

飞行时间质谱探测磁光阱中超冷分子离子的实验研究*

元晋鹏 姬中华 杨艳 张洪山 赵延霆[†] 马杰 汪丽蓉 肖连团 贾锁堂

(山西大学激光光谱实验室, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

(2012年1月4日收到; 2012年3月6日收到修改稿)

利用飞行时间质谱探测了由磁光阱中的俘获光和再泵浦光光缔合作用形成的超冷基态铯分子, 研究了微通道板工作电压、加速电场强度和加速电场持续时间对铯分子离子信号强度的影响. 实验结果与理论模型的拟合一致; 获得了适合实验条件的最优化实验参数, 为进一步研究超冷分子的光缔合光谱和光电离光谱奠定了实验基础.

关键词: 飞行时间质谱, 超冷分子, 磁光阱, 光缔合

PACS: 33.15.Ta, 37.10.Mn, 34.80.Gs

1 引言

在过去的二十多年, 激光冷却俘获中性原子技术的发展使我们能够探索许多有趣的物理现象, 比如冷原子钟^[1]、原子干涉仪^[2]、玻色-爱因斯坦凝聚^[3]、原子激光^[4]等. 同样地, 超冷分子由于其复杂的内部结构使其在量子化学^[5]、量子计算^[6]、频率标准^[7]、分子光学^[8]等方面的潜在应用引起了人们广泛的研究兴趣.

为了产生超冷分子, 人们很自然地想到将激光冷却原子的方法应用到分子冷却上. 但是由于分子具有复杂的多重振转能级结构, 没有像原子那样的封闭二能级系统, 因此用传统的激光冷却方法很难实现分子的冷却^[9], 只有极个别的分子可以用激光冷却俘获的方法进行降温^[10]. 因此, 许多有效的冷却分子的机制被提出, 主要分为直接冷却和间接冷却两大类. 直接冷却主要有缓冲气体冷却方法^[11]和斯塔克电场冷却方法^[12], 间接冷却主要有费氏巴赫共振冷却方法^[13]和光缔合冷却方法^[14]. 其

中, 直接冷却方法可冷却的分子种类较多, 但是由于主要针对分子平动进行冷却, 目前这种方法仅能得到温度高于 1 mK 的冷分子. 在间接冷却中, 费氏巴赫共振冷却方法是通过外加磁场将原子和分子的能级调节到相同的数值使碰撞中的两个原子形成一个亚稳态的分子. 这种方法需要获得较低的原子温度 (μK 量级), 形成的高振动能级分子内部束缚较弱, 因此极易离解为原子. 光缔合方法是在一束特定频率光的作用下, 一对相互碰撞的基态原子共振吸收一个光子, 形成某一振转能级的激发态分子, 然后通过自发辐射或受激辐射, 形成稳定的基态分子. 通过这种方法产生的分子具有效率高, 状态稳定, 并且对原子样品温度要求低 (百 μK 量级) 的特点^[15]. 至今, 所有的碱金属原子都适用于光缔合方法制备超冷分子^[16-20].

对于超冷分子的探测, 主要有以下几种探测手段: 俘获损耗光谱技术^[21]、碎裂光谱技术^[22]、飞行时间质谱技术^[16]. 俘获损耗光谱技术是通过探测光缔合过程中超冷原子荧光强度的变化来测量超冷激发态分子光谱的技术, 探测灵敏度较低, 且

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB921603)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 10934004)、国家自然科学基金 (批准号: 60808009, 60978018, 60978001, 61008012, 11174187, 11004125) 和国家自然科学基金创新群体科学基金 (批准号: 61121064) 资助的课题.

[†] E-mail: zhaoyt@sxu.edu.cn

易受杂散光影响. 碎裂光谱技术是通过光缔合过程中激发态分子转移到其他激发态后自发辐射产生的特定频率的荧光进行探测, 从而反映光缔合过程中产生的激发态分子的信息, 在实验中需要使用高性能的带通滤光片分离所需测量的特定频率的荧光, 并对微弱的荧光信号进行探测. 飞行时间质谱技术是通过光缔合过程中激发态分子自发辐射形成的超冷基态分子进行探测, 实验装置主要包括用于使离子加速的加速电场装置和用于探测离子信号的微通道板探测器. 它具有探测灵敏度高、背景几乎为零、不受杂散光影响的特点. 由于飞行时间质谱技术的超高灵敏度, 经常用于探测光缔合形成的超冷基态分子^[23]. 甚至在没有特定的缔合光的情况下, 也可以探测到超冷分子的形成^[16,24]. 其原因在于磁光阱中的俘获光和再泵浦光提供了光缔合光的作用. 在参考文献[24]中, Caires等测量了磁光阱中直接产生的Rb₂分子产率. 在参考文献[16]中, Fioretti等也提到了他们在实验过程中发现了在没有特定频率的光作为光缔合光的情况下可以形成Cs₂且推测形成分子的原因是冷却光和再泵浦光的作用, 然而, 他们并未对这一现象进行细致地研究也未对产生的分子特性进行研究.

本文中, 我们观测了在磁光阱中由于俘获光和再泵浦光的光缔合而直接形成的超冷基态Cs₂分子, 使用共振增强多光子电离的方法将超冷基态Cs₂分子电离为Cs₂⁺分子离子, 然后用飞行时间质谱进行探测. 通过研究微通道板工作电压、加速电场强度和加速电场持续时间对铯分子离子信号强度的影响, 并采用理论模型对实验结果进行拟合, 获得了适合实验条件的最优化实验参数, 为进一步研究超冷分子的光缔合光谱和光电离光谱奠定了重要的实验基础.

2 实验装置

实验装置如图1所示, 磁光阱由三对相互垂直、偏振相反的俘获激光束, 一个再泵浦激光束和一个四极磁场组成. 俘获光和再泵浦光均由可调谐外腔式半导体激光器 (TOPTICA, DL100) 产生, 其典型工作电流约为 200 mA, 最大输出功率为 160 mW, 典型线宽为 1—2 MHz. 俘获光锁定在红失谐于 Cs 原子超精细跃迁 6S_{1/2}(F =

4) → 6P_{3/2}(F' = 5) 线 15 MHz 的位置, 光束直径为 15 mm, 每束光的功率约为 6 mW. 再泵浦光锁定在 Cs 原子 6S_{1/2}(F = 3) → 6P_{3/2}(F' = 4) 超精细跃迁线上, 光束直径为 10 mm, 功率约为 5 mW. 四极磁场梯度约为 12 Gauss/cm. 磁光阱中背景压强为 1 × 10⁻⁷ Pa, 冷原子云直径为 0.9 mm, 俘获原子数为 2 × 10⁷ 个, 用飞行时间法^[25]测得冷原子云温度约为 170 μK. 光缔合形成的基态 Cs₂ 分子由一束脉冲染料激光电离, 用于电离基态原子和分子的脉冲染料激光 (Spectra Physics, CBR-G-18EG) 由 Nd:YAG 激光泵浦 (Spectra Physics, INDI-40-10-HG), 工作波长为 710 nm, 接近 Cs 原子 6S_{1/2} → 6D_{3/2,5/2} 共振跃迁线. 所用染料 Pyridine 2 在这个波段的转换效率为 18%, 脉冲宽度为 8 ns, 脉冲能量为 1 mJ.

实验中使用了图2所示的时序控制来探测磁光阱中的基态原子和分子. 数字脉冲延时发生器 (SRS, DG535) 控制本实验中的所有时序. 为了降

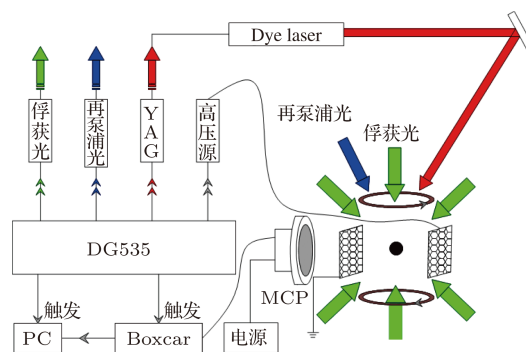


图1 实验装置图 (MCP 为微通道板, Boxcar 为取样平均器, YAG 为染料激光泵浦源, Dye laser 为染料激光, DG535 为数字脉冲延时发生器, PC 为用于实验数据采集的电脑)

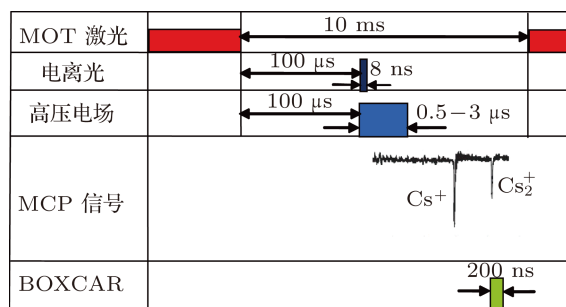


图2 实验时序控制示意图, 时序的重复频率为 10 Hz (MOT 为磁光阱, MCP 为微通道板, BOXCAR 为取样平均器)

低 Cs^+ 原子离子信号强度, 我们通过控制声光调制器和电光调制器对俘获光和再泵浦光进行关断. $100 \mu\text{s}$ 后脉冲染料激光作用到原子团上, 同时栅网提供的高压加速电场作用在原子分子离子上. 在加速电场的作用下, 产生的 Cs^+ 离子和 Cs_2^+ 离子由于质量不同到达微通道板的时间也不相同. 由微通道板采集的离子信号经放大后由示波器显示, 同时由一个取样平均器 (Boxcar SRS-250) 记录.

3 实验结果及分析

除了 MCP 本身的探测性能外, 影响 MCP 探测效率的因素主要有 MCP 的工作电压、加速电场的强度及持续时间. 因此, 我们对这些参数进行了详细研究.

3.1 微通道板工作电压对离子信号的影响

微通道板离子探测器主要用于飞行时间质谱和二次离子质谱等质谱仪中, 具有结构简单、增益高、时间响应快和空间成像等特点. 不同的工作电压对微通道板的探测效率有很大影响, 微通道板的增益系数由下式决定 [26]:

$$G = \left(\frac{AU}{2a\sqrt{U_0}} \right)^2 4U_0 a^2 / U, \quad (1)$$

其中 $a = L/d$ 为微通道板管长与管径之比, A 为决定二次发射系数的物质常数, 约为 $0.2\text{--}0.25$, U_0 为垂直管壁方向的二次电子平均发射电位, 约为 $1\text{--}2 \text{ V}$, U 为微通道板的工作电压. 图 3 为加速电场强度为 105 V/cm 持续时间为 $2.0 \mu\text{s}$ 时, 不同工作电压下微通道板探测到的离子信号强度, 图中误差为 1200 次测量结果的标准方差, 实线为采用 (1) 式对实验结果的拟合. 插图显示了微通道板探测信号的洛伦兹拟合, 图中第一个信号是 Cs^+ 原子离子信号, 第二个信号是 Cs_2^+ 分子离子信号, 横坐标的零点位置在 MOT 激光关断时, 原子离子和分子离子信号出现的时间分别在 5.88 和 $8.24 \mu\text{s}$, 符合理论计算的位置 [23], 纵坐标是微通道板探测到的电压信号. 信号是由洛伦兹拟合, 拟合的信号强度分别是 0.38 和 0.23 V , 半高全宽 (FWHM) 分别是 5.52 和 5.93 ns .

如图所示, 实验数据与理论拟合较为一致. 随着微通道板工作电压的增大, Cs^+ 铯原子和 Cs_2^+ 铯

分子离子信号都呈增大趋势, 但是随着微通道板工作电压的持续增大, 离子信号的增大趋势在逐渐减小. 这是由于随着微通道板两端工作电压的增大导致微通道板的电子增益增大, 从而对输入离子信号有了更好的放大作用, 产生了较大的离子信号. 但是, 离子信号强度并不可以无限增大, 随着微通道板两端工作电压的增大, 会产生自饱和现象 [27,28], 即在一定工作电压极限下输出电流密度不随输入电流密度的增大而增大. 实验所使用的微通道板两端最大电压不得超过 2 kV , 否则会造成损坏. 而且, 较大的工作电压也会减少微通道板的工作寿命 [29]. 因此, 实验中在保证离子信号信噪比的情况下, 应尽量降低 MCP 的工作电压. 我们将微通道板两端工作电压设定为 1.7 kV , 既能保证比较高的探测效率, 也能保证微通道板的使用寿命.

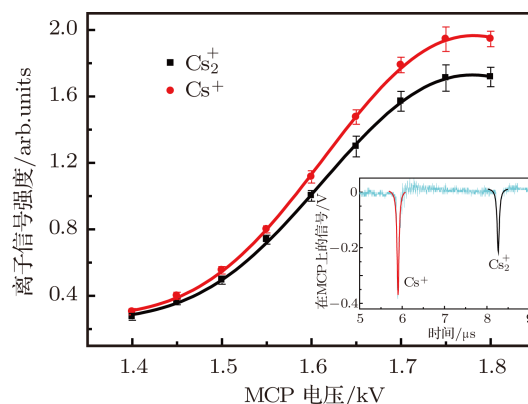


图 3 微通道板工作电压对离子信号强度的影响, 实线为采用理论模型对实验结果的拟合, 插图显示了微通道板探测信号的洛伦兹拟合

3.2 加速电场强度对离子信号的影响

在脉冲染料光对分子进行电离之后, 需要一个加速电场使离子飞行到微通道板而被探测. 不同的加速电场强度对离子信号的强度有较大的影响. 根据微通道板的工作原理 [30], 当有足够能量的一次电子或离子轰击微通道板表面时, 就有一定数目的电子从电极表面发射出来, 即二次电子, 其数目与入射电子或离子能量有关. 我们实验中入射的为铯原子分子离子, 其入射到电极表面的入射深度 h 与其入射能量 W 成正比: $h = \alpha W = \alpha Eqd$, 式中 α 为系数, E 为加速电场强度, q 为电荷量, d 为加速电场间距的一半. 微通道板内部产生的二次电子向真空界面运动时, 由于电子散射和声子散射而很快

损失能量, 到达真空界面时, 其剩余能量已经不足以克服势垒, 因而不能逸出. 只有在发射体表面附近激发的电子, 向界面运动时的能量损耗较小, 才可能克服表面势垒逸入真空, 成为二次电子. 通常电子逸出几率 P 随激发深度增加而指数地衰减, 即 $P = e^{-\lambda h}$, 式中 λ 为衰减常数. 假定离子在射程范围内激发的二次电子数目处处相等, 数目记为 n , 我们对相应每个特定的入射电子能量的受激电子数目和逸出几率之积积分就可以获得微通道板的二次发射电子数目 N :

$$N = \int P \cdot nh dh = -e^{-\alpha\lambda qdE} \left(\frac{n\alpha qd}{\lambda} E - \frac{n}{\lambda^2} \right) + \frac{n}{\lambda^2}. \quad (2)$$

图 4 为在微通道板工作电压为 1.7 kV 加速电场持续时间为 2.0 μs 时, 不同的加速电场强度下的铯分子离子信号强度, 图中误差为 5 次测量的标准方差, 实线为采用 (2) 式对实验结果的拟合.

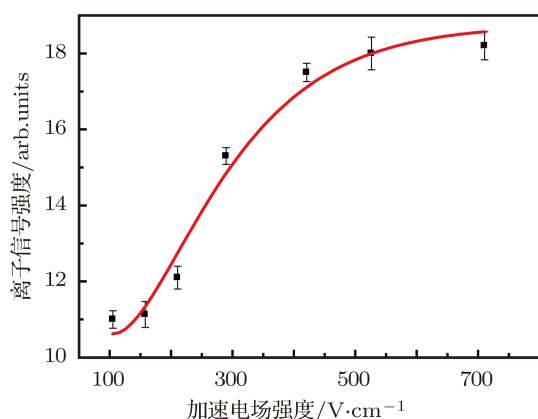


图 4 加速电场强度对分子离子信号强度的影响, 实线为采用理论模型对实验结果的拟合

由图可以看到实验数据与理论拟合较为一致. 随着加速电场强度的增大, 分子离子信号的强度逐渐增大, 但是随着加速电场强度的继续增大, 分子离子信号强度产生饱和现象. 在不同的加速电场强度下到达微通道板的离子能量不同, 在微通道板中激发的倍增电子数量也不同, 从而导致不同的信号增益. 然而, 较大的加速电场强度也会导致到达微通道板的离子能量过大而使通道内壁材料的二次电子发射特性降低, 导致微通道板的增益降低, 所以随着加速电场强度的持续增大, 分子离子信号的强度产生饱和现象. 同时, 较大的加速电场强度意

味着较短的飞行时间, 这样会导致不同离子到达通道板的时间间隔减小, 从而降低微通道板的时间分辨率 [27]. 因此, 在选用飞行时间质谱作为探测手段的实验中, 需要选取合适的加速电场强度, 既要保证对离子信号有较好的探测效率, 又要考虑原子分子离子信号的时间分辨率, 在保证较大的信号强度和足够的时间分辨率的情况下应选取较小的加速电场强度来保证微通道板的寿命, 实验中约 100 V/cm 的加速电场强度获得的分子离子信噪比可以满足实验需要.

3.3 加速电场持续时间对离子信号的影响

同样地, 加速电场持续时间也会对分子离子信号产生影响. 我们使用洛伦兹线型对获得的离子信号进行拟合以获得分子信号的 FWHM, 图 5(a) 记录了在加速电场强度为 105 V/cm, 微通道板工作电压为 1.7 kV 时, 不同加速电场持续时间下分子离子信号的强度和半高全宽的变化, 由于加速电场持续时间对分子离子信号的影响必然有个最佳值, 我们采用二项式拟合对实验数据进行拟合, 获得图 5(a) 所示实线. 图 5(b) 为不同加速电场持续时间下分子离子数目的变化, 实线为实验数据点的平均值. 图中误差为 5 次测量的标准方差.

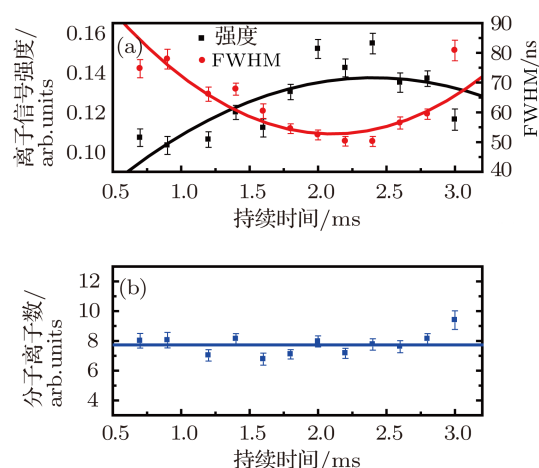


图 5 (a) 加速电场持续时间对分子离子信号的影响, 图中实线为实验数据的二项式拟合; (b) 加速电场持续时间对分子离子数目的影响, 图中实线为实验数据点的平均值

如图 5(a) 所示, 随着加速电场作用时间的增大, Cs_2^+ 信号强度呈现先增大后减小的趋势, 而 Cs_2^+ 信号的 FWHM 却呈现先减小后增大的趋势; 如

图 5(b) 所示, Cs_2^+ 分子离子数目基本保持不变. 分子离子在加速电场的电场力作用下由磁光阱中心飞行至微通道板, 同时在飞行过程中分子离子间存在库仑力, 加速电场的电场力对分子离子信号的影响主要体现在信号强度上, 离子间库仑力对分子离子信号的影响主要体现在信号的 FWHM 上^[31]. 在改变加速电场持续时间的整个过程中, 由于产生的分子数目、光电离效率、微通道板的探测效率都基本保持不变, 所以 Cs_2^+ 分子离子数目保持不变. 在加速电场作用时间较短时, 分子离子间距较大, 库仑力不明显, 电场力起主导作用, 随着加速电场持续时间的增大, 分子离子在电场力作用下速度增大, 到达微通道板的离子能量增大, 从而使微通道板增益变大, 因此分子离子信号变大, 由于初态的分子离子数目不变, 所以分子离子信号的 FWHM 变小. 当加速电场的持续时间较大时, 分子离子间距变小, 库仑力作用明显, 随着加速电场持续时间的增大, 在库仑力的排斥作用下, 分子离子的间隔变大, 因此分子离子信号的 FWHM 变大, 由于初态的分子离子数目不变, 所以分子离子信号强度变小.

不同的实验需求需要选择不同的实验参数, 在我们的实验中希望得到一个强度较大的 Cs_2^+ 分子离子信号, 从而对产生分子的物理过程进行有效的研究, 所以我们选择 $t = 2.2 \mu\text{s}$ 加速电场持续时间. 本实验的系统误差主要来源于加速电场强度的确定, 电源电压的不稳定, 以及离子信号的洛伦兹拟合.

4 结论

我们用飞行时间质谱的方法, 探测了由磁光阱中的俘获光和再泵浦光光缔合作用形成的超冷基态铯分子. 研究了影响飞行时间质谱探测效率的实验参数, 实验结果与理论模型的拟合一致, 我们发现: 基于电子倍增原理的微通道板两端的工作电压的增大会导致离子信号强度增大, 但是随着微通道板工作电压的持续增大会出现微通道板增益的自饱和现象. 为了保证比较高的探测效率, 同时保证微通道板的使用寿命, 我们选取 1.7 kV 的工作电压; 加速电场强度的增大会导致分子离子信号强度的增大, 随着加速电场强度的持续增大离子信号的强度出现饱和现象. 为保证较大的离子信号强度和较好的时间分辨率以及较长的微通道板寿命, 我们选择约 100 V/cm 的加速电场强度; 加速电场持续时间的增大会导致 Cs_2^+ 分子离子信号的强度和 FWHM 发生改变, 随着加速电场持续时间的增大离子信号的强度呈现先增大后减小的趋势, 离子信号的 FWHM 对应地呈现先减小后增大的趋势, 分子离子的数目保持不变. 其原因来自于加速电场的电场力和分子离子间的库仑力的综合作用. 由于在加速电场强度为 105 V/cm 时, 持续时间 $t = 2.2 \mu\text{s}$ 信号的强度最大, FWHM 最小, 因此选择 $t = 2.2 \mu\text{s}$ 加速电场持续时间. 实验结果对应用飞行时间质谱探测超冷分子离子的理论和实验提供一定的参考价值.

-
- [1] Bize S, Laurent P, Abgrall M, Marion H, Maksimovic I, Cacciapuoti L, Grünert J, Vian C, Pereira dos Santos F, Rosenbusch P, Lemonde P, Santarelli G, Wolf P, Clairon A, Luiten A, Tobar M, Salomon C 2005 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **38** 449
- [2] Shin Y, Saba M, Pasquini T A, Ketterle W, Pritchard D E, Leanhardt A E 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 050405
- [3] Weber T, Herbig J, Mark M, Nägerl H C, Grimm R 2003 *Science* **299** 232
- [4] Holland M, Burnett K, Gardiner C, Cirac J I, Zoller P 1996 *Phys. Rev. A* **54** 1757
- [5] Ospelkaus, Ni K K, Wang D, de Miranda M H G, Neyenhuis B, Quemener G, Julienne P S, Bohn J L, Jin D S, Ye J 2010 *Science* **327** 853
- [6] DeMille D 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 067901
- [7] Inbar E, Mahal V, Arie A 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 1598
- [8] Chapman M S, Ekstrom C R, Hammond T D, Rubenstein R A, Schmiedmayer J, Wehinger S, Pritchard D E 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 4783
- [9] Bahns J T, Stwalley W C, Gould P L 1996 *J. Chem. Phys.* **104** 9689
- [10] Shuman E S, Barry J F, DeMille D 2010 *Nature* **467** 820
- [11] Doyle J M, Friedrich B, Kim J, Patterson D 1995 *Phys. Rev. A* **52** 2515
- [12] Bethlem H L, Berden G, Cromptvoets F M H, Jongma R T, van Roij A J A, Meijer G 2000 *Nature* **406** 491
- [13] Chin C, Kerman A J, Vuletić V, Chu S 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 033201
- [14] Jones K M, Tiesinga E, Lett P D, Julienne P S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 483
- [15] Stwalley W C, Wang H 1999 *J. Mol. Spectrosc.* **195** 194

- [16] Fioretti A, Comparat D, Crubellier A, Dulieu O, Seeuws F M, Pillet P 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 4402
- [17] Lett P D, Helmerson K, Phillips W D, Ratliff L P, Rolston S L, Wagshul M E 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 2200
- [18] Miller J D, Cline R A, Heinzen D J 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 2204
- [19] Wang H, Gould P J, Stwalley W C 1996 *Phys. Rev. A* **53** 1216
- [20] Abraham E R I, Ritchie N W M, McAlexander W I, Hulet R G 1995 *J. Chem. Phys.* **103** 7773
- [21] Wang L R, Ma J, Zhang L J, Xiao L T, Jia S T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6373 (in Chinese) [汪丽蓉, 马杰, 张临杰, 肖连团, 贾锁堂 2007 物理学报 **56** 6373]
- [22] Wang H, Gould P L, Stwalley W C 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 476
- [23] Ji Z H, Wu J Z, Ma J, Feng Z G, Zhang L J, Zhao Y T, Wang L R, Xiao L T, Jia S T 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 053701
- [24] Caires A R L, Nascimento V A, Rezende D C J, Bagnato V S, Marcassa L G 2005 *Phys. Rev. A* **71** 043403
- [25] Gen T, Yan S B, Wang Y H, Yang H Q, Zhang T C, Wang J M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5104 (in Chinese) [耿涛, 闫树斌, 王彦华, 杨海菁, 张天才, 王军民 2005 物理学报 **54** 5104]
- [26] Chen Y Q, Yang X D 2005 *Laser Spectroscopy Measurement Techniques* (Shanghai: East China Normal University Press) p23 (in Chinese) [陈扬骏, 杨晓东 2005 激光光谱测量技术 (上海: 华东师范大学出版社) 第 23 页]
- [27] Pan J S 2004 *J. Appl. Opt.* **25** 25 (in Chinese) [潘京生 2004 应用光学 **25** 25]
- [28] Wiza J L 1979 *Nucl. Instrum. Methods* **162** 587
- [29] Wang C J, Wu H B, Zhang J S, Fang L J 1992 *J. Appl. Opt.* **13** 30 (in Chinese) [王长骏, 吴洪兵, 张继胜, 房利君 1992 应用光学 **13** 30]
- [30] Bo C W 2005 *M. D. Dissertation* (Jilin: Changchun University of Science and Technology) (in Chinese) [薄春卫 2005 硕士学位论文 (吉林: 长春理工大学)]
- [31] Kraft S D, Mikosch J, Staunum P, Deiglmayr J, Lange J, Fioretti A, Wester R, Weidemüller M 2007 *Appl. Phys. B* **89** 453]

Experimental investigation on ionized ultracold molecules formed in a magneto-optical trap by time-of-flight mass spectroscopy*

Yuan Jin-Peng Ji Zhong-Hua Yang Yan Zhang Hong-Shan Zhao Yan-Ting[†]
Ma Jie Wang Li-Rong Xiao Lian-Tuan Jia Suo-Tang

(Laser Spectroscopy Laboratory of Shanxi University, State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

(Received 4 January 2012; revised manuscript received 6 March 2012)

Abstract

We use time-of-flight mass spectroscopy to detect the ultracold ground state Cs_2 molecules formed directly by a photoassociation due to the trapping laser beams and repumping laser beam in a magneto-optical trap. We investigate the dependences of the Cs_2^+ intensity on operating voltage of micro-channel-plate, accelerating field intensity and duration time of the accelerating field. The experimental results are consistent with theoretical fitting. We obtain the best optimal parameters suited to our experimental condition, which is important for the future experiment on ultracold molecule photoassociation and photoionization spectroscopy.

Keywords: time-of-flight mass spectroscopy, ultracold molecule, magneto-optical trap, photoassociation

PACS: 33.15.Ta, 37.10.Mn, 34.80.Gs

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB921603), Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10934004), National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60808009, 60978018, 60978001, 61008012, 11174187, 11004125) and Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61121064).

[†] E-mail: zhaoyt@sxu.edu.cn