

激光加热微管靶反激光方向 二次谐波时空分辨结构*

陈文华 顾 敏 林尊琪 余文炎
谭维翰 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报道了高功率激光加热微管靶,从入射激光的反方向观察二次谐波的时空分辨结构,分析了激光与微管靶的相互耦合过程。在激光与等离子体细丝相互作用的理论基础上,解释了微管区域内反激光方向二次谐波辐射的特殊现象。

关键词: 等离子体,二次谐波,微管靶。

一、引 言

最近,利用高功率激光辐射微管靶,在软 X 光波段得到了 $Mg^{+10}1s3p$ 与 $1s4p$ 能级间很高的粒子数反转^[1]。

采用这种特殊结构的靶,除了可以得到较高的 X 光增益系数外,还有利于得到沿同一方向均匀放大的 X 光 ASE 输出。

由于激光与微管靶的相互作用过程是相当复杂,必须利用各种探测手段来对它加以认识。在实验中,从反激光方向取出等离子体的二次谐波信号,利用条纹相机技术得到二次谐波的时空分辨结构。由这些结果发现,在微管中心区的二次谐波发光很弱,在微管边缘的二次谐波则较强。对这些物理现象进行深入的研究,可以帮助了解激光与靶的相互作用过程,进而对产生等离子体能级粒子数反转的物理过程有更深的认识。

二、实验布置

实验光路及探测仪器的安排见图 1。激光经非球面打靶透镜 $L_1(f/2, f=60\text{cm})$, 聚集于微管靶的微管中心表面,光斑直径为 $60\mu\text{m}\sim 80\mu\text{m}$ 。

微管靶的结构是在厚度为 $200\mu\text{m}$ 的纯镁带上,精细地加工出 $40\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, $60\mu\text{m}$ 的孔。

在顺激光方向即微管靶的后向,和侧向即垂直于激光方向分别置有 TlAp 晶体谱仪 c_1 , c_2 , 其主要性能指标见文献[2],利用它们可以得到微管内等离子体和从管口往外喷射的

收稿日期: 1987年11月9日; 收到修改稿日期: 1987年12月16日

* 本课题得到中国科学院自然科学基金资助。

等离子体 X 光发射光谱。另外,还在微管靶的上方安置有针孔相机 c_3 。靶和这些仪器均安筒在一个真空靶室内,其真空度可由油扩散泵抽达 10^{-6} Torr。

等离子体的二次谐波信号,经由打靶透镜 L_1 , $0.53 \mu\text{m}$ 全反镜 M_2 所组成的成像系数,成像于条纹相机的水平狭缝上,仔细调整光路使得条纹相机的狭缝恰取在微管像的直径上。为了判断实验中二次谐波的辐射机制,还必须知道入射激光的时间波形。因此,从激光器的初级放大器上用光纤取出信号,经过适当的延迟光路之后,再由光纤引导进入条纹相机狭缝的一端(见图 1)。经条纹相机时间扫描后,可以在同一张底片上得到入射激光波形中二次谐波的时空分辨结构。其时间分辨率为 10 ps , 空间分辨率为 $2 \mu\text{m}$ 。

实验在上海光机所六路激光装置上完成。激光线宽 0.2 \AA , 脉冲半宽度为 $100 \sim 250 \text{ ps}$ 可调, 能量为 $1 \sim 10 \text{ J}$, 靶面功率密度可达 $5 \times 10^{13} \sim 3 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。

三、实验结果

图 2 是 120# 的结果。靶的厚度为 $160 \mu\text{m}$, 微管 $\phi \sim 60 \mu\text{m}$ 。激光延续时间为 370 ps , $E = 5.3 \text{ J}$ 。在整个激光脉冲内,二次谐波均有发光,其发光的空间尺度为 $260 \mu\text{m}$ 。在这二次谐波时空分辨结构的中央,有一区域宽度约为 $50 \mu\text{m}$ 的暗纹,对应于微管的位置。

在这种情况下,后向晶体谱仪没有拍摄到谱线,侧向晶体谱仪所拍摄的谱中, $\text{Mg}^{+10}1s^2-1s3p$ 和 $1s^2-1s4p$ 谱强度没有反转。

图 3 是窄带激光打 Al 平面靶的结果,实验编号为 20#。激光延续时间为 580 ps , $E = 7.0 \text{ J}$ 。二次谐波的空间发光尺度为 $\sim 130 \mu\text{m}$, 它结构是中间为强发光区,边缘发光较弱,与微管靶的结果相反。

我们变换了靶,得到了图 4 的结果。实验编号为 124#, 靶厚度为 $180 \mu\text{m}$, 微管直径为 $50 \mu\text{m}$ 。激光脉冲延续时间为 450 ps , 能量 $E = 6.3 \text{ J}$ 。二次谐波在整个激光延续时间内均有发光,其空发光区域为 $300 \mu\text{m}$ 。在这个结果中,我们在靠近边缘处仍可分辨出有条纹较弱的发光区域。

在这种情况下,后向晶体谱仪 c_1 拍摄到了 $\text{Mg}^{+10}1s^2-1s3p$ 与 $1s^2-1s4p$ 谱线强度反转的结果,侧向晶体谱仪所拍摄的谱,其强度仍没有反转。

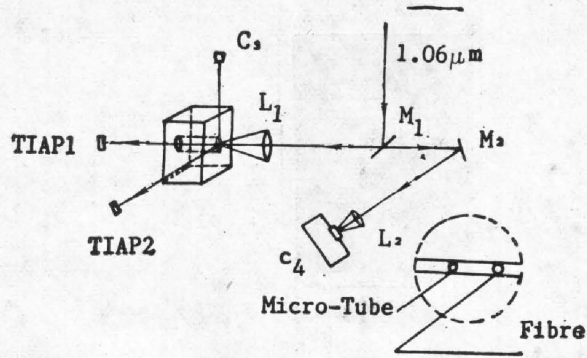


Fig. 1 Experimental setup and the scheme of the streak camera slit

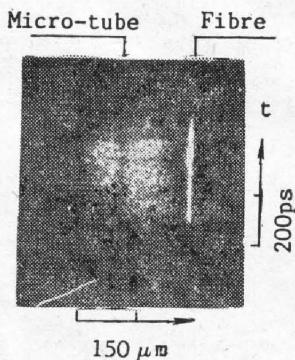


Fig. 2 Result of shot No. 120. The 2nd harmonic emission within the microtube is very weak

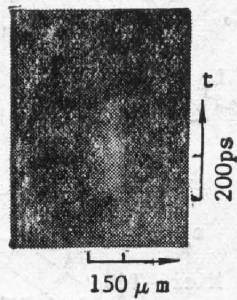


Fig. 3 Result with planar target

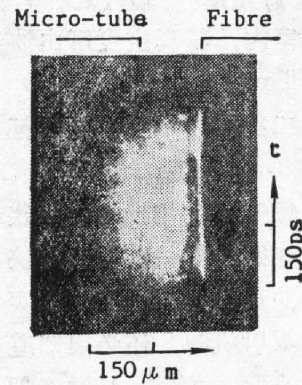


Fig. 4 Result of shot No. 124. There is a weak emission region in the structure

四、结果分析

关于激光加热微管靶, 得到很高粒子数反转的分析与计算, 可参见文献[1], 本文仅从后向二次谐波的时空分辨结构出发, 分析等离子体与激光相互作用过程。

二次谐波的辐射机制有两种: 参量衰变和线性转换机制。参量衰变的过程是, 入射光子在临界界面处衰变成一个电子等离子体和一个离子声子。然后, 电子等离子体自身相互作用 ($\omega_e + \omega_e = \omega_2$), 或一个光子与一个电子等离子体相互作用 ($\omega_0 + \omega_e = \omega_2$), 从而产生二次谐波辐射。这种机制的产生是有阈值的。

线性转换机制是建立在共振吸收理论的基础上^[3, 4], 光射激光在等离子体临界界面形成局域强场, 导致了很强的共振吸收, 场能线性地转化成等离子体的 Langmuir 振动动能, 从而产生二次谐波辐射。线性辐射机制与参量衰变所不同的是, 线性转换机制没有阈值, 只要等离子体密度达到临界密度, 便会有二次谐波辐射。从实验结果图 2, 图 4 可以看出, 二次谐波在整个激光延续时间内均有发光, 故可以断定其辐射机制是线性转换机制。

在线性转换机制的平面波理论中, 其物理模型是, 等离子体只有纵向的线性密度梯度, 横向没有密度变化。P 偏振入射的平面波, 得到二次谐波的辐射能量通量为^[5]:

$$P = \frac{k^2}{2\sigma_T \epsilon_0 c} \delta(2\alpha + k_y) \delta(k_x) \left\{ \left| \int \frac{k_x}{k^2} (J_y k_y + J_z k_z) e^{-ik_z z} dz \right|^2 + \left| \int \left[\frac{k_y}{k^2} (J_y k_y + J_z k_z) - J_y \right] e^{-ik_z z} dz \right|^2 + \left| \int \left[\frac{k_z}{k^2} (J_y k_y + J_z k_z) - J_z \right] e^{-ik_z z} dz \right|^2 \right\} \quad (1)$$

从(1)式中的因子 $\delta(k_x) \delta(k_y + 2\alpha)$ 可以看出, 只能在 $k_x = 0, k_y + 2\alpha = 0$ 方向上, 即入射光线的镜向反射方向上观察二次谐波辐射。

在激光与微管靶相互作用的情况下, 微管周围所产生的等离子体将向微管内喷射。则在微管区域内, 等离子体径向还有密度梯度分布。根据文献[5]的等离子体细丝二次谐波辐射的线性转换理论, 其物理模型正是建立在二维等离子体均有密度分布的基础上的。

当基波场关于 z 轴(光轴)对称的时候,它所耦合起的二次谐波辐射的能量通量为:

$$P_z = 0, \quad (2)$$

$$P_z = \frac{k_z^2 c^3 \epsilon^2}{32 \pi^3 r_0^2 \omega_0^6 m^2} \left| \int \frac{\partial}{\partial r} r H_\varphi \left[\frac{d}{dr} r \ln \epsilon''(r) \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} - \frac{d}{dz} \ln \epsilon'(r) \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} r H_\varphi \right] \frac{J_0(k_z r)}{s_1^2} dr dz \right|^2, \quad (3)$$

即二次谐波在光轴方向没有辐射通量,其辐射主要是集中在侧向。

如果基波场是非轴对称的,则轴向的二次谐波辐射能量通量变为:

$$P_z = \frac{2\pi k_z^2}{c r_0^2} \left| \int \mathcal{J}_r e^{-i k_z z} r dr dz \right|^2, \quad (4)$$

这个积分可证明不为零。

由此可见,线性转换的平面波理论不能解释微管区二次谐波不发射的情况,见图 2。

由等离子体细丝二次谐波的线性转换理论,图 3 的结果是满足基波场关于 z 轴对称的结果,后向二次谐波辐射能量通量 $P_z = 0$ 。侧向能量通量 $P_z \neq 0$,实验上也得到了垂直光轴 P_z 方向的辐射^[6]。图 4 的结果是因为在基波场关于 z 轴非对称的条件下得到的,理论上给出后向能量通量不为零。

比较平面靶和微管的结果,其最大差别就是二次谐波发光区域大小的差别,微管靶的二次谐波发光区域远大于平面靶的结果。

我们知道,入射激光光强是高斯型分布的,其能量主要集中在光轴中间。当说明聚焦光斑直径为 $60 \sim 80 \mu\text{m}$ 时,光束分布的全宽度可达 $150 \sim 200 \mu\text{m}$ 。在打平面靶的时候,由于高斯光束的中间部分所发出的二次谐波,远比其他光斑边缘所发出的二次谐波强,故在条纹相机接收的时候,所加的滤光片把光束边缘所发出的二次谐波给滤掉了,因此只得到光束中心一条比较窄的二次谐波时空分辨结构。

在打微管靶的情况下,光强最强的部分入射到了微管内。根据等离子体细丝二次谐波辐射的线性转换理论,微管内的后向二次谐波辐射的能量通量较弱或不辐射。因此,强度比较平均的光束全宽度内($150 \sim 200 \mu\text{m}$)二次谐波辐射全部都被条纹相机记录下来。

另外,由于激光能量沉积在靶面上,这些能量还会以热传导的方式向周围扩散,使得产生等离子体的范围也随之扩大。因此,从二次谐波时空分辨结构上也看到,其发光区域随时间对应地扩大。由于结构是时空分辨的,故很容易估算出热传导的速率为 10^6ms^{-1} 的量级。

作者感谢郑玉霞、王关志、程瑞华、毕无忌、林康春、何兴法等同志在实验中热情帮助。感谢六路激光装置的全体工作人员的大力支持。

参 考 文 献

- [1] 谭维翰,林尊琪等;《中国激光》,1987,14, No. 9 (Sep), 575.
- [2] 卢仁祥,毛楚生等;《光学学报》,1982,2, No. 6 (Jun), 568.
- [3] N. S. Erokhin, S. S. Moiseev *et al.*; *Nucl. Fusion.*, 1974, 14, No. 3 (Jun), 333.
- [4] N. S. Erokhin, V. E. Zakharov *et al.*; *Sov. Phys. JETP.*, 1969, 29, No. 2, 101.
- [5] 谭维翰,顾敏;《光学学报》,1988,8, No. 9 (Sep), 799~805.
- [6] 顾敏,谭维翰等;《光学学报》,1988,8, No. 10 (Oct), 940~945.

Space and time resolved structure of second harmonic emission from microtube targets at backscattering direction*

CHEN WENHUA, GU MIN, LIN ZUNQI, YU WENYAN, TAN WEIHAN
AND DENG XIMING

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 9 November 1987; revised 16 December 1987)

Abstract

Reported in this paper are the space and time resolved structures of second harmonic emission from laser irradiated microtube targets observed at backscattering direction. The process of laser-microtube interaction has been analysed. By using the plasma-filament interaction theory, we primarily explained the special phenomena of the backscattering 2nd harmonic emission within the microtube region.

Key words: plasma; second harmonics; microtube target.

* Projects Supported by the Science Foundation of the Chinese Academy of Science.