

# 超强激光与 Ar 团簇相互作用中 X 射线的研究\*

孙彦乾<sup>1)2)</sup> 陈黎明<sup>1)†</sup> 张璐<sup>1)</sup> 毛婧一<sup>1)</sup> 刘峰<sup>1)</sup> 李大章<sup>3)</sup> 刘成<sup>1)</sup>  
李伟昌<sup>4)</sup> 王兆华<sup>1)</sup> 李英骏<sup>2)‡</sup> 魏志义<sup>1)</sup> 张杰<sup>1)5)</sup>

1) (中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 光物理重点实验室, 北京 100190)

2) (中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 理学院, 北京 100083)

3) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

4) (西北核技术研究所, 西安 710024)

5) (上海交通大学物理系, 上海 200240)

(2010年12月30日收到; 2011年6月5日收到修改稿)

本文主要研究了超强超短激光与 Ar 团簇相互作用过程中 X 射线能谱、K 壳层光子产额、能量转换效率以及激光对比度对 X 射线光子产额的影响. 实验中得到 K 壳层的光子产额约为  $1 \times 10^{11}$ /发, 能量转换效率约为  $2.8 \times 10^{-5}$ . 同时观测到较强预脉冲电离化团簇会导致预电离, 产生膨胀等离子体, 然而主脉冲与膨胀的等离子体相互作用的强度较未膨胀时降低了, 从而导致 K 壳层光子产额降低, 而使用高对比度的激光能增加 X 射线光子产额.

**关键词:** 超强超短激光, Ar 团簇, X 射线

**PACS:** 52.38.Ph, 36.40.Gk, 52.50.Jm, 52.70.La

## 1 引言

超强超短激光的发展拓宽了激光与等离子体相互作用的研究范围, 促进了激光与各种物质相互作用产生粒子源和 X 射线辐射源的研究, 其中激光与团簇作用的研究越来越受到大家的关注, 包括热电子的产生<sup>[1]</sup>、高能离子的产生<sup>[2]</sup>和 X 射线的激发<sup>[3,4]</sup>等. 虽然强激光与气体靶相互作用相对于固体靶而言没有碎屑产生, 但因气体密度太低, 对入射激光能量吸收较弱 (5%左右), 限制了 X 射线的能量转换效率. 然而原子团簇密度远大于气体密度, 碰撞过程中能增强对激光能量的吸收, 提高作用过程中 X 射线的能量转换效率, 并且无碎屑产生<sup>[5]</sup>, 因此强激光与团簇相互作用是获得高能量转换效率、无碎屑台式 X 射线源的有效方式. 激光驱动的硬 X 射线源在生物和医学成像<sup>[6]</sup>、微型光刻等许多研究领域中都具有潜在的应用价值. 具有高亮度、短脉宽的硬 X 射线是得到理想 X 射线生物体成像

的必要条件<sup>[7]</sup>.

本文主要研究了超强飞秒激光与 Ar 团簇相互作用过程中 X 射线能谱、K 壳层光子产额、能量转换效率以及激光对比度对 K 壳层光子产额的影响. 实验中得到总的 K 壳层光子产额约为  $1 \times 10^{11}$ /发, 对应单位能量的光子数约为  $6 \times 10^{10}$ /J, 能量转换效率约为  $2.8 \times 10^{-5}$ . 当激光对比度较差时, 较大能量的激光脉冲产生的 K 壳层光子产额较低, 这主要是因为较强的预脉冲会电离化团簇, 降低主脉冲和膨胀的等离子体相互作用的强度, 因此要获得较高的光子产额就必须保持高密度的等离子体与激光相互作用.

### 1.1 实验装置

实验中使用的超短激光脉冲是由中国科学院物理研究所光物理实验室“极光-III”装置产生的. “极光-III”掺钛蓝宝石激光系统采用了啁啾脉冲放大技术, 激光脉冲中心波长

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60878014, 10974249, 10735050, 10925421, 10734130, 10874242), 国家重点基础研究发展计划 (973)(批准号: 2007CB815100) 和国家高技术研究发展计划资助的课题.

† E-mail: lmchen@aphy.iphy.ac.cn

‡ E-mail: lyj@aphy.iphy.ac.cn

为 800 nm, 压缩后单脉冲能量最高可达 32 J, 最大峰值功率大于 1 PW, 重复频率为 20 min/发. 实验中使用三阶自相关仪来测量激光对比度,

本次实验中到达靶面的激光能量为 0.5—2.5 J, 激光脉冲的皮秒级对比度的动态范围在  $10^5$ — $10^9$  之内可调.

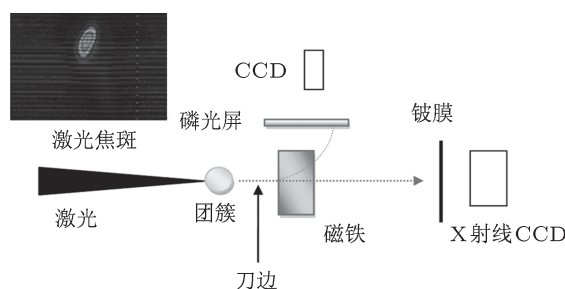


图 1 激光与 Ar 团簇相互作用产生 X 射线的实验布局, X 射线 CCD 放置在激光前向来探测 X 射线光子产额和光子能量

实验布局如图 1 所示. 激光脉冲经过压缩后, 用  $F/10$  的离轴抛物面镜 (OAP) 将其聚焦到靶室中间的喷嘴正上方 2mm 处, 此时得到激光焦点的尺寸为  $41 \mu\text{m} \times 91 \mu\text{m}$ , 如图 1 所示. 激光在聚焦区域的平均功率密度为  $10^{17}$ — $10^{18} \text{ W/cm}^2$ . 在激光传播方向上使用 Roper Scientific 公司生产的 16 bit 单光子计数 X 射线 CCD<sup>[8]</sup> 进行 X 射线光子产额和能谱的测量. 实验中使用一 8000 G ( $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$ ) 的永磁铁使高能电子在磁场作用下发生偏转, 这样避免了沿激光前向发射的电子对本底的影响. 实验中采用了超音速喷射法产生气体团簇, 喷嘴系统包括快响应的电磁阀与控制器. 参考 Semushin 等人<sup>[9]</sup> 给出的优化的喷嘴进行参数设计, 本实验中使用的喷嘴<sup>[10]</sup> 出口直径为 3 mm, 喉部直径为 1 mm, 深度为 7 mm, 出口半张角  $8.1^\circ$ . 根据 Hagen 半经验公式<sup>[11]</sup> 和喷嘴的具体参数可以计算团簇的尺寸: 首先由公式  $\Gamma^* = k \frac{(d/\tan \alpha)^{0.85} P_0}{T_0^{2.29}}$  得到无量纲的 Hagen 参数  $\Gamma^*$ , 其中  $k$  是与原子有关的常数 (对氩气  $k = 1650$ ),  $d$  为喷嘴喉部的直径 (单位为  $\mu\text{m}$ ),  $\alpha$  为喷嘴的半张角,  $P_0$  和  $T_0$  分别为气体膨胀前的初始背压 (单位为 mbar,  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ) 和初始温度 (单位为 K), 然后由公式<sup>[12]</sup>  $N = 100 \left( \frac{\Gamma^*}{1000} \right)^{1.8}$  可计算出平均每个团簇中的原子个数  $N$ , 本实验中  $N$  值为  $2.3 \times 10^6$ .

靶室顶部放置光学 CCD 观察 Thomson 散射, 通过观察等离子体通道的长度和亮度定性的判断激光和团簇相互作用的强度. 实验过程中, 等离子体通道参数可以作为调整其他实验参数 (如激光能

量, 气体背压等) 的重要依据.

## 2 实验结果与讨论

实验中 X 射线 CCD<sup>[8]</sup> 采集的原始图如图 2 所示, 图 2(a) 为整个相面的图像, (b) 为放大到单个像素的图像. X 射线 CCD 每个像素的输出强度与入射光子沉积到像素上的能量呈线性关系, 如果最多只有一个光子入射到同一像素上, 则输出的强度与该入射光子能量成正比. 如果有多个光子同时入射到同一个像素上, 那么输出的强度与入射光子的能量总和成正比. 统计所有光子的能量就可以得到 X 射线的能谱. 图 3 是对原始图中数据进行柱状图统计得到的 X 射线能谱图. 图中光子能量约 3 keV 的峰是氩的  $K\alpha$  特征峰, 能量低于 3 keV 的光子由低电离态和超热电子的韧致辐射产生. 同时, 在图中约 6 keV, 9 keV 的位置各有一个较小峰, 这是因实验中  $K$  壳层光子产额较高, 而滤片能够挡住的入射光子数目有限 (使用的滤片是  $330 \mu\text{m}$  厚的铍膜, 此厚度对氩  $K$  壳层光子的透过率为 26.66%), 导致两个或三个光子同时入射到同一个像素上, 而这个特定的像素会自动把所有入射光子的能量叠加, 由于 X 射线 CCD 每一像素的输出强度与入射光子的总能量成正比, 所以在 6 keV, 9 keV 位置出现的峰分别对应的是两个和三个  $K$  壳层光子的叠加. 假设光子呈  $4\pi$  立体角均匀分布, 依照这种统计结果可得到总  $K$  壳层光子产额约为  $1 \times 10^{11}$ /发, 对应单位能量的光子数约为  $6 \times 10^{10}$ /J, 光子能量转换效率约为  $2.8 \times 10^{-5}$ .

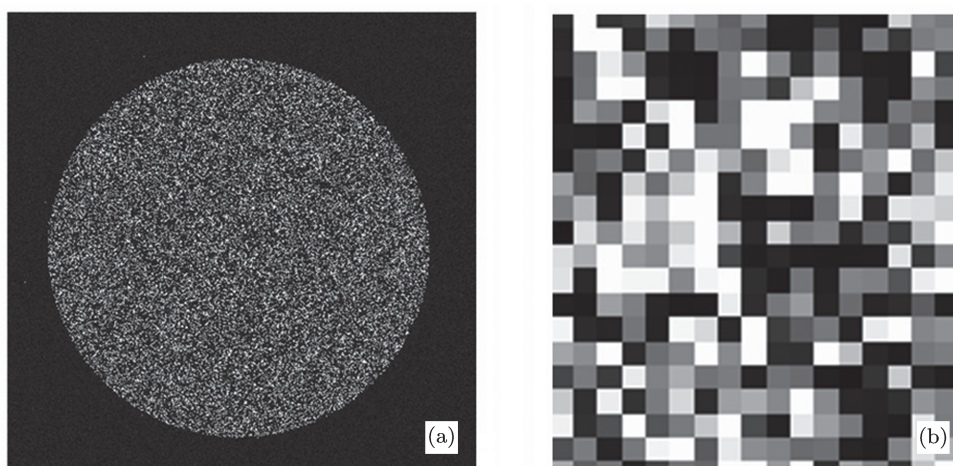


图2 X射线 CCD 采集到的原始图 (a) 为整个相面的图像; (b) 为放大到单个像素的图像

利用刀边成像技术, 可以测量 X 射线源的尺寸. 首先在源和 X 射线 CCD 之间放置刀边, 用 X 射线 CCD 采集刀边像, 对刀边像的刃边扩展函数作费米函数拟合, 费米函数的数学表达式为  $F(x) = a + \frac{b}{e^{(x-c)/d} + 1}$ , 其中  $a, b, c, d$  为常数. 然后对费米函数  $F(x)$  作微分可得到刀边像的线扩展函数. 最后对线扩展函数作高斯拟合可得到 X 射线源的半高全宽<sup>[13]</sup>, 根据实验数据计算出 X 射线源的尺寸约为 180  $\mu\text{m}$ . 较大尺寸的 X 射线源与激光参数和光学系统聚焦能力有关, 实验中只有部分激光能量被聚焦到有限焦斑尺寸内, 另外的激光能量分布于可见焦斑的外围区域, 而在外围区域产生的超热电子仍可激发 X 射线光子, 从而形成了较大尺寸的 X 射线源.

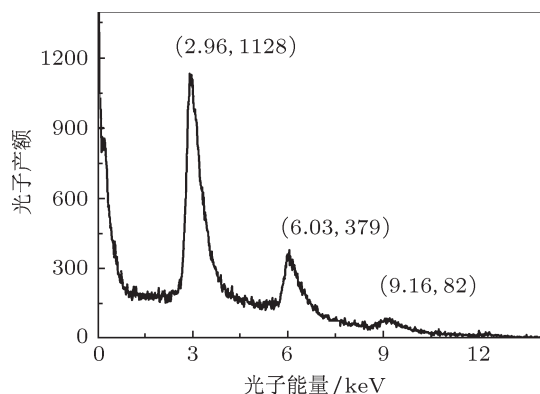


图3 激光与 Ar 团簇相互作用过程中得到的 X 射线能谱图

实验中  $K$  壳层的光子产额与激光对比度的高低有很大关系. 本次实验激光对比度在  $10^5$ — $10^9$  间可调. 当激光对比度为  $10^5$ , 到达靶面主脉冲能量为 0.5—1.4 J 时, 激光平均功率密度

为  $10^{17}$ — $10^{18}$   $\text{W}/\text{cm}^2$ , 对应的预脉冲的激光强度约为  $10^{13}$   $\text{W}/\text{cm}^2$ , 这个强度略低于氩原子的光场离化阈值<sup>[14]</sup>, 此时预脉冲基本没有离化团簇, 保证了主脉冲能充分的与 Ar 团簇相互作用. 当激光能量增加时激光强度随之增加, 相互作用强度也增加, 此时光子产额会随激光能量增加而增加. 如图 4 所示,  $K$  壳层的光子产额随着激光能量增加呈上升趋势, 同时实验中采集了顶部的 Thomson 散射, 如图 5 所示. 从图中可看出激光和 Ar 团簇相互作用产生的等离子通道较长, 这也说明激光与团簇相互作用的强度较大. 随着能量增加到 1.5—2 J, 预脉冲的强度开始接近  $10^{14}$   $\text{W}/\text{cm}^2$ , 并开始离化团簇, 同时等离子体开始膨胀, 主脉冲到达时, 等离子体的密度已经有所下降, 这样激光主脉冲恰好与膨胀的低密度等离子体相互作用, 极大地降低了激光和等离子体相

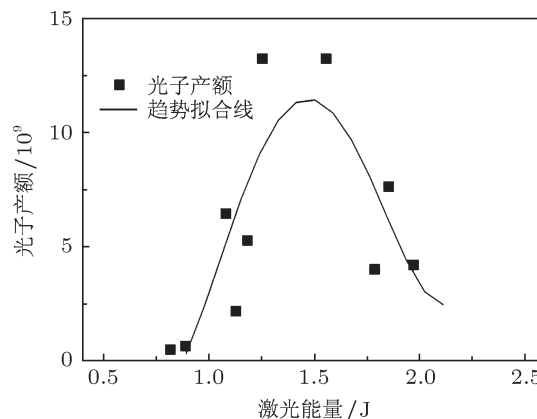


图4 激光对比度为  $10^5$  能量为 0.5—2 J,  $K$  壳层光子产额随激光能量的变化

相互作用的强度. 从图 4 中光子产额的趋势拟合线也可以看出激光能量继续增加,  $K$  壳层光子产额开始

下降. 由图还可以看出, 在激光对比度为  $10^5$  时, 单发  $K$  壳层 X 射线光子产额在  $1.3 \times 10^9$ — $1.4 \times 10^{10}$  之间变化.

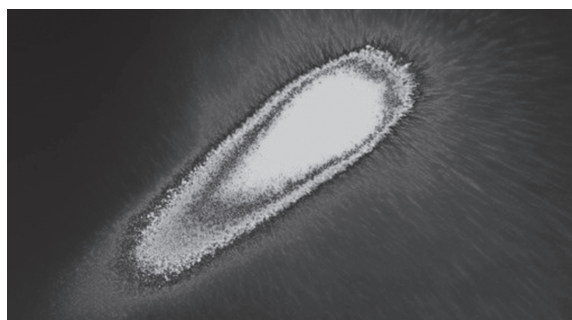


图 5 激光和 Ar 团簇相互作用时顶部 Thomson 散射图像

激光对比度提高到  $10^9$ , 到达靶面主脉冲能量为 0.7—2 J 时, 激光峰值功率约为  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>, 激光预脉冲的强度不足以离化团簇, 因而主脉冲能与高密度的 Ar 团簇相互作用. 此时, 非线性共振将成为主要的能量吸收机理 [15], 极大地提高电子加热效率.  $K$  壳层光子产额随能量增加呈现上升的趋势, 单发产生的  $K$  壳层 X 射线光子产额在  $1.92 \times 10^{10}$ — $1 \times 10^{11}$  之间变化, 特别当到达靶面能量为 1.67 J, 激光功率密度约为  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> 时, 最大光子产额达到  $10^{11}$ , 并有饱和趋势, 如图 6 所示.

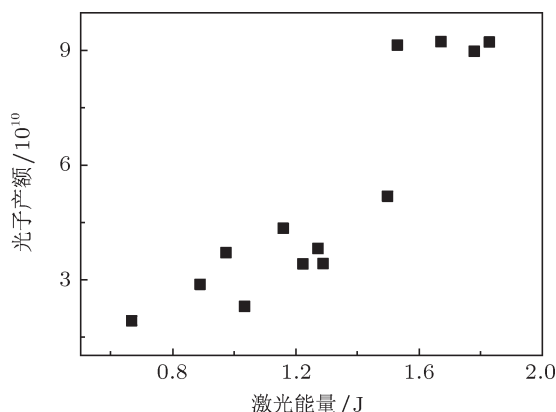


图 6 激光对比度为  $10^9$  能量为 0.7—2 J,  $K$  壳层光子产额随激光能量的变化趋势

图 7 给出了激光对比度为  $10^9$  时单位能量

的  $K$  壳层光子数随喷嘴偏移量的变化关系, 选取激光聚焦点为坐标原点, 设激光传播方向为正方向. 图中可以看出喷嘴偏移量从 -8 到 6 mm 变化过程中光子产额先增加后减小, 继续移动喷嘴光子产额又继续增加. 但总体上看, 在负偏移方向上, 光子产额在一个比较小的范围内变化, 这应与实验过程中较大的激光焦斑以及复杂的相互作用情况有关, 说明数倍于衍射极限的焦斑在激光方向上前后移动时对激光强度的影响较小, 整个过程中激光和团簇相互作用的强度变化不大.

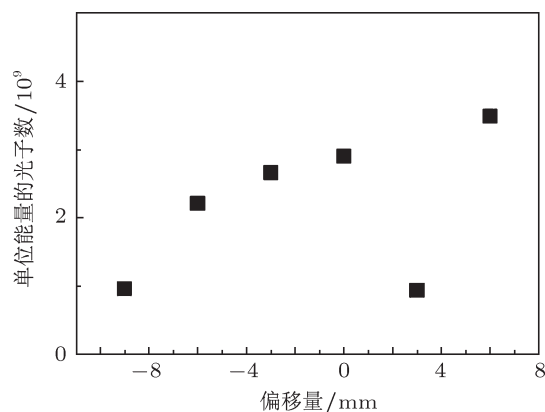


图 7 激光对比度为  $10^9$  单位能量的  $K$  壳层光子数随喷嘴偏移量的变化关系

### 3 结论

实验上观测到超强超短激光与 Ar 团簇相互作用过程中产生的  $K$  壳层光子产额约为  $1 \times 10^{11}$ /发, 对应单位能量的光子数约为  $6 \times 10^{10}$ /J, 光子的能量转换效率约为  $2.8 \times 10^{-5}$ . 这意味着在  $5 \times 10^{-5}$  sr 立体角内 (即 1 cm<sup>2</sup> 的成像面位于 20 cm 处时) 所接收的光子数足够进行单发成像. 实验观测到较强预脉冲离化团簇会导致预电离, 产生膨胀等离子体, 然而主脉冲与膨胀的等离子体相互作用的强度较未膨胀时降低了, 从而降低  $K$  壳层光子产额, 而高对比度激光的主脉冲和高密度等离子体作用就能得到较高的光子产额. 我们将准备继续优化“极光-III”的聚焦状况以进一步提高  $K$  壳层光子产额, 并利用高原子序数的团簇产生具有医学价值的 X 射线源.

[1] Kumarappan V, Krishnamurthy M, Mathur D 2003 *Phys. Rev. A* **67** 043204  
 [2] Ditmire T, Springate E, Tisch J W G, Shao Y L, Mason M B, Hay N, Marangos J P, Hutchinson M H R 1998 *Phys. Rev. A* **57** 369

[3] McPherson A, Luk T S, Thompson B D, Borisov A B, Shiryayev O B, Chen X, Boyer K, Rhodes C K 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 1810  
 [4] Chen L M, Kando M, Ma J, Kotaki H, Fukuda Y, Hayashi Y, Daito I, Homma T, Ogura K, Mori M, Pirozhkov A S, Koga J, Daido H,

- Bulanov S V, Kimura T, Tajima T, Kato Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 211501
- [5] Ditmire T, Smith R A, Tisch J W G, Hutchinson M H R 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 3121
- [6] Tillman C, Persson A, Wahlstrom C G, Svanberg S, Herrlin K 1995 *Appl. Phys. B* **61** 333
- [7] Krainov V P, Smirnov M B 2002 *Phys. Rep.* **370** 237
- [8] [http://www.princetoninstruments.com/pdfs/whitepapers/direct\\_detection.pdf](http://www.princetoninstruments.com/pdfs/whitepapers/direct_detection.pdf)
- [9] Semushin S, Malka V 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 2961
- [10] Liu F, Chen L M, Lin X X, Liu F, Ma J L, Li R Z, Li Y T, Wang Z H, Wang S J, Wei Z Y, Zhang J 2009 *Opt. Exp.* **17** 16379
- [11] Hagen O F 1992 *Rev.Sci.Instrum.* **63** 2374
- [12] Dorchies F, Blasco F, Caillaud T, Stevefelt J, Stenz C, Boldarev A S, Gasilov V A 2003 *Phys. Rev. A* **68** 023201
- [13] Xu M H, Chen L M, Li Y T, Yuan X H, Liu Y Q, Kazuhisa N, Toshi T, Wang Z H, Wei Z Y, Zhao W, Zhang J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 353(in Chinese) [徐妙华, 陈黎明, 李玉同, 远晓辉, 刘运全, Kazuhisa Nakajima, Toshi Tajima, 王兆华, 魏志义, 赵卫, 张杰 2007 物理学报 **56** 353]
- [14] Lin J Y, Chu H H, Shen M Y, Xiao Y F, Lee C H, Chen S Y, Wang J 2004 *Opt. Commun.* **231** 375
- [15] Chen L M, Liu F, Wang W M, Kando M, Mao J Y, Zhang L, Ma J L, Li Y T, Bulanov S V, Tajima T, Kato Y, Sheng Z M, Wei Z Y, Zhang J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 215004

# X-ray source generation under laser-Ar cluster interaction\*

Sun Yan-Qian<sup>1)2)</sup> Chen Li-Ming<sup>1)†</sup> Zhang Lu<sup>1)</sup> Mao Jing-Yi<sup>1)</sup> Liu Feng<sup>1)</sup>  
Li Da-Zhang<sup>3)</sup> Liu Cheng<sup>1)</sup> Li Wei-Chang<sup>4)</sup> Wang Zhao-Hua<sup>1)</sup>  
Li Ying-Jun<sup>2)‡</sup> Wei Zhi-Yi<sup>1)</sup> Zhang Jie<sup>1)5)</sup>

1) (Key Laboratory of Optical physics, Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (State Key Laboratory of Geomechanics and Deep Underground Engineering, School of Science, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

3) (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

4) (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

5) (Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

(Received 30 December 2010; revised manuscript received 5 June 2011)

## Abstract

Bright  $K$ -shell X-ray emissions are generated through the interaction between intense femtosecond laser pulses and Ar clusters. The total yield of  $K$ -shell X-ray photons reaches  $1 \times 10^{11}$  photons/shot with a conversion efficiency of  $2.8 \times 10^{-5}$  in  $4\pi$ . When Ar clusters are irradiated by a laser pulse with intense prepulse, the yield of  $K$ -shell X-ray photons will decrease due to prepulse ionization. Keeping high-density plasmas interacting with the main pulse is essential for obtaining the highest X-ray yield.

**Keywords:** intense laser, Ar clusters, X-ray source

**PACS:** 52.38.Ph, 36.40.Gk, 52.50.Jm, 52.70.La

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 60878014, 10974249, 10735050, 10925421, 10734130, 10874242), the National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant No. 2007CB815100), and the National High Technology Research and Development Program of China.

† E-mail: lmchen@aphy.iphy.ac.cn

‡ E-mail: lyj@aphy.iphy.ac.cn