

# 钠蒸气中的双光子共振三光子电离和 双光子混合共振三光子电离

钱祖良 贾锁堂 秦莉娟 王祖赓

(华东师范大学物理系, 上海 200062)

(国家教委华东师范大学量子光学开放实验室, 上海 200062)

(中国科学院上海光学精密机械研究所、华东师范大学量子光学联合开放实验室)

**摘 要** 在钠原子-分子混合样品中, 分别运用双光子共振三光子电离以及双光子混合共振三光子电离, 测得了钠原子  $4D$  态的电离流时间衰减曲线。由电离流与多光子动力学参数的关系, 得到了  $4D$  态的光电离截面。

**关键词** 三光子电离, 双光子混合共振, 光电离截面。

## 1 引 言

激发态电离截面是研究原子分子结构的一个很重要的动力学参数, 随着共振多光子电离等诸多技术的发展, 大大推动了原子和分子高激发态以及里德堡态的研究<sup>[1]</sup>。近年来, 又有不少关于原子和分子激发态电离截面研究的报道, 例如 Armstrong 等对钡原子激发态的电离截面进行了研究<sup>[2]</sup>, Bouchiat 等报道了铯原子分子某一激发态电离截面的测定<sup>[3]</sup>, 林美荣等对苯分子高激发态的电离截面的测定<sup>[4]</sup>等。早先, 曾有以三步共振光电离方法测定钠原子  $4D$  态光电离截面的报道<sup>[5]</sup>, 在该方法中用了两台染料激光器。本文分别运用钠原子的等频双光子共振三光子电离法以及钠分子-原子的等频双光子混合共振三光子电离法, 测得了钠原子  $4D$  态的光电离截面。

## 2 原 理

图 1 画出钠分子和钠原子混合样品的有关能态, 从中可知: 1) 如将染料激光器的波长调谐到钠原子  $3S \rightarrow 4D$  双光子共振, 则第三个光子将使钠原子电离, 这即为双光子共振三光子电离(在图中该过程用  $a$  表示); 2) 如将染料激光波长调谐到  $3P \rightarrow 4D$  共振, 这将实现钠分子-原子的混合共振<sup>[6]</sup>, 这时, 第一个光子先将钠分子从基态泵浦到激发态, 通过分子-原子碰撞能量转移, 使钠原子  $3P$  态获得布居, 第二个光子使  $3P \rightarrow 4D$  共振, 而第三个光子将使钠原子电离, 这即为双光子混合共振三光子电离(图中用  $b$  表示)。现以  $|0\rangle$  表示为钠原子的基态,

\* 本项目得到国家自然科学基金资助。

收稿日期: 1994年9月2日; 收到修改稿日期: 1994年11月21日

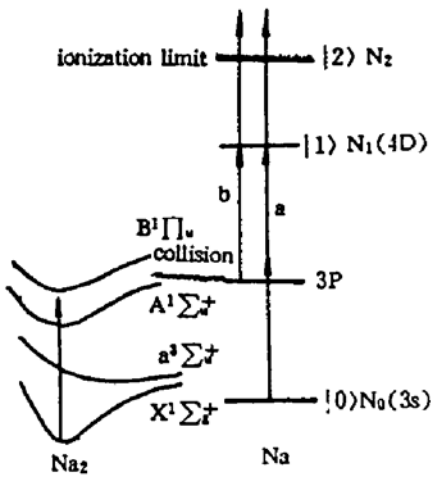


Fig. 1 The energy level scheme of Na<sub>2</sub>-Na  
 a: two-photon resonant three-photon ionization  
 b: two-photon hybrid resonant three-photon ionization

|1>表示 4D 态, |2>表示电离连续态。对于原子的双光子共振三光子电离, 可写出如下的速率方程:

$$\left. \begin{aligned} dN_0(t)/dt &= -N_0(t)\sigma^{(2)}I^2, \\ dN_1(t)/dt &= N_0(t)\sigma^{(2)}I^2 - N_1(t)(\sigma^{(1)}I + \gamma) \\ dN_2(t)/dt &= N_1(t)\sigma^{(1)}I. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $\sigma^{(1)}$  为 |1> 态的电离截面,  $\sigma^{(2)}$  为 |0> 态的吸收截面,  $\gamma$  为 |1> 态的辐射和无辐射弛豫速率总和,  $N_0$ 、 $N_1$ 、 $N_2$  分别为 |0> 态、|1> 态和 |2> 态的粒子数,  $I$  为激光光强。

假设初始条件为:  $N_0(t=0) = N_0$ ,  $N_1(t=0) = 0$ ,  $N_2(t=0) = 0$ , 则可得到电离流与时间  $t$ , 激发光强  $I$  以及各个参数  $\sigma^{(1)}$ 、 $\sigma^{(2)}$ 、 $\gamma$  的关系:

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = \frac{N_0\sigma^{(2)}\sigma^{(1)}I^3}{\sigma^{(1)}I\gamma - \sigma^{(2)}I^2} \{ \exp[-\sigma^{(2)}I^2t] - \exp[-(\sigma^{(1)}I + \gamma)t] \} \quad (2)$$

$$\text{令 } c = N_0\sigma^{(2)}\sigma^{(1)}I^3 / \sigma^{(1)}I + \gamma - \sigma^{(2)}I^2, \quad 1/T_1 = \sigma^{(1)}I + \gamma, \quad 1/T_2 = \sigma^{(2)}I^2 \quad (3)$$

则上式变为:

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = c[\exp(-t/T_2) - \exp(-t/T_1)] \quad (4)$$

对于双光子混合共振三光子电离, 注意到电离信号的衰减时间远大于该过程中存在的分子-原子碰撞时间, 因而在现在的测量研究中, 可认为该电离过程等效于一个 3P → 4D 单光子共振双光子电离的过程。其电离流时间衰减曲线为:

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = c'[\exp(-t/T_2) - \exp(-t/T_1)] \quad (5)$$

其中:

$$c' = \frac{N_0\sigma^{(1)}\sigma^{(2)}I^2}{\sigma^{(1)}I + \gamma - \sigma^{(2)}I^2}, \quad \frac{1}{T_1} = I\sigma^{(1)} + \gamma, \quad \frac{1}{T_2} = \sigma^{(2)}I \quad (6)$$

于是, 由实验分别测得二种电离过程在不同光强下的多光子电离流衰减曲线, 分别利用 (4) 式和 (5) 式对实验曲线进行最小二乘推拟合, 即可求出参数  $T_1$ , 而后由 (3) 式和 (6) 式中的  $T_1$  表达式可求得电离截面  $\sigma^{(1)}$ 。

### 3 实验装置

实验装置如图 2 所示。激发源为 Quantel 公司生产的 Datchrom-5000 型 YAG 激光器泵浦的脉冲染料激光器, 脉宽 12 ns, 线宽 0.01 nm, 重复频率 10 Hz, 单个脉冲的能量为 1~10 mJ, 聚焦光斑的实测半径为 1 mm。二倍频 YAG 激光泵浦的罗丹明 6 G 染料激光可在 550.0 nm~610.0 nm 波段内连续调谐。染料激光经分束器分为两束, 能量很小的一束引入能量计, 以测量进入样品池的能量。另一束通过会聚透镜  $L$  聚焦到热管炉的中心。热管炉长 70 cm, 加热区两端用石英玻璃密封, 管内装有约 10 g 的钠样品。在热管炉内装有平行于激光束的一电极, 在电极和热管炉的外壳加上 20 V 的直流偏压以收集离子。实验使用的 Boxcar 为 EG&G 公司生产的 4100 型, 收集到的电离信号经 Boxcar 送到计算机处理。

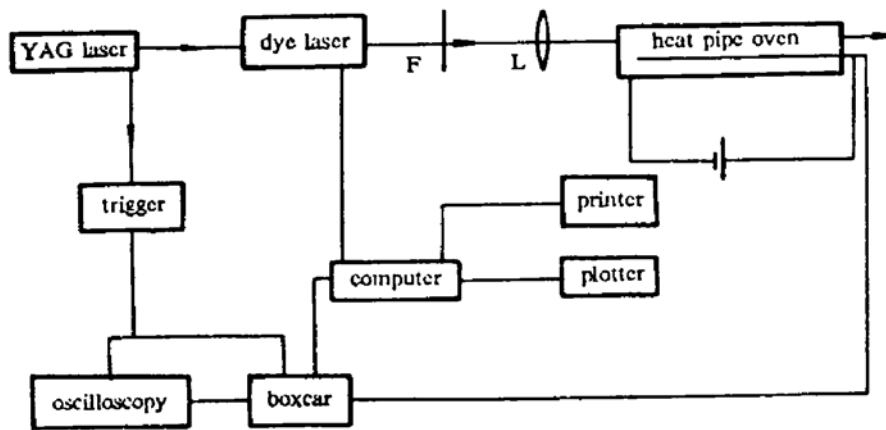


Fig. 2 Experimental setup

#### 4 结果与讨论

当激光波长调谐到 578.7 nm ( $3S \rightarrow 4D$  双光子共振跃迁波长) 时, 测得了如图 3(a) 所示的双光子共振三光子电离讯号谱; 而当激光波长调谐到 568.3 nm 和 568.8 nm (对应于  $3P_{1/2} \rightarrow 4D$  和  $3P_{3/2} \rightarrow 4D$  的跃迁波长) 时, 测得了如图 3(b) 所示的双光子混合共振三光子电离讯号谱。图 4 示出了激发波长为 578.7 nm 时的电离信号时间谱。根据(4)式和(5)式, 用最小二乘法拟合实验曲线, 可得到不同光强时的对应于三个不同激发波长的三组  $T_1$ 。由激光能量、重复频率和光斑面积求出泵浦激光的光子通量。实验中改变六个不同的光强, 在求出相应的光子通量和  $T_1$  后, 以光子通量为横坐标以  $1/T_1$  为纵坐标对六点进行直线拟合, 然后与(3)式和(6)式比较, 斜率即为光电离截面  $\sigma^{(1)}$ , 截距即为弛豫系数  $\gamma$ 。实验中, 前后用能量计测量了激光束所通过的透镜和石英窗片的能量衰减特性, 在计算光子通量时加以考虑。图 4 和图 5 示出了激发波长为 578.7 nm 时所测得的实验值和拟合结果, 图 5 中的横坐标为对应于所用光强的光子通量。由此求出相应的光电离截面的弛豫系数。现将所得结果列于表 1:

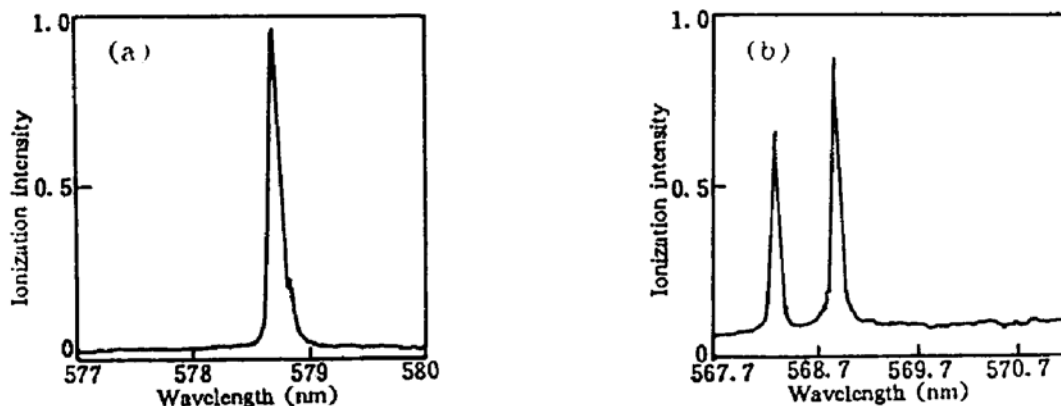


Fig. 3 (a) Two-photon resonant three-photon ionization (b) two-photon hybrid resonant three-photon ionization

Table 1 Ionization cross section of 4D state

Wavelength (nm)	Cross section ( $\text{cm}^2$ )	Relaxation rate ( $\text{s}^{-1}$ )
578.7	$(2.8 \pm 0.4) \times 10^{-18}$	$(5.1 \pm 0.5) \times 10^8$
568.3	$(2.1 \pm 0.3) \times 10^{-18}$	$(7.2 \pm 0.4) \times 10^8$
568.8	$(2.7 \pm 0.4) \times 10^{-18}$	$(5.0 \pm 0.6) \times 10^8$

可以看出, 本工作用两种不同的激发电离途径所得到的钠原子 4D 态的电离截面值与文献[5]中用两步不等频共振光电离方法所得到的电离截面值( $1.2 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ )基本一致。在测

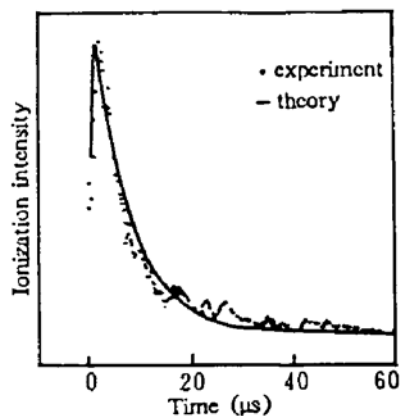


Fig. 4 The measured and theoretical fitting ion decay curves excitation wavelength; 578.7 nm

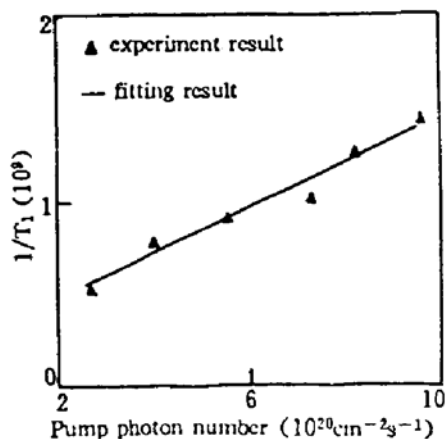


Fig. 5 The plot of  $1/T_1$  at various photon current density

量电离截面的同时,还得到了双光子吸收截面及无辐射弛豫等参数,它们与所报道的理论计算结果也是相符的。由于光子通量的变化直接影响光电离截面的测量定,因此本实验的误差主要来自于激光器的能量起伏和能量绝对测量中的误差。本工作中所采用的电离途径有可能运用到其它的原子与分子激发态光电离截面的测量。

### 参 考 文 献

- [1] D. S. Klinger, *Ultrasensitive Laser Spectroscopy*. Academic press Inc., New York, 1983: 260
- [2] Darrell J. Armstrong, Robert P. Wood, Chris H. Greene, Photoionization of the  $5d6p^3D_1$  state of barium. *Phys. Rev. (A)*, 1993, **47**(3): 1981~1988
- [3] M. A. Bouchiat, J. Guen, Ph. Jacquier *et al.*, Absolute measurements of the photoionization cross section of the  $5D_{5/2}$  Cs excited state and of the photodissociation cross section of  $Cs_2$  between 540 and 550 nm. *Chem. Phys. Lett.*, 1992, **199**(1/2): 85~92
- [4] 林美荣, 刘耀明, 张包铮等, 用共振多光子电离技术测量分子动力学参数. *光学学报*, 1993, **13**(11): 971~974
- [5] 厚美英, 张祖仁等, 钠原子的饱和三步共振光离化. *光学学报*, 1985, **5**(8): 691~696
- [6] Wang Zugeng, Qin Lijuan, Ma Longshong *et al.*, Two-photon hybrid resonant laser and photodissociation laser by two-photon pumping covering a wide wavelength region in the potassium vapor. *Opt. Commun.*, 1984, **51**(3): 155~159

## Two-Photon Resonant Three-Photon Ionization and Two-Photon Hybrid Resonant Three-Photon Ionization in $Na_2-Na^*$

Qian Zuling    Jia Suotang    Qin Lijuan    Wang Zugeng

(Department of Physics, East Chia Normal University, Joint Laboratory for Quantum Optics, SIOFM, Academia Sinica and East China Normal University, Shanghai 200062)

(Received 2 September 1994; revised 21 November 1994)

**Abstract** By two-photon resonant three-photon ionization and two-photon hybrid resonant three-photon ionization in  $Na_2-Na$ , the ion current time decay curve was measured. From the relation between ion current and multiphoton dynamic parameters photon-ionization cross-section of  $4D$  state in atomic sodium was determined.

**Key words** three-photon ionization, two-photon hybrid resonance, ionization cross-section.