

纳秒激光电离产生 Kr^{17+} 的研究*

罗晓琳^a, 孔祥蕾^a, 牛冬梅^a, 渠洪波^a, 李海洋^{a, b, **}

(a. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031 ;

b. 中国科学院大连化学物理研究所, 大连 116023)

关键词: 氪; 纳秒激光; 高价离子; 飞行时间质谱

中图分类号: O644 文献标识码: A

Generation of Multicharged Krypton Ions

in Nanosecond Laser Ionization of Krypton Beam*

Luo Xiaolin^a, Kong Xianglei^a, Niu Dongmei^a, Qu Hongbo^a, Li Haiyang^{a, b, **}

(a. *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031 ;*

b. *Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023)*

Abstract Up to Kr^{17+} multicharged krypton ions have been observed in time-of-flight mass spectrum by a 25 ns Nd-YAG 1.064 μm laser at laser intensity about 10^{12} W/cm^2 . Experimental results indicate that the multicharged ions appear only when the laser interacts with the middle part of the pulsed beam, and the intensities of the multicharged ions increase dramatically by increasing the backing pressure of Kr gas, which indicates that the clusters in the beam is essential to the production of multicharged ions. From the experimental results, it is concluded that the cluster is ionized via multiphoton ionization and forms a nanoplasma ball, which can absorb the laser resonantly to further ionize the single charge ion to the high charge state.

Keywords Krypton, Nanosecond laser, Multicharged ions, Time-of-flight mass spectrum

随着激光技术,尤其是超快、超强激光技术的发展,强光场与原子、分子及团簇的相互作用,已成为近年来人们研究的热点^[1-8]. 团簇分子与超快超强光场之间的相互作用,可以产生高价态离子以及高能电子,并产生强 X 射线发射甚至实现“台式核聚变”,已引起广泛的重视. Kr 气及其团簇的强场电离,近年也有不少研究. 利用波长 1.064 μm 的皮秒 Nd-YAG 激光, Huillier 等人在 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 光场强度下,研究了氪气的多光子电离过程,观察到

+4 价的氪高价离子^[7]. Castleman 等人利用 800 nm, 功率密度为 10^{15} W/cm^2 的飞秒激光,对 Kr 原子团簇进行了电离实验,观察到 Kr^{17+} ^[8].

在 $10^{10} \sim 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 的纳秒光场下,在氙气载带苯分子束的激光电离实验中,我们曾观察到 C^{n+} ($n=2, 3$) 的高价离子现象^[9]. 本工作利用能量更高的基频 1.064 μm 、25 ns 的 Nd-YAG 激光和飞行时间质谱,研究了氙气分子束的激光电离过程. 我们首次在纳秒激光电离实验中,观察到了高达 Kr^{17+} 的高

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (20073042) and the Grant 863 Program of China (2002AA649010, 2001AA640302).

** Corresponding author, E-mail: hli@aiofm.ac.cn Received 18 November 2003.

价离子。

实验是在自制的飞行时间质谱仪上进行的^[9]。Kr 气由脉冲阀超声喷射形成脉冲束,穿过直径为 3 mm 的小孔进入电离室。能量为 300 mJ 的 1.064 μm 激光经过焦距为 75 mm 的透镜聚焦在脉冲束中心,功率密度接近 10¹² W/cm²。电离产生的离子由 1850 V 的电场加速进入自由飞行区进行质谱分析。实验中 Kr 的纯度大于 99.999%,所采集的信号都经过 128 次平均。我们研究了脉冲束不同位置 and 不同压力条件下的质谱分布特征。

调节脉冲阀的开启时间与激光之间的相对延迟,得到激光与脉冲束不同位置相互作用的结果,如图 1。可以看出,当激光作用于脉冲束的前段(0.62 ms)和后段(1.52 ms)时,观察到的离子信号仅为 Kr⁺,而当激光作用与脉冲束的中段(0.82 ~ 1.32 ms)时,不仅观察到 Kr⁺ 离子信号,还观察到非常强的高价离子信号 Krⁿ⁺(n = 2 ~ 17)。

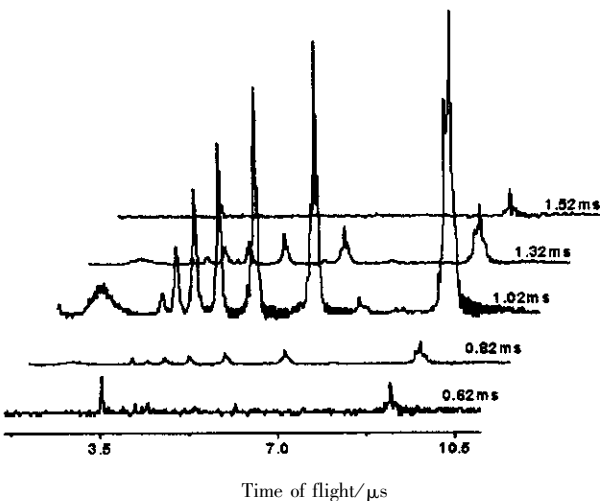


图 1 不同激光延迟下的飞行时间质谱图

Fig. 1 Time-of-flight mass spectra under different laser delay

为清晰展示 Kr 的高价离子峰,这里给出激光作用于脉冲束的中段时记录到的飞行时间质谱图,图 2 中可清楚观察到质谱中出现 1 ~ 7 价以及 11 ~ 17 价的 Kr 离子。

在脉冲束的前段和后段,束中团簇含量很少,主要为 Kr 原子的单体,而在脉冲束的中段,团簇含量大量增加。实验中观察到高价 Kr 离子,可能与分子束中存在 Kr 团簇有关,它们在强光场中的电离与单体有着不同的电离方式和过程。

通过改变脉冲束的束源压力,可以进一步说明高价离子的产生与团簇有关。图 3 是在脉冲束中段、

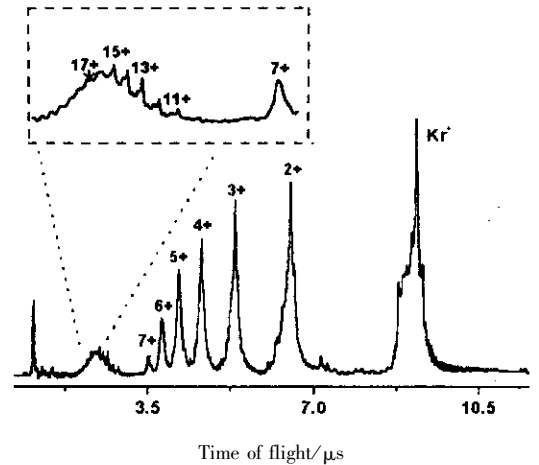


图 2 Kr 原子高价离子的飞行时间质谱图

Fig. 2 Time of flight mass spectrum of multicharged krypton ions

不同束源压力下得到的谱峰强度图。从图 3 中可以看出,随着背景压力的降低,高价离子信号的强度迅速减弱,当氪压力降到 0.2 MPa 时,已基本观察不到高价离子信号,说明高价离子的形成与脉冲束的压力有着非常密切的关系,只有在压力足够大的条件下,才能产生高价离子。而脉冲束中团簇的尺度也与压力有关,压力越大,团簇尺度也越大,其关系由 Hagen 参数关系式^[10]给出。

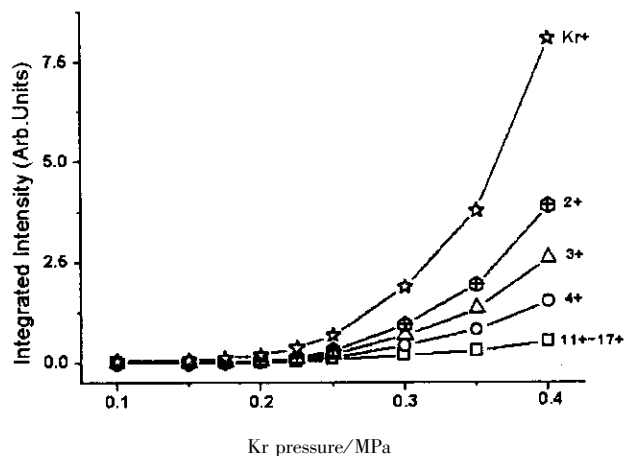


图 3 不同 Kr 背景压力下的谱峰强度图

Fig. 3 Integrated Intensities of several ions under different Krypton pressure

与我们实验结果相似的是, Castleman 等人利用功率密度为 10¹⁵ W/cm² 的飞秒激光对 Xe、Kr 原子团簇进行了电离实验^[8],观察到 Xe²⁰⁺ 和 Kr¹⁷⁺。并发现这些高价离子的产生,与团簇的存在与否有着直接的联系。与他们的飞秒激光实验相比,本工作为纳秒激光,光强比其低 1000 倍,而且高价离子的

强度分布规律明显不同. Castleman 的实验中高价离子的强度随着离子价态增大单调下降. 从图 2 可以看出, 我们实验中高价离子在 1~7 之间强度随离子价态减小, 但 8~10 价离子几乎观测不到, 11~17 价离子强度却随价态略有增大. 离子强度的不同分布表明实验中产生高价离子的机理与 Castleman 的实验可能存在不同.

在 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 光强下, 主要电离过程是多光子电离, 一般很难发生飞秒实验中的场致电离过程^[1-8]. 本实验中高价离子的形成与团簇的存在密切相关, 因而我们认为实验中高价离子产生的可能机理是 Ditmire 等提出的“纳米尺度等离子体”(nanoplasma)的流体动力学模型^[5], 即原子团簇吸收多个光子后被电离形成纳米尺度的等离子体小球, 当等离子体小球的尺寸膨胀到一定的值时, 会发生与激光场的共振吸收, 并产生高电离态的离子. 但对整个过程的认识, 特别是团簇对纳秒激光的吸收, 还需要进一步的实验和理论研究.

致谢: 对张伟老师及张先焱、阚瑞峰、王宾、刘颖、温丽华、梁峰、邵士勇等同学在实验中给予的大

力支持和有益讨论表示感谢.

参 考 文 献

- [1] Wabnitz H, Bittner L, de Castro, *et al. Nature*, 2002, **420**:482
- [2] Ditmire T, Tisch J W G, Springate E, *et al. Nature*, 1997, **386**:54
- [3] Siedschlag C, Rost J M. *Phys. Rev. A*, 2003, **67**:013404
- [4] Last I, Joshua J. *Phys. Rev. A*, 2000, **62**:013201
- [5] Ditmire T, Donnelly T, Rubenchik A M, Falcone R W, Perry M D. *Phys. Rev. A*, 1996, **53**:3379
- [6] Shao Y L, Ditmire T, Tisch T W G, Marangos J P, Hutchinson M H R. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**:3343
- [7] L'Huillier A, Lompré L A, Mainfray G, Manus C. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **48**:1814
- [8] Snyder E M, Buzza S A, Castleman Jr A W. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**:3347
- [9] Kong Xianglei (孔祥蕾), Luo Xiaolin (罗晓琳), Zhang Xianyi (张先焱), *et al. Acta. Phys. Chim. Sin.* (物理化学学报), 2003, **19**:469
- [10] Hagen O F, Obert W. *J. Chem. Phys.*, 1972, **56**:1793