

# 氩团簇高信噪比 13—23nm 软 x 射线 辐射谱实验观察 \*

程元丽 赵永蓬 肖亦凡 夏元钦 陈建新 王 骐

(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)

(2002 年 12 月 26 日收到 2003 年 1 月 24 日收到修改稿)

用 150fs 的掺钛蓝宝石激光系统, 在功率密度约为  $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  时激励 Ar 团簇, 利用具有空间分辨能力的平场光栅谱仪观察到 13—23nm 波段 Ar 的软 x 射线谱, 并观察到 Ar 的 11 阶离子谱线。在较宽的激光脉宽和较低的激光功率密度情况下, 通过激励 Ar 团簇, 获得了 Ar 的高阶电离度的实验结果, 且谱线的信噪比明显好于光场感应电离的情况, 说明团簇的形成大幅度地提高了激光能量的吸收效率。

关键词: Ar 团簇, 超短强激光, 软 x 射线辐射

PACC: 3640

## 1. 引 言

近年来关于超短脉冲强激光与气体、固体靶相互作用产生强的 x 射线辐射和 x 射线激光, 吸引了人们极大的研究兴趣, 这种强的 x 射线辐射源有望应用于物质烧熔、医学和生物成像、微型光刻等许多研究领域中。超短脉冲强激光与气体靶相互作用已经获得了显著的研究成果, 1995 年 Lemoff 等人用光场感应电离(OFI)电子碰撞机理成功地获得了 Pd-like Xe 41.8nm  $4d^9 5d^1 S_0 - 4d^9 5p^1 P_1$  跃迁的 x 射线激光放大<sup>[1]</sup>。2001 年 Sebba 等人的研究小组报道了基于 OFI 电子碰撞激发机理 Pd-like Xe 41.8nm 软 x 射线饱和激光放大, 获得的增益长度积的值达到  $15^{[2]}$ , 同时观测到类 Ni-like Kr 32.8nm 增益<sup>[3]</sup>。强激光抽运气体靶相对于固体靶而言虽没有碎屑产生, 但由于气体密度低, 对入射激光能量吸收较弱(5% 左右), 限制了入射激光能量转换为 x 射线的效率。而原子团簇由于其内部的密度接近于固体的密度, 通过碰撞过程增强对激光能量的吸收, 从而提高 x 射线的转换效率, 并且无碎屑产生, 是获得高能量转换效率、无碎屑台式 x 射线光源和 x 射线激光源、高能离子源、中子源的一种新方案。目前利用超短强激

光脉冲与团簇相互作用已经获得了能量高达 keV 量级的电子、MeV 量级的离子和中子、强的 keV 量级的 x 射线辐射<sup>[4-6]</sup>。

本文采用 150 fs 的掺钛蓝宝石激光系统, 在约  $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  较低功率密度情况下激励 Ar 团簇, 利用具有空间分辨能力的平场光栅谱仪获得了 Ar 的 13—23nm 软 x 射线辐射, 观察到 Ar 的 11 阶离子辐射谱。相对于文献[7]中 OFI 的 Ar 气获得的 x 射线辐射, 本文在更宽的激光脉宽和更低的激光功率密度情况下, 通过激励 Ar 团簇, 获得了 Ar 的更高阶电离度的实验结果, 且谱线的信噪比明显好于光场感应电离的情况, 说明团簇的形成大幅度提高了激光能量的吸收效率<sup>[8]</sup>。

## 2. 实验装置及实验条件

实验装置示意图如图 1 所示, 飞秒激光器输出激光脉宽为 150fs, 单脉冲输出能量为 5mJ, 中心波长为 800nm, 激光光束经 f/6 透镜聚焦于喷嘴下方 1mm 处, 焦点处的激光峰值功率约为  $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 。Ar 团簇靶由 Ar 气通过高压喷嘴喷入真空靶室绝热自由膨胀产生, 喷嘴直径为 200μm, 喷气阀门的开启时间为 443μs, 频率为 10Hz。喷气时间与激光脉冲通过

\* 国家 863 高技术资助的课题。

外触发同步完成。

利用一台平焦场光栅谱仪进行谱的测量，该谱仪包括一个日立的变栅距凹面光栅(1200 l/mm)和一个半径为3725mm的前置轮胎镜。该谱仪具有 $100\mu\text{m}$ 的空间分辨能力，测谱范围为4—45nm，谱线分辨率不低于1000。测量结果由PI公司的背向照明 $1024\times 1024$ 软x射线CCD相机记录，CCD像素大小为 $13\mu\text{m}$ 。

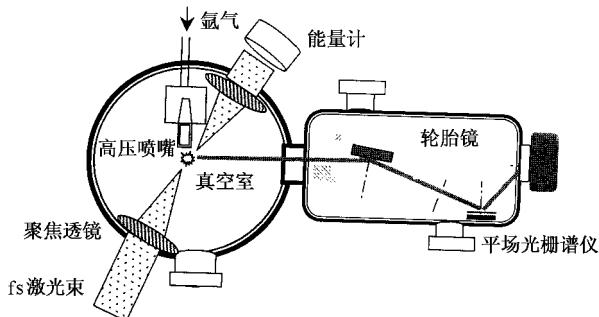


图1 飞秒激光与原子团簇相互作用实验装置示意图

实验时气体阀的背景气压可在0—8MPa之间变化。喷氩气前的真空度为 $6\times 10^{-4}\text{Pa}$ ，喷氩气时靶室真空度维持在 $(2\text{--}9)\times 10^{-2}\text{Pa}$ ，CCD对信号积分时间为600s。

实验数据在中科院物理所光物理开放实验室的Quanra-Ray TSA型钛宝石飞秒激光装置上获得。

### 3. 实验结果及分析讨论

首先比较了在150fs, 5mJ激光脉冲作用下，不同Ar气背景气压的条件下激光能量的吸收和软x射线辐射的情况，发现在2MPa背景气压时对激光能量表现出较强的吸收，并且软x射线产额明显增加<sup>[9]</sup>，表明这个压强下已有Ar团簇的产生。借助Hagena参量可以对形成的团簇大小进行估计。Hagena参量给出了生成的团簇的尺寸与背景气压、气体温度以及气体常量之间的关系<sup>[10]</sup>，其表达式为

$$\Gamma^* = \kappa \frac{(d/\tan\alpha)^{0.85}}{T_0^{2.29}} P_0,$$

其中d为气体阀门喷嘴的直径( $\mu\text{m}$ )， $\alpha$ 是高压气体的膨胀半角(对声速， $\alpha=45^\circ$ ；对超声速， $\alpha<45^\circ$ )， $P_0$ 是气体的背景压强(mbar)， $T_0$ 是高压气体膨胀前的温度(K)， $\kappa$ 是与气体相关的常数，对于Ar气 $\kappa=1650$ 。形成团簇Hagena参量要满足 $\Gamma^* \sim 100\text{--}300$ 的条件，形成团簇内的原子数目 $N_e$ 与 $\Gamma^*^{2.0\text{--}2.5}$ 成比

例，具体数值还与实验中所用的气阀结构有关，需要在实验中测量。已有一些实验在 $\Gamma^* > 10^3$ 的条件下，通过Rayleigh散射测得形成的团簇内包含大约100个原子<sup>[11]</sup>。在我们的实验中，2MPa背景气压时 $\Gamma^* \sim 6\times 10^3$ 。

在2MPa背景气压时，由CCD获得Ar的谱图如图2所示。从图中可以看出，在13—23nm范围内获得了信噪比非常好的Ar的软x射线辐射谱，谱线主要来源于Ar<sup>VII</sup>、Ar<sup>X</sup>和Ar<sup>XI</sup>离子(Ar<sup>XI</sup>和Ar<sup>IX</sup>离子在13—23nm范围的谱很少)。文献[7]中利用45fs, 80mJ的激光脉冲激励Ar气，研究了OFI情况下Ar的软x射线辐射，观察到的x射线辐射大部分来源于Ar<sup>VII</sup>和Ar<sup>VIII</sup>离子的辐射。同本文150fs, 5mJ的激光脉冲与Ar团簇相互作用的实验结果对比，本文中1) x射线辐射显著增强，信噪比大幅度提高；2) 观察到了更高阶离子的x射线辐射，说明膨胀后等离子体内的电子温度更高。

按照Lemoff等人的理论，通过光场感生电离把Ar气电离到7阶离子，激光强度需要 $2\times 10^{16}\text{W/cm}^2$ ，而Ar<sup>IX</sup>离子的产生需要 $1.6\times 10^{18}\text{W/cm}^2$ 的激光功率密度，超过我们所用的激光功率密度近两个数量级。这说明强激光与团簇相互作用产生的等离子体的过程及结果完全不同于OFI气体靶时的情形，此时是通过碰撞加热、共振吸收和碰撞电离在等离子体内获得了更高的电子温度和更高阶的离子。激光抽运团簇时，最初的电子虽仍由光场感应电离产生，但随着团簇内的电子密度的迅速增加，高密度等离子体对入射激光场产生屏蔽效应，碰撞电离快速占据主导地位，伴随着碰撞逆韧致吸收使激光能量沉积在团簇内的自由电子上。随着团簇的不断膨胀，当团簇内的电子密度 $n_e$ 满足 $n_e/n_{\text{crit}} = 3$ （其中 $n_{\text{crit}} = m_e \omega^2 / 4\pi e^2$ 是临界电子密度）时，团簇内的电子对激光场产生共振吸收，电子被快速加热，通过碰撞电离过程，有可能获得更高阶的电离状态。本文实验中，激光入射能量在5mJ左右，脉宽也比较宽，为150fs，这样的激光功率密度直接激励气体靶，通过光场感应电离是不能够产生高达11阶的Ar离子状态的。在文献[7]的实验条件下，通过在光场感应电离可以产生Ar<sup>IX</sup>和Ar<sup>VIII</sup>离子，但由于入射激光是线偏振，等离子体内的电子温度比较低( $< 30\text{eV}$ )，此时主要是通过三体复合过程产生了Ar<sup>VII</sup>和Ar<sup>VIII</sup>离子的软x射线辐射。

在文献[12]中，Chen等人给出了激光能量分别

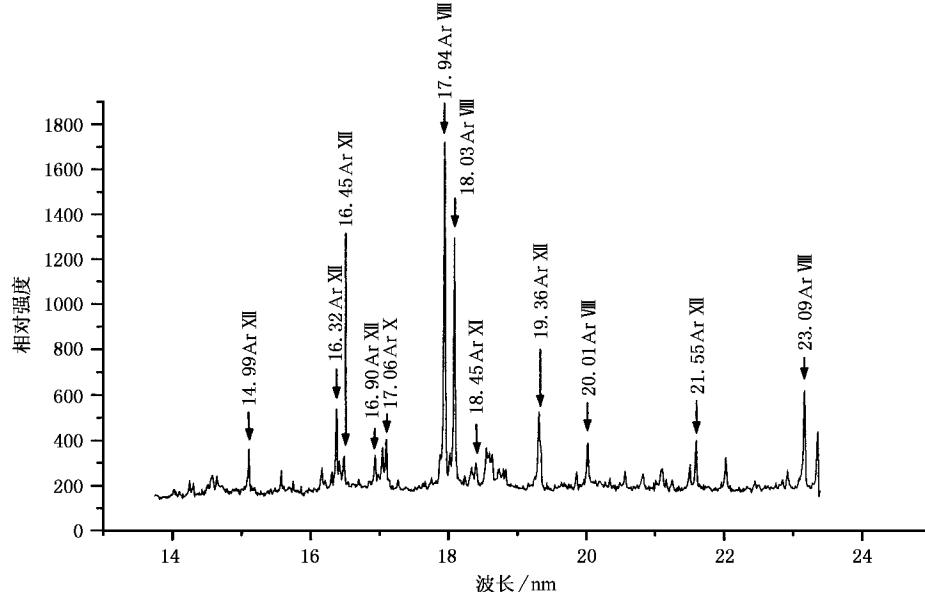


图 2  $150\text{fs}$   $5 \times 10^{15} \text{W}/\text{cm}^2$  脉冲激励 Ar 团簇获得的软 x 射线辐射谱

为 30mJ 和 3mJ 的情况下 ,Xe 团簇对激光能量的吸收以及  $\text{Xe}^{7+}$  10.8nm XUV 辐射强度随激光脉宽的变化情况 . 在入射激光能量小( 3mJ )的情况下 , 发现 Xe 团簇对激光能量的吸收和 XUV 辐射强度反而随激光脉宽的增加而增加 . 同样的情况可以推论到 Ar 团簇 . 在入射的激光能量较小的情况下( 5mJ ), 如果激光脉宽过窄 ,Ar 团簇还没有来得及膨胀到共振吸收的状态 , 激光脉冲就已经结束了 . 而增加激光脉宽虽然使光强幅值减小 ,却增加了激光与团簇相互作用的时间 ,在整个激光脉冲持续时间内 ,随着团簇的不断膨胀 ,在激光脉冲结束前 ,团簇内有可能达到共振吸收的状态 ,通过共振吸收快速加热电子 ,获得更高温度的电子 ,增加了 XUV 辐射的强度和团簇的电离度 . 这一现象完全不同于 OFI 时的情形 ,在 OFI 中 x 射线的辐射强度随激光强度的减小而迅速减弱 .

文献 [13] 中 ,Mocek 等人 ,利用 25fs 的激光脉冲激励氩团簇靶 ,获得了 Ar VIII ,Ar IX 和 Ar X 在 4—18nm 波段的谱线 . 由于此时的激光脉宽较窄 ,主要是碰撞加热 ,没有共振吸收 . 文章最后提到利用更宽

的激光脉宽有可能观察到更高的电离状态 ,100fs 时 ,可以得到 Ar 的 10 阶离子 . 本文的工作利用 150fs 的激光脉冲获得了 Ar 的 10 阶和 11 阶离子 ,实验结果符合 Mocek 等人的结论 . 细致的物理图像 ,还需要理论和实验的不断探索 .

#### 4. 结 论

本文利用较低能量( 5mJ ) 较宽脉宽( 150fs )的激光激励氩团簇 ,获得了高信噪比的 Ar 的软 x 射线辐射 ,该实验结果与 OFI 激励 Ar 气体靶时的结果相比有很大差异 . 说明 fs 激光与团簇相互作用 ,大大增强了介质对激光的吸收效率 . 同时与文献实验结果的对比 ,说明对于 Ar 团簇靶 ,在低激光入射能量情况下 ,150fs 的激光脉宽可以获得来自于更高电离状态、更高强度的 x 射线辐射 .

感谢中科院物理所张杰研究员、陈正林博士等在实验方面给予的帮助 .

- [1] Lemoff B E , Yin G Y , Gordon III C L , Barty C P J and Harris S E 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 1574
- [2] Bhan S Se , Haroutunian R , Balcou Ph , Grillon G *et al* 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3004

- [3] Peixiang Lu , Hidetoshi Nakano , Tadashi Nishikawa , and Naoshi Uesugi 1999 *High power lasers in energy engineering* , O-39. Nov. 1-5. Osaka Uni. Japan SPIE-3886
- [4] Ditmire T , Tisch J W G , Springate E *et al* 1997 *Nature* **386** 54

- [ 5 ] Ditmire T , Zweuback J , yanovsky V P et al 1999 *Nature* **398** 489  
 [ 6 ] Meperson A , Luk T S et al 1994 *Nature* **370** 631  
 [ 7 ] Ling Qin Jian Deng ,Fangchuan Zhong , Zhengquan Zhang , Zhizhan Xu 2000 *Acta Optica Sinica* **20** 342  
 [ 8 ] Lin J Q et al 2001 *Chin . Phys . Lett .* **18** 211  
 [ 9 ] Jiangquan Lin , J Zhang , Y J Ling , LiMing Cheng , et al 2001 *Acta Phys . Sin .* **50** 457  
 [ 10 ] Hagena O F et al 1992 *Rev . Instrum* **63** 237  
 [ 11 ] Ditmire T , Springate E , Tisch J W G , Shao Y L S et al 1998 *Phys . Rev . A* **57** 369  
 [ 12 ] Chen L M , Park J J , Hong K H , Choi I W , Kim J L , Zhang J and Nam C H 2002 *Physics of Plasmas* . **9** 3595  
 [ 13 ] Mocek T , Kim C M , Shin H J , Lee D G , Cha Y H , Hong K H , Nam C H 2000 *CLEO* 296

## Soft-x-ray emission from Ar clusters irradiated by 150fs laser pulses<sup>\*</sup>

Cheng Yuan-Li Zhao Yong-Peng Xiao Yi-Fan Xia Yuan-Qin Chen Jian-Xin Wang Qi

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

( Received 26 November 2002 ; revised manuscript received 24 January 2003 )

### Abstract

Soft x-ray emission from Ar clusters irradiated by intense 150 fs laser pulses at an intensity of  $\sim 5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  has been measured with a flat field spectrometer. Strong transitions from Ar $VII$  charge states have been observed , some spectral lines belong to Ar $XI$  and Ar $XII$  . Compared with optical field ionization , the interaction of intense laser pulse with clusters enhances drastically the absorption of laser energy and higher charge states are obtained as well. The significant change in the spectrum is attributed to the collisinal heating of small-sized Ar clusters formed at on enough baking pressure of gas.

**Keywords :** Ar clusters , intense laser , soft-x-ray

**PACC :** 3640

<sup>\*</sup> Project supported by the 863 High-Tech . Foundation of China.