

# 超短强激光辐照 Ar 喷气靶的 X 射线发射\*

覃 岭 邓 健 钟方川 张正泉 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学开放研究实验室, 上海 201800)

**摘 要** 利用带差分抽运系统的高效高分辨率软 X 射线大面积透射光栅光谱仪, 对超短强激光脉冲辐照下氩气体靶的软 X 射线发射特性进行了光谱诊断。测得了氩气 12 nm ~ 35 nm 范围内的 X 射线发射光谱, 并观察到 X 射线发射强度随喷气气压的增加而增加。

**关键词** 脉冲氩气体靶, 超短强激光, 透射光栅光谱仪, 软 X 射线发射光谱。

## 1 引 言

近年来, 超短强激光脉冲与气体靶相互作用的研究引起了人们的极大关注。随着辐照激光光强的增加, 在不同实验条件下气体原子将呈现出新颖的强场激光物理行为。在相对较低的激光功率密度(接近于  $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>)下, 实验观测到的气体原子的高次谐波已进入水窗波段, 波长已推进到 2.7 nm<sup>[1]</sup>。在较高一些的功率密度(高于  $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>)下, 气体原子将被光场电离(OFI)引发快电离过程, 这为 X 射线激光的实现提供了新的更具潜力的实验方案<sup>[2]</sup>。团簇的 X 射线发射<sup>[3]</sup>也是这一光强量级内的新现象。在  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> 的激光功率密度下, 电子的运动已进入相对论区, 粒子加速器——作为该激光光强量级内强场物理的代表性应用前景, 人们已进行了较为深入的探讨<sup>[4]</sup>。

为增强超短强激光与气体相互作用过程中 X 射线的发射以及产生 X 射线激光, 国内外的研究人员选用不同的气体、不同的气体靶与激光作用, 获得了令人振奋的结果。Lemoff 等人在特制的气室中充以氩气, 得到了 41.8 nm 的 X 射线激光<sup>[2]</sup>; Chichkov 等人则采用具有 3 个串列孔的脉冲喷气靶, 在较低的气体密度下获得了 37.4 nm 的氧激光<sup>[5]</sup>。我们采用结构比较简单、重复性高、喷气条件易于控制的单孔脉冲喷气靶(Fiedorowicz 等人用这种靶在 1 纳秒的激光脉冲条件下测得了氩气的 X 射线发射<sup>[6]</sup>), 并利用带差分抽运系统的高效高分辨率软 X 射线大面积透射光栅光谱仪, 对超短强激光脉冲下氩气的 X 射线的发射特性进行了光谱诊断, 测得了氩气 12~ 35 nm 范围内的 X 射线光谱, 并观察到 X 射线的发射强度随喷气气压的增加而增强。

## 2 实验安排

实验安排如图 1 所示, 由飞秒激光器、电磁驱动喷气阀、大面积透射光栅光谱仪组成。

\* 国家科委 863 高科技项目。

收稿日期: 1998-09-07; 收到修改稿日期: 1998-10-27

上海光学精密机械研究所强光光学开放研究实验室建成的 2 TW/45 fs 钛宝石激光器<sup>[7]</sup>的中心波长为 785 nm, 线宽为 18 nm, 可提供的最大能量为 120 mJ。激光由焦距 500 mm 的  $f/10$  的透镜聚焦到气体阀喷嘴正下方 2 mm 处, 焦斑直径约 100  $\mu\text{m}$ 。气体阀喷嘴直径为 1 mm, 喷气时间与激光脉冲以外触发方式完成同步操作。聚焦透镜和气体阀都位于真空靶室内。

带差分抽运系统的谱仪<sup>[8]</sup>在相对于打靶激光束  $90^\circ$  方向侧向观测靶点处的软 X 射线发射。差分抽运系统前端的差分孔 ( $\phi 2$  mm) 靠近靶点, 以便尽可能地扩大谱仪 X 射线的接收立体角。实验时, 谱仪真空度高于  $8 \times 10^{-3}$  Pa。

谱仪由镀金轮胎镜、无底衬大面积透射光栅和软 X 光 CCD 相机等组成。轮胎镜决定了谱仪的截止波长为 1.4 nm, 收集立体角为  $7.45 \times 10^{-5}$  球面度。实验中采用的两种大面积透射光栅 (5000 g/mm 和 1000 g/mm) 在两个相互正交方向上都具有谱分辨能力, 一个是光栅线的衍射, 另一个是光栅加强筋的衍射。减薄型背向照明软 X 光 CCD 相机的敏感面尺度为 2 cm  $\times$  2 cm。对以上的两种光栅, 色散方向谱仪的光谱分辨率分别为 0.05 nm 和 0.25 nm。为了滤掉气体散射的可见光, 在光栅前加了 200 nm 厚的 Al 膜。

### 3 实验结果及讨论

整个实验过程中, 气体阀的背景气压维持在 0.3 MPa, 激光脉冲能量为 25~80 mJ, 喷氩气时靶室真空度在 0.05~0.8 Pa 之间变化。在不同的激光能量与不同的气体密度下测量 Ar 的 X 射线发射。

首先, 固定喷气气压的大小(以靶室的真空度来度量), 入射的激光脉冲能量从 25 mJ 逐渐增加到 80 mJ, 用 5000 l/mm 大面积透射光栅作为衍射元件来获取 X 射线谱。当靶室真空度为 0.1 Pa、入射激光能量为 30 mJ 时, 该气阀在  $180^\circ$  方向

观测到了氩气的 81 次高次谐波信号<sup>[9]</sup>。在喷气密度较高(靶室的真空度为 0.8 Pa)、入射能量大于 50 mJ 时, 可明显地看到靶点处脉冲气体被电离后发出的白光随着激光能量的增加而逐渐变亮, 这说明有氩等离子体产生, 而且其光谱发射强度随激光能量的增加而明显增强。

图 2 给出了能量为 80 mJ、喷气时靶室的真空度为 0.8 Pa 时氩的 X 射线谱(从光栅加强筋方向的衍射获得)。软 X 射线 CCD 对信号的积分时间为 20 分钟。解谱后发现: Ar 气的 X 射线谱波长主要处于 15~25 nm 范围内; 谱线主要来源于光场电离后氩 V、氩 VI、氩 VII 的发射。可见在这样的实验条件下, 光场电离完全可以将氩电离到七阶离子。

按照 Lemoff 等人的理论<sup>[10]</sup>, 激光能量为 80 mJ(聚焦光强为  $2 \times 10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>) 时, 可把氩气电离到 ArVII, 与本文的实验结果一致。但在 25 mJ 时, 光场电离仍可将氩气电离到

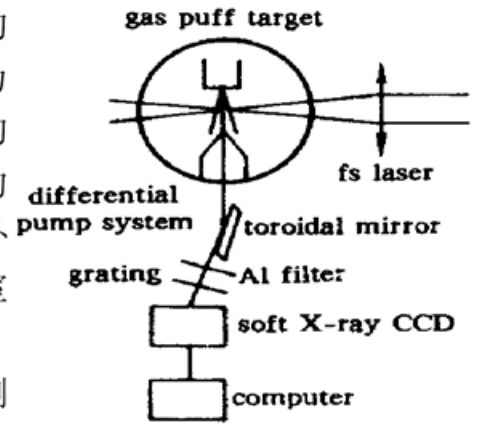


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

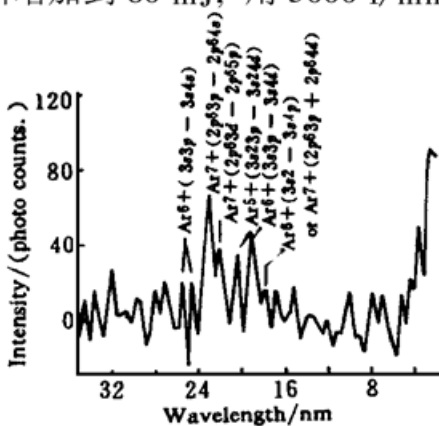


Fig. 2 Spectrum from the Ar puff target irradiated by fs laser, recorded with the soft X-ray CCD camera and the 5000 l/mm grating. The laser energy is 80 mJ, and the chamber pressure is 0.8 Pa

ArIV, 也应该有 X 射线的发射, 但是, 我们未获得低能量下的可重复的氩气的 X 射线谱, 这可能是因为低能量下 X 射线的产额降低; 发射的 X 射线谱超出了 5000 g/mm 光栅的色散方向的摄谱范围(1.4~ 15 nm), 而在加强衍射方向, 由于加强筋数少, 间距大, 导致衍射效率过低。

研究了不同的气体密度下 Ar 的 X 射线的发射特性, 如图 3 所示。其中打靶的能量都为 80 mJ, 积分时间为 20 分钟, 喷气时靶室的真空度分别为 0.1 Pa、0.6 Pa、0.8 Pa。

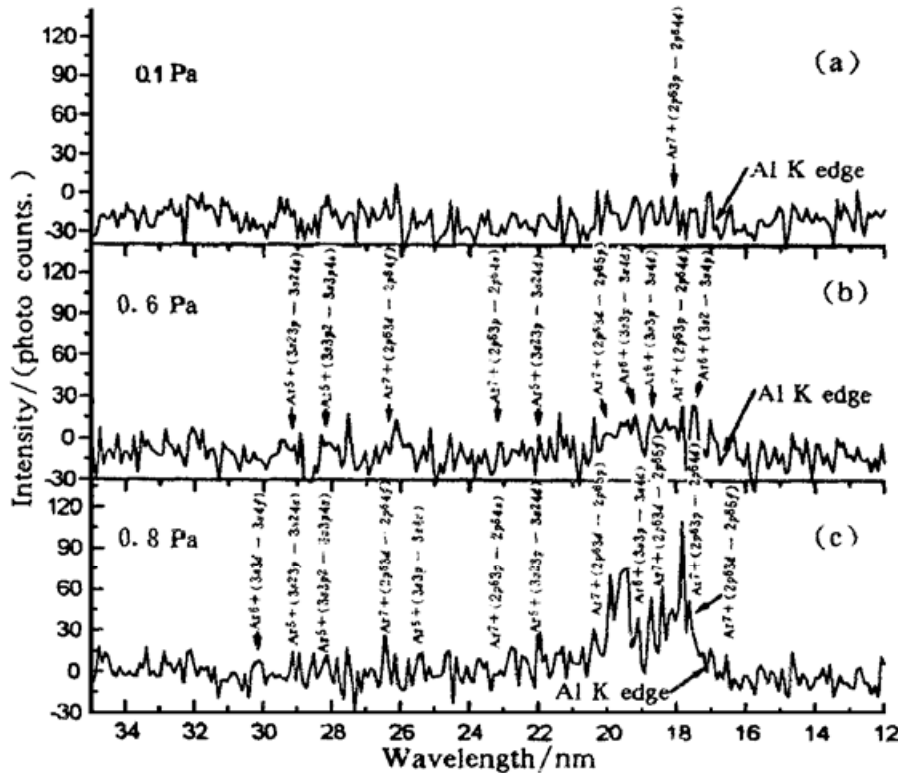


Fig. 3 Spectrum from the Ar puff target irradiated by fs laser under various chamber gas pressure condition, recorded with the soft X-ray CCD camera and the 1000 g/mm grating. The laser energy is 80 mJ, and the chamber pressures is (a) 0.1 Pa, (b) 0.6 Pa, (c) 0.8 Pa

射线光源(10 Hz); 其产生的等离子体也可以用作 X 射线激光的增益介质。当然, 这需要优化实验的条件, 如减小焦斑的大小, 增加激发激光的能量等等。

**结 论** 利用大面积透射光栅谱仪光谱诊断了超短强激光脉冲辐照下氩气的光场电离后的软 X 射线发射, 比较了不同实验条件下的 X 射线发射强度变化, 观察到随着激光入射能量和喷气气体密度的增加, 氩离子的 X 射线发射增强, 发现光场电离后离子体系中仅存在少数几个离子态。脉冲喷气靶可作为重复性比较好的高亮度等离子体 X 射线光源。

由于本实验中没有进行靶点附近气体密度的实验诊断, 仅靠靶室的真空度作定性的判断, 因此气体密度的变化, 对氩离子的 X 射线发射的影响仅能得到比较定性的结果。所以, 靶点附近的气体密度的测量、等离子体的电子温度及密度诊断, 对今后的实验(如氩 X 射线激光、高次谐波实验)将有很大的意义。

摄谱结果发现: Ar 在 0.1 Pa 下的 X 射线发射很小, 0.6 Pa 时的 X 射线发射明显增强, 到 0.8 Pa 时 X 射线强度进一步提高。由此得出结论: 随着气体密度的增加, 氩气的 X 射线发射增强; 氩气的 X 射线的波长范围很窄, 主要集中在 17~ 25 nm, 这是由于光场电离造成 Ar 原子被电离后的氩 V、氩 VI, 氩 VII 的发射线。因此光场电离后离子体系中仅存在少数几个离子态<sup>[11]</sup>。由图 3(c) 可知, 当气体密度高时,  $Ar^{6+}(3s^2 - 3s4p)$  (17.6 nm)、 $Ar^{7+}(2p^63d - 2p^64d)$  (18 nm)、 $Ar^{7+}(2p^63d - 2p^65f)$  (18.4 nm)、 $Ar^{6+}(3s3p - 3s4d)$  (19.2 nm)、 $Ar^{7+}(2p^63d - 2p^65p)$  (20 nm) 这五条谱线强度很高, 因此超短强激光脉冲驱动的脉冲喷气靶可以用作一种重复性比较好的高亮度等离子体 X

感谢中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学开放研究实验室运行组的大力支持。

### 参 考 文 献

- [1] Chang Zengha, Rundquist A, Wang H *et al.*. Generation of coherent soft X rays at 2.7 nm using high harmonics. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**(16) : 2967~ 2970
- [2] Lemoff B E, Yin G Y, Gordon C L *et al.*. Demonstration of a 10-Hz femtosecond-pulse-driven XUV laser at 41.8 nm in Xe IX. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(9) : 1574~ 1577
- [3] Ditmire T, Smith R A, Tisch J W G *et al.*. High intensity laser absorption by gases of atomic clusters. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(16) : 3121~ 3124
- [4] Malka G, Lefebvre E, Miquel J L. Experimental observation of electrons accelerated in vacuum to relativistic energies by high-intensity laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(17) : 3314~ 3317
- [5] Chichkov B N, Egbert A, Eichmann H *et al.*. Soft-x-ray lasing to the ground states in low-charged oxygen ions. *Phys. Rev. (A)*, 1995, **52**(2) : 1629~ 1639
- [6] Fiedorowicz H, Bartnik A, Matraro Z *et al.*. X-ray emission from laser-irradiated gas puff targets. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(22) : 2778~ 2780
- [7] 徐至展, Vigroux L, Saviot F 等. 输出 2 TW/45 fs 的掺钛宝石超短脉冲强激光系统. 中国科学(A), 1997, **272**(7) : 640~ 645
- [8] 邓 健, 钟方川, 覃 岭等. 新型软 X 射线透射光栅谱仪的研制. 光学学报, 1999, **19**(10) : 1114~ 1117
- [9] 徐至展, 张正泉, 李学信等. 利用超快强激光场产生的高次谐波获得相干软 X 射线辐射. 光学学报, 1997, **17**(7) : 957~ 958
- [10] Lemoff B E, Barty C P J *et al.*. Femtosecond -pulse-driven, electron-excited XUV lasers in eight-times-ionized noble gases. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(8) : 569~ 571
- [11] Augst S, Meyerhofer D D, Strickland D *et al.*. Laser ionization of noble gases by Coulomb-barrier suppression. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, **8**(4) : 858~ 867

## Soft X-Ray Emission Spectrum of Ar Puff Target Irradiated by Ultrashort Pulse Intense Laser

Qin Ling    Deng Jian    Zhong Fangchuan    Zhang Zhenquan    Xu Zhizhan  
(Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 7 September 1998; revised 27 October 1998)

**Abstract** Experiment on the spectrum diagnosis of the emission characteristics from Ar gas target irradiated by the Ultrashort pulse intense laser was carried out, with a high efficiency, high resolution transmission grating combined with a differential pump system. Enhancement of the emission spectra among 12~ 35 nm with the increase of chamber gas pressure is observed.

**Key words** gas puffs target, ultrashort intense laser pulse, transmission grating spectrograph, soft X-ray spectrum.