

文章编号: 0258-7025(2001)09-0793-04

超短脉冲强激光场中氦的高次谐波研究*

王 琪 陈建新 陈德应 夏元钦 吴小燕 姚 琴 王 渊

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要 报道了在 105 fs-0.6 TW 激光装置上以氦气为介质产生高次谐波的实验结果。实验中主要研究了不同气压、不同激光能量、不同偏振特性对谐波辐射的影响,并从理论上进行了分析。结果表明,要想得到较强的谐波辐射信号,必须有适当的气体密度和激光能量;要想得到较高次的谐波辐射信号,除了有较高的激光功率密度外,还必须具备灵敏度高的探测器。

关键词 高次谐波, 氦气, 飞秒激光系统

中图分类号 O 437.1 **文献标识码** A

Study of High-order Harmonic Generation in Kr

WANG Qi CHEN Jian-xin CHEN De-ying XIA Yuan-qin

WU Xiao-yan YAO Qin WANG Yuan

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract In this paper, the experimental results of high-order harmonic generation in Kr using an 105 fs, 795 nm laser system are presented. The effects of gas densities, laser intensity and laser polarization on harmonic emission are mainly studied. At the same time, the results are analysed from theory. The results indicate that proper gas densities and laser intensity are needed in order to get stronger harmonic emission; besides having higher laser intensity, the detector of high sensitivity must be possessed in order to get higher order harmonic generation.

Key words high-order harmonic generation, Kr noble gases, fs-laser system

1 引言

谐波辐射可以获得 X 光波长的相干光,因而是近十几年光学界从事的主要研究内容之一。80 年代中期以前,由于激光脉宽较宽(ns 量级),只能得到几次谐波,实验结果可用微扰理论解释,实验和理论都停留在微扰阶段。80 年代后期,自从 A. McPherson 等^[1]在激光和气体相互作用的实验中观察到非微扰的高次谐波辐射以来,随着超短超强激光技术的发展,高次谐波的研究在短短的 10 年时间里取得了令人振奋的进展。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^[2-5],其中 Michigan 大学的实验小组^[4]利用脉宽

为 26 fs(十个光周期)的 780 nm 激光脉冲与 He 相互作用,观察到了 297 次谐波辐射(2.73 nm),Vienna 技术大学的实验小组^[5]利用脉宽仅为 5 fs 的 780 nm 激光脉冲与 He 相互作用,观察到的谐波辐射波长也小于 3 nm。最近几年我国对高次谐波的研究在理论和实验上也取得了很多进展^[6-9],目前中国科学院上海光机所强激光光学开放研究实验室报道了氦气中高次谐波的辐射^[9],观察到的最高次谐波为 81 次(9.7 nm)。

本工作是在本实验室前期实验工作的基础上进行的,前期工作的实验主要研究了中心波长为 780 nm 和 795 nm 的飞秒激光系统在氦气中实现 7 次到 19 次的高次谐波及谐波谱线的移动^[10],本工作是利用中心波长为 795 nm,脉宽为 105 fs 的掺钛蓝宝石激光系统对氦的高次谐波辐射作进一步的研究,系统地研究了不同气压、不同激光能量、不同偏振特性对谐波辐射的影响。

* 国家 863 高技术计划激光技术主题、国家自然科学基金(69688003)资助项目。

收稿日期:2000-06-26; 收到修改稿日期:2000-09-01

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,主要由掺钛蓝宝石 (Titanium-Doped-Sapphire) 飞秒激光系统(美国光谱物理公司生产,激光脉冲宽度为 105×10^{-15} s)产生超短脉冲、超高功率强激光场;美国 Acton 公司的 VSN-515 型 0.5 m 真空紫外单色仪;日本滨松公司生产的型号为 R595, 响应中心波长为 70 nm 的无窗光电倍增管和 Boxcar 门积分器组成。

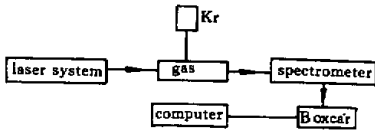


图 1 实验装置
Fig.1 Experimental setup

2.1 激光系统

飞秒激光系统用最大输出功率为 10 W 且连续可调的带有 BeamLok 的氩离子激光器 (BeamLok2060) 作为掺钛蓝宝石锁模激光器 (Tsunami) 的抽运源,由 Tsunami 产生的约 80 fs 的超短脉冲种子激光经展宽器展宽,再生放大器放大,进入主放大器,之后再经压缩机压缩,最后得到光束直径为 26 mm,脉冲能量约为 60 mJ,激光脉冲的重复频率为 10 Hz,脉冲宽度为 105 fs 的激光输出。

2.2 光学聚焦系统

激光的聚集是由焦距为 320 mm 的非球面聚焦透镜完成的。激光和气体相互作用区的光斑直径约为 140 μm ,由于光斑较大,所以有利于谐波辐射^[11]。在激光能量为几十毫焦耳时,可以获得 10^{15} W/cm² 以上的打靶功率密度。

2.3 单色仪和信号记录系统

真空紫外单色仪由入射狭缝、反射式光栅(1200 G/mm)和出射狭缝组成。由于谐波信号和入射光在同一方向传输,强入射光可能损坏单色仪的光学元件,因此,不但在设计非球面聚焦透镜的焦距时考虑了这点,而且在放置单色仪的入射狭缝时,使其与激光焦点的距离保持在 460 mm 的位置,以此来保护光栅不受损伤。实验中所使用的探测器为日本滨松公司生产的型号为 R595 无窗光电倍增管,实验时光电倍增管加电压为 1600 V,由光电倍增管放大的信号最后用 Boxcar 门积分器记录。

2.4 真空系统

由气体靶室、单色仪和光电倍增管放大系统三部分组成,每一部分各有一套真空机组(包括机械泵和分子泵)抽真空。由于无窗光电倍增管工作时,要求气体压强必须低于 1.33×10^{-2} Pa,如气压高,光电倍增管很易被损坏,因此,只有气体靶室、单色仪和光电倍增管放大系统三部分的真空度达到一定程度时才能进行实验,并且在实验过程中,必须保证光电倍增管处的压强低于 1.33×10^{-2} Pa。气体源属于静态气体室。

3 实验结果和分析

3.1 气体密度对谐波辐射的影响

在研究气体密度对高次谐波辐射的影响,寻找最佳的气体密度时,用 Boxcar 门积分器作为单色仪的信号记录系统。在保持激光能量 8 mJ 不变的情况下,对气体气压分别为 0.74 kPa, 1.62 kPa 和 2.97 kPa 进行了谐波测量,如图 2 (a) ~ (c) 所示。

从图中可以看到,气体密度较低时(0.74 kPa),各谐波的相对强度较弱,随着气体密度增加到 1.62 kPa,各谐波的强度也在增加,但气体密度继续增加到 2.97 kPa,各谐波的相对强度反而降低。主要原因有两个:1) 激光与气体靶相互作用的过程中,气体密度超过一定值后,如继续升高,气体电离的几率增大,电子产额也将迅速增加,而电子密度增加,就会使谐波在传播过程中相位失配变得明显,从而影响谐波信号的强度;2) 随着气体密度的上升,使背景气体对谐波信号的吸收也迅速增加,从而抑制了谐波辐射随气体密度的平方上升的趋势。因此,为了使实验中谐波信号足够强,气体密度就不能太低,但从上面的分析可以看出,气体密度过高对谐波信号的增强并无益处,从实验结果来看,气体密度在 1.33 kPa 左右,谐波信号较强。

3.2 激光能量对谐波辐射的影响

保持气体密度在 1.33 kPa 左右,取激光能量为 8 mJ 和 35 mJ,相应的功率密度为 4.949×10^{14} W/cm² 和 2.165×10^{15} W/cm²,测得的谐波辐射如图 2 (b) 和图 3 所示,从图中可以看到:1) 在两种不同的激光功率密度下,谐波辐射从第 7 次到第 17 次有一个平台出现,而 19 次以后的谐波信号,其强度迅速下降,这和二能级原子理论模型^[12,13]的结果是一致的,即:原子的谐波辐射谱中,最初几次的谐波强度会随谐波次数的增加逐级衰减,随后出现一个较

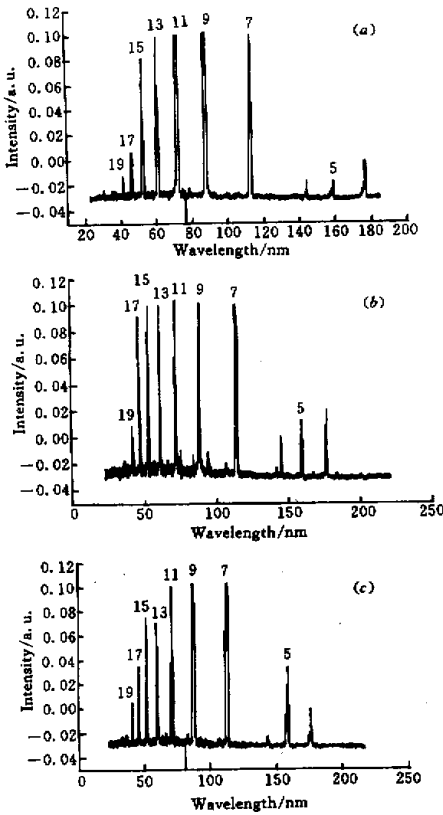


图2 抽运激光为线偏振, 激光能量 8 mJ
 气压为: (a) 0.74 kPa; (b) 1.62 kPa; (c) 2.97 kPa
 Fig.2 Pumping laser is linearly polarization,
 the energy is 8 mJ, the pressure is 0.74 kPa (a),
 1.62 kPa (b) and 2.97 kPa (c)

宽的平台区域,在该区域内各次谐波基本上具有相同的强度,最后在某一高频率附近平台区终止,更高层次的谐波迅速地衰减为零;2) 随着激光功率密度的上升,同次谐波信号增强(图 2(b))和图 3 中的 5 次,17 次,19 次比较明显),而且随着功率密度的提高,能观测的谐波次数也增加,因此,要想得到较高次、较强的谐波辐射,入射激光能量不能太低。19 次谐波突然降低还有一个因素,是无窗光电倍增管响应波在此处的灵敏度也有明显的变化。

3.3 氮气的极高次谐波

从 Chang Britton 的有关原子电离的理论^[14]计算中可以估计中性氮气的谐波截止次数,介质的饱和和激光强度 I_s 可由下式求得

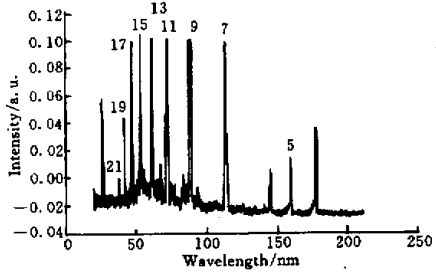


图3 抽运激光为线偏振,激光能量 35 mJ,气压 1.4 kPa
 Fig.3 Pumping laser is linearly polarization, the energy is 35 mJ, the pressure is 1.4 kPa

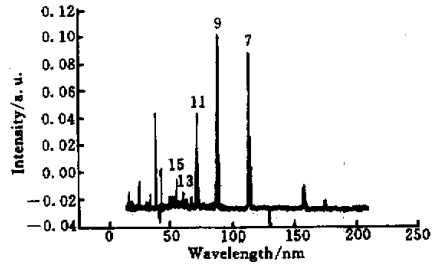


图4 抽运激光为近圆偏振,激光能量 35 mJ,气压 1.4 kPa
 Fig.4 Pumping laser is circularly near polarization, the energy is 35 mJ, the pressure is 1.4 kPa

$$I_s = \frac{1.69 \times 10^{12} E_p^{(3+\alpha)}}{\{ \ln[2.29cr \times 3^{(2n^*-1)} G_{ln} G_{n^*} E_p / \lambda_0] / [-\ln(1-p)] \}^2}$$

式中 E_p (eV) 为原子的电离能,氮的第一电离能为 13.999 eV, $p = 0.98$ 为原子的电离几率, c 为光速, $\tau = 105 \times 10^{-15}$ s 为入射激光的脉宽, $\lambda_0 = 795$ nm 为入射激光的波长。由文献[15]知,对于氮气 $n^* = 0.99$, $G_{ln} = 3$, $G_{n^*} \approx 2.16$, $\alpha \approx 0.5$ 为修正因子。由上式可得氮原子的饱和激光强度 $I_s = 2.277 \times 10^{14}$ W/cm²。根据 Kulander 的理论^[16],可求得最大光子能量 $h\nu = E_p + 3.17U_p = 56.564$ eV。由此,可以计算出中性氮气中谐波的理论截止次数为 35 次。在研究激光能量对谐波辐射的影响中发现,虽然入射激光功率密度较高,但是并没有观测到极高次谐波。其原因主要有以下几个方面:1) 实验所用探测器的灵敏度还不够,提高了探测器的灵敏度,改用瞬态信号采集器,有可能观测到更高的谐波次数;2) 由理论^[12,13]可知,平台区域以后的谐波信号强度迅速下降,再加上实验所用的单色仪和光电倍

增管的响应的中心波长都为 70 nm, 因此很难观测到 21 次 37.85 nm 以后的谐波信号。但从谐波信号的位置和变化趋势看, 在实验中有可能存在更高次的谐波辐射。

3.4 不同激光偏振特性对谐波信号的影响

实验中我们对气压为 1.4 kPa, 激光能量为 35 mJ, 激光为线偏振和近圆偏振时氦的高次谐波信号进行了观测, 如图 3 和图 4 所示。

从图中可以看到, 在近圆偏振的情况下, 各谐波信号的相对强度减弱, 有的谐波信号已经观测不到。

参 考 文 献

- 1 A. McPherson, G. Gibson, H. Jara *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 J. Zhou, J. Peatross, M. M. Murnane *et al.*. Enhanced high-harmonic generation using 25 fs laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 76(5):752~755
- 3 Y. Nagata, K. Midorikawa, M. Obara *et al.*. High-order harmonic generation by subpicosecond KrF excimer laser pulses. *Opt. Lett.*, 1996, 21(1):15~17
- 4 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
- 5 M. Schnurer, Ch. Spielmann, P. Wobrauschek *et al.*. Coherent 0.5 keV X-ray emission from helium driven by a sub-10-fs laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 80(15):3236~3239
- 6 Qu Weixing, Yu Wei, Hu Suxing *et al.*. High-order harmonics from two-level atoms in laser field with low-frequency. *Acta Physica Sinica (物理学报)*, 1998, 47(9):1458~1464 (in Chinese)
- 7 Shen Baifei, Yu Wei, Zeng Guihua *et al.*. Harmonic generation due to relativistic effects. *Chinese J. Lasers (中国激光)*, 1997, 24(3):242~246 (in Chinese)
- 8 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)
- 9 Liu Yaqing, Xu Zhizhan, Zi Kai *et al.*. High-order harmonic generation in Ar noble gases. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2000, 20(1):8~13 (in Chinese)
- 10 Wang Qi, Xia Yuanqin, Chen Deying *et al.*. High-order harmonic from 40 nm to 110 nm in Kr noble gas driven by fs-laser system. *Acta Optica Sinica (光学学报)* (to be published, in Chinese)
- 11 M. Protopapas, C. H. Keitel, P. L. Knight. Atomic physics with super-high intensity lasers. *Rep. Prog. Phys.*, 1997, 60(4):389~486
- 12 L. Plaja, L. Roso-Franco. Adiabatic theory for high-order harmonic generation in a two-level atom. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, 9:2210~2213
- 13 A. E. Kaplan, P. L. Shkolnikov. Superdressed two-level atom: very high harmonic generation and multiresonances. *Phys. Rev. A*, 1994, 49:1275~1280
- 14 Chang Britton, P. R. Bolton, D. N. Fittinghoff. Closed-form solutions for the production of ions in the collisionless ionization of gases by intense lasers. *Phys. Rev. A*, 1993, 47(5):4193~4203
- 15 M. V. Ammosov, N. B. Delone, V. P. Krainov. Tunnel ionization of complex atoms and of atomic ions in an alternating electromagnetic field. *Sov. Phys. JETP*, 1986, 64(6):1191~1194
- 16 J. L. Krause, K. J. Schafer, K. C. Kulander. High-order harmonic generation from atoms and ions in the high intensity regime. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 68(24):3535~3538