

Ar 原子团簇与飞秒强激光相互作用产生的 高能离子计算*

朱频频 刘建胜 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2003 年 2 月 10 日收到 2003 年 4 月 14 日收到修改稿)

利用改进的“等离子体球”模型模拟了 Ar 原子团簇与飞秒强激光相互作用的物理过程. 改进后的模型弱化了原模型在共振吸收附近团簇内部屏蔽电场的异常增强行为, 从而使其更为合理, 计算得到的 Ar 离子平均动能与以往的实验结果符合. 还定量地研究了 Ar 离子平均动能及其平均电荷态与团簇尺寸以及激光参数之间的变化关系.

关键词: 团簇, 飞秒激光, 高能离子, 共振吸收

PACC: 5250J, 5240M, 3640

1. 引 言

近年来, 原子团簇与强激光相互作用成为一个十分活跃的研究领域. 这方面最早的研究来自 McPherson 小组, 他们于 1993 年在 Kr, Xe 团簇 248nm 的超强激光脉冲作用时发现了大量异常的内壳层 x 射线辐射^[1]. 这以后, 许多其他研究小组包括 Lezinus 小组^[2]、Rose-Petruck 小组^[3]以及 Ditmire 小组等对于团簇与强激光相互作用这一新奇的领域展开了多方面研究. 许多实验结果表明团簇对激光能量有非常强的吸收效率^[4], 并且在实验中发现了高产额的高能 x 射线辐射(100—5000eV)^[5,6]、达到 1MeV 的高能量离子^[7,8], 以及 keV 量级的高能量电子^[9]. 更让人惊奇的是 Livermore 实验室用 35fs 的强激光脉冲照射 D 团簇时, 获得了高产额的中子, 实现了所谓的“台式聚变”^[10].

研究人员从不同角度建立了几种理论模型来描述团簇与强激光的相互作用过程, 并试图解释实验中观察到的现象. McPherson 等人认为在团簇与激光的相互作用过程中外壳层电子的集体激发造成了内壳层的空缺, 从而产生了空心原子, 并进而解释了他们在实验中观察到的原子内壳层 x 射线辐射现象^[1]. 这种模型本身并不完善, 理论也不是很清楚,

无法给出定量的描述. Rose-Petruck 等人提出了“电离点火”模型^[3], 认为激光场与离子场的共同作用导致了团簇的高速电离, 从而产生高电离态的离子. 但是这种模型采用 Monte-Carlo 方法模拟团簇在激光场中的运动, 不能描述团簇内部原子的集体行为, 而且只适用于模拟较小的团簇. 另外还有一种简单的库仑爆炸模型^[11], 它跟踪了单个电子在 1100 个原子的 Xe 团簇中的运动轨迹, 认为所有的自由电子都会在一个光周期的时间内离开团簇, 并进而发生库仑爆炸. 但是对于大尺寸团簇, 这种库仑爆炸的图像并不完全正确, 此时使用 Ditmire 等人提出的等离子体球模型^[12]却相当合适. 在等离子体球模型中, 团簇被看成是一个高密度的等离子体小球, 前提是团簇足够大以能使大多数电子被约束在团簇内. 团簇中的每个原子感受到的是等离子体球极化后产生的屏蔽场, 原子的电离机理主要是在屏蔽场作用下的隧道电离和电子碰撞电离, 团簇通过逆韧致吸收被加热, 并伴随流体力学膨胀和库仑爆炸. 这个模型较好地解释了团簇的膨胀过程、高能离子和高能电子的产生, 以及团簇的共振吸收效应等实验现象.

但是等离子体球模型对共振吸收没有做出详细描述, 并且似乎过高地估计了共振吸收对团簇内部电场的增强行为. 在某些情况下, 该模型推断团簇内部电场相对真空的场强能增强至数百倍甚至更

* 国家自然科学基金(批准号 29890210)和国家重点基础研究项目资助的课题.

大^[13].如果共振点恰好在激光脉冲的峰值附近(可以通过调节团簇尺寸和激光脉冲宽度实现),团簇内部的电场强度可以达到 10^{21} W/cm²,这样高的场强可以直接通过 OFI 电离产生超高电荷态 Kr²⁸⁺,但是这样高的价态在实验中并没有发现.另外,用此模型计算出的离子平均动能要比实验值大得多,更接近于离子的最高动能^[12].

为了更合理地解释这些现象,我们对等离子体模型作了改进^[13,14],改进后的模型特别适用于解释团簇与超短超强激光相互作用过程中高电荷态离子的产生以及离子的平均动能.本文将使用这一模型来分析 Ar 原子团簇与飞秒强激光脉冲相互作用产生的离子平均动能以及其电荷态的变化过程,并给出平均离子动能、离子电荷态与团簇大小,以及激光功率密度之间的变化关系.之所以选择 Ar 团簇,是因为可以与文献[15]的实验工作相比较,并可以对进一步的实验工作做出理论指导.

2. 改进的等离子体球模型简介

改进的等离子体球模型在文献[13]中给出了较为详细的描述,这里将只是简略地介绍这个模型.在原先的等离子体球模型中,团簇被近似地看作是一个密度均匀的等离子体球.由于团簇的尺寸相对激光波长小得多,所以团簇内部场强的分布也被认为是均匀的,其值由 $E = 3E_0/|\epsilon + 2|$ 给出, E_0 为真空中的场强.等离子体的介电常数由 Drude 模型给出, $\epsilon = 1 - \omega_p^2/\omega(\omega + i\nu)$,其中 $\omega_p = \sqrt{4\pi e^2 n_e/m_e}$ 为等离子体频率, ν 为电子碰撞电离频率, ω 为激光频率.这样,当电子密度降低到 $3n_c$ 附近,即达到共振吸收时,团簇内部的场强和加热效率明显增强,从而导致电子温度和团簇膨胀速度急剧上升.但是这种增强的程度却不太合理,以致造成引言中提到的那些不合理的推论(超高电荷态 Kr²⁸⁺ 的产生和远大于实验值的离子平均能量),因此需要弱化这种增强.

考虑在共振吸收附近,电子温度和密度变化如此快的情况下,准静态的介电常数已经不再适用.通过求解 Maxwell 方程组,采用了一个等效介电常数 $\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon + i\dot{\epsilon}/\omega$ 来代替准静态介电常数.当 ϵ 变化速率较小时, $i\dot{\epsilon}/\omega$ 可以忽略,这时准静态的介电常数仍然适用,而在共振吸收附近, $\dot{\epsilon}$ 的变化速率大到可以与 ω 相比,此时 $i\dot{\epsilon}/\omega$ 的值不能忽略,这样的结果

就是降低了对团簇内部电场的增强程度,从而给出较为合理的解释.

本文主要利用这个模型来计算不同条件下相互作用产生的高能离子的动能及其电荷态.先给出平均 Ar 离子动能的计算方法.模型中假设团簇膨胀的速度均匀,从而离子沿团簇半径方向逃逸速率与其所在的半径位置成正比,因此可以对整个团簇内的离子动能进行积分以得到离子的平均动能:

$$\bar{E} = \frac{m_i v_i^2}{2} \int_0^R \frac{r^2 4\pi r^2}{R^2} dr \frac{3}{4\pi R^3} = 0.3 m_i v_i^2, \quad (1)$$

其中 $m_i = 40m_p$ (m_p 为质子质量)为 Ar 离子的质量, v_i 为团簇的膨胀速度.

3. 计算结果与讨论

图 1 示出一个 5.5nm(3000 个原子)的 Ar 团簇在一个波长为 780nm、脉宽为 150fs 以及峰值功率密

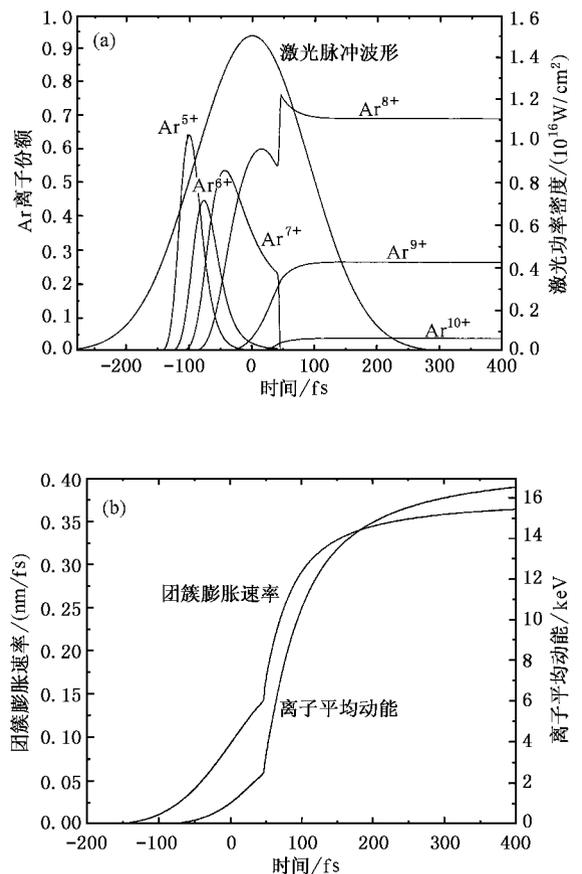


图 1 直径为 5.5nm(3000 个 Ar 原子)的 Ar 团簇与波长为 780nm、脉宽为 150fs、峰值功率密度为 1.5×10^{16} W/cm² 激光脉冲相互作用过程中 Ar 离子(从 Ar⁵⁺ 到 Ar¹⁰⁺)份额(a)和团簇膨胀速度及离子平均动能(b)随时间的变化关系

度为 $1.5 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 激光脉冲作用下的模拟过程. 从 Ar^{5+} 到 Ar^{10+} 的离子分布与相互作用时刻的关系示于图 1(a), 相互作用结束后 Ar 离子平均电荷态为 8.5^+ . 团簇膨胀速度以及由它通过(1)式计算得到的离子平均动能与相互作用时刻的变化关系示于图 1(b), 最终产生的平均离子动能约为 17keV. 图 1 中有一个 Ar^{8+} 离子产额突然增加, 以及离子平均动能急剧上升的过程, 这些显然是共振吸收造成的.

文献 [15] 中给出了一个我们实验测得的 Ar 离子能谱, 其 Ar 离子最高能量为 200keV 左右, 由离子能谱计算得到的平均能量为 15keV, 这和我们计算的离子平均动能结果相当接近. 但是在文献 [12] 中计算得到的离子动能却更接近于实验测得的离子最高能量, 这应该就是未改进的等离子体球模型过高地估计共振吸收的作用所造成的结果. 所以, 我们的改进模型非常适合于定量解释团簇与强激光相互作用产生的高能离子.

本文还计算了不同条件的团簇与激光相互作用下, 离子平均动能及其电荷态的变化情况.

3.1. 不同尺寸的团簇

图 1 中共振吸收点在激光脉冲的峰值以后到达, 对于小于 5.5nm 的团簇, 其膨胀速度较快, 共振吸收也会提前到达, 如果共振吸收正好发生在激光脉冲的峰值到达时, 共振吸收达到最大值, 而对于更小的团簇, 其共振吸收也会降低. 另一方面, 对于比 5.5nm 更大的团簇, 其膨胀速度更慢, 共振吸收就会到达激光脉冲的后沿, 这时激光功率较低, 共振吸收变得较小. 在不考虑共振吸收的情况下, 大团簇的能量吸收效率较高, 但事实上, 越大团簇的共振吸收也会越弱, 所以存在一个最佳的尺寸使得团簇对激光能量的吸收效率最高.

图 2(a) 示出 Ar 离子平均动能与团簇尺寸的变化关系曲线, 两条曲线分别对应激光脉冲的峰值功率为 1.5×10^{16} 和 $2.0 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$, 激光波长以及脉冲宽度均分别为 780nm 和 150fs. 从图中可以很清楚地看到存在最佳的团簇尺寸, 使得离子获得动能最大: 当激光脉冲峰值功率为 $1.5 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 时, 最佳直径在 7nm 左右, 对应约 7000 个 Ar 原子, 而当峰值功率为 $2.0 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 时, 在 8nm 左右, 对应约 9000 个 Ar 原子. 因为提高激光的功率密度会加速团簇的初始电离速率以及团簇的膨胀速率, 所以会提前共

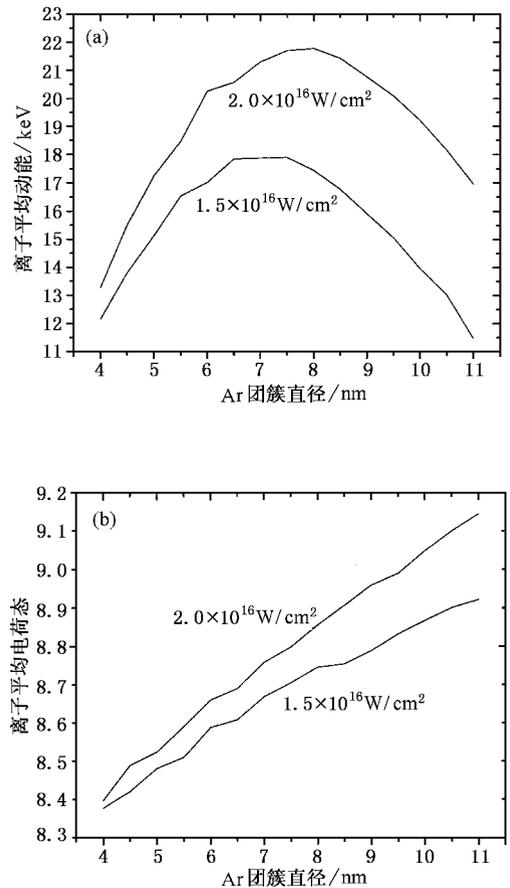


图 2 Ar 团簇与波长为 780nm、脉宽为 150fs、峰值功率密度为 1.5×10^{16} 和 $2.0 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 的激光脉冲相互作用时离子平均动能(a)和离子平均电荷态(b)随团簇尺寸的变化关系

振吸收的到达, 最佳团簇尺寸也随之变大.

同时也计算了 Ar 离子的平均电荷态与团簇尺寸的变化关系, 如图 2(b)所示. 从图中可以看出, Ar 离子的平均电荷态一直随团簇尺寸的增大而增大, 亦即在相同的激光条件下, 越大的团簇其电离的程度越深, 并不存在一个最佳的团簇尺寸使得电离程度最深. 这可以通过团簇内离子的电离机理来解释: 在团簇膨胀的早期, 电离机理主要是激光场的隧道电离, 当团簇内的电子密度超过临界密度时, 团簇内受到的屏蔽场要低于激光场, 而此后团簇内的电子主要通过逆韧致吸收加热, 并伴随团簇的膨胀和与离子的碰撞电离过程; 由于电子密度很高, 电子碰撞电离相对于场电离而言起主要作用, 对于较大尺寸的团簇, 其膨胀速度较慢, 所以电子的加热和电子碰撞电离的时间要长, 因此越大的团簇其电离的程度越深, 能产生更高的平均电荷态.

3.2. 不同功率密度激光脉冲作用下的情况

较高的激光功率密度会加速团簇的初始电离速率以及团簇的膨胀速率,也会提前共振吸收的到达,所以与团簇尺寸的变化情况相似,也会存在一个恰当的激光功率密度,使得共振吸收达到极大值.对于 5.5nm(约 3000 个 Ar 原子)的 Ar 团簇,这个激光峰值功率密度约为 $1.2 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$;而 4.0nm(约 1200 个 Ar 原子)的 Ar 团簇则约为 $1.1 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$.

图 3 示出 4.0 和 5.5nm 两种尺寸的 Ar 团簇在与波长为 780nm、脉宽为 150fs 的激光脉冲作用时 Ar 离子平均动能、离子平均电荷态以及自定义的能量吸收效率分别随激光功率密度变化的曲线.我们计算的激光功率密度变化范围约为 $10^{15} - 10^{17} \text{ W/cm}^2$,这是可以在实验室中较容易实现的.在这些功率密度的激光脉冲作用下,团簇内的电子密度在相互作用开始后很短的时间内就增加到远大于 $3n_c$ 的地步,然后随团簇的膨胀,电子密度会降低到发生共振吸收的条件.

图 3 中,Ar 离子平均动能随激光功率的增加而增加,在共振吸收附近迅速增加,并存在一个极大值;Ar 离子的平均电荷态的变化也类似.可以很清楚地看到共振吸收机理在团簇与飞秒强激光相互作用中的重要地位.

由于激光功率密度的变化会影响团簇吸收能量的绝对值大小,为了反应团簇对激光能量的吸收效率,我们定义了一个简单的能量吸收效率.考虑到团簇吸收的能量大部分转化为离子的动能,而对于聚焦情况和脉宽都相同的激光脉冲,其功率密度与其脉冲能量成正比,因此定义离子平均动能与激光功率密度的比值为能量吸收效率.能量吸收效率随激光脉冲峰值功率密度变化的关系如图 3(c)所示.由于团簇对激光能量的吸收存在饱和效应,对于很高能量的激光脉冲,其吸收效率反而会降低,并可以清楚地看到共振吸收会提高团簇对激光能量的吸收效率.图 3 中 4.0nm 的 Ar 团簇对峰值功率密度为 $2 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 的激光脉冲能量吸收效率最高,而 5.5nm 的 Ar 团簇则对 $3 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 的激光脉冲能量吸收效率最高.另外图中还表明在低功率密度的激光脉冲作用下,小团簇的吸收效率较高,而随激光功率密度的提高,大团簇对能量的吸收效率要逐渐超过较小的团簇.

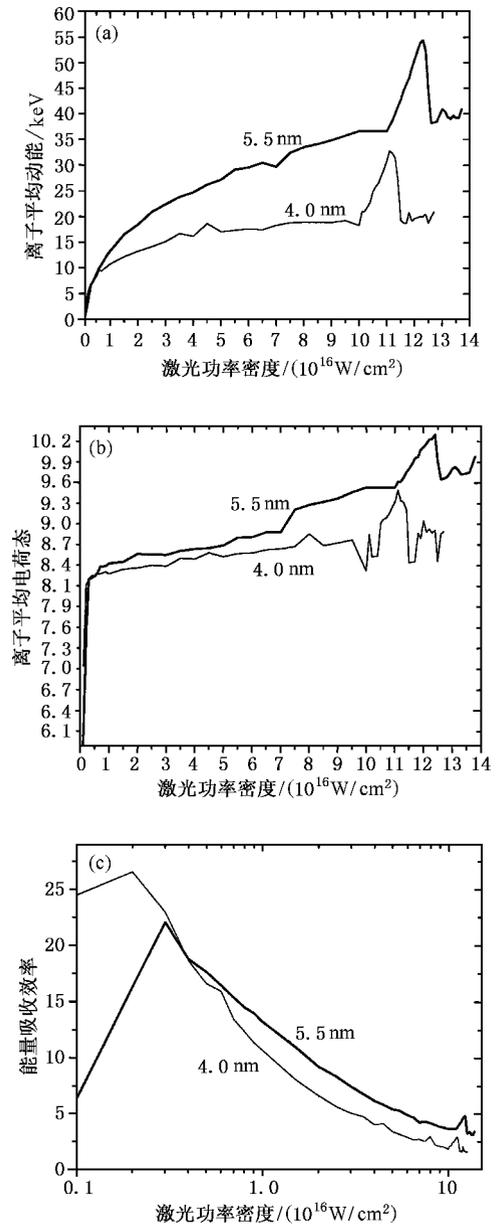


图 3 直径为 4.0 和 5.5nm 的 Ar 团簇与波长为 780nm、脉宽为 150fs 的激光脉冲相互作用时离子平均能量 (a) 离子平均电荷态 (b) 和能量吸收效率 (c) 随激光功率密度的变化关系

4. 结 论

本文利用改进的等离子体球模型研究了 Ar 团簇与飞秒强激光脉冲的相互作用过程.主要针对相互作用中高能离子产生过程进行了分析,计算得到的离子平均能量与实验值十分接近.另外,还定量研究了离子平均能量、平均电荷态与团簇尺寸以及

激光功率密度之间的变化关系,发现存在最佳的团簇尺寸和最佳的激光功率密度使得团簇对激光能量

吸收效率最高,这也许能为我们正在进行的实验提供理论指导.

- [1] McPherson A ,Luk T S ,Thompson B D ,Boyer K and Rhodes C K 1993 *Appl. Phys. B : Photophys. Laser Chem.* **57** 337
- [2] Lezinus M ,Dobosz S ,Normand D and Schmidt M 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 261
- [3] Rose-Petrucci C ,Schafer K J ,Wilson K R and Barty C P L 1997 *Phys. Rev. A* **55** 1182
- [4] Ditmire T ,Smith R A ,Tisch J W G and Hutchinson M H R 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 3121
- [5] Ditmire T ,Donnelly T ,Falcone R W and Perry M D 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 3122
- [6] Zweiback J ,Ditmire T and Perry M D 1999 *Phys. Rev. A* **59** 3166
- [7] Ditmire T ,Springate E ,Tisch J W G ,Shao Y L ,Mason M B ,Hay N ,Marangos J P and Hutchinson M H R 1998 *Phys. Rev. A* **57** 369
- [8] Ditmire T ,Tisch J W G ,Springate E ,Mason M B ,Hay N ,Smith R A ,Marangos J and Hutchinson M H R 1997 *Nature* **386** 54
- [9] Shao Y L ,Ditmire T ,Tisch J W ,Springate E and Marangos J P 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 3343
- [10] Zweiback J ,Smith R A ,Cowan T E ,Hays G ,Yanovsky V P and Ditmire T 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 2634
- [11] Last I and Jortner J 1998 *J. Phys. Chem. A* **102** 9655
- [12] Ditmire T ,Donnelly T ,Rubenchik A M ,Falcone R W and Perry M D 1996 *Phys. Rev. A* **53** 3379
- [13] Liu J S ,Li R X ,Zhu P P ,Xu Z Z and Liu J R 2001 *Phys. Rev. A* **64** 33426
- [14] Liu J S ,Li R X ,Zhu P P ,Xu Z Z and Liu J R 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1121 (in Chinese)[刘建胜、李儒新、朱频频、徐至展、刘晶儒 2001 物理学报 **50** 1121]
- [15] Li Z ,Lei A L ,Ni G Q and Xu Z Z 2000 *Chin. Phys. Lett.* **17** 99

Calculation of high-energy ions exploded from argon clusters in high intensity femtosecond laser pulses^{*}

Zhu Pin-Pin Liu Jian-Sheng Xu Zhi-Zhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China)

(Received 10 February 2003 ; revised manuscript received 14 April 2003)

Abstract

The modified nanoplasma model has been used to simulate the interaction of large Ar clusters with high intensity femtosecond laser pulses. The modified model has weakened the huge enhancement of electric field inside the clusters , thus provides a more reasonable explanation. The calculated mean kinetic energy of Ar ions is in good agreement with our previous experimental results. For further experimental work , it is the quantitative analysis of the variation of the mean kinetic energy and charge states of Ar ions exploded from the interactions with the cluster size and laser intensity.

Keywords : cluster , femtosecond laser , high-energy ions , resonance absorption

PACC : 5250J , 5240M , 3640

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 29890210) , and the Stake Key Development Program for Basic Research of China.