

电子密度起伏对 $3\omega_0/2$ 谐波空间分辨光谱的影响

谭维翰 林尊琪 章辉煌 刘仁红 庄亦飞 何兴法

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文用宽频带、窄频带激光打靶产生 $(3\omega_0/2)$ 谐波空间分辨光谱, 并提出 $3\omega_0/2$ 谐波在电子密度起伏波上的散射来解释已观察到的实验结果。

关键词: 宽频带激光打靶, $3\omega_0/2$ 谐波。

一、引 言

双等离子衰变与 $(3\omega_0/2)$ 谐波的产生一直是一个富有理论与实际意义的难题。已经确认由双等离子衰变产生的超热电子预热靶心对惯性约束聚变十分有害^[1], 而入射激光与双等离子衰变的等离子体波耦合产生的 $(3\omega_0/2)$ 谐波具有十分复杂的时间、空间和光谱结构^[2~8], 给理论分析带来困惑。实验中观察到的某些特征, 至今未能作出令人信服的理论解释, 其物理机理仍在探索中, 较为突出的有: (1) $(3\omega_0/2)$ 有红移与蓝移两个峰, 两峰间距达 $60\sim 120\text{\AA}$, 而每一峰的宽度又达 $30\sim 50\text{\AA}$ ^[6]; (2) 红移峰与蓝移峰在离靶面 $10\sim 150\ \mu\text{m}$ 较为广阔的范围内分布着, 在远离靶面的稀密度区 $n\approx 0.05n_0$ 处仍有红移甚至蓝移分量^[8]; (3) 从 $(3\omega_0/2)$ 的时间分辨谱来看, $(3\omega_0/2)$ 谐波发射不是连续的, 而是由许多 $10\sim 20\ \text{ps}$ 短脉冲所组成^[6, 7]; (4) 与二次谐波发射一样, $(3\omega_0/2)$ 谐波有很大的旁散角^[6], 在与入射激光近乎垂直的方向仍能观察到很弱的 $(3\omega_0/2)$ 谐波; (5) 本文实验结果表明, 用宽带激光打靶产生的 $(3\omega_0/2)$ 谐波, 蓝移分量很弱甚至看不见。本文论述了 $(3\omega_0/2)$ 谐波的理论模型, 实验装置、实验结果及其分析。

二、 $(3\omega_0/2)$ 谐波的理论模型

1. 对已有 $(3\omega_0/2)$ 谐波理论模型的评述

为了解释 $(3\omega_0/2)$ 谐波的红、蓝移及加宽, 最早文献[2, 3]以热修正为基础解释谐波的红移、蓝移与加宽, 但热运动导致等离子体 $(3\omega_0/2)$ 谐波的移位与加宽只在 5\AA 量级, 完全不能解释实验观察到的移位与加宽分别为 $40\sim 70\text{\AA}$, $30\sim 50\text{\AA}$ 的现象。作者曾提出^[6] 等离子体细丝的形成与崩塌模型, 用细丝底部在形成与崩塌过程中向内向外运动的都普勒效应产

生的红移、蓝移来解释所观察到的 $(3\omega_0/2)$ 谐波的红峰与蓝峰。由实验值红移 70\AA ，蓝移 50\AA 可估算出细丝形成与崩塌速度分别为 $3 \times 10^8 \text{ cm/sec}$ ， $2 \times 10^8 \text{ cm/sec}$ 与有质动力产生的推进速度为一致^[7]。近年 Young 等^[8]将 $(3\omega_0/2)$ 谐波在低密度出现的原因归结为 $(3\omega_0/2)$ 谐波在低密度等离子体上的散射，但无法解释通过时间分辨谱表现出来的 $(3\omega_0/2)$ 谐波 $10 \sim 20\text{ps}$ 脉冲发射特点，用细丝形成与崩塌恰能解释这种脉冲发散特点，值得注意的是由 Hora, Gumin 等^[9]提出的在等离子体冕区朗缪尔 (Langmuir) 驻波随时间周期性出现，周期为 6ps 左右，入射光子与脉动的朗缪尔驻波栅相互作用就产生脉动为 10 ps 量级的谐波，然而在解释 $(3\omega_0/2)$ 谐波在沿入射激光方向的空间丝状结构也遇到困难。综上所述，在 $(3\omega_0/2)$ 谐波的 5 个特点中最难解释的是在稀薄密度 $0.05 n_c$ 处为什么能观察到 $(3\omega_0/2)$ 谐波。

2. 沿等离子体细丝传播 $(3\omega_0/2)$ 谐波在电子密度起伏波上的散射

由于电子密度起伏，电子密度 n_0 可表示为 $n_e = n_0 + \tilde{n}_e$ ，式中 n_0 为缓慢变化的下平台的电子密度， \tilde{n}_e 为电子密度起伏， $(3\omega_0/2)$ 谐波在 $(n_0/4)$ 密度附近产生后，沿着激光入射的相反方向传播，并在密度起伏 \tilde{n}_e 上被散射， $(3\omega_0/2)$ 谐波及散射波的矢势 $A_{3/2}$ ， A_s 满足如下方程^[10]

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - c^2 \nabla^2 + \omega_p^2 \right) A_s = - \frac{4\pi e^2}{m} \tilde{n}_e A_{3/2} \quad (1)$$

对 A_s 、 \tilde{n}_e 满足的方程进行分析后^[10]，得出最大增长率的电子密度起伏波波矢 k_e 及散射波波矢分别为

$$\left. \begin{aligned} k_e &= 2k_{3/2} - \frac{2\omega_{3/2}}{c} \frac{c_s}{c}, \\ k_s &= k_e - k_{3/2} = k_{3/2} - \frac{2\omega_{3/2}}{c} \frac{c_s}{c}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将这散射波看成波源，沿 θ 方向的衍射波矢势 $A_D = A_s \exp(i k_s \sin \theta z)$ ，如图 1 所示， $2D$ 为 $(3\omega_0/2)$ 谐波光束直径， A_D 为衍射波，将 A_D 沿 z 求衍射积分，并用 D 除，进行规一化，使得

$$\bar{A}_D = \frac{\int A_D dz}{D} = A_s \frac{\sin(k_s \sin \theta D)}{k_s \sin \theta D}, \quad (3)$$

由 (3) 式可求出 n 级衍射的衍射角 θ 为

$$\sin \theta = \frac{\pi n}{(2\pi D/\lambda_s)} = \frac{n}{2D} \lambda_{s0} \quad (4)$$

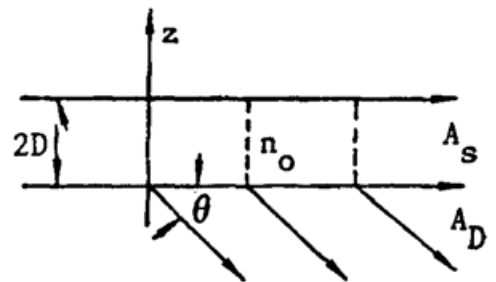


Fig. 1 The scattering and diffraction wave of $3\omega_0/2$ harmonic beam

在文献 [6]、[12] 中，作者联系到 $(3\omega_0/2)$ 谐波的时间与光谱发射特性，论证了以等离子体细丝的形成与崩塌来解释 $(3\omega_0/2)$ 谐波的红移和蓝移光谱特征，看来有很大一部分 $(3\omega_0/2)$ 谐波是在等离子体细丝中传播的，其高斯光束半径可按文献 [12] 中公式估算， $D = a_m = (1.767/\sqrt{\varepsilon(0)}) L^{2/3} \lambda^{2/3}$ ， L 为下平台特征长度，取 $L = 100 \mu\text{m}$ ， $\lambda_s = 0.7 \mu\text{m}$ ，得 $D = 6 \mu\text{m}$ ，代入 (4) 式得 $\sin \theta = (0.7n/12)$ 。对于 $n = 17$ 的高阶衍射，其衍射角 $\theta \approx \pi/2$ ，其强度比后向散射减弱到 $(1/17)^2 \approx 1/300$ 倍，这与实验观察是相符的。

三、实验装置、结果和分析

1. 实验布置

实验是在中国科学院上海光学精密机械研究所六路高功率激光装置上完成的,窄带激光是用第3路直接入射到主靶室,其宽度为 0.2\AA ;需用宽带激光时,先将2路打到副靶室。然后将副靶室产生的宽带反激光引到第3路光路上,经放大入射到主靶室进行打靶,其宽度为 30\AA ,窄带、宽带激光每次打靶的能量在 $2\sim 9\text{J}$,脉冲宽度为 250ps 、靶面功率密度为 $0.3\sim$

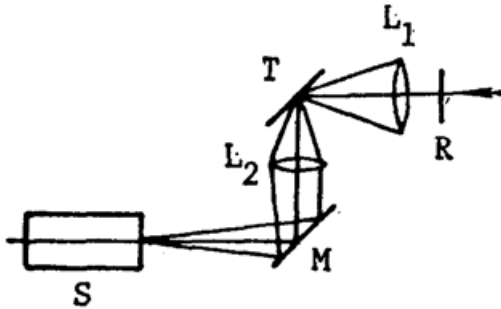


Fig. 2 Experimental arrangement

谱仪沿入射光方向的空间分辨谱,谱仪狭缝是水平放置的,显微物镜 L_2 与全反镜 M 构成一个 $20\times$ 成像系统,将沿激光从靶面到非靶面 $200\mu\text{m}$ 的空间范围,成像于光谱仪狭缝上。

2. 实验结果与分析

表1列出各次打靶的激光参数及光谱测量结果。图3分别给出窄带与宽带激光打靶时从靶面到距靶面约 $100\mu\text{m}$ 处的 $(3\omega_0/2)$ 谐波空间分辨谱光密度分布曲线,图4给出各枪的 $(3\omega_0/2)$ 谐波空间分辨光谱照片以及相对于靶面的距离;由表1及图4可看出006、007、009、038各枪为窄带激光打靶, $(3\omega_0/2)$ 谐波空间分辨谱用Ne线定标,有明显的红移与蓝移。由006、007、009看,随着激光入射到靶面能量的增加,红、蓝移也增加。038枪入射激光能量虽然很大,但已离焦 $180\mu\text{m}$,且挡掉 $2/3$ 能量,故靶面功率密度不高。这一枪有清晰的红、蓝移,但不大,且加宽也小,由026~049为宽带激光打靶,一般的来说,在相同靶面入射激光功率密度下,宽带打靶产生的 $(3\omega_0/2)$ 谐波讯号要比窄带激光打靶弱得多,而且蓝移又比红移弱很多,有时甚至看不见,如026~049诸枪均表现出这一特点。这表明在宽频带情形,单色功率密度下降,有质动力作用产生的等离子向内推进速度相对减弱,而向外膨胀速度更加减弱了。这就导致红移峰,特别是蓝移峰减弱甚至消失。026~049诸枪入射到靶场的能量是很高的,除026枪外,其它诸枪的红移及加宽并不大,蓝移消失也是宽频带激光打靶向外喷射的超热电子减少的一个标志。

由图3、图4看出在离靶面 $10\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ 处均能观察到 $(3\omega_0/2)$ 谐波发射,特别是在 $\sim 100\mu\text{m}$ 处等离子体密度已很稀薄 $n\approx 0.05n_0^{[4]}$,参照前面的讨论,在等离子细丝中传输的 $(3\omega_0/2)$ 谐波细光束,由于等离子体密度起伏的散射与衍射效应,使得在与入射激光近乎垂直的方向,在整个 $(3\omega_0/2)$ 谐波传输路径上,包括 $(n_0/4) > n > 0.05n_0$,均能观察到很弱的 $(3\omega_0/2)$ 谐波散射光。

最后作者向参加本工作的六路激光装置运行组全体同志表示感谢,并感谢张伟清同志

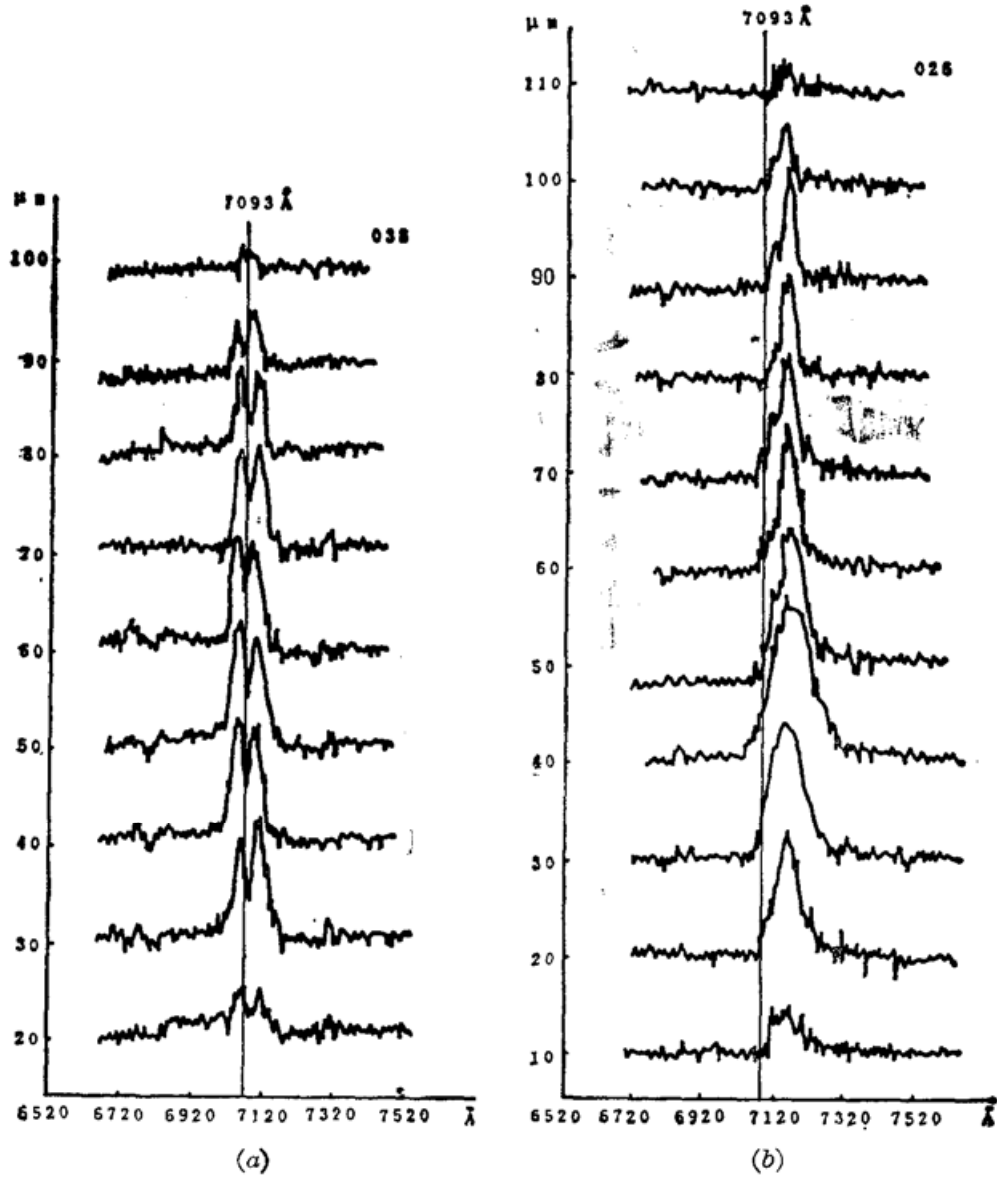


Fig. 3 The photo density of $3\omega_0/2$ harmonic space resolved spectrum
(a) narrow band shooting; (b) broad band shooting

Table 1

| No. | bandwidth | polarization | incident laser energy | | peak wavelength (\AA) | | peak breadth (\AA) | | target & else |
|-----|-----------|--------------|-----------------------|-----------------|----------------------------------|------|-------------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------|
| | | | $E_2(\text{J})$ | $E_3(\text{J})$ | blue | red | blue | red | |
| 006 | N | V | | 2.4 | 7076 | 7112 | 37 | 51 | \emptyset 150 μm cylinder copper target |
| 007 | N | V | | 2.7 | 7076 | 7117 | 35 | 37 | ibid |
| 009 | N | V | | 3.9 | 7079 | 7119 | 62 | 95 | ibid |
| 038 | N | H | | 11.2 | 7069 | 7115 | 39 | 41 | plane copper target defocus 180 μm 2/3 energy with blocked |
| 026 | B | H | 9.4 | 7.2 | | 7132 | | 117 | \emptyset 150 μm cylinder |
| 032 | B | H | 9.4 | 5.2 | 7073 | 7122 | 62 | 53 | plane copper target |
| 040 | B | H | 8.5 | 3.5 | 7076 | 7109 | 14 | 40 | ibid |
| 049 | B | H | 9.4 | 3.8 | | 7109 | | 20 | ibid |

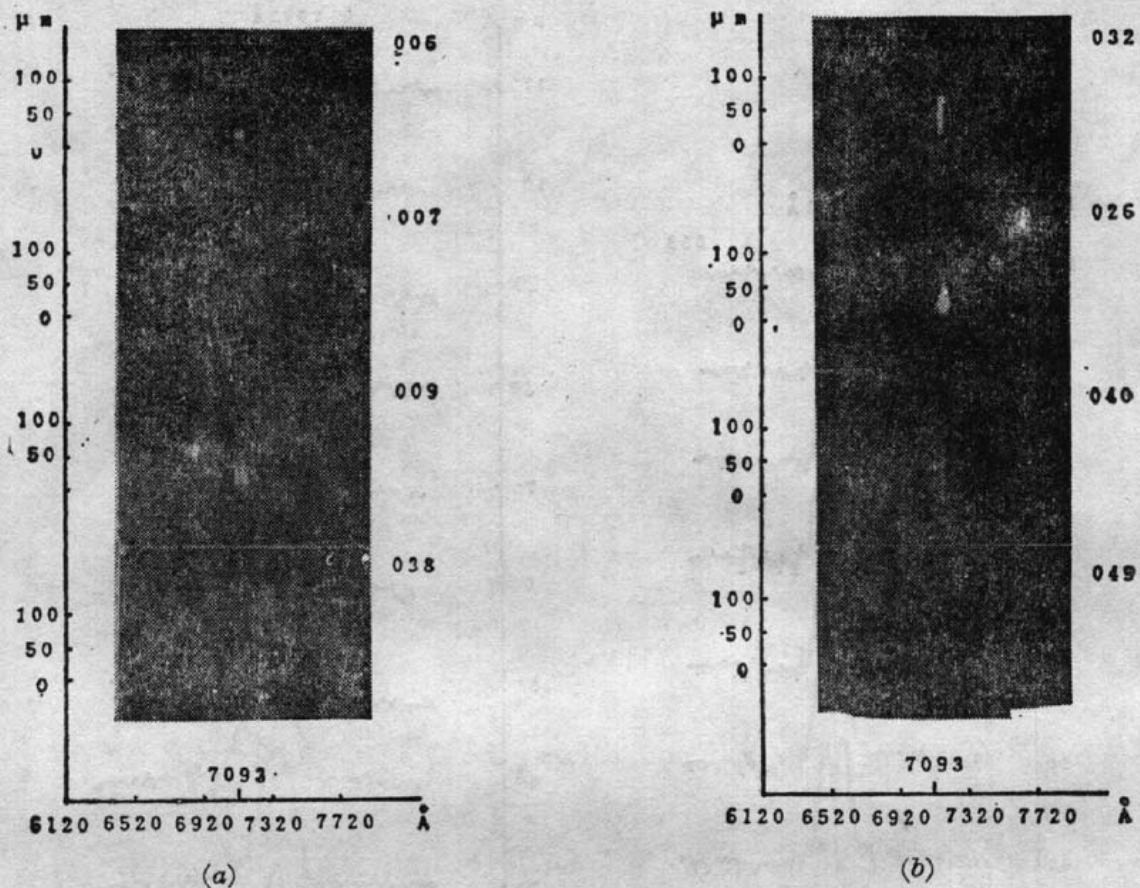


Fig. 4 The space resolved photograph of $3\omega_0/2$ harmonic emission
(a) narrow band shooting; (b) broad band shooting

在整理数据中给予的协助。

参 考 文 献

- [1] K. Estabrook, W. L. Kruer *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **45**, No. 17 (Oct), 1399~1403.
H. A. Baldis, C. J. Walsh; *Phys. Fluids*, 1983, **26**, No. 5 (May), 1364~1375.
D. W. Phillion, E. M. Campbell *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **49**, No. 19 (Nov), 1405~1408.
- [2] C. S. Liu, M. N. Rosenbluth; *Phys. Fluids*, 1976, **19**, No. 7 (Jul), 967~971.
- [3] A. I. Avrov, V. Yu. Bychenkov *et al.*; *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 1977, **72**, No. 3 (Mar), 970~982.
- [4] R. W. Short, W. Seka *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **52**, No. 17 (Apr), 1496~1499.
- [5] P. D. Carter, S. M. L. Sim *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **44**, No. 21 (May), 1407.
H. C. Barr; *Rutherford Laboratory Annual Report*, 1979 (unpublished), 8. 33
- [6] Lin Zunqi, Tan Weihan *et al.*; *Laser and Particle Beams*, 1986, **4**, Part. 2, 223~230.
- [7] Tan Weihan, Lin Zunqi *et al.*; *Scientia Sinica (Ser. A)*, 1987, **30**, No. 4, 420~427.
- [8] P. E. Young, B. F. Lasinski *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **61**, No. 24 (Dec), 2766~2769.
- [9] Gu Min, H. Hora; 《中国激光》, 1989, **16**, No. 11 (Nov), 656~662.
- [10] W. L. Kruer; 《The Physics of Laser Plasma Interaction》, (Addison-Wesley Publishing Company, 1988), 12, 118.
- [11] 章辉煌, 林尊琪等; 《中国激光》, 1989, **16**, No. 6 (Jun), 334~338.
- [12] Tan Weihan, Yu Wenyan *et al.*; *Laser and Particle Beams*, 1986, **4**, Part. 2, 231~237.

The effects of electron density fluctuation on generation of the $3\omega_0/2$ harmonic emission in laser produced plasmas

TAN WEIHAN, LIN ZUNQI, ZHANG HUIHUANG, LIU RENHONG, ZHUANG YIFEI AND HE XINGFA

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

(Received 29 December 1989; revised 24 May 1990)

Abstract

Reported in this paper are the spatially and spectrally resolved fine structures of the $3\omega_0/2$ harmonic emission for both broad band and narrow band laser shooting, observed at an angle of 90° with respect to the laser optical axis. In order to give an explanation to the experimental results observed, the scattering of $3\omega_0/2$ harmonic under the influence of electron density random fluctuation is proposed.

Key words: broad band sloting; $3\omega_0/2$ harmonic.