

原子团簇对飞秒激光的吸收^{*}

林景全 张 杰 李英骏 陈黎明 吕铁铮 滕 浩

(中国科学院物理研究所光物理开放实验室, 北京 100080)

(2000 年 5 月 25 日收到, 2000 年 8 月 21 日收到修改稿)

使用 800 nm 飞秒脉冲激光研究了 Xe, Ar, He 等原子团簇对激光的吸收. 实验结果表明, 脉冲阀门的工作压力、所使用的气体种类等因素对团簇的尺寸及团簇对激光的吸收影响很大. 在阀门工作压力为 20×10^5 Pa、激光功率密度为 1×10^{15} W/cm² 的条件下, Xe 团簇对激光的吸收高达 45%. 激光预脉冲的存在会降低原子团簇对激光能量的吸收. 离子能量测量结果表明, 团簇对激光的高效吸收导致较高离子温度等离子体的生成.

关键词: 原子团簇, 飞秒激光, 能量吸收效率, 高能离子

PACC: 3640

1 引 言

近几年来, 随着超短脉冲激光技术的发展, 高强度激光与物质的相互作用已成为非常活跃的研究领域. 研究等离子体靶对激光能量的吸收是其中的一个较为重要的方面^[1]. 一般而言, 单原子组成的气体靶, 其原子密度不高, 对激光的能量吸收较弱(通常小于 5%), 激光与单原子气体靶相互作用后形成的等离子体温度低(小于 100 eV). 固体靶对激光的吸收效率虽然较高(可达 80% 以上), 但吸收的相当一部分能量通过热传导传给冷的靶体, 同时还通过流体力学膨胀等过程消耗掉一部分热量, 因此, 生成等离子体的温度通常小于 1 keV. 团簇作为介于气体、液体和固体之间的一种特殊的物质态, 超强激光与其相互作用时产生的等离子体可望区别于与气体和固体相互作用时的情况. 惰性气体原子团簇的产生主要通过脉冲阀门来实现. 惰性气体原子通过脉冲阀门的细小喷嘴喷入真空中, 气体经过绝热膨胀过程, 其随机热能转化为径向的定向动能, 导致气体的内部温度下降, 当阀门内气体的压力达到一定值时, 喷出的气体会变得过饱和, 形成一定尺寸的、由范德瓦耳斯力维系的原子团簇^[2]. 原子团簇在超短脉冲激光作用下表现出自己独特的性质, 它与单原子气体相比, 有高的激光吸收效率, 产生的等离子体具有高得多的温度; 与固体靶比较, 由团簇形成的纳

米尺度等离子体的外部为真空, 不会通过热传导损失能量. 这样, 团簇对激光的高效吸收及向周围环境的较小热损失, 使产生的等离子体较固体靶时包含更多高电离阶及能量的离子. 最近, 在超短脉冲激光与原子团簇相互作用过程中激光能量的吸收, 电子、高能离子的产生及软 X 射线辐射等方面的研究尤为关注. 实验上已观察到了 keV 电子、MeV 离子、keV 能量范围的 X 射线辐射^[3-5], 并在强激光辐照氙团簇实验中测量到了一定产额中子^[6]. 因此, 开展超短脉冲激光与原子团簇相互作用的研究, 对于无碎屑高能转换效率软 X 射线源的研制、内壳层粒子数反转机制 X 射线激光及台式高效中子源的实现等方面研究有着重要的意义.

本文研究了 Xe 等几种原子团簇对飞秒激光的能量吸收效率. 在此过程中, 测量到了由原子团簇爆炸所产生的高能离子.

2 实 验

实验是在中国科学院物理研究所 Quanra-Ray[®] TSA 型钛宝石飞秒激光装置上进行的. 该激光器由飞秒振荡器、脉冲展宽器、再生放大器及脉冲压缩器等几部分组成. 激光脉宽为 150 fs, 单脉冲输出能量为 5 mJ, 中心波长为 800 nm, 重复频率为 10 Hz. 实验中把用来产生原子团簇的脉冲阀门放在真空靶室内, 脉冲阀门的喷口直径为 0.8 mm, 气体脉冲宽度

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 19825110, 19974074 和 60078008)和国家高科技惯性约束聚变(ICF)基金资助的课题.

为 $200 \mu\text{s}$, 阀门的内部工作压力最高可达 $80 \times 10^5 \text{Pa}$. 采用 $f/6$ 透镜对激光束进行聚焦, 焦点处的激光峰值功率为 $1 \times 10^{15} \text{W}/\text{cm}^2$. 焦点位于气体喷嘴下方约 1mm 处. 采用 R-938 型激光能量计对激光能量进行测量, 能量计的探头对准入射激光. 为了去掉杂散光对测量结果带来的影响, 在能量计的探头前装有中心波长为 800nm 的干涉滤光片. 由于打靶形成的等离子体对入射激光具有折射效应, 为了使折射的激光也能被能量计收集到, 在激光焦点与能量计探头之间放置直径为 7cm 的 $f/3$ 收集透镜. 在与激光轴线成不同的角度上, 用光电倍增管分别对散射光进行监测, 监测结果表明可忽略散射光对实验结果的影响. 团簇对激光的吸收效率可由激光经过团簇介质后剩余的激光能量与入射激光能量之

比得到. 实验中为了研究激光预脉冲对团簇吸收激光的影响, 选取预脉冲的能量为主脉冲的 10% , 主-预脉冲的间隔为 50ps . 另外, 为了研究不同入射激光功率密度条件下团簇对激光的吸收, 我们利用可变光阑来改变入射到团簇表面上的激光能量. 实验中采用法拉第筒对团簇爆炸后产生的离子进行收集, 利用飞行时间法对离子的能量进行测量. 法拉第筒距激光焦点为 20cm , 其轴线与激光夹角为 45° . 除离子外, 激光与团簇相互作用时也会产生一些能量较高的电子. 为了防止这部分电子进入法拉第筒对离子能谱的探测产生影响, 我们在法拉第筒入口前加了强度为 $370 \times 10^{-4} \text{T}$ 的磁场, 来有效地阻止电子进入法拉第筒.

图 1 给出实验装置示意图.

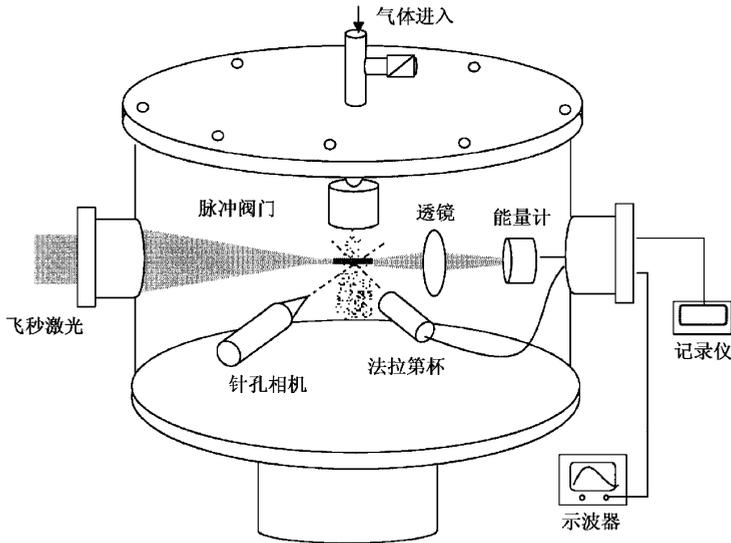


图 1 飞秒激光与原子团簇相互作用实验装置示意图

3 实验结果与讨论

首先测量了由惰性气体原子形成的团簇对飞秒激光的吸收. 图 2 给出室温下不同的阀门内部工作压力时, Xe 等团簇对激光的吸收曲线.

由图 2 可见, 在较低的工作气压下, 各种气体对激光的吸收均较低. 随着阀门所使用工作气压的升高, 激光的吸收率逐渐增大. 在实验中测得 Xe, Ar 团簇的激光吸收率分别达 45% 和 33% . Xe 在阀门工作压力仅为 $2 \times 10^5 \text{Pa}$ 时就表现出较大的吸收, 这表明在此压力条件下, Xe 经由细嘴喷出时已开始形成团簇. 然而, He 在整个增压过程中始终处于低

的激光吸收效率, 即使气压增至 $60 \times 10^5 \text{Pa}$ 后仍是如此, 这表明 He 在常温下很难形成大团簇. 由图 2 的实验结果可知: 在相同的工作条件下, 高 Z 元素的惰性气体比低 Z 元素的惰性气体易形成团簇.

可借助团簇的尺寸与压力、气体常量等参量的关系对所得实验结果进行分析. Hagenau 参量给出了生成团簇的尺寸与压力、气体常量、气体温度等参量的关系^[7]. Hagenau 参量可以表达为

$$\Gamma^* = k \frac{(d/\tan\alpha)^{0.85} P_0}{T_0^{2.29}}, \quad (1)$$

其中 d 为气体阀门的喷嘴的直径, α 与气体喷嘴形状有关的参量, P_0 为阀门内部的工作压力, T_0 为阀门内部气体的工作温度, k 是与气体种类有关的常

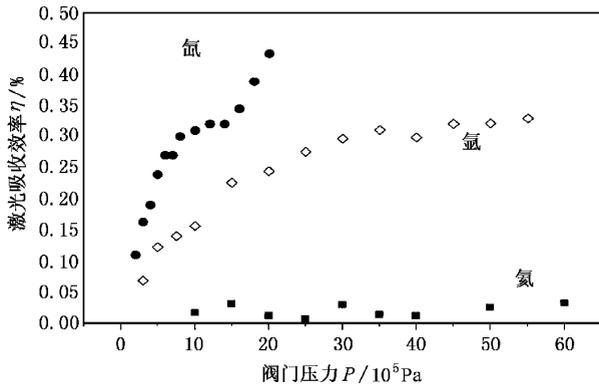


图2 原子团簇对激光的吸收随阀门压力 P 变化曲线

量 Xe, Ar, He 的值依次为 5500, 1650, $3.85^{[8]}$ 。已有的研究表明, 脉冲阀门工作时生成团簇的平均尺寸与参量 Γ^* 的关系近似为 $\Gamma^{*2.0-2.1[9]}$ 。由上面介绍可知, 气体经脉冲阀门喷出时生成团簇的平均尺寸随着阀门的工作压力、原子序数 Z 的增加而增大。由于在激光的作用下, 大团簇的扩散速度较小团簇的慢, 它维持高原子密度的时间相对长一些, 这样会增加对激光的吸收。因此, 同一种原子形成的团簇对激光的吸收会随着阀门压力的增加而增大; 在相同的实验条件下, 不同原子序数 Z 的原子所形成的团簇对激光的吸收会随 Z 的增加而增大。

图3 给出不同的工作气压(不同尺寸团簇)条件下, Ar 团簇对带有预脉冲的激光吸收曲线。

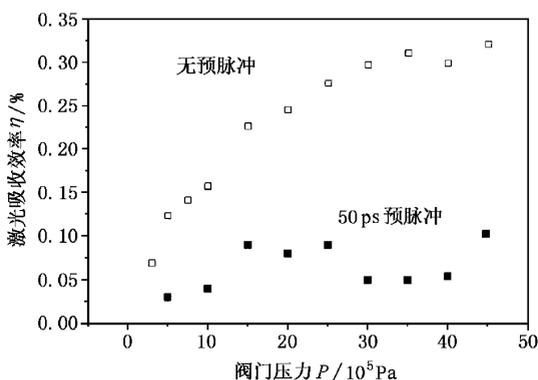


图3 不同阀门压力下氩团簇对激光的吸收

为了便于比较, 图3 同时给出不带预脉冲的激光照射条件下 Ar 团簇的吸收曲线。由图3 可见, 在其他实验条件相同的情况下, 团簇对带有 50ps 预脉冲激光的吸收远小于无预脉冲时的情况。

激光预脉冲会降低团簇对激光吸收这一实验结果, 可根据超短强激光作用下团簇的扩散过程加以

分析。当脉冲强激光与团簇相互作用时, 应尽量满足团簇由纳米尺度的近固体密度小球扩散到气体密度状态所用的时间与激光脉宽相当或略长于激光脉宽这一条件, 这样, 激光的能量才可能被团簇介质高效吸收。激光与团簇相互作用时, 团簇在激光脉冲的作用下开始膨胀, 团簇的主要膨胀机制为流体力学过程。我们所采用脉冲阀门喷嘴的气体通道为圆柱形, 团簇以音速膨胀, 团簇在激光的作用下, 由近固体密度扩散到气体密度状态所用的时间为 $^{[10]}$

$$\tau \approx r_0 \left(\frac{m_i}{ZkT_e} \right)^{1/2} \left(\frac{n_0}{n_e} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

其中 r_0 为初始的团簇半径, T_e 为团簇的电子温度, m_i 为离子质量, Z 为离子所带正电荷数。可以对 Ar 团簇由近固体密度扩散到低密度的气体状态所需的时间进行估算 $^{[10]}$, Ar 团簇的晶格间距为 0.38 nm, 假定其初始电子温度为 1 keV, $Z=8$, 扩散后的原子密度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 对于直径为 10 nm 的 Ar 团簇, 得到典型的扩散时间约为 1 ps。因此, 在激光与团簇相互作用时, 激光应选择超短脉冲工作方式, 一般而言, 针对不同尺寸的团簇, 激光脉宽的上限应为几个皮秒。在有一定强度预脉冲的激光作用下, 首先, 高密度的团簇介质高效吸收预脉冲能量而开始膨胀分离, 而当主脉冲到来之际, 它只能与由团簇散开的低密度气体原子相互作用, 这样就大大地降低了团簇对激光能量的吸收。由预脉冲降低团簇吸收的实验结果可知, 任何先于打靶主脉冲到来的激光辐射对于原子团簇实验都是有害的, 因此, 实验中应尽可能地提高激光脉冲的对比度, 以及应采取措施避免高功率激光的 ASE 辐射照射到团簇靶上。

图4 给出脉冲阀门内部工作压力固定在 $20 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的条件下, Ar 团簇的激光吸收随入射激光功

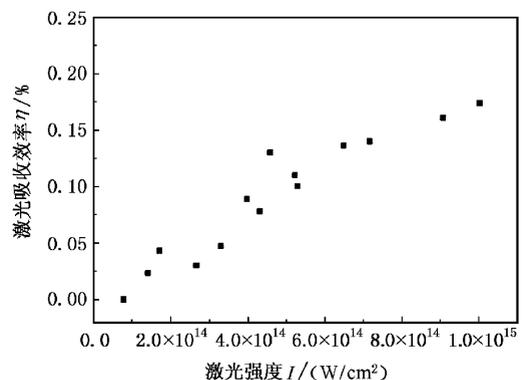


图4 氩团簇对激光吸收随入射激光强度的变化

率密度的变化曲线.

由图 4 可见,在我们激光所能达到的功率密度范围内(小于 $1 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$),Ar 团簇的吸收随激光功率密度的升高而逐渐增大.可根据激光与团簇相互作用的物理过程,对不同功率密度下团簇的激光吸收情况进行分析.Ar 团簇在激光场的作用下开始光电离,在激光功率密度达到一定值时,这种电离可发生在激光脉冲的前沿,使团簇内的电子密度迅速增加,由团簇形成纳米尺度的高密度等离子体,另一方面,形成的纳米尺度等离子体对入射激光场的屏蔽作用使团簇的光电离速率下降,此时,等离子体加热及膨胀速度变慢.当屏蔽作用加强之后,碰撞电离变成了团簇的主要电离机制,碰撞效应使等离子体的电子温度迅速升高,又加快了团簇的膨胀速度.当等离子体的电子密度下降到 $n_e/n_{\text{crit}} = 3$ (其中 n_{crit} 为等离子体的临界密度)时,团簇对激光的吸收因共振效应而迅速提高,这类似于激光与固体靶相互作用时激光的共振吸收现象^[10].当入射到团簇靶的激光功率较低时,团簇开始电离及其加热等过程的速度较慢,如果电子密度下降到 $n_e/n_{\text{crit}} = 3$ 的时刻发生在激光脉冲的后沿,或者发生在激光脉冲经过之后,则激光无法在团簇介质中经历共振吸收过程,这样,激光能量吸收就低.当入射激光功率增加时,团簇的电离、电子温度的升高及团簇膨胀等物理过程的速度都相应加快,团簇对激光场的共振吸收可发生激光脉冲期间的较强处,这样就提高了它对激光能量的吸收.

超短脉冲激光与原子团簇相互作用时的激光能量吸收高、热量损耗小,因此,可望能产生较高能量的离子.开展 Xe 离子能量的测量可对我们下一步工作,即利用氙团簇对超短脉冲激光的高效吸收而产生高能氙离子,高能氙离子间碰撞发生核聚变反应而产生中子的研究奠定基础.

图 5 给出典型的由 Xe 团簇爆炸后所得到的离子飞行时间曲线.图 5 中首先到来的窄尖峰是由于 Xe 团簇辐射出的 X 射线辐照法拉第筒收集时产生的光电子所致,后面紧跟着的较宽信号峰表明有大量的 Xe 离子产生.令人感兴趣的是有相当数量的

Xe 离子能量达 100 keV 以上.激光与团簇相互作用时,团簇高度电离,有两种力作用在团簇上:一是与热电子相关的压力.热电子膨胀、向外拉动冷的离子,产生流体力学爆炸,其爆炸的特征速度为等离子体声速.另一种作用在团簇上的力来自于团簇上的电荷积累.团簇中较热电子的平均自由程大到足以使之逃出团簇,如果这些热电子的能量足够高,他们可以克服团簇上的电荷积累对其的束缚,那么这些热电子可以同时离开团簇.如果团簇上的电荷积累足够多,则团簇将发生库仑爆炸.团簇产生的离子在以上两种力的作用下爆炸后会达到很高的能量.

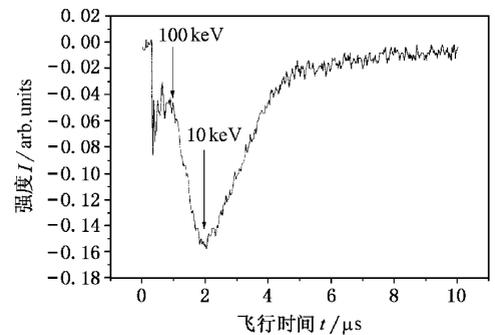


图 5 氙离子的飞行时间谱 ($P = 20 \times 10^5 \text{ Pa}$)

4 结 论

我们用 150 fs, 800 nm 的超短激光,在功率密度为 $1 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 的条件下,研究了原子团簇对激光的吸收.实验发现 Xe, Ar 等惰性气体由脉冲喷嘴向真空喷射时易形成团簇.团簇对激光的吸收远高于单原子气体靶,其值大小与固体靶相当.在激光功率密度小于 $1 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 时,团簇对激光的吸收随功率密度的增加而增大.激光预脉冲会降低团簇对激光能量的吸收.激光能量被团簇吸收后大部分沉积于离子中.

感谢赵理曾、冯宝华和张秀兰老师在实验中给予的帮助.

[1] D. F. Price, R. M. More, *Phys. Rev. Lett.*, **75**(1995), 252.
 [2] O. F. Hagena, W. Obert, *J. Chem. Phys.*, **56**(1972), 1793.
 [3] Y. L. Shao, T. Ditmire, *Phys. Rev. Lett.*, **77**(1996), 3343.

[4] T. Ditmire, J. W. G. Tisch, E. Springate, M. B. Mason, N. Hay, R. A. Smith, M. H. R. Hutchinson, *Nature*, **386**(1997), 54.

- [5] A. McPherson , B. D. Thompson , A. B. Borisov , K. Boyer , C. K. Rhodes , *Nature* **370** (1994) , 631. (1989) , 321.
- [6] T. Ditmire , J. Zweiback , V. P. Yanvsky , T. E. Cowan , G. Hays , K. B. Wharton , *Nature* , **398** (1999) 489. [9] J. Farges M. F. D. Ferady , G. Torchet , *J. Chem. Phys.* , **84** (1986) , 3491.
- [7] O. F. Hagen *et al.* , *Rev. Sci. Instrum.* , **63** (1992) 2374 [10] T. Ditmire , T. Donnelly , A. M. Rubenchik , R. Aa. Falcone , M. D. Perry , *Phys. Rev.* , **A53** (1996) , 3379.
- [8] J. Wormer , V. Guzielski , T. Moller , *Chem. Phys. Lett.* , **159**

ABSORPTION OF FEMTOSECOND LASER PULSES BY ATOMIC CLUSTERS*

LIN JING-QUAN ZHANG JIE LI YING-JUN CHEN LI-MING LÜ TIE-ZHENG TENG HAO
(*Laboratory of Optical Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China*)

(Received 25 May 2000 ; revised manuscript received 21 August 2000)

ABSTRACT

Energy absorption by Xe , Ar , He atomic clusters are investigated using laser pulses with 5mJ energy in 150fs duration. Experimental results show that the size of cluster and laser absorption efficiency are strongly dependent on several factors , such as the working pressure of pulse valve , atomic number Z of the gas. Absorption fraction of Xe clusters is as high as 45% at a laser intensity of $1 \times 10^{15} \text{W/cm}^2$ with $20 \times 10^5 \text{Pa}$ gas jet backing pressure. Absorption of the atomic clusters is greatly reduced by introducing pre-pulses. Ion energy measurements confirm that the efficient energy deposition results in a plasma with very high ion temperature.

Keywords : atomic clusters , femtosecond laser , energy absorption efficiency , high energy ions

PACC : 3640

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 19825110 , 19974074 and 60078008) and the Inertial Confinement Fusion Foundation of the China National High Technology Development Program.