

强激光与气凝胶靶相互作用的二次谐波 与 X 射线发射的实验研究*

宋向阳 韩申生 徐至展 张令清 刘亚青 陆海鹤 张正泉

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

王 珏 沈 军

(同济大学物理系波耳固体物理研究所 上海 202300)

提要 主要通过对气凝胶多孔材料平面靶产生的激光等离子体 X 射线和谐波发射的研究,发现气凝胶平面靶的光谱发射与普通平面靶明显不同。气凝胶靶发射的 X 射线光厚较薄,容易产生二次谐波的次峰结构,这是由于气凝胶靶本身的低密度特性容易激发离子声衰变不稳定性而引起的。

关键词 激光等离子体,气凝胶靶,X 射线发射

1 引 言

在激光驱动的惯性约束核聚变 (ICF) 以及 X 射线激光的研究中,各种不同材料和不同结构的靶与强激光相互作用产生的等离子体特性的研究一直是十分引人注目的课题。由于材料制备技术的发展,气凝胶低密度多孔材料在 ICF 的研究中得到了广泛的应用。

对某种材料通过溶胶-凝胶(化学方法)和超临界干燥(物理方法)特殊处理,可以实现对材料结构在几纳米至几十纳米范围的介观尺寸的控制,用这种方法获得的非晶态材料称为气凝胶(Aerogel)。气凝胶为多孔合成材料,它具有如下特点:轻质且密度变化范围大($3 \sim 500 \text{ kg/m}^3$),多孔(孔洞率达 99.5% 以上,比表面积高达 $200 \sim 800 \text{ m}^2/\text{g}$),纳米结构(典型孔洞尺寸为 $1 \sim 200 \text{ nm}$,网络特征长度或组成网络的胶体颗粒直径为 $1 \sim 50 \text{ nm}$)。

气凝胶材料与 ICF 间有着密切的关系,理论与实验研究均表明,低密度多孔泡沫材料吸附氘(DT)燃料,构成低温冷冻靶将有利于节约驱动能,提高聚变产额^[1]。这就要求泡沫材料具有很小的孔洞尺寸($< 1 \mu\text{m}$)、高气孔率($> 90\%$)、低密度($< 0.1 \text{ g/cm}^3$)、且在几十微米范围内密度高度均匀^[2]。美国 LLNL 的 Pekala 等人研制成功由轻原子量元素组成的有机气凝胶,其宏观密度与基干密度分别为 0.03 g/cm^3 和 0.7 g/cm^3 ,微孔尺度在几十纳米量级而且微孔分布均匀,对 DT 具有良好的吸附性能^[3]。日本大阪大学 ILE 使用 Gekko- 激光装置直接驱动,内爆了充液氘或固体氘的泡沫低温靶^[4]。实验表明由于低温靶很低的热容量和极低密度,对超热电子和冲击波的预热非常灵敏,使用固体塑料层外套可以抑制预热。在用 530 nm , 8 kJ

* 国家“863”高技术基金资助项目。

激光辐照充液体氘泡沫靶时,观测到 2×10^8 个中子, dR 为 $10 \pm 3 \text{ mg/cm}^2$; 达到最大压缩之前,观测到在靶的中心 X 射线预发射^[5]。

由于气凝胶制备技术的日臻成熟,目前已经可制作出比临界密度低得多的气凝胶材料。所以人们提出了一种新的靶结构改善激光与等离子体相互作用时的某些不稳定性。如 Green-House 靶就是在间接驱动中使用气凝胶材料的一例。在直接驱动 ICF 时,除上述的低温冷冻泡沫靶外,最近又有人提出在聚爆靶外加一层低密度的气凝胶材料^[6]来减小激光的不均匀程度。

众所周知,在高增益直接驱动 ICF 中入射激光的均匀性和靶等离子体的热光滑对聚爆起着关键的作用,几年来各大实验室已经发展了许多光束的时空非相干平滑化技术用以改善光束质量。而依靠靶内能量沉积(临界密度面)与烧蚀区之间的热传导形成所谓的热光滑效应,则会降低驱动不均匀性对内爆的影响。这要求临界面与烧蚀面之间的距离 D_{AC} 大到所产生的热光滑足以抹平驱动能量本身带来的扰动,在稳态条件下,这一要求是可以达到的。但是实际上, D_{AC} 是与时间相关的量,当激光辐照冷的靶表面时, D_{AC} 从 0 逐步达到稳态值。在 D_{AC} 增长过程中,热传导并不能消除驱动的不平滑,而由于打靶初期激光本身辐照靶面的痕迹(imprinting)却会引起非均匀的冲击波,成为 Rayleigh-Taylor 不稳定性的扰动源。为了降低这种激光在靶表面的痕迹及由其所引起的 RT 不稳定性增长,提出了间接-直接驱动方案(IDD)^[7,8]。在真正的点火激光作用于靶丸之前,先用 X 光在靶的表面产生一层均匀的等离子体,使得主激光脉冲作用时 D_{AC} 不为 0,从而可以在激光脉冲初期就形成热光滑。但是这种方案存在以下缺点:(1) X 光会在靶内产生冲击波引起靶丸的预热;(2) 很难控制均匀等离子体“缓冲”区的密度标尺长度。而使用气凝胶材料作为缓冲既可以阻止预热也可通过改变气凝胶泡沫的厚度对“缓冲”区密度标长任意选取,真正实现对 D_{AC} 的调节。

正是由于气凝胶材料在 ICF 中具有如此重要的作用,所以各国科学家都十分关注激光与这种材料的相互作用的研究。对二氧化硅经溶胶-凝胶和超临界干燥处理,研制成气凝胶和碳气凝胶靶,研究了与中等功率密度的激光相互作用时,在这种气凝胶等离子体中所存在的一些非线性过程。图 1(a)和(b)分别为这种靶材料的扫描电子显微镜下的图像(放大 6000 倍)和透射电子显微镜下的图像(放大 2×10^5 倍)。



图 1 SiO₂ 气凝胶靶的扫描电镜像 (a) 和透射电子显微镜像 (b)

Fig. 1 (a) SEM micrograph (b) TEM micrograph of 2 mg/cm^3 SiO₂ aerogel target materials

2 实验布局

实验是在中国科学院上海光机所 115 脉宽可调高功率激光装置^[9]上进行的,实验布置如

图 2所示。激光波长为 $1.06\mu\text{m}$, 谱宽为 0.03nm , S 偏振, 激光能量在 $2\sim 10\text{J}$ 之间, 脉冲宽度 (FWHM) 在 $100\text{ps}\sim 1\text{ns}$ 之间可调, 每次打靶都用能量计和条纹相机进行探测, 条纹相机为 Hamamatsu 公司的 C1587 型, 测谱范围为 $300\sim 1600\text{nm}$, 时间分辨率为 2ps , 实验时在条纹相机前放置 $1.06\mu\text{m}$ 的滤光片。激光经 $f/D = 1$ ($f = 100\text{mm}$, $D = 100\text{mm}$) 的非球面透镜聚焦于靶上, 透镜基本上可以消除各种像差, 聚焦后的光斑直径约为 $100\mu\text{m}$, 激光功率密度约为 $2.5 \times 10^3 \sim 1.2 \times 10^5\text{W/cm}^2$ 。实验过程中靶室内的真空度 $< 1.33\text{Pa}$ 为了探测后向 $2k_0$ 谐波, 在入射窗口前放一块 532nm 45° 全反镜, $2k_0$ 光最后进入平面光栅光谱仪。光谱仪一级谱线色散率为 0.8nm/mm , 光谱分辨率为 0.01nm , 打靶过程中用汞灯 (546.074nm , 579.065nm) 定标。同时在真空靶室内靶的侧面 (与靶面夹角约为 15°) 放置一装有狭缝的 T1AP 平面晶体谱仪, 其光谱分辨率为 $\lambda/\Delta\lambda \sim 800$, 空间分辨率为 $20\mu\text{m}$ 。在靶室的侧向 (与入射激光成 90° 夹角) 放置透射光栅光谱仪, 其光谱分辨 $\Delta\lambda \sim 0.16\text{nm}$ ^[10], 两种谱仪光谱的记录底片都为经过标定的无保护膜的 5FW 专用 X 光胶片^[11]。

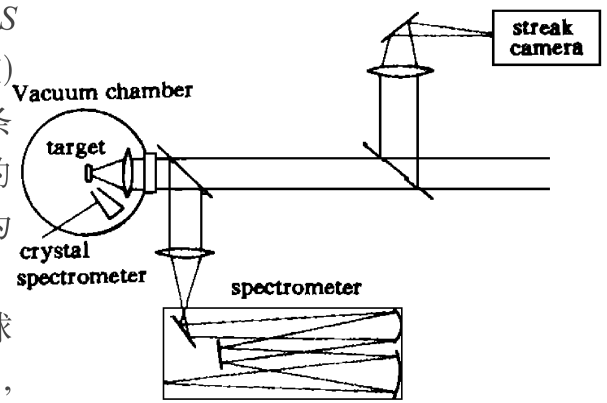


图 2 115 实验布置图

Fig. 2 Schematic of the experimental arrangement

3 实验结果与分析

图 3(a) 和 (c) 是单脉冲激光垂直入射固体 SiO_2 平面靶和 C 平面靶时, 从后向测得的 $2k_0$ 光谱分辨扫描图, 光谱为单峰结构。根据理论分析, 只有在 P 偏振斜入射时由共振吸收在临界面附近形成局部场强, 才产生无红移的 $2k_0$ 窄光谱。而我们是采用 S 偏振光垂直入射靶面的, 结果也产生无红移的谐波光谱主峰, 说明这部分光谱是由线性转换机制引起的。当强激光辐照固体靶时, 形成在径向和轴向都有密度梯度的等离子体, 且其标尺长度短而梯度较大。由于使用大口径短焦距透镜聚焦, 所以会聚角大, 则不论是 P 偏振还是 S 偏振的入射激光, 都会在等离子体边缘临界密度面处发生共振吸收, 激发等离子体静电波^[12]。这种静电波与入射激光或另一静电波耦合, 产生无红移的 $2k_0$ 辐射。由于等离子体向靶外膨胀, 产生 Doppler 效应使得主峰有稍微的蓝移。其中 Doppler 频移可由下式确定^[13]

$$\Delta k_2 = 4k_0 u / c \quad (1)$$

式中 Δk_2 表示谐波的频移量, u 为临界面的运动速度。从图 3(b) 和 (d) 可知 SiO_2 平面靶和 C 平面靶产生的蓝移量分别为 0.3nm 和 0.1nm , 则相应的临界面向外膨胀速度约为 $7 \times 10^7\text{cm/s}$ 和 $2 \times 10^7\text{cm/s}$ 。

实验中使用的 SiO_2 气凝胶靶, 密度为 0.2g/cm^3 , 多孔孔径为 $1\sim 100\text{nm}$, 孔洞率 $> 90\%$, 最大分布在 $\sim 20\text{nm}$ 。碳气凝胶靶的密度为 0.43g/cm^3 , 多孔孔径为 $1\sim 50\text{nm}$, 最大分布 $\sim 10\text{nm}$ 。

激光垂直入射二氧化硅和碳气凝胶平面靶, 从与入射激光相反的方向对产生的二次谐波进行探测, 在激光功率密度与打固体靶的功率密度相差不多时, 发射的光谱不象固体靶只有单峰, 而是呈双峰结构, 且主峰光谱基本上没有发生频移。一般说来, 在激光光压的作用下, 等离

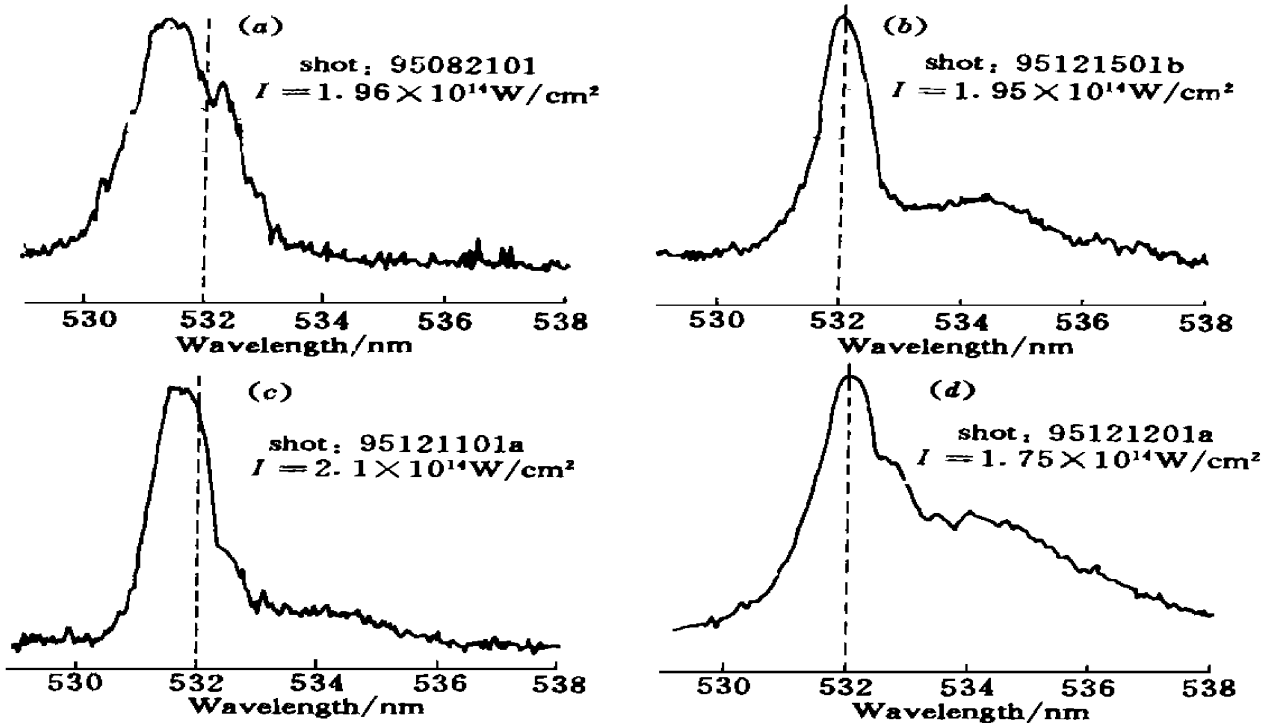


图 3 二次谐波光谱

(a) 固体 SiO_2 平面靶; (b) SiO_2 气凝胶靶; (c) 固体 C 平面靶; (d) C 气凝胶靶

Fig. 3 $2k_0$ forward scattering spectra

(a) solid SiO_2 target; (b) SiO_2 aerogel target; (c) solid C target; (d) C aerogel target

子体的临界面会产生向内的运动,这就使得线性转换的光谱有一点红移。激光与普通靶作用时光压很难驱动临界面再向高密度运动,而在与低密度多孔靶相互作用时,光压将抑制临面向外膨胀甚至会将它向内压缩。时间分辨谱的实验已经证实^[13]:在激光作用的初期,由于等离子体向外膨胀而产生 Doppler 效应,使主峰有稍微的蓝移,随后主峰很快发生红移。由于我们所摄的是谐波的时间积分谱,所以不可能分辨出这种过程,但是从图 3(a) 和 (c) 中也可以看出,普通固体靶发射的光谱,有蓝移现象存在,这说明等离子体主要是向靶外膨胀。而气凝胶靶的光谱主峰却基本上没有发生频率移动,说明光压驱动临面向内运动,从整个时间积分效果上看便是无频移的光谱主峰(如图 3(b) 和 (d) 所示)。

从谐波光谱中还发现低密气凝胶靶中容易激发产生参量衰变不稳定性,图 3(b) 和 (d) 中另一相对较弱的红移次峰就是由离子声衰变不稳定性 (IPD) 引起的^[12]。首先由参量衰变将入射光波衰变为一个等离子体波和一个离子声波: $k_0 \rightarrow k_{epw} + k_{ia}$; 然后入射光波与等离子体波,或者两个等离子体波自身相互作用,产生二次谐波 $k_{epw} + k_{epw} \rightarrow k_2$, $k_0 + k_{epw} \rightarrow k_3$ 。由于一部分激光能量转化为离子声波,引起红移,红移量即为 $2k_{ia}$, 相应的波长移动量为^[13]

$$\Delta\lambda_{ia} \approx 3.7(Z/A)^{1/2} [\text{nm}] \quad (2)$$

对于 SiO_2 和 C, 红移量约为 2.6 nm, 与实验中所测得的值基本上吻合。因为参量衰变不稳定性是一个非线性过程,故存在一个阈值。理论研究产生参量衰变不稳定性的阈值为^[13]

$$I_{th}^{IPD} \approx ZT_e^{-1/2} e^f 10^{13} [\text{W}/\text{cm}^2] \quad (3)$$

其中 T_e 为电子温度,单位为 keV, f 为等离子体光学厚度。由于低密气凝胶靶产生的等离子体光学厚度要比固体靶的薄,这一点通过对固体靶发射的 X 射线中存在自吸收现象比低密度靶

要严重可以看出(如图 4所示),因而在激光与低密度靶相互作用中容易激发参量衰变不稳定性。另外离子声衰变不稳定性阈值与 Z 值也有关,所以在 C 平面靶中有少量的红移光谱发射,而 SiO_2 平面靶中却没有,如图 3(a)和(c)所示。

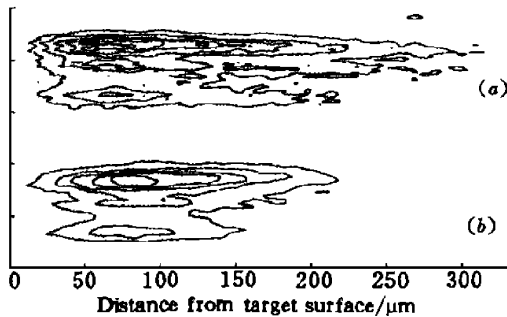


图 4 类氦 X 射线谱的空间分辨

(a) 固体 SiO_2 平面靶; (b) SiO_2 气凝胶靶

Fig. 4 A contour plot of X-ray from

(a) solid SiO_2 target; (b) SiO_2 aerogel target

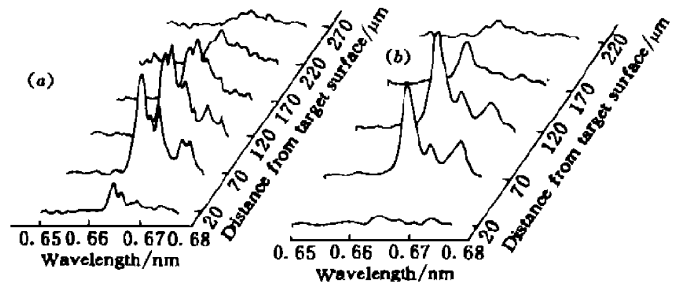


图 5 X 射线谱空间分辨密度扫描图

(a) 固体 SiO_2 平面靶; (b) SiO_2 气凝胶靶

Fig. 5 Spatial-resolved X-ray spectra of

(a) solid SiO_2 target; (b) SiO_2 aerogel target

图 4 为用 T1AP 晶体谱仪拍摄的两种 SiO_2 靶材发生的类氦线的空间分辨光谱,图 5 为相应的密度扫描曲线。普通 SiO_2 平面靶 X 射线发射的空间范围要比硅气凝胶靶的大,且有严重的自吸收现象存在,这说明低密度气凝胶靶的高密度区比普通固体靶要小。考虑到它们的谐波发射谱,可以认为低密度气凝胶靶的等离子体密度变化比较平缓,所以在用它做缓冲靶时要考虑低于临界密度面以下区域的非线性机制,特别是临界面附近的参量不稳定性对激光能量的衰减。

4 结 论

利用中等功率密度的激光束辐照二氧化硅气凝胶和碳气凝胶低密度平面靶,对所产生的激光等离子体 X 射线和谐波发射光谱进行了分析研究,发现气凝胶平面靶的光谱发射与普通平面靶明显不同。根据光谱特性,研究了等离子体状态与这几种特殊靶之间的关系及相互作用过程中的非线性不稳定性。我们发现气凝胶靶发射的 X 射线光厚较薄,容易产生二次谐波的次峰结构,这是由于气凝胶靶本身的低密度特性易激发离子声衰变不稳定性(IPD)的原因。

致谢 作者衷心感谢 115 运行组全体工作人员的大力支持和帮助。感谢中国科学院紫金山天文台 PDS 组在底片扫描方面给予的帮助。实验过程中,与范品忠教授、林礼煌教授、翟侃博士后和李儒新博士进行了有益的讨论,黎忠博士后、江云华和邵雯雯帮助对激光脉宽进行了测量,作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 R. A. Sacks, D. H. Darling. Direct drive cryogenic ICF capsules employing D-T wetted foam. *Nucl. Fusion*, 1987, 27(3): 447~ 452
- 2 L. M. Hair, R. W. Pekala, R. E. Stone *et al.*. Low-density resorcinol-formaldehyde aerogels for direct-drive laser inertial confinement fusion targets. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1988, 6(4): 2559~ 2563
- 3 R. W. Pekala, C. T. Alviso, F. M. Kong *et al.*. Aerogels derived from multifunctional organic monomers. *J. Non-cryst. Solids*, 1992, 145: 90~ 98
- 4 K. A. Tanak. Cryogenic deuterium targets experiments with the Gekko , green laser system. *Phys. Plasmas*, 1995, 2: 2496~ 2497

- 5 T. Yamanaka, K. Nishihara. Physics of high power laser matter interactions, (Kyoto Japan, World Scientific, Mar. 1992), 249~ 254
- 6 M. Desselberger, M. W. Jones, J. Edwards *et al.*. Use of X-ray preheated foam layers to reduce beam structure imprint in laser-driven targets. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(15): 2961~ 2964
- 7 M. H. Emery, J. H. Gardner. Hydrodynamic target response to an induced spatial in coherence-smoothed laser beam. *Phys. Fluids*, 1991, **B3**: 2640~ 2643
- 8 M. Desselberger, T. Afshar-rad, F. Khattak *et al.*. Nonuniformity imprint on the ablation surface of laser-irradiated targets. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(10): 1539~ 1542
- 9 Xu Zhizhan, Chen Shisheng, Ouyang Bin *et al.*. A high power Nd: glass laser with output of 2.5 J/20 ps. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1991, **11**(5): 413~ 418 (in Chinese)
- 10 Yaqing Liu, Ruxin Li, Pinzhong Fan *et al.*. A novel transmission grating spectrograph with pre-optics, 5th international colloquium on X-ray laser. Lund Sweden, 1996, 364~ 366
- 11 Liu Yaqing, Li Ruxin, Fan Pinzhong *et al.*. A relative calibration for SIOFM-5FW X-ray film using net attenuative foil. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(2): 232~ 235 (in Chinese)
- 12 Xu Zhizhan, Xu Yuguang, Yin Guangyu *et al.*. Second-harmonic emission from laser-plasma interactions. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(9): 4902~ 4908
- 13 N. G. Bosov, V. Yu Bychenkov, O. N. Krokhin *et al.*. Second harmonic generation in a laser plasma. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1979, **9**(9): 1081~ 1102

Second Harmonic and X-ray Emission from Aerogel Targets Irradiated with Intense Laser Pulses

Song Xiangyang Han Shensheng Xu Zhizhan Zhang Liqing
Liu Yaqing Lu Haihe Zhang Zhengquan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Wang Jue Shen Jun

(Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 202300)

Abstract The interaction between intense laser pulses and aerogel targets was studied. The X-ray emission and second harmonic generation are different from those of the plane targets. Different plasma status relative to these special targets was studied.

Key words laser plasma, aerogel target, X-ray emission