

文章编号: 0253-2239(2001)11-1404-03

# 等离子体密度标长对高次谐波转换效率的影响\*

帅 斌 李儒新 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学开放实验室, 上海 201800)

**摘要:** 通过等离子体粒子模拟研究了在强激光与等离子体相互作用产生高次谐波的过程中, 等离子体密度标长对转换效率的影响。计算了在不同密度标长下 p 偏振非相对论强度激光与高密度等离子体相互作用产生高次谐波的转换效率, 发现等离子体密度标长对转换效率有重要的影响, 这种影响与谐波级次、等离子体密度、激光脉冲宽度有关。

**关键词:** 高次谐波; 等离子体; 密度标长; 粒子模拟  
中图分类号: O437 文献标识码: A

激光和气体原子相互作用产生高次谐波存在机制上的缺陷, 因此, 随着激光强度的逐渐提高, 越来越多的注意力集中到另外一种机制的高次谐波——激光和等离子体相互作用产生高次谐波。对于等离子体, 电离导致的限制将不复存在。理论上可以通过提高激光强度获得任意强和任意高级次的谐波。

激光和等离子体相互作用产生等离子体的思想源于激光和单电子相互作用的理论<sup>[2]</sup>。单电子在强光驱动下的运动是高度非线性的, 它的辐射包含高次谐波。但是激光和亚临界密度的等离子体相互作用产生谐波被认为是低效的<sup>[3]</sup>, 最有前途的是激光和过临界密度等离子体相互作用产生高次谐波, 即激光和固体表面等离子体相互作用产生高次谐波。

这一问题最开始的实验研究是通过大功率二氧化碳激光器实现的<sup>[4]</sup>。理论上的解释由 Bezerides 等人<sup>[5]</sup>给出。其物理图景是: 在强激光的作用下电子穿越等离子体和真空界面往复运动, 电子经历的势是高度非线性的, 于是电子的辐射也是高度非线性的, 这种辐射包含了高次谐波。同时, 激光和等离子体相互作用产生高次谐波还有其他物理原因, 例如  $v \times B$  力的作用和共振吸收。近年来随着啁啾脉冲放大技术的出现和发展, 出现了一大批飞秒、太瓦激光系统, 使这种过程有了一些新特性。

早期人们认为等离子体和真空界面附近有限的密度梯度将会降低高次谐波的转换效率, 也就是说, 理想的阶梯状密度分布下谐波转换效率最高<sup>[5]</sup>。对于长脉冲(皮秒量级), 有质动力会将临界面密度分布推压得很陡, 但是对于飞秒量级的超短脉冲, 一般来讲临界面密度总是有一个有限大小的梯度分布。最近一些实验表明, 适当的有限密度梯度会提高高次谐波的转换效率<sup>[6]</sup>。密度标长对高次谐波产生的影响至今仍没有定论, 是一个相当重要的问题。

激光与过临界密度等离子体相互作用的研究方法受到很大的限制。最大的限制来源于用激光和等离子体波相互作用描述不再适用, 通过解析方法来准确求解是非常困难的。在这种情况下, 粒子模拟是一种行之有效的方法。本文采用粒子模拟来研究密度梯度对等离子体高次谐波产生的影响。我们采用的程序是一维 PIC 程度 LPIC++<sup>[7]</sup>, 该程序可以处理斜入射情形。

## 1 模拟条件

图 1 表示了模拟计算中假设的状况和条件。通常认为 s 偏振的光与等离子体相互作用产生高次谐波是低效率的, 所以我们在模拟中选取了 p 偏振入射, 为了和实验对比, 入射角选为 45°。各种参数及它们的意义如下:

激光强度: 由无量纲振幅  $a_0 = 2I_0 r_e \lambda^2 / (\pi m c^3)^{-1/2}$  表示。其中  $r_e = e^2 / mc^2$  为电子的经典半径,  $I_0$  为激光的功率密度。e、m、c、λ 分别是电子电荷、电子质量、光速和抽运光波长。当  $a_0 < 1$

\* 国家自然科学基金(19974058)、国家杰出青年科学基金(69925513)、上海应用物理中心(99JC14006)、国家重点基础研究发展规划项目(G1999075200)、国家 863 计划、中国科学院“百人计划”和“引进国外杰出人才”项目资助课题。

收稿日期: 2000-11-23; 收到修改稿日期: 2001-01-11

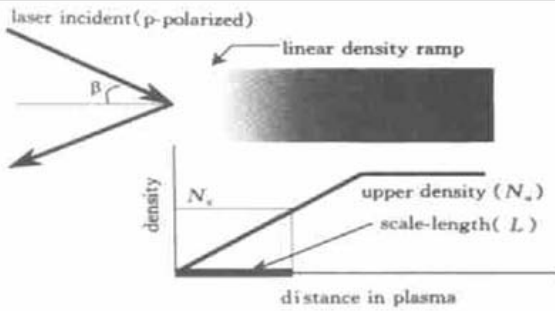


Fig. 1 Schematic of PIC simulation

时, 电子运动是非相对论的; 当  $\alpha_0 > 1$  时是相对论的。为与以后的实验比较, 我们选择了非相对论强度, 相对论强度下等离子体谐波产生<sup>[8]</sup>有不同的机制和特征。

激光脉冲宽度  $\tau$ : 以激光周期为单位;

等离子体密度: 以临界密度  $N_c = m\omega^2 / (4\pi e^2)$  为单位,  $\omega$  为激光的频率。

图 1 中  $N_u$  为等离子体的上密度,  $N_c$  为临界密度, 当密度线性分布时, 从真空到  $N_c$  的距离就是密度标长  $L$ 。

## 2 模拟结果

图 2 和图 3 是强度为 0.5、宽度为 20(对于一个典型的 800 nm 钛宝石啁啾脉冲放大系统, 大致相当于强度和波长平方的乘积为  $I\lambda^2 = 3.4 \times 10^{17} \text{ W} \cdot \mu\text{m}^2 / \text{cm}^2$ , 脉冲宽度为 50 fs, 激光与等离子体相互作用产生的谐波强度随密度标长变化的模拟结果。图 2 中上密度为 4, 图 3 中上密度为 10。

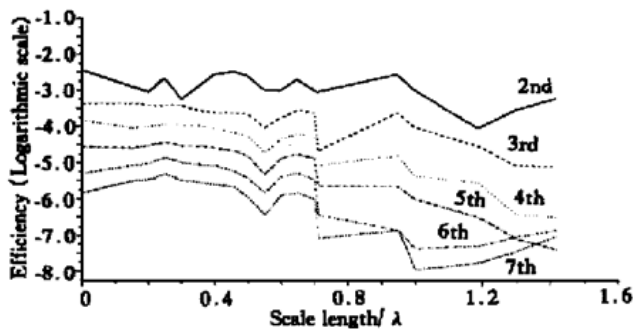


Fig. 2 Conversion efficiency of harmonics vs plasma density scale length with  $\alpha_0 = 0.5$ ,  $\tau = 20$ ,  $N_u = 4N_c$ ,  $\beta = 45^\circ$

在图 2 中转换效率基本上随密度标长的增加而降低, 同时有所起伏。引起该起伏的物理因素尚不清楚。图 3 显示了和图 2 很不相同的结果, 谐波转换效率的最大值出现在  $L \neq 0$  的地方。实际上在  $L = 0$  时, 大于 6 次的谐波不会产生。图 3 中可以看到 2 阶和 3 阶谐波的最大位置和其他级次不同。最大的可能是共振吸收导致特定标长处谐波转换效率增高。

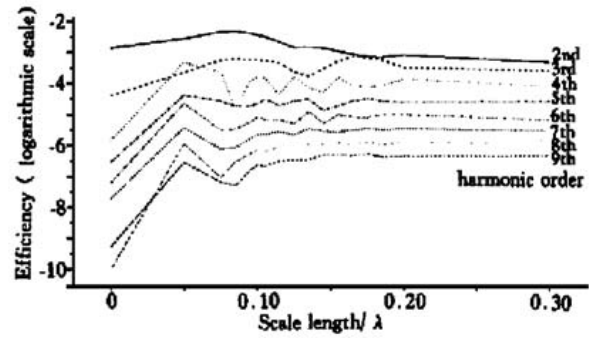


Fig. 3 Conversion efficiency vs plasma density scale length with  $\alpha_0 = 0.5$ ,  $\tau = 20$ ,  $N_u = 10N_c$ ,  $\beta = 45^\circ$

共振吸收可以产生的最高次谐波  $n$  正比于  $(N_u/N_c)^{1/2}$ , 对于  $N_u = 10N_c$ , 刚好是三阶。对金属而言, 表面等离子体密度通常在数百倍临界密度, 所以图 3 的结果更接近实际的情况。

图 4 和图 5 是对相对较长脉冲模拟的结果, 脉冲宽度为 200 周期, 强度分别是 0.05(取很低强度是为和实验比较, 因为激光器的总能量是有限的) 和 0.5。等离子体上密度为 4。对比图 4(a) 和图 4(b), 图 5(a) 和图 5(b), 可以看出在长脉冲情况下, 等离子体密度梯度对谐波转换效率仍然有影响, 这种影响和短脉冲情况不尽相同。在图 4 中, 当  $L = 0.1$  时二阶和四阶谐波被增强, 三阶被减弱; 在图 5 中, 四阶和六阶被增强而三阶被减弱。这一结果里面应该包含某种物理现象, 但是对长脉冲而言, 模拟需要很长的时间, 在微机上面模拟给出如同图 2 和图 3 的详细结果是很困难的。长脉冲的详细研究有待进一步的工作。

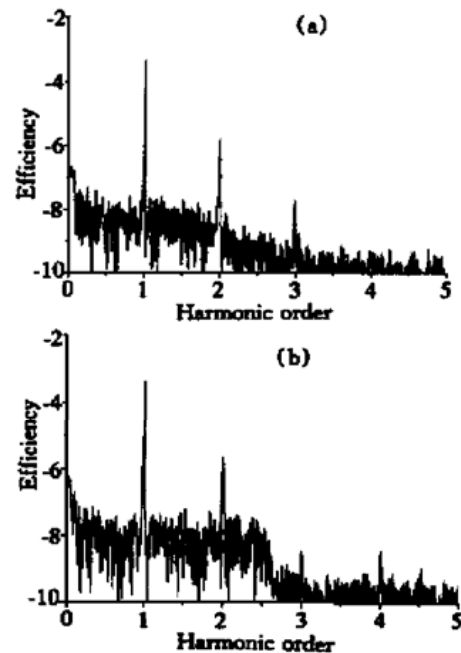


Fig. 4 Harmonic spectra with  $\alpha_0 = 0.05$ ,  $\beta = 45^\circ$ ,  $N_u = 4N_c$ ,  $\tau = 200$ . (a)  $L = 0$ ; (b)  $L = 0.1$

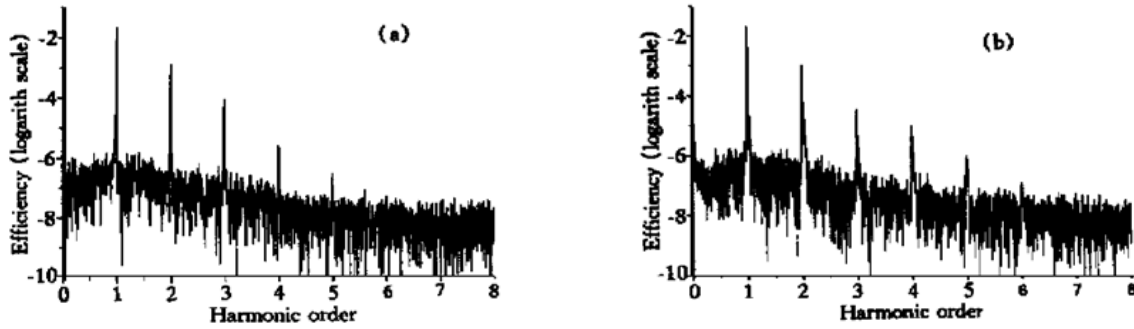


Fig. 5 Harmonic spectra with  $\alpha_0 = 0.05$ ,  $\beta = 45^\circ$ ,  $N_u = 4N_c$ ,  $\tau = 200$ . (a)  $L = 0$ ; (b)  $L = 0.1$

**结论** 通过上面的结果和讨论, 我们发现在激光与高密度等离子体相互作用产生高次谐波的过程中, 有限的密度梯度的存在将明显地影响谐波转换效率。这种效应与等离子体的上密度、激光的脉冲宽度和谐波的级次有关。共振吸收和其他物理效应在这一现象中起重要作用。转换效率在适当的密度标长下可以提高几个量级, 这种效应可以作为选择性谐波产生的一条途径。

### 参 考 文 献

- [1] Kohlweyer S, Tsakiris G D, Wahlstrom *et al.*. Harmonic generation from solid-vacuum interface irradiated at high laser intensities. *Opt. Commun.*, 1995, **117**(5): 431~438
- [2] Sarachik E S, Schappert G T. Classical theory of the scattering of intense laser radiation by free electrons. *Phys. Rev. (D)*, 1970, **1**(10): 2738~2753
- [3] Gibbon P. High-order harmonic generation in plasmas. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **QE-33**(11): 1915~1924
- [4] Carman R L, Forslund D W, Kindel J M. Visible harmonic emission as a way of measuring profile steepening. *Phys. Rev. Lett.*, 1981, **46**(1): 29~32
- [5] Bezerides B, Jones R D, Forslund D W. Plasma mechanism for ultraviolet harmonic radiation due to intense CO<sub>2</sub> light. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **49**(3): 202~205
- [6] Ishizawa A, Kanai T, Ozaki T *et al.*. Enhancement of high-order harmonic generation efficiency from solid surface plasma by controlling the electron density of gradient picosecond laser produced plasmas. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2001, **37**(3): 384~389
- [7] Lichters R, Meyer-Ter-Vehn J, Dukhov A. Short-pulse laser harmonics from oscillating plasma surface driven at relativistic intensity. *Phys. Plasmas*, 1996, **3**(9): 3425~3437
- [8] 沈百飞, 余 纬, 曾贵华 等. 强激光和稠密度等离子体相互作用产生的三次谐波. *光学学报*, 1996, **16**(7): 903~907

## Effect of Plasma Density Scale Length on the Conversion Efficiency of High Order Harmonic Generation in Laser-Plasma Interaction

Shuai Bin Li Ruxin Xu Zhizhan

(Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 23 November 2000; revised 11 January 2001)

**Abstract:** The effect of plasma density scale length on the conversion efficiency of high order harmonic generation in the interaction of intense laser and plasma was investigated via PIC (particle in cell) simulation. The conversion efficiency of high order harmonic generation produced by the interaction between p-polarized, non-relativistic laser pulse and over dense plasma with different density scale-lengths was calculated. The plasma density scale length significantly affects the conversion efficiency and this effect is different for different harmonic order, different laser pulse duration and different plasma density.

**Key words:** high-order harmonics; plasma; density scale-length; PIC simulation