

文章编号: 0258-7025(2003)03-0255-04

借助光栅测谱中高级次谱判断强激光场作用时的有效功率密度

陈建新, 王 骐, 夏元钦

(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, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 借助在 X 光波段高次谐波辐射谱测量过程中, 根据单色仪光栅分光的作用, 产生的 23 级次(34.56 nm)谐波谱的二级次谱(69.13 nm)的出现与否, 判断了实验获得高次谐波谱的截止波长; 从而根据高次谐波的理论, 判断了强激光场与物质相互作用时, 激励产生 X 光谱的有效功率密度为 $1.007 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 此时获得最大光子能量为 32.817 eV。它的准确判断和测量是研究实验获得谱线的来源和强度的基础数据。

关键词 激光物理; 光栅分光; 高级次谱; 测试系统

中图分类号 O 437.1 文献标识码 A

Experimental Method of Estimating Effective Laser Intensity by Use of the High-order Spectrum

CHEN Jian-xin, WANG Qi, XIA Yuan-qin

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

Abstract In this paper, based on the dispersion of grating in monochromator, the cutoff wavelength of getting harmonics is judged on the appearance of 2nd spectrum (wavelength of 69.13 nm) of the 23rd high-order harmonic (wavelength of 34.56 nm); Accordingly, the efficiency laser intensity of producing X spectrum is estimated in virtue of the theory of high harmonic which is $1.007 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ and the most photon energy is 32.817 eV, which are the basic data of studying the origin and intensity of the spectrum in the experiment.

Key words laser physics; dispersion of the grating; high-order spectrum; testing system

1 引言

20 世纪 80 年代中期以来, 基于啁啾脉冲放大技术^[1~3]的脉宽可以短于 10 fs, 脉冲能量可以大于 100 mJ, 激光强度可以达到 10^{20} W/cm^2 以上的紧凑型超短脉冲、超高功率激光器的出现, 不仅开创了现代激光物理学最有前途的分支之一——超强辐射物理和技术, 而且也用于产生高次谐波、超快 X 射线源、强激光场中原子的电离特性以及基于强激光场的光场感生电离 X 射线激光的研究提供了理想的驱动源^[4~7]。在对上述现象进行的实验研究装置

中, 实验诊断的时间积分谱测试系统是非常关键的一个环节。一般的测试系统包括分光装置、探测器及 4400 信号检测和分析系统(或 CCD 等)三部分。在高次谐波和 X 射线激光实验研究中, 使用光栅谱仪作为分光装置是经常使用的主要探测仪器。在用光栅分光的测谱过程中, 光栅分光除产生一级谱外, 同时也产生二级、三级等高级次谱。这一现象往往给谱的识别带来一定困难, 但也可以使用这一高级次谱的特征产生一些新的光谱技术, 如提高分辨率等, 这些在可见光波段已有了相当多的报道。本文

收稿日期: 2001-11-05; 收到修改稿日期: 2002-02-04

基金项目: 国家 863 高技术(863-804-7-10)激光技术主题资助项目。

作者简介: 陈建新(1970—), 女, 哈尔滨工业大学航天学院电子科学与技术系博士, 主要从事强场物理研究。E-mail: jianxchen@163.com

是在 X 光波段谱的测量过程中,借助出现的高级次谱,判断强激光与物质相互作用时激励 X 光产生的有效光功率密度,而这一物理量是在 X 光激光研究中最重要物理量之一。它的准确判断和测量对研究 X 光激光是至关重要的。目前对强激光与物质相互作用时激励 X 光产生的有效光功率密度的测量方法中也只给出与物质相互作用前入射到靶上的光功率密度,真正产生激励有效的光功率密度都还只能靠其他量去推测^[8]。用高级次谱的出现与否判断激励光功率密度更直接、更准确。

2 基本原理

2.1 闪耀光栅

在测量高次谐波的实验中,采用的分光装置是 VSN-515 型 0.5 m 真空紫外单色仪,当单色仪狭缝的宽和高分别为 10 μm 和 4 mm 时,在 121.6 nm 处的分辨率为 0.05 nm。单色仪测量的波长范围依据所选的闪耀光栅,可由超真空紫外到红外。此单色仪共配有三块线数分别为 1200 G/mm, 1200 G/mm, 600 G/mm 的镀铱光栅,闪耀波长分别为 70 nm, 200 nm, 150 nm。实验中所选用的光栅为闪耀波长 70 nm 的光栅,该光栅所能测量的最短波长标称值为 30 nm。由于闪耀光栅对所得到的谐波谱的

分光作用^[9],对波长 λ_B 的 1 级光谱闪耀的光栅,也对 $\lambda_B/2, \lambda_B/3$ 的 2 级, 3 级光谱闪耀(此时 $\Delta = 2 \frac{\lambda_B}{2}$ 和 $\Delta = 3 \frac{\lambda_B}{3}$)。因此,在所得到的谐波谱中,若观察到各级高次谐波的一级谱,由于闪耀光栅的作用,也应该看到各级高次谐波的二级谱和三级谱,只不过高次谐波二级谱和三级谱的强度小于一级谱的强度,同时有不同波长级次不同的光会出现重叠在一起的现象。

2.2 无窗光电倍增管

实验中所使用的探测器为无窗光电倍增管,因为光栅的衍射中心波长为 70 nm,因此,为了与光栅相匹配,选用光电倍增管型号为 R595,此型号光电倍增管响应的中心波长为 70 nm。

2.3 高次谐波

当频率为 ω 的脉冲激光强度达到 10^{14} W/cm^2 的量级时,聚焦辐照惰性气体原子可产生频率为 $N\omega$ 的高次谐波发射^[10]。表 1 给出了产生各级高次谐波的一级谱对应的波长理论计算值,同时也给出了由于光栅的作用,与各级高次谐波辐射相对应的二级谱和三级谱的波长值。从表中可以看到,5 次谐波的一级谱与 15 次谐波的三级谱发生重叠,7 次谐波的一级谱与 21 次谐波的三级谱发生重叠。

表 1 各级高次谐波的一级谱、二级谱和三级谱的波长值

Table 1 The wavelength values of the 1st, 2nd, 3rd order spectra for high-order harmonic generation

Order of harmonic	5th	7th	9th	11th	13th	15th	17th	19th	21th	23th	25th	27th
Wavelength value of the 1 st order/nm	159.00	113.57	88.33	72.27	61.15	53.00	46.76	41.84	37.85	34.56	31.80	29.44
Wavelength value of the 2 nd order/nm	318.00	227.14	176.67	144.55	122.31	106.00	93.53	83.68	75.71	69.13	63.60	58.89
Wavelength value of the 3 rd order/nm	477.00	340.71	265.00	216.82	183.46	159.00	140.29	125.53	113.57	103.69	95.40	88.33

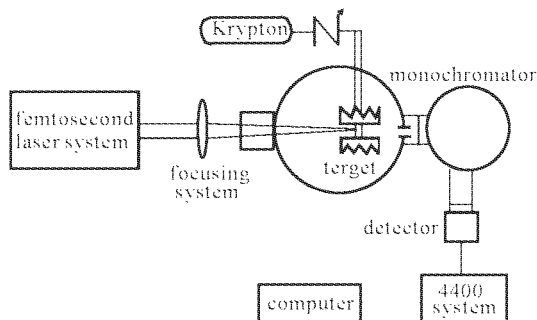


图 1 产生氪气的高次谐波实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of high-order harmonic emission in Kr

3 实验装置

产生氪气的高次谐波实验装置如图 1 所示。整个实验系统由激光脉冲宽度为 105 fs 的掺钛蓝宝石飞秒激光系统,真空系统, VSN-515 型 0.5 m 真空紫外单色仪,型号为 R595 无窗光电倍增管,4400 信号检测和分析系统 Boxcar 门积分器组成。其中,飞秒激光器的基本参数为:输出光束直径为 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,中心波长为 795 nm。激光

的聚焦是由焦距为 320 mm, 孔径为 35 mm 的非球面聚焦透镜完成的。打开靶室充气口与高压气瓶真空管道之间的气体微调阀, 靶室内开始充气, 同时靶室内所充的气体通过入射针孔与出射针孔向靶室外的真空室内泄漏, 通过调节微调阀控制靶室内的气压, 并维持靶室内的气压动态平衡而形成, 通过 DL-4 型真空计测量靶室内的真空度。

4 实验结果及分析

图 2 给出了抽运激光的偏振为线偏振, 激光能量为 35mJ, 靶室气压为 1.4 kPa 氩的高次谐波辐射图, 图中的 5(1) 表示 5 次谐波的一级辐射谱, 11(2) 表示 11 次谐波的二级辐射谱, 依次类推。从上面理论可以确定:

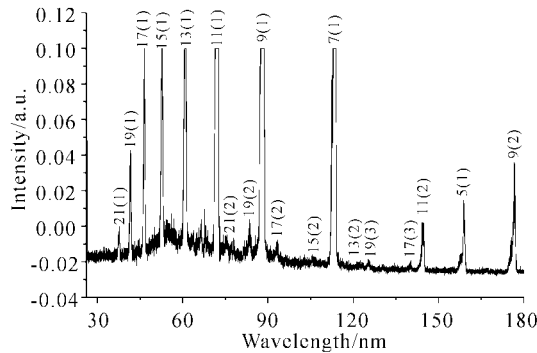


图 2 抽运激光为线偏振, 激光能量 35 mJ, 在气压为 1.4 kPa 的氩气中产生的高次谐波辐射图

Fig. 2 Harmonic spectra in Kr at pressure of 1.4 kPa pumped by linear polarization laser with the energy of 35 mJ

1) 图中 5~21 次一级谐波谱线来源于激光与物质相互作用; 5~21 次二级谐波谱线和三级谐波谱线与激光和物质相互作用无关, 它们是由于光栅的分光作用产生的。

2) 由理论计算可知, 5 次谐波的一级谱与 15 次谐波的三级谱发生重叠, 7 次谐波的一级谱与 21 次谐波的三级谱发生重叠, 因此, 5 次谐波的一级谱的强度, 一方面来源于激光与物质相互作用, 另一方面来源于由于光栅的分光作用 15 次谐波的三级谱重叠。7 次谐波一级谱的强度也存在类似情况。

3) 在得到的时间积分谱谱线中, 没有出现高于 21 次谐波的更短谱线, 从整个系统考虑, 存在两种可能性, 第一种可能是由于光栅的衍射中心波长和光电倍增管响应的中心波长都在 70 nm, 对于 35

nm 左右的谱线, 激光与物质相互作用可能产生了此谱线, 但测试系统观察不到; 第二种可能是激光与物质相互作用根本没有产生此谱线, 也就是在此条件下, 激光与物质相互作用产生的高次谐波的平台截止级次为 21 次, 对应的波长为 37.85 nm。我们正是从 23 次谐波的二级谱的识别否定了第一种可能。因为 23 次谐波的二级谱波长为 69.13 nm, 光栅在此波段附近的衍射效率应该是很高的, 同时光电倍增管在此波段附近的响应也比较强, 若有 23 次谐波产生, 由于光栅的分光作用, 在谱线上应该观察到 23 次谐波的二级谱。事实上, 在 69.1 nm 处没有观察到任何谱线强度。为了说明这一点, 图 3 中给出了 67.0~70.5 nm 波段氩的高次谐波辐射谱, 从图 3 中可以明显地看到, 在波长 69.13 nm 处, 没有观察到谱线的强度, 对应波长 67.72 nm, 68.09 nm, 68.78 nm 的谱线可能是氩的低价离子辐射的离子谱。

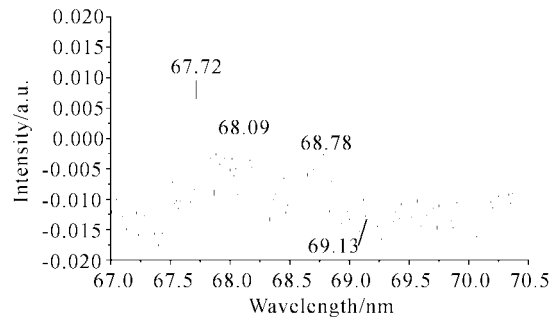


图 3 67.0~70.5 nm 波段氩的高次谐波辐射谱

Fig. 3 Harmonic spectra of Kr in the range of 67.0 nm and 70.5 nm

4) 从上面的讨论可以看到, 产生高次谐波的平台截止级次为 21 次, 对应的波长为 37.85 nm。这一点的确定是非常重要的, 由此可以根据高次谐波的理论确定激光与物质相互作用区域产生的最大光子能量, 从而推断出激光与物质相互作用区域有效光功率密度的大小。这在真空中无法测量有效光功率密度的大小提供了间接的估计方法。

5) 从 Britton Chang 的有关原子电离的理论^[11]计算中, 可以估计中性氩气的谐波截止次数, 介质的饱和激光强度 I_s 可由(1) 式求得

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

式中 E_p (eV) 为原子的电离能, 氩的第一电离能为 13.999 eV, $p = 0.98$ 为原子的电离几率, $c = 3 \times$

10^8 m/s 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[12]知, 对于氦气 $n^* = 0.99, G_{bn} = 3, G_{n^*l} \approx 2.16, \alpha \approx 0.5$ 为修正因子。由上式可得氦原子的饱和激光强度 $I_s = 2.277 \times 10^{14}$ W/cm²。

根据文献[13]提出的理论, 可根据下式求得最大光子能量为 56.564 eV

$$h\nu = E_p + 3.17U_p \quad (2)$$

由此, 可以计算出中性氦气中谐波的理论截止次数为 35 次。由上面的讨论知, 实验中没有观察到 35 次谐波, 观察到的平台截止级次为 21 次, 也就是说实验中获得激光功率密度低于 2.277×10^{14} W/cm²。由式(2)可以计算出 21 次谐波对应的激光功率密度为 1.007×10^{14} W/cm², 此时获得最大光子能量为 32.817 eV。

5 结 论

与目前对强激光与物质相互作用时激励 X 光产生的有效光功率密度的测量方法相比, 用辐射谱的高级次谱出现与否判断激励的有效光功率密度更直接、更准确, 为以后的实验研究奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 Margaret M. Murnane, Henry C. Kapteyn, Roger W. Falcone. Generation and application of ultrafast X-ray sources [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(12):2417~2422
- 2 P. Maine, D. Strickland, P. Bado *et al.*. Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(2):398~403
- 3 M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart *et al.*.

- Petawatt laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3):160~162
- 4 Lu Peixiang, Hidetoshi Nakano, Tadashi Nishikawa *et al.*. Study of commercial terawatt femtosecond laser-driven table-top X-ray lasers in gases. High power lasers in energy engineering [C]. *SPIE*, 1999, **3886**:294~305
- 5 S. Sebban, R. Haroutunian, Ph. Balcou *et al.*. Saturated amplification of a collisionally pumped optical-field-ionization soft X-ray laser at 41.8 nm [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(14):3004~3007
- 6 Liu Yaqing, Xu Zhizhan, Zai Kai *et al.*. High-order harmonic generation in Ar noble gases [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(1):8~13 (in Chinese)
- 7 Wang Qi, Xia Yuanqin, Chen Deying *et al.*. High-order harmonic generation in Krypton with femtosecond Ti:sapphire laser [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(5):534~537 (in Chinese)
- 8 D. Normand, M. Ferray, L. A. Lompre *et al.*. Focused laser intensity measurement at 10^{18} W/cm² and 1053 nm [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(23):1400~1402
- 9 Liang Quanting. Physical Optics [M]. Beijing: Mechanic Industry Publishing Company, 1993. 198~199 (in Chinese)
- 10 Peng Huiming, Wang Shiji, Qiu Yubo *et al.*. X-ray Lasers [M]. Beijing: National Defence Industry Publishing Company, 1997. 89~93 (in Chinese)
- 11 Chang Britton, P. R. Bolton, D. N. Fittinghoff *et al.*. Closed-form solutions for the production of ions in the collisionless ionization of gases by intense lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 1993, **47**(5B):4193~4203
- 12 M. V. Ammosov, N. R. Bolton, P. Krainov *et al.*. Tunnel ionization of complex atoms and of atomic ions in an alternating electromagnetic field [J]. *Sov. Phys. JETP*, 1986, **64**(6):1191~1194
- 13 J. L. Krause, K. J. Schafer, K. C. Kulander. High-order harmonic generation from atoms and ions in the high intensity regime [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(24):3535~3538