

乙醚团簇在纳秒激光场中的多价电离 及其电子能量分布的研究^{*}

张娜珍^{1)†} 仓怀文¹⁾ 王卫国¹⁾ 苗书一¹⁾ 金峰^{1)‡} 吴庆浩^{1)‡} 花磊^{1)‡} 李海洋^{1)‡}

1) 中国科学院大连化学物理研究所, 分子反应动力学国家重点实验室, 大连 116023)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2008 年 11 月 3 日收到, 2008 年 12 月 22 日收到修改稿)

用 5 ns, 1064 nm 的脉冲 Nd:YAG 激光, 研究了乙醚团簇与纳秒激光的相互作用. 在 10^{11} W/cm² 量级光强下, 观察到价电子完全剥离的 O⁶⁺, C⁴⁺, 且这些高价离子的强度比值基本不随激光能量而变化. 用阻滞电压方法测量了电离过程中溢出电子能量分布, 在最大激光能量 4.0×10^{11} W/cm², 溢出电子的平均能量为 56 eV, 最大能量为 102 eV. 实验结果支持了高价离子产生的“多光子电离引发-逆韧致吸收加热-电子碰撞电离”三步模型, 表明电子碰撞电离是高价离子形成的主要途径. 另外, 计算结果表明, 团簇中电子-离子的库仑屏蔽可以有效降低高价离子的电离势, 促进高价离子的产生.

关键词: 高价离子, 电子能量, 纳秒激光, 乙醚团簇

PACC: 3280, 3640

1. 引 言

随着超短激光脉冲放大技术的发展, 强激光场与原子、分子及团簇的相互作用已经成为一个重要的研究领域^[1-9]. 在强激光作用下团簇会发生库仑爆炸, 产生高价态离子以及高能电子, 并可以产生 X 射线, 已有多个理论和计算模型可解释这种团簇增强的激光物质作用过程^[3-6]. 目前激光与团簇作用中研究较多的为小原子分子团簇如 Xe, Kr, Ar, H₂ 等的电离, 由于多原子分子的组成复杂, 多原子分子团簇在强激光场作用下的实验研究相对较少, 对其爆炸过程的机理分歧也较大. 吴成印等^[10, 11]应用脉宽 110 fs, 功率密度 $7 \times 10^{13} - 3 \times 10^{15}$ W/cm² 的激光对甲醇分子进行了研究, 判定碳氧高价离子是直接通过甲醇分子离子库仑爆炸产生的, 并认为几何准直机理对甲醇分子各向异性分布起主导作用. Sizos 等^[12]研究了碘甲烷在皮秒强光下的多价电离, 认为高价离子是由不稳定的高价母体离子所产生的碎片离子通过场致电离产生的. Shimizu 等^[13, 14]用功率密度为 $10^{16} - 10^{17}$ W/cm² 的飞秒激光对苯、六氟苯的库

仑爆炸过程进行研究, 认为六氟苯中氟离子的存在影响了 C 高价离子的角度分布, 导致其与苯库仑爆炸产生的 C 高价离子角度分布不同.

最近, 用波长为 532 nm 或 1064 nm, 脉宽为 25 ns 的 Nd:YAG 激光器, 对苯、吡喃、碘甲烷、甲醇等团簇进行电离时, 发现激光功率密度低至 $10^9 - 10^{11}$ W/cm² 时仍然可以观察到高平动能的高价离子, 并提出“多光子电离引发-逆韧致吸收加热-电子碰撞电离”的三步理论模型来解释纳秒光场中高价离子的产生^[15-20]. 按照这个模型, 电离过程中应存在高能电子. 前期的实验中由于实验条件的限制, 我们未能测量此类电离过程中的电子能量分布. 为了进一步考察多原子分子在强激光场作用下产生高价离子的规律, 本文用波长 1064 nm, 脉宽 5 ns 的激光研究了乙醚分子团簇的电离, 观察到了 C^{q+} ($q = 2 - 4$) 以及 O^{q+} ($q = 2 - 6$) 的高价离子, 研究了高价离子强度及比值随激光参数的变化趋势, 并用阻滞电压法测量了不同激光能量下的电子能量分布, 详细讨论了电子能量分布与高价离子的关系, 探讨了高价离子的产生机理.

^{*} 国家自然科学基金(批准号 20573111), 国家自然科学基金重点项目(批准号 40637036)资助的课题.

[†] E-mail: hli@dicp.ac.cn

2. 实验方法

实验装置为一套自制的激光电离飞行时间质谱仪,如图 1 所示.系统由束源室,双极飞行时间质谱仪,激光系统以及数据采集系统组成.束源室和双极飞行时间质谱仪分别由一个 110 L/s 和 600 L/s 的分子泵维持真空.当脉冲阀进样频率为 5 Hz 时,束源室和质谱仪处的真空分别约为 1 Pa 和 1×10^{-3} Pa.由 0.2 MPa 高纯氦载带的乙醚样品经脉冲阀(Bosch,

026 133 025A, 喷口直径为 0.5 mm)喷射,通过直径 1.0 mm 的微孔进入飞行时间质谱电离区.

为提高检测效率,实验中的离子和电子分别通过不同的引出-加速电压检测.质谱电离区放置四块直径为 90 mm 的圆环电极板,其中心孔均为 10 mm.其中第 1 与第 2、第 3 与第 4 电极板间的距离为 10 mm,第 2 与第 3 极板间距为 20 mm.电离区的 1、4 两块电极板始终接地.当检测离子时,分别在第 2、3 两块极板上施加 1680 V 和 2800 V 的高压,离子经过 500 mm 长的自由飞行管后由微通道板(MCP1)检测.

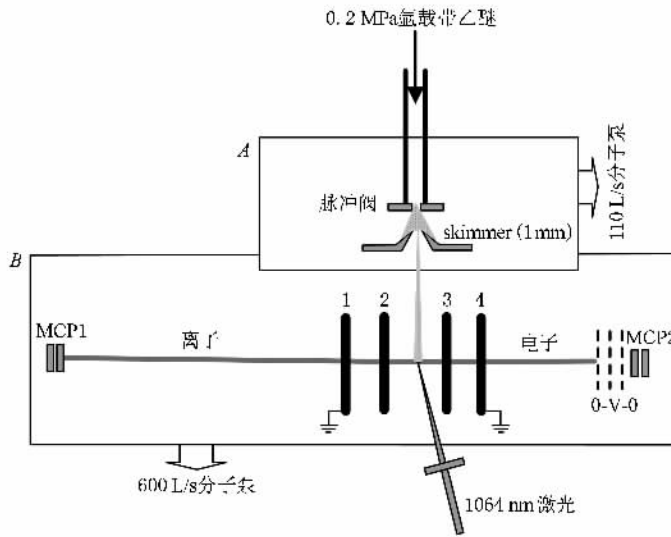


图 1 激光电离乙醚团簇装置示意图(A 为束源室, B 为双极飞行时间质谱)

电子能量测量采用 Springate 等人所用的阻滞电压法^[21].测量电子能量分布时,第 2、3 块极板分别施加 -1000 V 和 -200 V 的高压,引出电子自由飞行 200 mm 后,穿过一个 0-V-0 结构的阻滞电压装置到达检测器 MCP2.在测量电子能量时需在 0-V-0 结构的中心栅网施加阻滞电压 V ,只有能量超过 eV 的电子才能被 MCP2 检测.而到达 0-V-0 结构的电子的能量等于电子在团簇中的能量 E 与在质谱引出场中获得的势能 eV_r 之和,即 $eV = E + eV_r$.实验测到的电子信号强度可以表示为

$$S(E) = \sum_E n(E) \rho(E), \quad (1)$$

其中 E 为电子能量, $n(E)$ 是电子能量为 E 的电子数目, $S(E)$ 为检测到的电子信号强度, $\rho(E)$ 为电子能量为 E 时电子的接收效率.连续改变阻滞电压 V ,可以得到电子信号 $S(E)$ 随电子能量 E ($E = eV - eV_r$) 的变化曲线,对此曲线微分后除以相应电子能量的接收效率,即可得到电离过程中产生电子的

能量分布.电子的接收效率 $\rho(E)$ 的高低主要取决于仪器的相关参数以及电子的空间和能量分布,实验中电子能量 E 小于 11 eV 时收集效率可达到 100%,而电子能量 E 为 40 eV 的电子收集效率为 37%.关于接收效率 $\rho(E)$ 的计算方法详见文献 [22, 23].需要特别指出,文章中给出的电子能量分布均为考虑收集效率后的结果.实验中,我们近似认为电子在引出场中获得的能量 eV_r 大小等于激光光斑处的电势,本实验中 V_r 为 -425 V.但是由于激光光斑直径约为 0.1 mm,不同光斑位置产生的电子在引出场中获得的能量会有差异,由此导致的电子能量测量误差约为 ± 2 eV.

脉冲阀的开启、激光的触发及离子信号的采集之间的时序关系,由自制的五通道脉冲延迟发生器控制.实验中,利用 Nd:YAG 激光器(New Wave Tempest)的基频 1064 nm 作为光源,脉冲宽度为 5 ns,产生的最大激光能量约 160 mJ/脉冲,激光焦点处最

大功率密度约为 $4.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$. 激光束经过焦距为 150 mm 的透镜聚焦在电离区中心, 与脉冲束垂直正交. 激光偏振方向与飞行轴垂直, 所采集的信号经过示波器 (Lecroy432) 1000 次平均后存储. 实验中载气 Ar (南京特种气体厂) 的纯度大于 99.999%, 乙醚液体为分析纯 (纯度 99.7%, 沈阳化学试剂厂).

3. 实验结果及讨论

3.1. 乙醚团簇的激光电离质谱图

图 2 是激光电离乙醚团簇的典型飞行时间质谱图. 所用的激光波长为 1064 nm, 能量为 $3.1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$. 可以看到, 谱图中存在着一系列乙醚多光子电离的产物, 如 $\text{C}_4\text{H}_9\text{O}^+$, $\text{C}_3\text{H}_7\text{O}^+$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}^+$, $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+$, CH_3O^+ , C_2H_5^+ , 没有观测到乙醚的母体离子. 这与王艳等人^[24]报道的在 355 nm, 10^8 W/cm^2 激光能量下乙醚的多光子电离结果基本相同. 值得注意的是, 除多光子电离碎片离子峰之外, 谱图中还存在着一些 C, O 的高价离子信号, 分别为 O^{6+} , C^{4+} , $\text{C}^{3+}/\text{O}^{4+}$, C^{2+} , O^{2+} , 并且 O^{6+} , C^{4+} 离子强度明显高于其他高价离子强度.

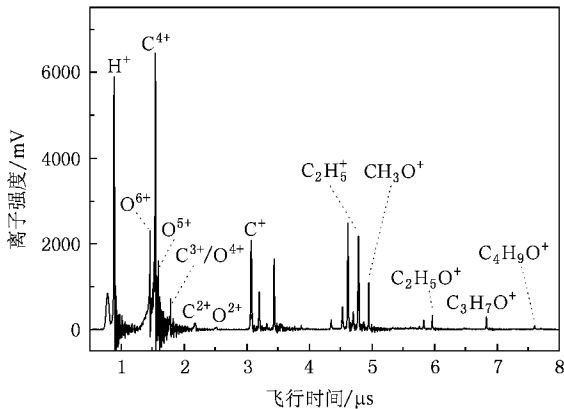


图 2 激光电离乙醚团簇的典型飞行时间质谱图

3.2. 激光能量对高价离子强度及比值的影响

通过改变激光能量, 研究了激光能量对高价离子产生的影响. 图 3(a) 给出了 O^{6+} , C^{4+} 离子积分强度随激光能量的变化趋势, 图 3(b) 为 $\text{O}^{6+}/\text{C}^{4+}$ 比值随激光能量的变化趋势. 可以看到, O^{6+} , C^{4+} 离子积分强度随着激光能量的增加而增大, 当激光能量由 $1.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 增大至 $4.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 时, 高价离

子的积分强度由 1 增加至约 100, 增大了近两个数量级. 但是在此激光能量范围内, $\text{O}^{6+}/\text{C}^{4+}$ 的比值仅由 0.50 变化至 0.66. 这表明虽然激光能量的增加可以增大高价离子的绝对强度, 但对高价离子之间的比值影响却很小.

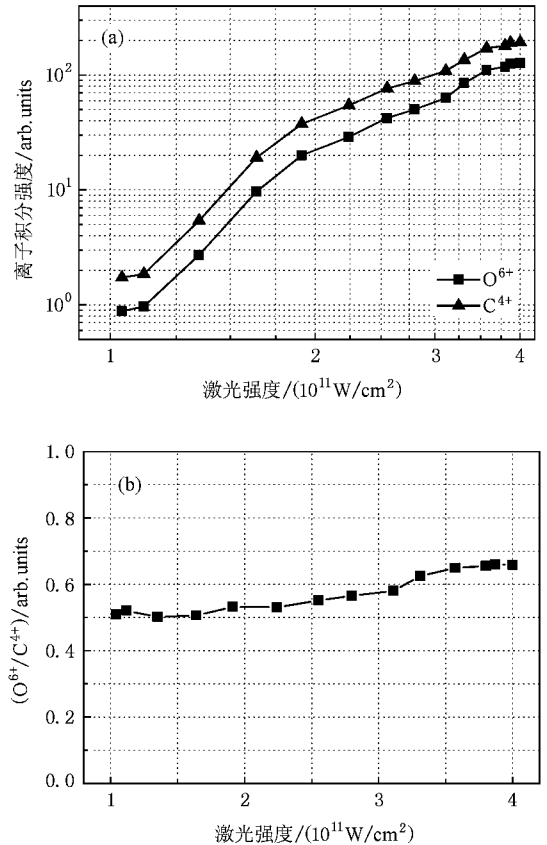


图 3 (a) O^{6+} , C^{4+} 积分强度随激光能量的变化趋势 (b) $\text{O}^{6+}/\text{C}^{4+}$ 比值随激光能量的变化趋势

3.3. 电离过程中的电子能量分布

为了深入研究高价离子的产生机理, 用阻滞电压法测量了激光电离乙醚团簇时的电子能量分布. 图 4(a) 为激光能量为 $3.1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 时, 电子信号积分强度随阻滞电压的变化曲线. 对图 4(a) 中曲线微分, 并将阻滞电压减去引出场在激光光斑处电压 -425 V, 可得到相应的电子能量分布, 如图 4(b) 所示. 从图中可以看到, 平均电子能量约为 43 eV, 最大电子能量约 84 eV.

图 5(a) 为不同激光能量下的电子能量分布. 如图所示, 随着激光能量的增大, 纳秒激光与乙醚团簇作用中产生的电子能量也相应增大, 同时电子能量分布的宽度逐渐增宽. 图 5(b) 为平均电子能量和最

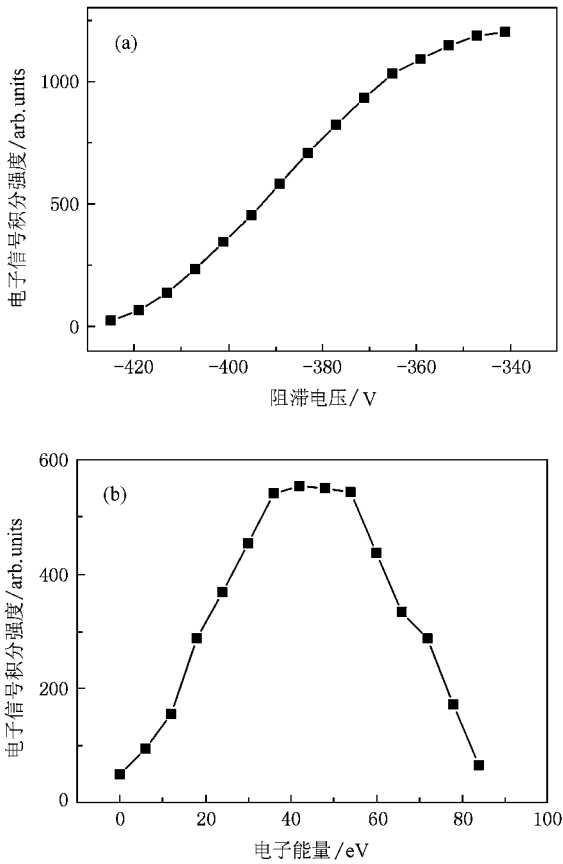


图 4 (a) 电子信号积分强度随阻滞电压的变化 (b) 电子能量分布图. 激光能量为 $3.1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, 图中电子能量分布已经考虑不同平动能电子的接收效率

大电子能量随激光能量的变化趋势. 由图中看到, 电离过程中电子能量的平均值和最大值均随激光能量的增大而线性增大. 当激光能量由 $1.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 增加 4 倍至 $4.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 时, 平均电子能量由 17 eV 增大至 56 eV, 而最大电子能量则由 30 eV 增加至 102 eV, 增大均接近 3 倍.

3.4. 高价离子产生的可能机理

在低光强纳秒激光与乙醚团簇的相互作用过程中, 观察到价电子完全剥离的 C^{4+} 、 O^{6+} 高价离子, 这种多价电离现象在纳秒激光电离苯、甲醇和碘甲烷分子束时也同样发生. 我们曾提出一个初步的三步理论模型“多光子电离引发-逆韧致吸收加热-电子碰撞电离”来解释纳秒光场中高价离子的产生. 即电离过程首先由多光子电离引发, 中性团簇中的部分分子通过吸收多个光子被电离, 产生的部分电子被束缚在团簇内部. 这些被束缚的电子在激光场中与团簇内的中性分子及离子碰撞, 并通过逆韧致吸收

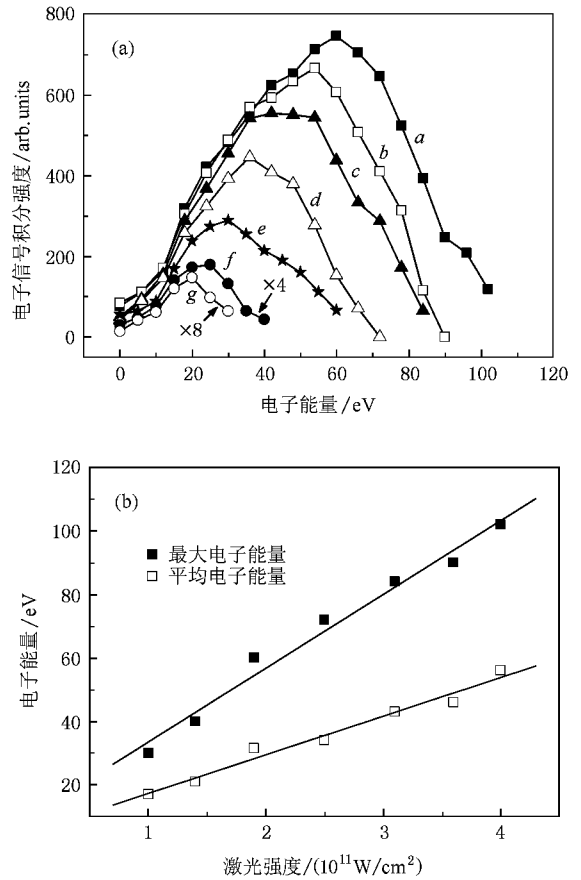


图 5 (a) 不同激光能量下的电子能量分布, 曲线 a—g 的激光能量分别为 $4.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, $3.6 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, $3.1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, $2.5 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, $1.9 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, $1.4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, $1.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ (曲线 f、g 分别将原数据增大了 4、8 倍); (b) 平均及最大电子能量随激光能量的变化趋势

机理获得能量. 当电子能量超过多价电离所需要的电离势时, 通过碰撞电离逐步产生 C、O 的高价离子. 最后, 在库仑排斥力的作用下, 团簇发生库仑爆炸, 释放出 C、O 的高价离子.

实验中测定的高价离子及电子能量分布结果定性支持了我们的理论模型. 首先, 在实验中观察到了乙醚多光子电离的碎片, 说明在这种实验条件下多光子电离仍是激光与乙醚团簇作用中的一个重要过程. 其次, 在电离过程中确实存在着高能量的电子. 实验测定的最大电子能量达到 102 eV, 支持了模型的推测, 即高价离子来源于高能电子碰撞电离. 最后, 由图 5(b) 可以看到, 电离过程中的平均电子能量和最大电子能量均随激光能量增大而线性增加, 这与逆韧致吸收与激光能量的关系一致. 在激光场中, 电子与中性粒子或离子碰撞一次吸收的平均能量为 $\Delta E \sim U_p = 9.33 \times 10^{-14} I^2$, 其中 U_p 是激光场

的有质动力学势,即电子在激光场中振荡的平均动能; I 是激光功率密度,单位 W/cm^2 ; λ 是激光波长,单位 μm 。可以看到,激光场中电子碰撞一次吸收的平均能量与激光强度及波长的平方成正比。在相同激光波长下,当电子在电场中加热的时间和碰撞频率确定时,电子的最终能量与激光能量成线性的关系。

虽然在实验中观测到较高能量的电子,但在低光强下测量的电子能量仍然小于 C、O 最高价态的电离势(C^{4+} 电离势为 64.5 eV, O^{6+} 电离势为 138.1 eV)。在图 5(a)中最低激光能量时,平均电子能量仅为 17 eV,最大电子能量也只有约 30 eV。这表明在电离过程中,还可能存在着其他促进电离发生的影响因素。例如,团簇内部大量离子及电子的存在,会导致团簇内部离子的电离势大大降低,这被称为屏蔽效应。Gets 等人^[25]研究了屏蔽效应对团簇内稀有气体离子电离势的影响,发现团簇内电子温度较低时,屏蔽效应能够有效降低团簇内部离子的电离势。如当电子温度为 30 eV 时, X^{7+} 的电离势甚至可以降低约 80 eV。考虑屏蔽效应后,团簇中离子的电离势 E_{ip} 可以由下式得到^[25]:

$$E_{\text{ip}} = \frac{Z_{\text{eff}}^2}{2n^2} - \frac{Z_{\text{eff}}}{R} + \frac{3n^2 - \kappa(l+1)}{4R^2} - \frac{(5n^2 + 1 - 3\kappa(l+1))n^2}{12Z_{\text{eff}}R^3}, \quad (2)$$

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt{2n^2 \times E_z}, \quad (3)$$

$$R = \sqrt{T_e/4\pi Z n_a}, \quad (4)$$

其中 E_{ip} 为某价态离子的电离势, Z_{eff} 为该离子的有效电荷, R 为团簇的德拜半径, n 为价电子的主量子数, l 为价电子的轨道量子数, E_z 为此价态离子的孤立电离势(即不考虑屏蔽效应时的电离势), T_e 为电子温度, $Z n_a$ 为团簇内自由电子的数密度。式中所有单位均采用原子单位(a.u.)。

对多原子分子, $Z n_a$ 应为团簇内所有原子电离产生的电子密度之和,故团簇内自由电子的数密度可表示为 $n_a \sum Z_i m_i$, 其中 n_a 为团簇内分子的数密度, Z_i 为分子内某离子的价态, m_i 为此种元素在分子中的数目。如对乙醚团簇,计算 $\text{C}^{3+} + e \rightarrow \text{C}^{4+} + 2e$ 的电离势时, $\sum Z_i m_i$ 应为 25。乙醚团簇内的密度可以近似认为等于其液态密度 $0.7138 \text{ g}/\text{cm}^3$, 则 n_a 为 0.0086 a.u. 图 6 是利用(2)式计算得到乙醚团簇内 C^{4+} , C^{5+} 及 O^{6+} , O^{7+} 的电离势随电子温度的变化曲线。从图中看到,由于团簇内屏蔽效应的存在, C^{4+} ,

C^{5+} 及 O^{6+} , O^{7+} 的电离势均小于相应孤立离子的电离势(C^{4+} 64.5 eV, C^{5+} 392.1 eV 及 O^{6+} 138.1 eV, O^{7+} 739.3 eV)。例如, O^{6+} 电离势在电子温度为 100 eV 时降低至约 90 eV, 而当电子温度降低为 10 eV 时,可低至约 21 eV, 这可以定性解释在低光强下观测到 O^{6+} , C^{4+} 高价离子的现象。从图 5(a)看到,实验中不同激光能量下电子能量分布图中,均存在着大量小于 20 eV 的低能电子,可以推测这些低能电子的存在有效降低了团簇内 C^{4+} , O^{6+} 的电离势,使得在低光强下仍然可以形成相应的高价离子。但对于内壳层电离得到的 C^{5+} , O^{7+} 离子,即使在极限情况下,其电离势仍然高于 200, 400 eV, 远高于实验中测得的电子能量,因此即使存在屏蔽效应,也不可能观察到相应的离子。

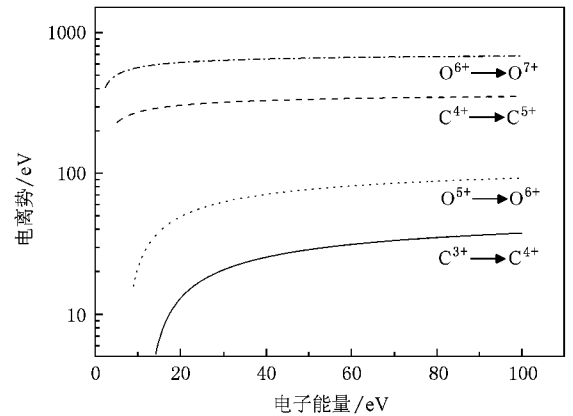


图 6 C^{4+} , C^{5+} 及 O^{6+} , O^{7+} 的电离势随电子温度的变化

屏蔽效应对电离势的影响也可以定性地解释为何高价离子比率基本不随激光能量变化。在纳秒激光与团簇作用过程中,随着激光能量的增加,电子通过逆韧致吸收获得的能量随之增大,这有利于更高价态离子的产生,但同时电子能量的增加会导致团簇内屏蔽效应的减弱,即高价离子的电离势会随着电子能量的增大而增大。这在一定程度上会抵消电子能量增加对高价离子产生的积极作用,使得最终能够电离产生 C^{6+} , O^{4+} 的电子所占的比例并没有发生明显的变化。因此,实验中 $\text{O}^{6+}/\text{C}^{4+}$ 比值基本不随激光能量而变化。

4. 结 论

在 $10^{11} \text{ W}/\text{cm}^2$ 光强下,用 5 ns, 1064 nm Nd:YAG 激光电离乙醚团簇时,可以观测到外层价电子完全剥离的 C^{4+} , O^{6+} 高价离子,这些离子的产率随着激

光能量增大而增加,但其比值却基本不随激光能量变化.利用阻滞电压法测定了不同激光能量下的溢出电子能量分布,结果表明平均及最大电子能量均随激光能量增大而线性增加,实验中的最大电子能量约为 102 eV.同时,低光强的实验表明,屏蔽效应

对团簇内相应电离势的降低对高价离子的形成起到重要的促进作用.“多光子电离引发-逆韧致吸收加热-电子碰撞电离”三步理论模型可以较好地解释纳秒激光条件下高价离子的产生规律.

- [1] Yang M , Liu J S , Cai Y , Wang W T , Wang C , Ni G Q , Li R X , Xu Z Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 176 [杨明、刘建胜、蔡懿、王文涛、王成、倪国权、李儒新、徐至展 2008 物理学报 **57** 176]
- [2] Tang X P , Wang S F , Gao L R , Wang C , Kong F A 2003 *Acta. Phys. -Chim. Sin.* **19** 661 (in Chinese) [唐晓萍、王素凡、高丽蓉、王操、孔繁敖 2003 物理化学学报 **19** 661]
- [3] Rose-Petruck C , Schafer K J , Wilson K R , Barty C P J 1997 *Phys. Rev. A* **55** 1182
- [4] Zuo T , AD B 1995 *Phys. Rev. A* **52** R2511
- [5] Ditmire T , Donnelly T , Rubenchik A M , Falcone R W , Perry M D 1996 *Phys. Rev. A* **53** 3379
- [6] Isidore L , Joshua J 2004 *J. Chem. Phys.* **120** 1336
- [7] Li H Y , Liu J S , Wang C , Ni G Q , Li R X , Xu Z Z 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1237
- [8] Chen G L , Lu H Y , Wang C , Liu J S , Li R X , Ni G Q , Xu Z Z 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2124
- [9] Wang L , Wu Y C , Wang H B , Liu H J , Ge F F , Chen J B , Zheng Z J , Gu Y Q , Shi S T , Luo X B , Chao Y W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6918 (in Chinese) [王磊、吴玉迟、王红斌、刘红杰、葛芳芳、陈家斌、郑志坚、谷渝秋、史叔廷 2007 物理学报 **56** 6918]
- [10] Ren H Z , Wu C Y , Ma R , Yang H , Jiang H B , Gong Q H 2002 *Int. J. Mass Spectrom.* **219** 305
- [11] Wu C Y , Ren H Z , Liu T T , Ma R , Yang H , Jiang H B , Gong QH 2002 *J. Phys. B: At. Mol. Opt.* **35** 2575
- [12] Siozos P , Kaziannis S , Kosmidis C 2003 *Int. J. Mass Spectrom.* **225** 249
- [13] Shimizu S , Zhakhovskii V , Murakami M , Tanaka M , Yatsuhashi T , Okihara S , Nishihara K , Sakabe S , Izawa Y , Nakashima N 2005 *Chem. Phys. Lett.* **404** 379
- [14] Shimizu S , Kou J , Kawato S , Shimizu K , Sakabe S , Nakashima N 2000 *Chem. Phys. Lett.* **317** 609
- [15] Wang W G , Li H Y , Niu D M , Wen L H , Zhang N Z 2008 *Chem. Phys.* **352** 111
- [16] Niu D M , Li H Y , Wang W G , Xiao X , Luo X L , Zhang N Z , Hou K Y 2008 *Mol. Phys.* **106** 1389
- [17] Luo X L , Kong X L , Niu D M , Qu H B , Li H Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 606 (in Chinese) [罗晓琳、孔祥蕾、牛冬梅、渠洪波、李海洋 2005 物理学报 **54** 606]
- [18] Niu D M , Li H Y , Liang F , Wen L H , Luo X L , Wang B , Hou K Y , Zhang X Y 2005 *Chem. Phys. Lett.* **403** 218
- [19] Kong X L , Luo X L , Niu D M , Zhang X Y , Kan R F , Li H Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1340 (in Chinese) [孔祥蕾、罗晓琳、牛冬梅、张先、阚瑞峰、李海洋 2004 物理学报 **53** 1340]
- [20] Xiao X , Li H Y , Luo X L , Niu D M , Wen L H , Wang B , Liang F , Hou K Y , Dong C , Shao S Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 661 (in Chinese) [肖雪、李海洋、罗晓琳、牛冬梅、温丽华、王宾、梁峰、侯可勇、董璨、邵士勇 2006 物理学报 **55** 661]
- [21] Springate E , Aseyev S A , Zamith S , Vrakking M J J 2003 *Phys. Rev. A* **68** 053201
- [22] Wen L H , Li H Y , Niu D M , Luo X L , Chai ZP 2006 *J. Chinese Mass Spectrom. Soc.* **27** 1 (in Chinese) [温丽华、李海洋、牛冬梅、罗晓琳、柴志平 2006 质谱学报 **27** 1]
- [23] Wen L H , Li H Y , Luo X L , Niu D M , Xiao X , Wang B , Liang F , Hou K Y , Shao S Y 2006 *Chem. Phys.* **322** 360
- [24] Wang Y , Zhang S D , Zhu X J and Kong X H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4491 (in Chinese) [王艳、张树东、朱湘君、孔祥和 2007 物理学报 **56** 4491]
- [25] Gets A V , Krainov V P 2006 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **39** 1787

Multiple ionization of diethyl ether cluster by nanosecond laser : generation of multiply charged ions and the electron energy distribution *

Zhang Na-Zhen¹⁾²⁾ Cang Huai-Wen¹⁾ Wang Wei-Guo¹⁾ Miao Shu-Yi¹⁾
Jin Feng¹⁾²⁾ Wu Qing-Hao¹⁾²⁾ Hua Lei¹⁾²⁾ Li Hai-Yang^{1)†}

1) *State Key Laboratory of Molecular Reaction Dynamics, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China*

2) *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

(Received 3 November 2008 ; revised manuscript received 22 December 2008)

Abstract

The interaction of diethyl ether clusters and laser was studied at laser intensity of 10^{11} W/cm² using 5 ns, 1064 nm laser pulses. Multiply charged ions O⁶⁺ and C⁴⁺ were observed and the ratio of O⁶⁺/C⁴⁺ nearly kept constant in the range of laser intensity studied. The energy distribution of electrons ejected was measured via retarding potential method. At the laser intensity of 4.0×10^{11} W/cm², the mean electron energy of 56 eV and the maximum electron energy of 102 eV were observed. It indicates that the multiply charged ions are mainly produced from energetic electron impact ionization. In addition, our calculated results show that the screening effect inside cluster can significantly decrease the ionization potentials of multiply charged ions, thus facilitating the ionization especially at low laser intensity. The above results further support our three stage model of " multiphoton ionization ignition-inverse bremsstrahlung heating-electron impact ionization ".

Keywords : multiply charged ions, electron energy, nanosecond laser, diethyl ether cluster

PACC : 3280, 3640

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.20573111) and the State Key Program of National Natural Science of China (Grant No.40637036).

† Corresponding author. E-mail: hli@dicp.ac.cn