

# 碘化钠分子的光离解及其生成物钠原子的共振电离研究

霍炳海

(天津大学应用物理学系 天津 300072)

J. Gao A. H. Bakry H. H. Telle

(英国斯旺西大学物理系激光研究室)

**提要** 利用脉冲激光与分子的相互作用,用波长 330 nm 激光脉冲对 NaI 分子进行了光离解;同时对光离解后的产物之一 Na 原子实行了共振电离。通过对 Na<sup>+</sup> 离子飞行时间质谱(TOFMS)结果的分析,讨论了 Na<sup>+</sup> 离子质谱的特点,并对过程中存在的多光子电离(MPI)进行了讨论。

**关键词** 光离解,共振电离,多光子电离,飞行时间质谱

## 1 引 言

NaI 分子有其特殊的分子结构,一直是人们研究的热点。此前,在有缓冲气体(buffer gas,如 Ar 气等)存在的情况下,对 NaI 分子实行了激光光离解<sup>[1-3]</sup>。在另外的实验室中对 Na 原子实行了共振电离的研究<sup>[4]</sup>。由于 NaI 分子间、NaI 分子与 Na 原子间的相互碰撞,使处于激发态的 NaI 原子和 Na 原子消激发,降低分子或原子的荧光强度。同样,也使分子光离解的效率和原子光电离的效率降低。适当地加入少量 Ar 气等缓冲气体,由于惰性气体的不活泼性,在系统中起着缓冲作用。当惰性气体与受激分子和原子碰撞时,其猝灭截面很小,将减弱消激发速率,也有利于分子的光离解和原子的光电离。另外,缓冲气体的存在,可以阻止金属蒸气对真空室窗口的污染以及影响碱金属原子的扩散<sup>[5]</sup>,使原子稳定在一定的范围内,也有利于原子的光电离。

我们实验的特点是不加缓冲气体,用一束激光使 NaI 光离解,然后用另一束激光把光解产物之一 Na 原子共振激发,随后再电离。就是说,NaI 分子的光离解和光解产物 Na 原子的共振激发和电离是在同一实验中实现的。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。Nd:YAG(Spectra Physics DCR2, Mountain View, CA, USA)脉冲激光器 1 经倍频输出波长为 532 nm,脉宽为 8 ns,重复频率为 20 Hz 的激光束。此光束经分束镜 2,被分成能量近似相等的两束激光,两者脉冲能量分别为 35~40 mJ。用其中的一束光泵浦可调谐染料激光器 3,此染料激光器的输出经倍频后获得波长 330 nm 的 UV(紫外)激光,经石英玻璃窗口进入到真空室 5 中。该光束穿过真空室后,被室外的反射镜又反射回室中。而

经分束镜后的另一束光泵浦另外一个可调谐染料激光器 4。该染料激光采用光栅-平面镜调谐,光栅常数为 2400 line/mm,输出脉宽为  $\Delta\lambda \approx 0.015$  nm 可见光。

真空室采用不锈钢制成。分子束源与真空室相连接。实验材料 NaI 分子粉末填满整个分子束源。热电偶探头埋置在分子源的中心部位。

长约为 70 cm 的时间飞行质谱仪 6(TOFMS) 竖直固定在真空室顶部。质谱仪的中心轴线基本上通过真空室中离化室的中心。在 TOFMS 顶部收集到的离子信号,经过放大送到数字存储示波器 7(8-bit digital storage adapter. Thurlby DSA 524, Huntingdon, UK),用该仪器记录并观察电离信号的变化,把所采集到的数据送入 IBM-PC 计算机 8 中寄存并处理,即可得到  $\text{Na}^+$  的 TOF 质谱。

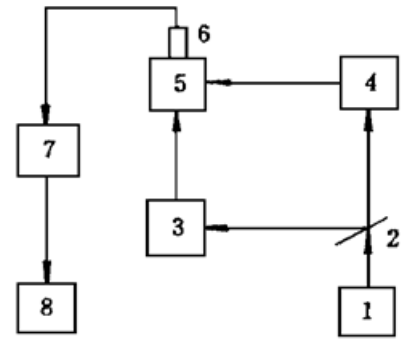
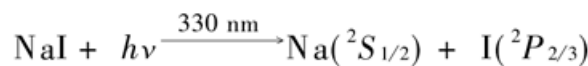


图 1 测量碘化钠光解产物的质谱示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the mass spectrometry of measuring photodissociation products of NaI  
1: Nd-YAG laser; 2: beam splitter; 3: UV dye laser; 4: visible dye laser; 5: vacuum chamber; 6: TOFMS apparatus; 7: digital storage adapter; 8: computer

### 3 实验过程及结果分析

使真空室达到约  $1.33 \times 10^{-4}$  Pa。分子束源工作温度为 580~ 600°C。在离化室处,分子束的直径约 9 mm,分子密度约为  $2 \times 10^{11}$  个/cm<sup>3</sup>。把两束染料激光和分子束调整到同一水平面上。分子束和聚焦后的二激光束在离化室中心处交叉。UV 光束在交叉点处的束直径约为 5 mm,聚焦前的光强约为  $5 \times 10^6$  W/cm<sup>2</sup>,聚焦后的光强可达  $4.2 \times 10^9$  W/cm<sup>2</sup>。

根据 NaI 分子的真空紫外吸收谱<sup>[6,7]</sup>。在实验中,采用波长为 330 nm 的 UV 光对 NaI 分子进行光离解。光解过程可表示为



结果,NaI 分子被离解成处于基态的 Na 原子和 I 原子。如图 2 所示。

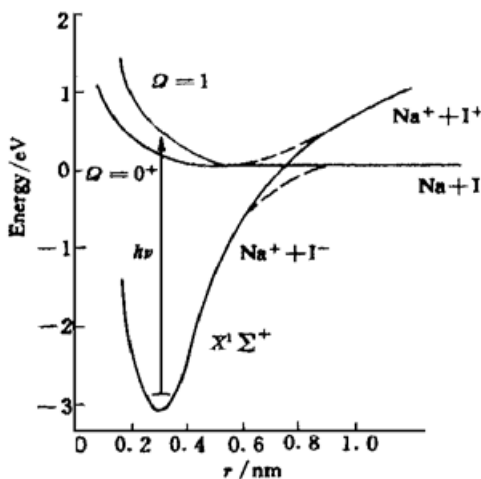


图 2 碘化钠光解示意图

Fig. 2 Schematic diagram for photodissociation of sodium iodide

在第二束染料激光(可见光)的作用下,使 Na 原子进行共振吸收。考虑到延时,该可见光由染料池通过长约为 5 m 的光纤导入离化室内。使该可见光绕 Na 的 D 线范围进行激光波长的扫描,步长为 0.01 nm,由长波方向向短波方向进行。当调谐到 Na 原子的共振吸收波长  $\lambda_1 = 589.60$  nm 和  $\lambda_2 = 589.00$  nm 时,Na 原子从基态跃迁到  $16956 \text{ cm}^{-1}$  的  $3p \ ^2P_{1/2}$  和  $16973 \text{ cm}^{-1}$  的  $3p \ ^2P_{3/2}$  态(见图 3)。处在激发态的 Na 原子随后吸收另一个 UV 光子而被光电离。此 UV 光子来源于经平面镜反射回室中的 UV 光。在数字存储示波器上可以直接观察到  $\text{Na}^+$  的飞行质谱的信号变化以及在波长 589.60 nm 和 589.00 nm 处有两个大的峰信号存在。当把由光纤导入的可见光阻挡时,两个峰信号马上消失,就证明所得的峰信号无疑

是 Na 原子的共振吸收时的电离信号。另外, 当增加脉冲激光的能量时, 峰信号的幅度有明显的增加, 图 4 给出了  $\text{Na}^+$  的三维质谱图。

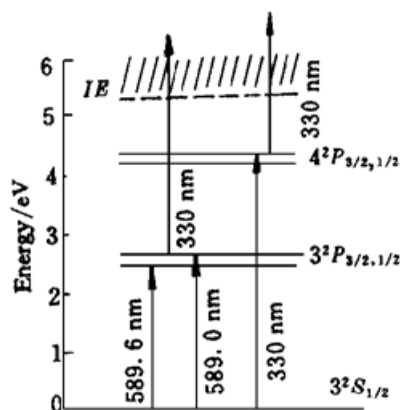


图 3 钠原子共振激发和电离过程示意图

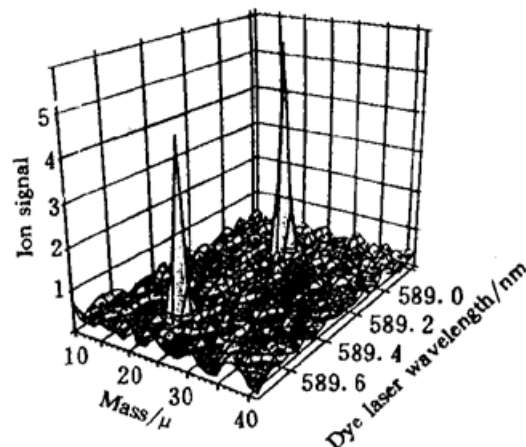


图 4 被测到的钠离子共振电离扫描图

Fig. 3 Diagram of resonant excitation and ionization schemes in sodium

Fig. 4 Resonant ionization scan of  $\text{Na}^+$  measured

Na 原子由基态  $3^2S_{1/2}$  跃迁到激发态  $4^2P_{1/2}$  ( $30267 \text{ cm}^{-1}$ ) 和  $4^2P_{3/2}$  ( $30273 \text{ cm}^{-1}$ ), 共振吸收波长为  $330.2369 \text{ nm}$  和  $330.2978 \text{ nm}$ 。在实验中, 用来光离解 NaI 的 UV 光波长为  $330 \text{ nm}$ , 十分接近上述的共振吸收波长。因而, 也仍然存在这样的过程; 光解后的 Na 原子可以再吸收一个 UV 光子, 实行准共振吸收, 而后再吸收另一个 UV 光子而被电离。这可以视为 Na 原子的多光子电离过程。因此, 在用可见光扫描时, 这种多光子电离信号为背景信号。对共振电离信号影响不大。图 3 给出了 Na 原子所有可能的共振吸收和电离的示意图。实验表明, 当增加激光强度时, 由此多光子过程形成的背景信号同样有明显的增加。

除此之外, 在分子束中, 也会有少量的 Na 原子。它们可以直接经共振电离, 或被 UV 光进行多光子电离, 对质谱信号也产生一定影响。同时, 少量的扩散泵油分子进入真空室中, 由多光子电离而形成杂散信号, 在背景信号中存在, 切断分子束源时, 这些信号依然存在。

### 参 考 文 献

- 1 William R. Anderson, Bradley M. Wilson, Timothy L. Rose. Importance of the perpendicular transition leading to ground state atoms in the photodissociation of NaI. *Chem. Phys. Lett.*, 1977, **48**(2) : 284~288
- 2 William R. Anderson, Bradley M. Wilson, Raleigh C. Ormerod *et al.*. Photodissociation of the alkali iodides at  $347.1 \text{ nm}$ : Experimental angular distributions and dynamic model for their interpretation. *J. Chem. Phys.*, 1981, **74**(6) : 3295~3306
- 3 Tzu-Min R. Su, Stephen J. Riley. Alkali halide photofragment spectra. I. Alkali iodide bond energies and excited state symmetries at  $266 \text{ nm}$ . *J. Chem. Phys.*, 1979, **71**(8) : 3194~3202
- 4 Kaare J. Nygaard, Robert J. Corbin, J. Daniel Jones. Two-step photoionization of potassium atoms. *Phys. Rev. A*, 1978, **17**(4) : 1543~1544
- 5 G. S. Hurst, M. G. Payne, S. D. Kramer *et al.*. Resonance ionization spectroscopy and one-atom detection. *Rev. of Mod. Phys.*, 1979, **51**(4) : 767~819
- 6 H. H. Telle, A. J. Tambini. Photofragmentation of NaI at  $355 \text{ nm}$ : excited-state symmetries. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 1989, **22**(12) : L315~L319
- 7 J. Wang, A. J. Blake, D. G. McCoy *et al.*. Analytical potential curves for the  $X^1\Sigma^+$  and  $O^+$  states of NaI. *Chem. Phys. Lett.*, 1990, **175**(3) : 225~230

## Study of Resonance Ionization of Atom Na Produced by Photodissociation of Sodium Iodide Molecule

Huo Binghai J. Gao\* A. H. Bakry\* H. H. Telle\*

(Department of Applied Physics, Tianjin University, Tianjin 300072

\*Department of Physics, Laser Division, Swansea University, UK)

**Abstract** In this paper, sodium iodide molecule dissociation was reported with a pulsed laser at 330 nm, and then one of the dissociated products, Na, was ionized by using resonance ionization method. By analysing time of flight mass spectra (TOFMS) of sodium ion  $\text{Na}^+$ , the feature of  $\text{Na}^+$  mass spectra was studied and the possible multiphoton-ionization (MPI) process was discussed.

**Key words** photodissociation, resonance ionization, multiphoton ionization, time of flight mass spectra

### 掺 Yb 光纤激光器

最近,我们成功地用国产掺 Yb 光纤,采用不同的波长泵浦,获得了在  $1\ \mu\text{m}$  附近的光纤激光。

实验用的光纤由武汉邮电科学研究院研制。光纤拉制采用 MCVD 工艺,采用溶液法掺入 Yb 离子,  $\text{Yb}^{3+}$  浓度为 2000 ppm。光纤芯径为  $4.3\ \mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.23, 截止波长为  $1.13\ \mu\text{m}$ 。泵浦源为大功率的 Ti:Sapphire 激光器, 波长在 860~980 nm 范围内的激光输出大于 200 mW。在现阶段的实验中, 采用典型的 F-P 激光谐振腔。泵浦光经显微物镜(20 $\times$ )与双色镜(对泵浦光,  $T > 80\%$ ; 对光纤激光,  $R > 99\%$ )耦合入紧贴双色镜的泵浦激光器前腔镜。总的泵浦耦合效率约 35%。针对掺 Yb 光纤的吸收峰, 我们用 915 nm 的激光进行泵浦。大部分实验采用的光纤长度为 3.5 m。实验表明: 当用光纤后端的 3.5% 菲涅耳反射作为后腔镜时, 光纤阈值振荡泵浦功率为 11 mW, 斜效率为 50%。泵浦光功率为 77 mW 时, 得到 33.6 mW 的激光输出, 激光中心波长为  $1.03\ \mu\text{m}$ , 谱宽(FWHM)为 3.5 nm; 再加对  $1.03\ \mu\text{m}$  反射率为 80% 的后腔镜时, 阈值功率降为 5 mW 左右, 斜效率可达 68%。此时的泵浦功率取吸收 77 mW 时,  $1.03\ \mu\text{m}$  激光输出功率可达 50 mW。将泵浦光调制为脉宽为 3 ms 的方波后, 用 PIN 管和存贮示波器观察光纤激光波形, 发现弛豫振荡类似有阻尼的正弦波, 周期约 8  $\mu\text{s}$ 。我们用 980 nm(对应于掺 Yb 光纤的强吸收峰)的泵浦光泵浦该光纤, 但没有得到  $1.03\ \mu\text{m}$  的激光。这一结果可能是因为所谓的寿命猝灭(lifetime quenching)造成的。我们也用 860 nm 的泵浦光进行了实验。在用光纤后端的菲涅耳反射(反射率 3.5%)作后腔镜时, 阈值泵浦功率为 17 mW, 中心波长为  $1.036\ \mu\text{m}$ , 谱宽(FWHM)为 3 nm。泵浦光功率为 77 mW 时, 得到 42 mW 的激光功率, 斜效率为 64%; 再加上对  $1.03\ \mu\text{m}$  反射率为 95% 的后腔镜后, 阈值功率降低为 10 mW, 斜效率降为 23%。在以上实验中, 输出激光的激光空间模式以  $\text{LP}_{11}$  模为主, 有时能得到  $\text{LP}_{01}$  模。

实验结果也表明, 用波长 860 nm 或 915 nm 的光泵浦时, 只要选用短光纤 ( $L < 0.5\ \text{m}$ ), 即可方便地得到 975 nm 的激光振荡。这种特性是掺 Yb 光纤激光所独有的。

中国科学院上海光机所高功率激光物理联合实验室

陈兰荣 华仁忠 逯其荣 陈 柏 刘玉璞 张影华 徐世祥 陈绍和 林尊琪

武汉邮电科学研究院 尹红兵 刘有信

复旦大学物理系 赵永华 孙迭簏 李富铭

1998 年 2 月 5 日收稿