

高次谐波辐射的实验研究

李学信 翟 侃 杨晓东 张正泉 徐至展

(中国科学院上海光机所强光光学开放研究实验室 上海 201800)

提要 报道了在本实验室建立的 45 fs-2 TW 级超短超强钛宝石激光装置上,以 Ar 为非线性工作介质,进行的高次谐波实验的初步研究结果。初步研究了激光能量和气体密度对高次谐波的影响,目前得到的最高次谐波为第 25 次谐波,相应波长为 31.4 nm。还检验了激光器、压电气阀、光谱仪以及信号处理和记录系统的工作性能,实现了相互间的协调。

关键词 高次谐波辐射,飞秒太瓦激光脉冲,钛宝石激光器

谐波辐射一直是光学界许多科研人员从事的主要研究内容之一。利用谐波辐射可获得新的激光谱线,可把激光波长推向更短,因此,多少年来谐波辐射研究长胜不衰。八十年代中期以前,由于激光脉冲较宽(ns量级),只能得到几次谐波,实验结果可用微扰理论解释,实验和理论仍然停留在微扰论阶段。八十年代后期,由于超短脉冲强激光技术的迅速发展,尤其是飞秒激光技术的发展,激光峰值功率已达到 TW(10^{12} W)量级,经聚焦后,激光功率密度已达到甚至远超过 10^{15} W/cm² 以上,达到甚至超过原子内部的库仑场。为研究高阶非线性效应提供了强有力的技术手段。目前,利用超短超强激光脉冲和原子气体相互作用,产生的高次谐波辐射倍受重视,因为它提供了一种产生相干极紫外和软 X 射线的重要方法。国际上已有几个实验室利用谐波辐射获得了波长短于 10 nm 的相干辐射光^[1~7],利用红外激光(Nd:glass, 1053 nm, Ti:sapphire, 800 nm)获得了 100 次以上的高次谐波^[1~5],利用紫外激光(KrF, 248 nm)已获得 35 次以上的高次谐波^[6,7]。由于谐波与驱动光源具有相似的性质,是产生相干 X 射线激光的主要途径之一,因此目前仍然是强场物理中研究的热点。在我国高次谐波研究尤其是实验研究才刚刚起步。中国科学院上海光机所强场光学开放研究实验室现在已建成了一套 45 fs-2 TW 级超短超强钛宝石激光装置,是我国目前仅有的几台超短脉冲强激光装置之一。为检验激光器、压电气阀、光谱仪以及信号处理和记录系统的工作性能,以及实现相互间的协调,我们初步研究了激光脉冲能量和气体密度对高次谐波的影响。以 Ar 气为非线性工作介质,目前已得到了第 25 次谐波,实验仪器正常,为今后进一步系统研究提供了必要的技术条件。

1 实验装置

高次谐波实验装置主要由激光器、脉冲气阀、单色仪、通道电子倍增管、Boxcar 门积分器以及记录仪组成,实验示意图如图 1 所示。

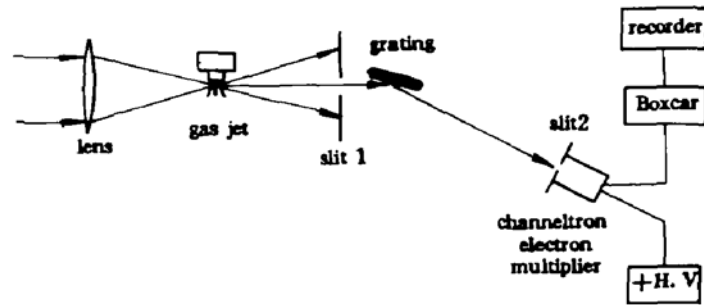


图 1 高次谐波实验示意图

Fig. 1 Experimental setup of high-order harmonic generation

1.1 激光系统

实验所用激光系统是由上海光机所强光光学开放研究实验室与法国 B. M. I 公司联合研制的 45 fs-2 TW 级超短超强钛宝石激光器。钛宝石激光器示意图如图 2 所示。

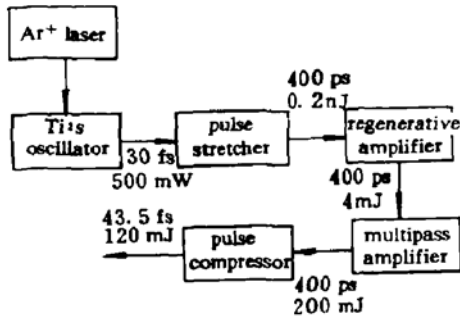


图 2 钛宝石激光器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the fs-TW Ti:sapphire laser amplification system used

用功率为 5 W 的氩离子激光器泵浦一锁模钛宝石激光振荡器,产生 30 fs 的种子光,30 fs 的种子光用脉冲展宽器(光栅对)展宽至 200 ps,展宽后的脉冲首先由再生放大器放大到 4 mJ,再由前置放大器放大到 20 mJ,最后由主放大器放大到 220 mJ,然后由脉冲压缩器(光栅对)把脉冲压缩,最后可得到光束直径为 50 mm,脉冲能量为 120 mJ,中心波长为 785 nm,线宽为 18 nm,脉冲宽为 43.5 fs,工作频率为 10 Hz 的激光输出。

实验中的气体样品由压电气阀提供。气阀喷口直径为 1.5 mm,喷气时间很短,为保证激光和气体相互作用必须使激光和气阀同步。激光束由焦距为 50 cm 的复合透镜聚焦到气体阀喷口下方约 1 mm 处,激光焦斑直径约为 100 μm ,焦斑处的功率密度约为 10^{15} W/cm^2 。高次谐波实验中多采用大焦斑长焦深即弱聚焦方式,以改善相位匹配,获得更高的转换效率。若采用短焦距聚焦镜利用本激光系统可获得更高的光强。当实现激光与气阀同步时,可清晰地看到二者相互作用时产生的气体放电现象。

1.2 光谱仪与信号探测系统

由于谐波信号和入射光在同一方向传输,谐波分谱显得比较困难。因为强大的入射光可能损坏光谱仪中的光学器件。实验中用 1 m 掠入射光栅 XUV 谱仪(Minuteman 310-G)分谱。谱仪由入射狭缝、反射式镀金光栅(300 line/mm)和出射狭缝组成。入射狭缝到气阀的距离为 45 cm,以免损坏光栅。入射狭缝把谱仪和气阀所在的主真空室分离开来,两边各有一套组合真空系统抽真空,气阀未喷气时,两边都保持了 $1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 的真空度,气阀喷气时,主真空室真空下降为 $1.33 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 量级,谱仪真空度不受影响,仍保持在 $1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 量级,为增益器件-通道电子倍增管提供了必须的真空度。由于谐波信号很弱,必须放大才能接收到。在单色仪的出射狭缝处直接接通道电子倍增管(Galileo Electro-Optics Corp CEM 4039)。暗电流小于 0.5/s,增益为 10^8 (2800 V 工作电压)。当单色仪的出射狭缝运动到有谐波信号的位置时,在通道电子倍增管的信号输出端,用示波器可以看到与激光同频率的信号输出。

1.3 信号处理和记录系统

从示波器上可以看到,从通道倍增管信号输出端出来的信号,每个信号的大小和形状都有差别。为消除噪声,提高信噪比,我们用 Boxcar 门积分器对信号进行处理。Boxcar 门积分器有扫描波形和谱形两种主要功能,我们用谱形扫描功能。信号处理过程中,单色仪出射狭缝移动,保持 Boxcar 门积分器的门静止,单色仪出射狭缝移动过程中,相当于不同波长的光信号通过 Boxcar 门积分器的门,由 Boxcar 门积分器的信号输出端可得到谱形。经 Boxcar 门积分器处理的信号可用示波器或记录仪记录。由记录仪记录的谱信号可以直接算出相应的波长,由示波器记录的信号可以记录在软盘上,以便作进一步的定量比较和处理。

2 实验结果与定性分析

由示波器记录得到的典型谐波信号如图 3。

其中的信号为相对值,对谱仪中光栅的衍射效率和通道电子倍增管的增益尚未定标。气体密度不变时,我们分别用 50 mJ, 40 mJ 和 30 mJ 的脉冲能量进行实验,发现 50 mJ 时的谐波信号最强,谐波次数最高,依次为 40 mJ 和 30 mJ。各次谐波随脉冲能量的变化关系如图 4 所示。当保持脉冲能量(50 mJ)不变而增加气体密度,谐波次数增加,信号明显增强。相同脉冲能量,不同气体密度下的谐波辐射如图 5 所示。由于谐波信号为相对值,不同阶谐波信号之间的比较是没有意义的。

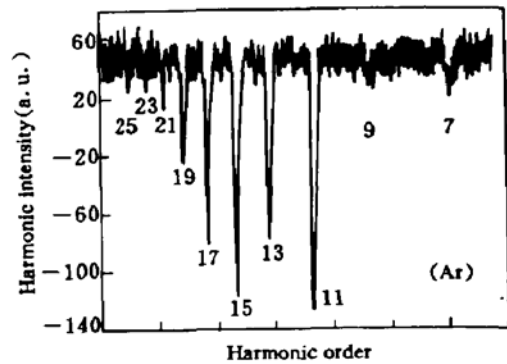


图 3 典型的谐波信号

Fig. 3 Example of high-order harmonic generation observed in Ar

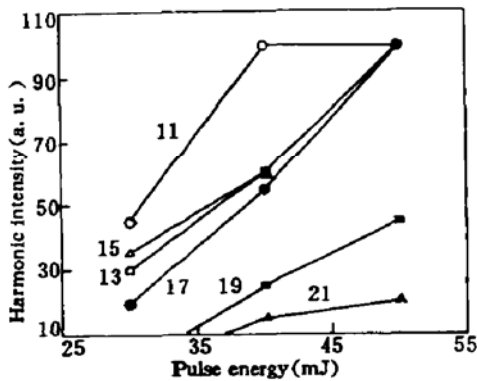


图 4 不同阶谐波随激光脉冲能量的变化关系

Fig. 4 The intensity change of different orders harmonics with pulse energy

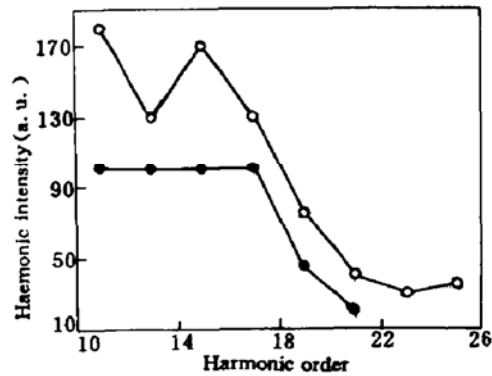


图 5 气体密度对高次谐波的影响

●: 低密度; ○: 对应高密度

Fig. 5 The effects of gas density on harmonic generation

● and ○ are for low and high density, respectively

由图 4 可以看出,11 次谐波强度随激光能量增加变化最大,由于在 50 mJ 时,在记录仪上 11 次谐波达到了饱和,所以,在图上该能量下第 11 次谐波不是最大值。13, 15, 17, 19 和 21 次谐波上升速度逐渐减小。在 30 mJ 时,最高只能得到 17 次谐波。由图 5 可以看出,保持激光能量不变(50 mJ),当气体密度较低时,只能得到 21 次谐波,当气体密度较高时可得到 25 次谐

波,而且,高密度时的同阶谐波信号强度要大一些。由图 3 可以看到 11 次谐波非常强,这时的光子能量和 Ar 的第一电离能(15.8 eV)接近,可能是多光子共振引起的。其它实验中,用不同的激光也观察到类似的现象^[8]。由图 4 可以看出,更高次谐波只能在高激光强度下获得,这说明要产生更高次谐波必须使用高强度激光。从各次谐波随激光能量(强度)的变化趋势可以看出,实验结果是无法用微扰理论解释的。由微扰论可知,各阶谐波信号强度随激光强度的变化与谐波次数有关,谐波次数越高,其强度随激光强度的变化也越快,图中虽然没有给出各阶谐波强度随激光强度的具体变化趋势,结果显然与微扰论期待值不相符合。这也说明,高次谐波的理论处理必须用非微扰论的方法进行。由图 5 可以看出,当气体密度较高时,谐波信号强度较大,谐波次数较高,因为,谐波辐射为相干辐射,辐射强度与参与的粒子数平方有正比关系,在高气体密度下获得较强的谐波信号,说明高次谐波辐射确实与参与的粒子数有强烈的依赖关系。由于气阀的原因,无法得到更高的气体密度,因此没有进行系统的研究。由于实验数据不够充分,对实验结果无法从理论上进行比较深入的定量解释。由现有的实验结果可以得到如下结论。高次谐波辐射是一种相干辐射(由其信号的方向性可以知道),与参与的粒子数有很强的依赖关系,高强度激光是产生高次谐波的必要条件,因此,要想得到高强度的更高次谐波信号,必须提高气体密度和增加激光强度,在不降低激光强度的前提下,适当增大激光焦斑是增加参与粒子数的方法之一。

参 考 文 献

- 1 J. J. Macklin, J. D. Kmetec, C. L. Gordon III. . High-order harmonic generation using intense femtosecond pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 70 : 766~769
- 2 M. D. Perry, G. Mourou. . Terawatt to petawatt subpicosecond lasers. *Science*, 1994, 246 : 917~924
- 3 A. L'Huillier, P. Balcou. . High-order harmonic generation in rare gases with a 1-ps 1053 nm laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 70 : 774~777
- 4 J. Zhou, J. Peatross, M. M. Murnane *et al.*. Enhanced high-harmonic generation using 25 fs laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 76 : 752~755
- 5 K. Miyazaki, H. Takada. High-order harmonic generation in the tunneling regime. *Phys. Rev. A.*, 1995, 52 : 3007~3021
- 6 S. G. Preston, A. Sanpera, M. Zepf *et al.*. High-order harmonics of 248.6-nm KrF laser from helium and neon ions. *Phys. Rev. A.* 1996, 53 : R31~R34
- 7 Y. Nagata, K. Midorikawa, M. Obara *et al.*. High-order harmonic generation by subpicosecond KrF excimer laser pulses. *Opt. Lett.*, 1996, 21 : 15~17
- 8 K. Miyazaki, H. Sakai, G. Kim *et al.*. High-order harmonic generation in rare gases with subpicosecond XeCl laser pulses. *Phys. Rev. A.* 1994, 49 : 548~557

Experimental Study of the High-order Harmonic Generation

Li Xuexin Zhai Kan Yang Xiaodong Zhang Zhengquan Xu Zhizhan

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

Abstract The experimental results of high-order harmonic generation in Ar gas with femtosecond Ti:sapphire laser pulses are presented. The laser system, gas jet, spectrometer and signal processing system are examined. The effects of laser intensity and gas density on the harmonic generation are studied. Harmonic orders with the highest reaching 25 are observed at present, corresponding to a shortest wavelength of 31.3 nm.

Key words high-order harmonic generation, femtosecond laser pulses, Ti:sapphire laser