stimulated Raman scattering from hohlraum irradiated with ultraviolet laser light. Hefei: University of Science and Technology of China, 2003:79-84)
- [5] 王传珂, 刘慎业, 王哲斌, 等. 光学多道谱仪配 CCD 组合系统效率曲线标定[J]. 光电子技术与信息, 2006, **19**(2):25-29. (Wang C K, Liu S Y, Wang Z B, et al. A method for calibrating the system efficiency of optical multichannel analyzer and CCD. *Optoelectronic Technology and Information*, 2006, **19**(2):25-29)
- [6] 张家泰, 许林宝, 常铁强, 等. 激光靶等离子体受激 Raman 散射[J]. 物理学报, 1991, **40**(10):1642-1644. (Zhang J T, Xu L B, Chang T Q, et al. Stimulated Raman scattering in laser plasma targets. *Acta Physica Sinica*, 1991, **40**(10):1642-1644)
- [7] 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 Z B, Zheng J, Jiang X H, et al. Stimulated Raman scattering from hohlraum irradiated with 351 nm laser light. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(1):45-49)

Stimulated Raman scattering from interaction of 2 ns, 351 nm laser with hohlraum

WANG Chuan-ke, JIANG Xiao-hua, LIU Shen-ye, KUANG Long-yu,
WANG Zhe-bin, LIU Yong-gang, LI San-wei, LI Wen-hong
(National Key Laboratory of Laser Fusion, Research Center of Laser Fusion,
CAEP, P. O. Box 919-986, Mianyang 621900, China)

Abstract: An experiment of laser-plasma interaction in hohlraum plasmas produced by laser beams with 351 nm wavelength, 2 ns pulse duration at SGII laser facility was reported in this paper. The time-resolved spectra and energy of scattered light by stimulated Raman scattering (SRS) were measured. When 2 ns laser entered into a small hohlraum($\phi 700 \mu\text{m} \times 1\ 250 \mu\text{m}$), the energy of scattered light from a slot hohlraum was 1.3 times that from a hohlraum. With different hohlraum size, the energy of scattered light from a small hohlraum was 1.6 times higher than that from a standard hohlraum($\phi 800 \mu\text{m} \times 1\ 350 \mu\text{m}$). Compared with 1 ns laser, when 2 ns laser interacted with hohlraum, the energy of SRS light was lower because of the decline of laser power, while the duration time was longer. The experimental results show that “hohlraum closure” is serious and that the size of standard hohlraum is unsuitable for the interaction of 2 ns laser light with the hohlraum.

Key words: Laser-produced plasma; Stimulated Raman scattering; Hohlraum; Hohlraum closure