

利用氩获得 795 nm 飞秒激光在静态气室中的高次谐波*

夏元钦 陈德应 陈建新 王 骐

(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 报道了 120 fs/795 nm 的 Ti:sapphire 飞秒激光在静态气体靶室中利用稀有气体氩作为非线性介质的高次谐波辐射, 在静态靶室中获得高次谐波辐射, 较常用的气体喷嘴具有结构简单, 实验容易操作等优点, 实验中在 42 mJ 和 7.5 mJ 线偏振激光驱动下观察了谐波辐射谱随气压变化情况.

关键词 Ti:sapphire 飞秒激光; 静态气体靶室; 氩的高次谐波辐射

中图分类号 O437.1 **文献标识码** A

0 引言

高次谐波是强场物理领域重要的现象, 1987 年首次获得 1 ps 248 nm KrF 激光在惰性气体超声喷嘴 17 次谐波^[1]以后短短十几年, 人们利用高强度、超短脉冲激光在气体介质中观察到了短于 10 nm、高于 100 次的高次谐波辐射^[2], 为人们探索寻找新型的软 X 射线相干光源提供了新的途径, 也吸引了人们研究强激光与原子的非微扰相互作用即强光非线性光学方面的兴趣. 产生高次谐波常规的方法是利用气体喷嘴喷射出来的介于气、液两相之间的高速粒子流与强激光场相互作用^[3,4], 气体喷嘴产生的气体背景气压可以很高, 气体密度很大. 本文报道的是利用线偏振的中心波长 795 nm, 50 mJ/120 fs Ti:sapphire 超短脉冲激光与静态靶室中的氩相互作用获得 5~21 次谐波辐射, 讨论了气体密度对高次谐波信号强度的影响.

1 实验装置

实验装置主要包扩聚焦系统、真空室及气体靶室系统、分光用的单色仪及时间积分谱测试系统等三个部分.

飞秒激光经聚焦系统聚焦于真空室的靶室内, 由靶室出射的高次谐波信号经真空紫外单色仪分光后通过单色仪出射狭缝处的探测器进行放大, 探测器是中心波长为 70 nm 的型号为 R595 的无窗光电倍增管, 信号由 4400 信号检测和分析系统对高次谐波辐射谱线的时间积分谱进行测量, 实验装置示意图如图 1 所示.

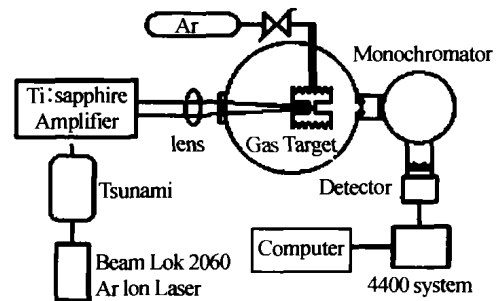


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

实验中气体靶室置于真空室内, 气体靶室采用由入射孔阑与出射孔阑及入射孔阑与出射孔阑之间的支架所组成的非对称的可压缩式结构, 气体靶室结构示意图如图 2 所示. 入射孔阑与出射孔阑通过它们之间的支架外侧波纹管的伸缩可调节它们两个端面上的黄铜皮之间的距离, 入射孔阑与出射孔阑两个端面上使用黄铜皮用胶粘封, 黄铜皮使得靶室内部与真空室相隔离, 通过调节入射孔阑与出射孔阑两个端面上黄铜皮的间距, 使入射针孔与出射针孔的间距从 1~10 mm 连续可调. 气体靶室使用银丝与真空室的靶室充气口相连, 靶室充气口有两个接口分别与高压气瓶和真空室底部相连, 在靶室充气口与高压气瓶和真空室底部相连的真空管道之间各有一个气体阀门相隔断. 入射激光打靶时, 聚焦激光束在黄铜皮上现场钻出入射针孔与出射针孔, 在

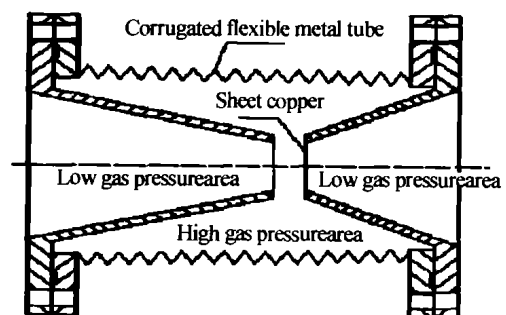


图 2 气体靶室结构示意图

Fig. 2 Structural schematic of the gas target cell

*国家 863 高技术计划激光技术主题资助项目

Tel: 0451-86412753 Email: fslaser_lab@hotmail.com

收稿日期: 2003-11-10

激光束打出入射针孔与出射针孔后,靶室内所充的气体开始向靶室外的真空室内泄漏,泄漏到真空室内的气体被真空室的真空机组抽走,通过调节与高压气瓶真空管道之间的微调阀保持动态平衡,维持靶室内的气压恒定. 使用北京大学电子学系生产的 DL-4 型真空计测量靶室内的气压.

实验中分光装置是美国 Acton 公司的 VSN-515 型 0.5 m 真空紫外单色仪. 单色仪入射狭缝和出射狭缝的宽度由 $5\ \mu\text{m}$ ~ 3 mm 可调,当单色仪狭缝的宽和高分别为 $10\ \mu\text{m}$ 和 4 mm 时,在 121.6 nm 处的分辨率为 0.05 nm. 实验中分光光栅闪耀波长为 70 nm,该光栅所能测量的最短波长标称值为 30 nm. 通过数字式的波长显示器,可直接读出波长的数值,精确度可达 $\pm 0.1\ \text{nm}$. 实验中所使用的探测器为日本滨松公司生产的无窗光电倍增管,光电倍增管的型号为 R595,此型号光电倍增管响应的中心波长为 70 nm,光电倍增管工作时需加载一定的电压,电压一般在 1000 ~ 4000 V,并且随着电压的升高,光电倍增管的增益系数也逐渐增大,电压 1000 V 时光电倍增管的增益系数不足 10^3 ,电压 3600 V 时光电倍增管的增益系数将近 10^9 ,在此次实验中工作电压 1600 V,这时光电倍增管的增益系数在 $10^5 \sim 10^6$. 另外无窗的光电倍增管工作时,要求周围的气体压强必须低于 $1.33 \times 10^{-2}\ \text{Pa}$,如果气压过高,则光电倍增管很容易被损坏. 实验中所用的 4400 信号检测和分析系统集 BOXCAR(模块)和数字平均(软件)于一体,对所获得的高次谐波信号进行处理. 由光电倍增管输出的信号分别引入到示波器 TDS-684A 与 4400 信

号检测和分析系统.

聚焦系统是焦距 350 mm 的非球面聚焦透镜,对镀膜透膜. 材料使用的是熔石英(一级).

2 实验结果

Ar 是非线性光学极化率比较高的一种介质,它的非线性光学极化率要比 Ne 高许多,实验证实飞秒激光输出能量为 8 mJ 时,在 Ne 气中一点谐波信号也没有观察到,把 Ne 气用分子泵排空,换上 Ar 气,在激光低能量 7.5 mJ 输出时,观察到的谐波信号已经很强了. 图 3 为示波器 TDS-684A 存储的瞬时的光电倍增管输出高次谐波信号,通道 1 为光电倍增管输出信号,通道 2 为触发信号.

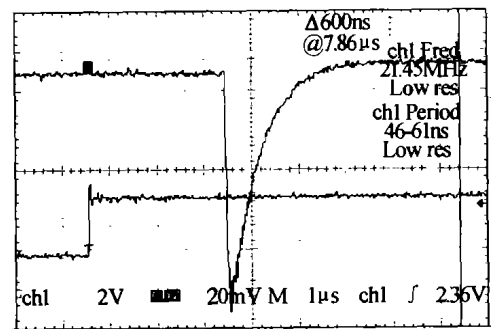


图 3 示波器 TDS-684A 测量的高次谐波波形图
Fig. 3 The stored high-order harmonic signal with TDS-684A oscilloscope

激光能量输出 42 mJ 情况下,改变靶室内气压分别为 2.14 kPa、1.37 kPa、1.00 kPa、0.53 kPa、0.22 kPa 以及 0.10 kPa,在激光能量输出 7.5 mJ 情况下,改变靶室内气压分别为 2.66 kPa、1.95 kPa、1.21 kPa、0.56 kPa 及 0.26 kPa,获得的高次谐波辐射谱如图 4 和图 5.

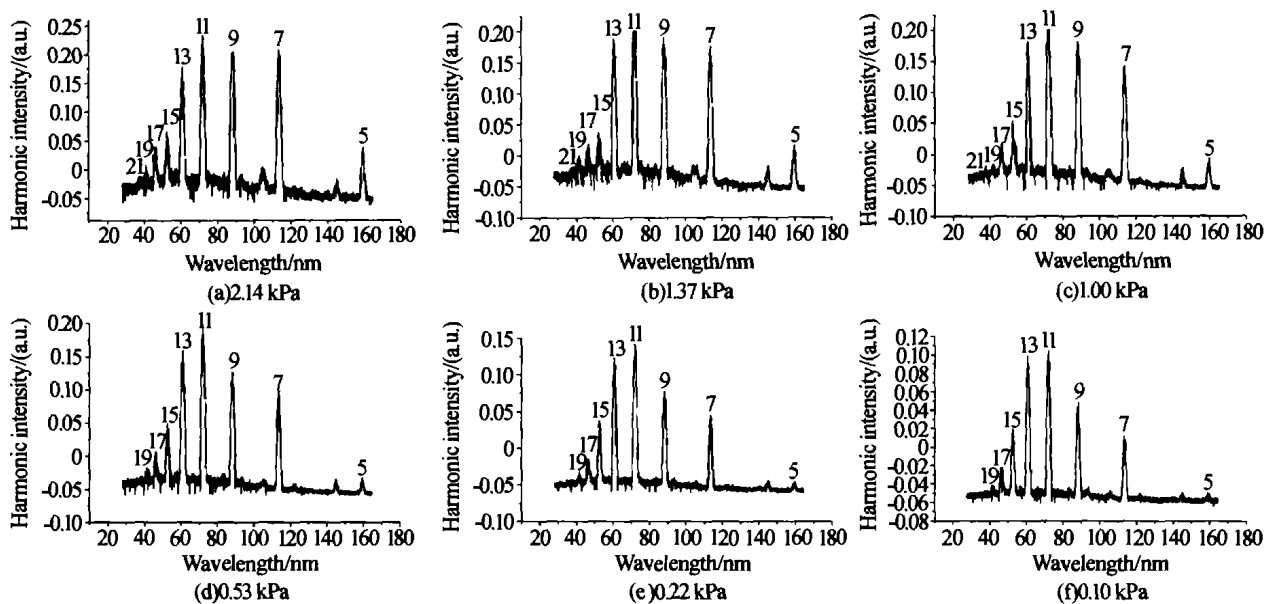


图 4 线偏振激光能量 42 mJ 时 Ar 中高次谐波随气压变化情况

Fig. 4 The high-order harmonic intensity in Ar dependence of gas pressure with 42 mJ linearly-polarized laser

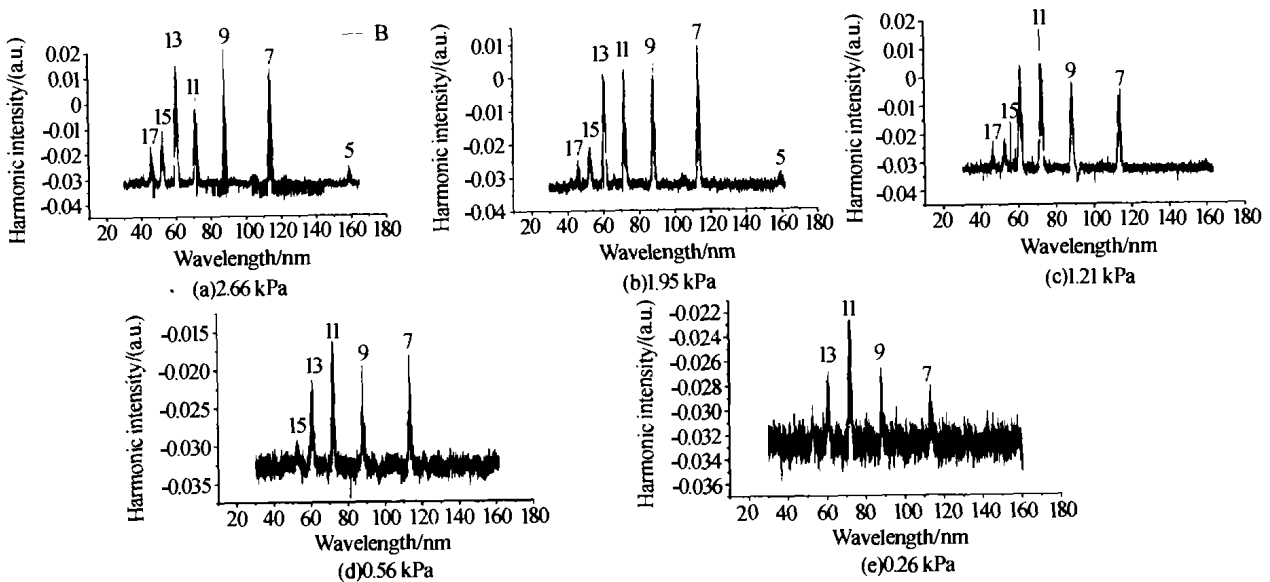


图 5 线偏振激光能量 7.5 mJ 时 Ar 中高次谐波随气压变化情况

Fig. 5 High-order harmonic intensity in Ar dependence of gas pressure with 7.5 mJ linearly-polarized laser

3 实验结果讨论

第 q 次谐波场强度 I_q 与气体原子密度 N 之间关系可表示为^[6]

$$I_q \propto |d(q\omega)|^2 N^2 b^3 |F_q|^2 \quad (1)$$

$d(q\omega)$ 是第 q 阶谐波偶极矩, N 是气体原子密度, b 是共焦参数(也可以称为焦点深度), $b = k_1 \bar{\omega}_0$, $\bar{\omega}_0$ 是激光焦斑的半径. 对于衍射极限光束, $\bar{\omega}_0 = \frac{f\lambda}{\pi \bar{\omega}_i}$, f 是聚焦透镜的焦距, $\bar{\omega}_i$ 是入射激光光束腰斑半径, 可以看出, 对于近似衍射极限光束, 如果入射激光光束不变(即光束腰斑半径不变), 共焦参数 b 以及 $\bar{\omega}_0$ 与聚焦透镜的焦距有很强的依赖关系. F_q 是相位匹配因子, 与激光几何聚焦引起的相位失配 Δk_q^{loc} 和自由电子引起的相位失配 Δk_q^{elec} 相关, 一般来说, 相位失配量越大, F_q 越小. 从式(1)可以看出 I_q 与 N 平方成正比. 但气体密度的增大, 因电离而产生的自由电子也会增加, 将会加大谐波在介质中传播的相位失配, F_q 将会变小. 因而存在一个最佳的气体原子密度, 产生最强的高次谐波. 图 6 给出 Ar 各级谐波强度随靶室内充气气压变化关系曲线,

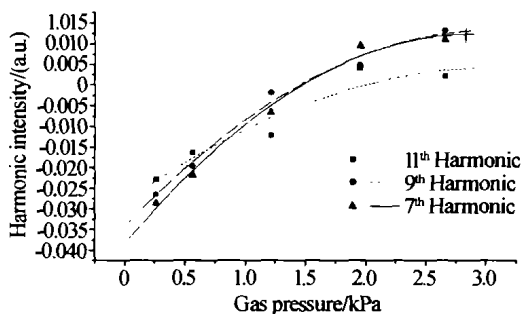


图 6 Ar 高次谐波强度随气压变化关系曲线, 泵浦激光线偏振, 能量 42 mJ

Fig. 6 The high-order harmonic intensity in Ar dependence of pressures with 42 mJ linearly-polarized laser pulses

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. 从图可以看出, 随着气压的增加, 高次谐波谱线强度也随之增强, 有饱和趋势. 但由于光电倍增管承受气压有限, 气压必须限定在一定范围内, 本次实验没有达到高次谐波最强值时气体气压.

4 结论

利用静态气体靶室获得超短脉冲强激光在非线性介质氩气中的高次谐波辐射, 实验方法简单, 实验过程易于控制, 是实现高次谐波辐射的一种简便方法. 氩气作为非线性高次谐波介质, 它的非线性光学极化率是比较高的. 在单脉冲能量 7.5 mJ 情况下, 高次谐波谱已经很强. 限于单色仪和探测器的探测范围和偏离中心波长处探测能力, 在激光单脉冲能量 7.5 mJ 和 42 mJ 情况下, 观测到的谐波最高级次分别为 17 和 21 次. 另外, 实验中对同一次的高次谐波的信号强度随充气气压变化关系进行研究, 研究发现, 在本次实验过程中, 所充气体压强(气体粒子数密度)没有使高次谐波的信号最佳, 这也是静态气体靶室不同于气体喷嘴的地方, 充气气压受到限制.

参考文献

- 1 Mcpherson A, Gibson G, Jara H, et al. Studies of multiphoton production of vacuum-ultraviolet radiation in the rare gases. *J Opt Soc Am(B)*, 1987, 4(4):595 ~ 601
- 2 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
- 3 刘亚青, 徐至展, 翟侃, 等. 氩气中高次谐波辐射的研究. *光学学报*, 2000, 20(1):8 ~ 13

Liu Y Q, Xu Z Z, Zai K, et al. *Acta Optica Sinica*, 2000,

- 20(1):8~13
- 4 Wang Yingsong, Liu Yaqing, Yang Xiaodong, *et al.* Spectral splitting in high-order harmonic generation. *Phys Rev(A)*, 2000, **62**(6):063806-1~063806-4
- 5 卢兴发. OFI 类镍氩系统 X 射线激光参数计算及试验系统研制. [哈尔滨工业大学博士学位论文], 2000, **3**:74~84
- Lu X F. Calculation of parameters and experimental system manufacture on OFI-based Ni-like krypton X-ray laser. [Dissertation of Harbin Institute of Technology], 2000, **3**:74~84
- 6 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

HHG of 795nm Ti:sapphire Femtosecond laser in Ar by Using Static Gas Target

Xia Yuanqin, Chen Deying, Chen Jianxin, Wang Qi

Research Institute of Opto-electronic Technology, ational Key Laboratory of Tunable Laser Technology

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

Received date:2003-11-10

Abstract High-order harmonics of 120 fs/795 nm Ti:sapphire laser in Ar in static gas target are reported. Compared with the traditional gas target, static gas target is simple in experimental configuration and experimental parameters can be easily controlled. Changes of high-order harmonic intensities vs gas pressures are observed with 42 mJ and 7.5 mJ linearly-polarized laser.

Keywords Ti:sapphire femtosecond laser; Static gas target; High-order harmonic generation in Ar



Xia Yuanqin was born on July 5 1968, an associate professor in Department of Optoelectronic Information Science and Technology in Harbin Institute of Technology. In 1987 he entered Harbin Institute of Technology, and got master's degree and doctoral degree in 1994 and 2001 respectively. In 2002, he went to CXRC (Coherent X-Ray Center) of Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology as a post-doctoral fellowship. Now he is working on the interaction between ultra-short intense laser field and matter, ultra-short process by using Ti:sapphire femtosecond laser.