

文章编号: 0253-2239(2002)09-1035-04

飞秒激光在氦气中的高次谐波*

夏元钦 陈建新 姚 琴 王 骥

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 利用中心波长在 795 nm 的线偏振的钛宝石超短脉冲激光除为抽运源, 在氦气中观察到 40 nm ~ 160 nm 第 5 ~ 17 次谐波的软 X 射线激光辐射, 着重研究了高次谐波谱线强度随气压的变化规律, 发现高次谐波谱线强度随充气气压的增加而增强, 实验中考虑到如果充气气压过高, 探测仪器可能受到损害, 充气气压没有达到最佳值。

关键词: 钛宝石; 超短脉冲激光; 氦气; 高次谐波; X 射线激光辐射

中图分类号: O437 文献标识码: A

1 引 言

最近几年, 人们利用激光强度高于 10^{13} W/cm² 的超短脉冲, 在各种气体介质中观察到了短于 10 nm、高于 100 次的高次谐波辐射^[1-3], 为探索寻找新型的软 X 射线光源提供了新的途径。获得更短波长的谐波辐射和提高谐波的转换效率是人们努力追求的目标^[4]。根据 Krause 的公式^[5]:

$$E_{\max} = I_p + 3.17 U_p, \quad (1)$$

获得最短波长的高次谐波(即最大的光子能量 E_{\max}) 取决于原子或分子的电离能以及激光场中电子的有质动能 U_p , 而 $U_p = 9.33 \times 10^{-14} I \lambda^2$, 所以要得到波长尽可能短的高次谐波要使用长波长的激光抽运, 作用介质的电离能尽可能地高。使用超短脉冲激光作为抽运源, 一方面由于高次谐波产生的效率非常低, 需要一定功率的抽运激光才能产生; 另一方面, 介质在超短脉冲强激光场中承受的饱和光强 I_s 与激光的脉冲宽度有关, 脉冲宽度越小, I_s 越大, 有质动能就越大, 从而高次谐波的截止波长就越短。He 气是所有气体(包括气体分子)中第一电离能最高的介质, 在中性的气体中利用 He 气可以产生获得最短波长的高次谐波, 当然利用离子可以产生更短和更高级次的高次谐波, 但人们用很好的探测仪器也只能勉强探测得到, 距离实际应用更加遥远。迄今为止, 获得最短的高次谐波是 Michigan 大学的实验小组利用脉宽 26 fs、波长 780 nm 激光脉冲与 He 相互

作用, 产生 297 次谐波, 波长是 2.73 nm, 已成功进入“水窗”波段^[6]。

2 飞秒激光系统及实验装置

本实验光源为美国 Spectra-Physics 公司生产的掺钛蓝宝石飞秒激光系统, 具体参数见参考文献 [7], 可以产生超短脉冲种子激光的掺钛蓝宝石锁模激光器 Tsunami 由氩离子激光器抽运, 当氩离子激光器抽运功率为 5 W 时, Tsunami 输出功率为 400 mW 左右, 脉宽为 80 fs, 带宽在 15 nm ~ 20 nm 之间, 重复频率 82 MHz。从 Tsunami 输出的单脉冲能量大约为 5 nJ 的超短脉冲经全反镜导入掺钛蓝宝石放大器。80 fs 的超短脉冲展宽(200 ps ~ 300 ps)放大(由倍频的 YAG 抽运)及重新压缩后可以获得单脉冲能量 60 mJ、脉宽 105 fs、重复频率 10 Hz、中心波长 795 nm(可调)水平线偏振的激光输出。

实验排布如图 1 所示。

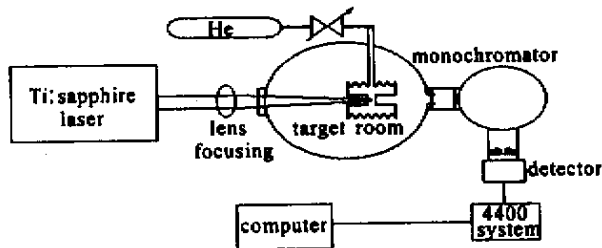


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

激光经焦距为 350 mm 的非球面聚焦透镜后首先在靶室的两个黄铜薄片上现场钻出入射针孔与出射针孔, 通过 DL-4 型真空计测量靶室内的真空度。由靶室出射的高次谐波辐射谱线经 VSN515 型真空紫外单色仪分光后通过单色仪出射狭缝处的探测器

* 国家科委 863 高科技项目、国家自然科学基金(69688003)资助课题。

E-mail: fslaser-lab@hotmail.com

收稿日期: 2001-06-08; 收到修改稿日期: 2001-08-03

进行放大。探测器是由日本滨松公司生产的中心波长为 70 nm 型号为 R595 的无窗光电倍增管,最后由 4400 信号检测和分析系统对 X 射线辐射谱线的时间积分谱进行测量。实验装置、单色仪、探测器及实验记录系统详见文献 [7]。

3 实验结果及分析

从掺钕蓝宝石飞秒激光系统输出的线偏振激光经过全反镜能量略有衰减,在进入靶室之前能量为

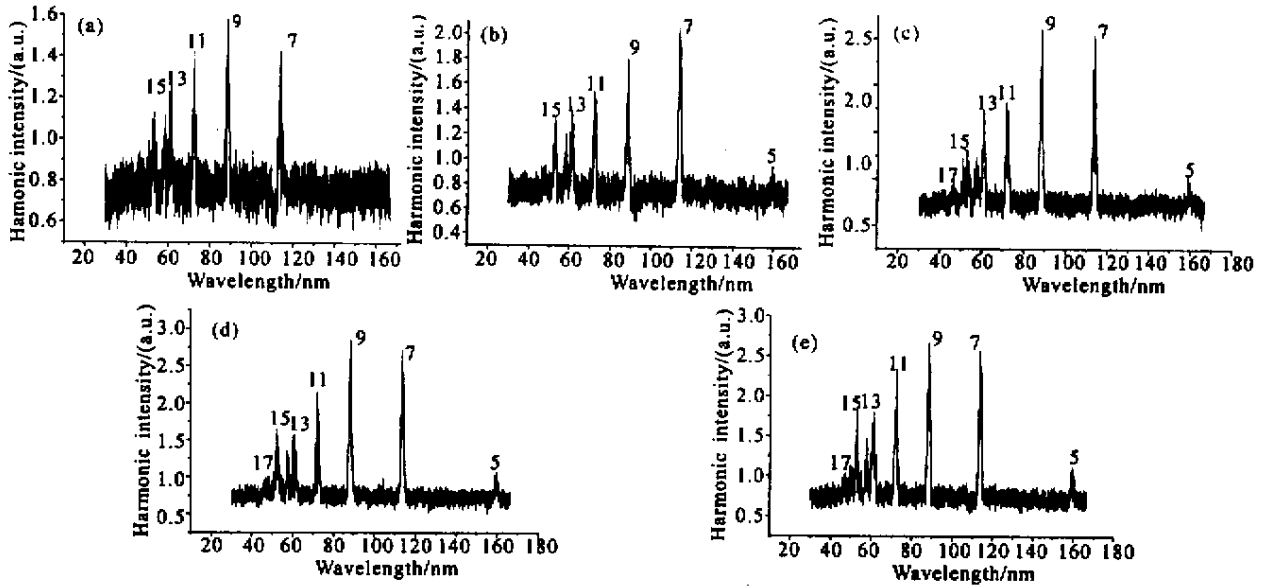


Fig.2 The harmonic intensity in He vs gas pressure driven by femtosecond laser at 795 nm. (a) 1.20 kPa ; (b) 1.80 kPa ; (c) 2.43 kPa ; (d) 2.80 kPa ; (e) 3.25 kPa

图 3 所示为各级谐波强度随靶室内充气气压变化关系曲线,这里谱线强度只是相对强度,各级谱线之间的强度是不能比较的,但同阶谐波谱线之间的相对强度是可以比较的。

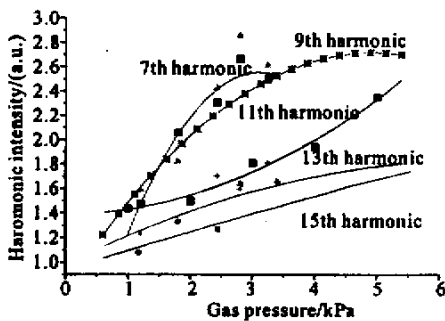


Fig.3 The harmonic intensity in He dependence of gas pressure by femtosecond laser at 795 nm

按照高次谐波强度与气体密度(充气气压)之间的关系式^[2]:

$$I_q \propto |d(q\omega)|^2 N^2 b^3 |F_q|^2, \quad (2)$$

42 mJ,在整个实验过程中保持此能量不变(即保持功率密度不变),依次改变靶室内充气气压从低到高为 1.20 kPa、1.80 kPa、2.43 kPa、2.80 kPa、3.25 kPa,获得的高次谐波随气压变化情况如图 2 所示。

从图 2 可以看到随着靶室内充气从低到高逐渐增加,各级高次谐波的强度逐渐增强,而且原来没有观察到的第 5 阶谐波也随着充气气压的逐渐升高出现并且逐渐增强。

其中, $d(q\omega)$ 为第 q 阶谐波偶极距, b 为共焦参数, F_q 为相位匹配因子。

从(2)式可以看出,一方面,高次谐波是在介质中产生,介质对谐波的作用是很重要的,参与产生谐波的原子(分子)数越多,产生的谐波越强;另一方面,谐波产生以要在介质中传播,因介质而引起的色散也会随气体密度而增大,气体密度的增大,因电离而产生的自由电子也会增加,也会加大谐波在介质中传播的相位失配,因此, F_q 会随气体密度增加而减小。因而对高次谐波的产生,存在一个最佳的气体密度(充气气压)。但由于本次实验使用的 R595 的无窗光电倍增管探测器必须工作在 10^{-2} Pa 气压以下,这样,充气只能在 3 kPa ~ 3.3 kPa 范围内,充气气压没有达到最佳。另一方面,在相同的条件下,可以获得 Kr 中 19 及 21 次的高次谐波^[8],但在 He 中没有观察到,而且已观察到的谐波信号也比 Kr 气中同一级次谐波的信号要弱许多,说明 He 中产生

的高次谐波效率要低,信号要相对弱一些,也相对比较难观测。

高次谐波的截止波长不仅与介质的一些性质(如电离能)有关,还与驱动激光的波长以及激光脉冲宽度有关,依据文献[6],我们得到高次谐波截止波长的公式可表示为:

$$h\nu_c = I_p +$$

$$0.5 I_p^{(3+\alpha)} \lambda^2 \left/ \left\{ \ln \left[\frac{0.86 \tau 3^{2n^* - 1} G_{lm} C_{n^* l^*} I_p}{-\ln(1-p)} \right] \right\}^2 \right. \quad (3)$$

其中 $h\nu_c$ 为截止的高次谐波光子能量, I_p 为介质的电离能,在这里是氦气的第一电离能, $I_p = 24.587$, 它们单位都是 eV, $\alpha = 0.5$ 为修正因子, λ 和 τ 为驱动激光的波长和脉冲宽度,单位分别是 μm 及 fs, 这里取

$$\lambda = 0.795 \mu\text{m}, \quad \tau = 105 \text{ fs}.$$

n^* 为有效的量子数, p 为用来定义饱和和激光强度的电离几率,这里取 $p = 0.98$,

$$G_{lm} = \frac{(2l+1) \prod_{m=0}^l (l+|m|)!}{6^{|m|} |m| (l-|m|)!}$$

l 和 m 为最外层电子的轨道和磁量子数,

$$C_{n^* l^*} = \left(\frac{2e}{n^*} \right)^{n^*} \frac{1}{(2\pi n^*)^{l^*}}$$

n^* 、 G_{lm} 以及 $C_{n^* l^*}$ 可以直接从 Ammosov-Delone-Krainov 有关电离速率的文章中得到^[9], 对于 He,

$$n^* = 0.74, \quad G_{lm} = 1, \quad C_{n^* l^*} = 2.03.$$

这样利用 105 fs、795 nm 驱动激光,在中性氦气中获得的最高次谐波光子能量为 432 eV,对应的波长为 2.87 nm 及高次谐波级次为 277 次。

另外,有关高次谐波截止波长的公式(3)在文献[6]中其右面第 2 部分分母写成

$$\left\{ \frac{\ln(0.86 \tau 2^{2n^* - 1} G_{lm} C_{n^* l^*} I_p)}{-\ln(1-p)} \right\}^2,$$

或许是印刷错误,如果按照原文给定的公式计算,得不到作者在 100 fs 入射激光条件下 He 中高次谐波截止级次 333 次、介质能量 518 eV 的结果,计算结果的与 333 次要相差将近一个量级。本实验的探测器及单色仪中心波长都在 70 nm,小于 40 nm 的谐

波探测起来比较困难,本次实验没有观察到更高级次的谐波。

结论 利用掺钛蓝宝石飞秒激光系统输出的线偏振激光在中心波长 795 nm 情况下,获得 He 中 5~17 次的高次谐波,并观察了高次谐波谱线强度随气压的变化规律,发现高次谐波谱线强度随充气气压的增加而增强。

实验中考虑到探测仪器的承受能力,充气气压过高,探测仪器可能受到损害,因此充气气压没有达到最佳值。

参 考 文 献

- [1] Li X F, L'Huillier A, Ferray M *et al.*. Multiple-harmonic generation in rare gases at high laser intensity. *Phys. Rev. (A)*, 1989, **39**(11):5751~5761
- [2] Lompre L A, L'Huillier A, Ferray M *et al.*. High-order harmonic generation in xenon: Intensity and propagation effects. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1990, **7**(5):754~761
- [3] Liu Yaqing, Xu Zhizhan, Zai Kai *et al.*. High-order harmonic generation in Ar noble gases. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 2000, **20**(1):7~13(in Chinese)
- [4] Wang Yingsong, Xu Zhizhan, Liu Yaqing *et al.*. Phase-matching effect in high-order harmonic generation. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 2000, **20**(1):1~7(in Chinese)
- [5] Krause J, Schafer K J, Kulander K C. High-order harmonic generation from atoms and ions in the high intensity regime. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(24):3535~3538
- [6] Chang Zenghu, Rundquist A, Wang Haiwen *et al.*. Generation of coherent soft X rays at 2.7 nm using high harmonics. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**(16):2967~2970
- [7] Wang Qi, Xia Yuanqin, Chen Deying *et al.*. High-order generation in krypton with femtosecond Ti:sapphire laser. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 2001, **21**(5):534~537(in Chinese)
- [8] Wang Qi, Che Jianxin, Chen Deying *et al.*. Study of high-order harmonic generation in Kr. *Chinese J. Lasers*(中国激光), 2001, **A28**(9):793~796(in Chinese)
- [9] Ammosov M V, Delone N B, Krainov V P. Tunnel ionization of complex atoms and of atomic ions in an alternating electromagnetic field. *Sov. Phys. JETP*, 1986, **64**(6):1191~1194

High-Order Harmonic Generation in He Driven by Ti:Sapphire Femtosecond Laser

Xia Yuanqin Chen Jianxin Yao Qin Wang Qi

(*The National Key Laboratory of Tunable Laser Technology , Institute of Opto-Electronic Technology , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001*)

(Received 8 June 2001 ; revised 3 August 2001)

Abstract : The 5th ~ 7th high order harmonics soft X-ray radiation with He in static gas target ranging from 40 nm to 160 nm driven by linearly-polarized 105 femtosecond Ti:sapphire laser at 795 nm are observed. The change of high-order harmonic intensity vs gas pressures is studied. The high-order harmonic intensity increases with gas pressures , but the optimal gas pressures have not been obtained considering the possible destruction to the detector under higher gas pressures.

Key words : Ti:sapphire femtosecond laser ; He ; high-order harmonic ; soft X-ray laser radiation