

文章编号: 0258-7025(2002)05-0421-04

# 钾原子的能量积聚诱导电离和双光子 共振三光子电离

李昌勇, 肖连团, 张临杰, 马维光, 贾锁堂

(山西大学电子信息技术系量子光学和光量子器件国家重点实验室, 山西太原 030006)

**摘要** 用染料激光激发钾蒸气, 发现了钾原子的两种电离机制和三个电离通道: 能量积聚诱导的电离,  $4S-6S$  和  $4S-4D$  双光子共振三光子电离。对前两个电离通道, 分别研究了电离谱与钾蒸气温度和激光强度的关系, 发现了钾原子的辐射囚禁效应和钾原子电离的非线性现象, 并给出了定性解释。

**关键词** 钾原子, 能量积聚, 双光子共振三光子电离, 电离通道, 辐射囚禁

**中图分类号** TN 249; O 562.4 **文献标识码** A

## Two-photon Resonant Three-photon Ionization and Energy Pooling Induced Ionization of Atomic Potassium

LI Chang-yong, XIAO Lian-tuan, ZHANG Lin-jie, MA Wei-guang, JIA Suo-tang

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,

Department of Electronics & Information Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006)

**Abstract** Atomic potassium is ionized by three channels when it is excited by a pulse dye laser. They are energy pooling induced ionization,  $4S \rightarrow 6S$  and  $4S \rightarrow 4D$  two-photon resonant three-photon ionization. The ionization current intensity at various vapor temperature and laser intensity were investigated for the former two ionization channels. The atomic radiation trapping and nonlinear ionization were found in ionization current spectra. The qualitative explanations for above phenomena are given.

**Key words** atomic potassium, energy pooling, two-photon resonant three-photon ionization, ionization channel, radiation trapping

自激光出现以来, 用激光激发原子和分子, 进而使之电离成了研究原子和分子结构及其相互作用过程的重要方法和工具<sup>[1]</sup>。

如图 1 中虚线箭头所示, 激光器波长调谐到  $4S-4P$  (766.4 nm, 769.8 nm) 单光子共振位置, 则会产生大量  $4P$  态粒子, 粒子之间的热碰撞通过能量积聚效应<sup>[2~4]</sup>会产生更高能级的粒子, 这些粒子再吸收一个光子使原子电离, 从而观察到电离信号, 这即为能量积聚效应诱导电离。

如图 1 中实线箭头所示, 将染料激光的波长调

谐到  $4S-6S$  (728.4 nm) 或  $4S-4D$  (729.8 nm) 双光子共振位置, 基态钾原子 ( $4S$ ) 吸收两个光子跃迁到激发态 ( $6S$  或  $4D$ ), 然后第三个光子使钾原子电离, 此即双光子共振三光子电离<sup>[1]</sup>。本文实验研究了电离谱随温度和激光强度的变化情况。对相关的现象作了定性解释。

## 1 实验装置

实验装置如图 2 所示。激发源为 Spectra-physics 公司生产的 DCR-3 型 YAG 激光器抽运的

收稿日期: 2000-11-07; 收到修改稿日期: 2001-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 60078009)和山西省青年科学基金(批准号: 991015)资助项目。

作者简介: 李昌勇(1967—), 男, 山西大学电子系讲师, 在职博士, 主要从事激光光谱、分子光谱与激光器件研究。E-mail:

lichyong@mail.sxu.edu.cn

PDL-2 染料激光器。实验中采用 LDS751 染料，激光可在 720~780 nm 波段内连续可调。脉宽~8 ns，线宽  $0.3 \text{ cm}^{-1}$ ，重复率 10 Hz，单个脉冲的最大能量为 6 mJ，聚焦光斑的实测半径为 1 mm。热管炉长 70 cm，管内装有适量钾样品，两端用有机玻璃密封。在热管炉内装有平行于激光束的一导线型电极，在电极和热管炉的外壳通过一个电阻后加上 18 V 的直流电压，以收集离子。实验使用了 SRS 型 Boxcar，HP 54111D 型 500 MHz 数字示波器，收集到的信号经 Boxcar 送到微机进行处理。

过程要比双光子过程容易发生，正是在这些吸收波长位置钾原子得到电离。

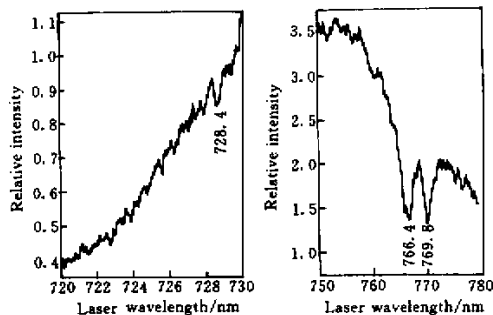


图 3 钾原子的吸收光谱

Fig. 3 Absorption spectra of atomic potassium

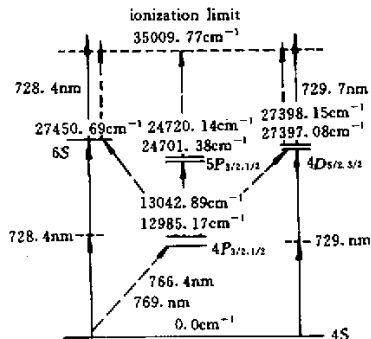


图 1 钾原子能级及其电离过程示意图

(实线表示双光子共振三光子电离通道,虚线表示能量积聚诱导电离通道)

Fig. 1 Relative levels of atomic potassium and the diagram of ionization process

Solid arrows represent the channels of two-photon resonance three-photon ionization and dash arrows represent the channels of energy-pooling induced ionization

### 2.2 能量积聚效应诱导钾原子电离

图 4 所示为在不同温度下所测出的电离流随波长的变化情况。在低温下(小于 390 C),当染料激光波长为 766.4 nm 和 769.8 nm 时,钾原子得到了较强的电离。随着温度的增加,电离信号会逐渐变弱。当温度上升到 400 C 时,电离谱出现凹陷,这可能与多个原因引起。由于此凹陷与文献[3]观察扩散带辐射时的凹陷非常类似,所以可能是由辐射囚禁效应引起的。在温度较高时,单位体积的粒子数增加,在强激光激发下,布居到 4P 态的粒子数增加,4P 态粒子通过辐射返回基态的几率也增加。放出的辐射又被基态原子吸收,这样循环往复,4P 态粒子不再发生能量积聚过程或者说发生能量积聚过程的几率变得很小,从而在电离谱上形成凹陷;另一原因是由于相对于高温下的大量粒子,激光光子较少,大部分或全部光子被钾原子吸收,只有很少或甚至没有光子使能量积聚产生的高激发态原子电离,从而形成凹陷;另外,文献[4]报道了在高温下,钠原子的 3P 激发态原子之间碰撞较低温更容易形成激发态分子,钾原子类似于钠原子在高温下也能形成激发态分子,这些都会导致电离信号的减弱。

### 2.3 4S-6S 双光子共振三光子电离信号与温度的关系

图 5 所示为在 728.4 nm 附近不同温度下所测出的电离流随波长的变化情况。当染料激光波长为 728.4 nm 时,钾原子得到了较强的电离。随着温度的增加,电离信号会逐渐增强。当温度上升到 340 C 时,电离谱出现最强值。然后随着温度升高,电离信号逐渐变弱。在温度小于 340 C 时,由于温

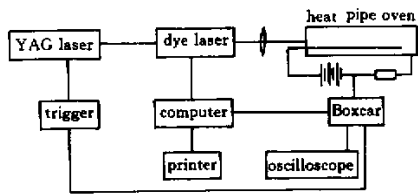


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 钾原子的吸收光谱

图 3 为钾原子的吸收光谱。图中未消除染料激光强度随输出波长变化带来的起伏。从图中可以看到当激光波长为 766.4 nm,769.8 nm 及 728.4 nm 时都有明显吸收,而且对 766.4 nm,769.8 nm 的吸收远大于对 728.4 nm 的吸收,这正说明了单光子

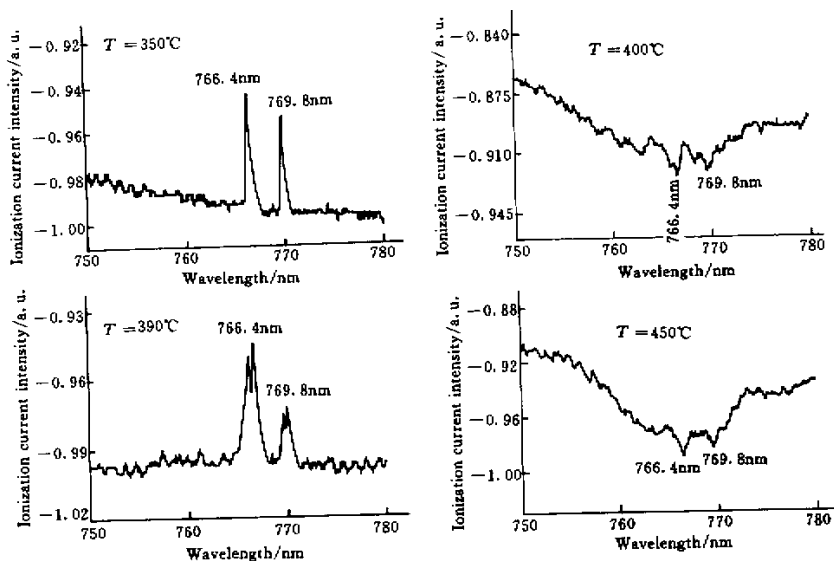


图 4 在不同温度下所测出的激光波长范围为 750~780 nm 的电离谱

Fig. 4 Ionization current spectra as the laser is scanned in the wavelength range of 750~780 nm at various temperature

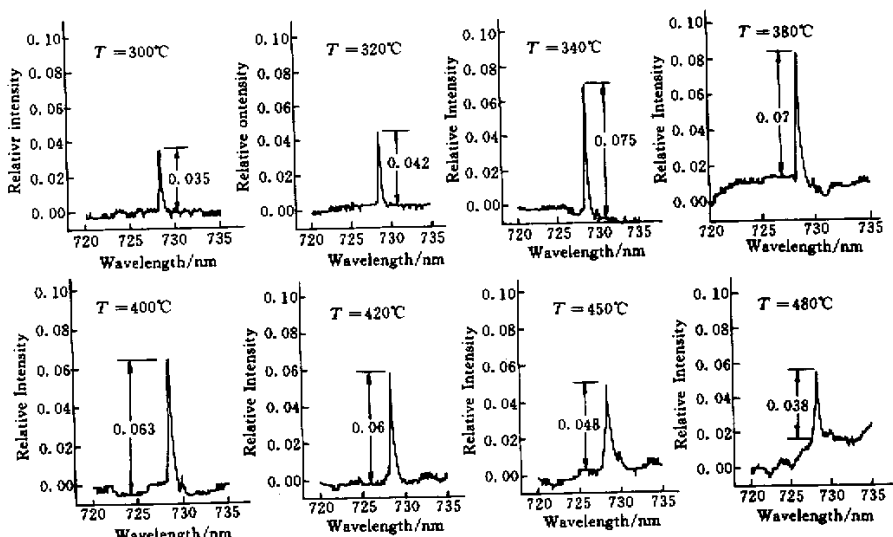


图 5 不同温度下测出的激光波长范围为 720~735 nm 的电离谱

Fig. 5 Ionization current spectra as the laser is scanned in the wavelength range of 720~735 nm at various temperature

度越高,钾蒸气中钾原子密度越高,参与双光子共振的粒子数增多,导致电离粒子数增加。在温度继续升高时,钾原子密度更高,通过双光子共振布居到 6S 态的粒子数增加,6S 态粒子通过碰撞能量转移到达更高激发态或较低激发态的几率增加,以至于能够形成受激辐射<sup>[5,6]</sup>,从而参加电离的粒子数减少。在高温下,也有利于激发态分子的形成<sup>[4]</sup>,这些都会导致电离信号的减弱。

## 2.4 4S-6S 双光子共振三光子电离强度与激光激发强度的关系

图 6 所示为温度在 420°C 时不同强度 728.4 nm 激光激发下电离流的时间谱。从图上可以看出,随激光强度的增强,电离流逐渐增加,当激光强度上升到 3.56 mJ 时,电离流升到最大值,再增加激光强度,电离流最大值反而下降。电离流随激光强度的增加而增强是容易理解的,因为随着激光强度增加,会有

更多的粒子参与双光子共振而到达  $6S$  态,更多的  $6S$  态原子能够再吸收一个光子而被电离。但当激光强度继续增加,以至于能够最大比率地将饱和蒸气压下的基态粒子通过双光子共振抽运到  $6S$  态,则电离流达到最大值,这时,如果再增加激光强度,电离流反而会降低。这一现象超出了人们的想象,同时也觉得有趣。理论上可以作如下定性的解释:在热蒸气中,原子之间相互碰撞以至于产生了能量转移, $6S$  态的原子通过碰撞到达其他态,各激发态粒子数的大量布居,能够形成受激辐射。Juin-huei 等<sup>[7]</sup>已经报道了在钾原子蒸气中用激光双光子共振法(对应于  $4^2S_{1/2}-3^2D_{5/2}$  跃迁),观察到了 50 条谱线,其中有许多是受激辐射。在先前的实验中,也发现了钾原子的受激辐射<sup>[5,6]</sup>。这些受激辐射的产生,导致了  $6S$  态的粒子参与再吸收一个光子被电离的几率减小,从而电离流变小。

### 2.5 $4S-4D$ 双光子共振三光子电离

图 7 所示为实验测得的双光子共振三光子电离信号。电离谱中较小的峰值对应的激光波长为 729.7 nm,此值正好与钾原子  $4S-4D$  双光子共振的理论波长值相等。对于  $4D$  态的双光子共振吸收,理论上能够发生,实验上  $3D$  的双光子共振吸收已经由 Juin-huei 等<sup>[7]</sup>观察到,并作了详细研究。由于使用电离光谱技术具有较高的灵敏度,甚至可以达到单离子的探测极限<sup>[8]</sup>,所以尽管吸收谱中未能观察到 729.7 nm 的吸收峰,我们还是把在电离谱上发现的峰值认为是  $4S-4D$  双光子共振三光子电离引起的。由于激光能量在此波长不很强,所以电离峰值较小。

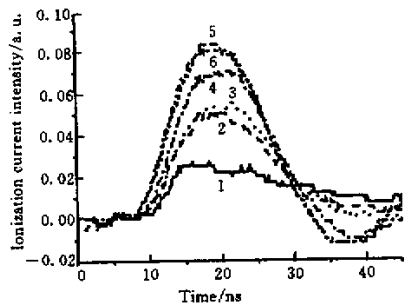


图 6 不同强度 728.4 nm 激光激发下电离流的时间谱  
曲线 1~6 分别是在激光能量为 0.89, 1.47, 1.98,  
2.81, 3.56, 3.86 mJ 时测得的

Fig. 6 Time-resolved spectra of ionization current with various laser intensity at 728.4 nm

Curve 1~6 were obtained with the laser excited intensity of 0.89, 1.47, 1.98, 2.81, 3.56, 3.86 millijoule, respectively

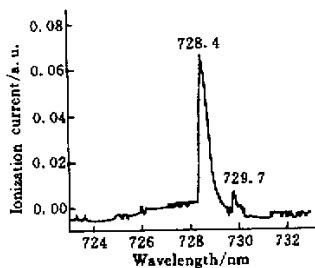


图 7 钾原子的双光子共振三光子电离谱

Fig. 7 Two-photon resonance three-photon ionization spectra of atomic potassium

## 3 结 论

钾原子能够通过两种机制三个通道实现电离,其中  $4S-6S$  的双光子共振三光子电离和能量积聚诱导电离信号较强。前者先随温度升高而增强,到达最大值后,又随温度升高而减弱。在温度不变的情况下,先随激光强度的增强而增加,到达最大值后,又随激光强度增强而减弱。后者先随温度升高而增强,当温度达到 390 C 时获得最大值,温度继续升高则会出现凹陷,这是由于辐射的囚禁效应和高温下钾原子粒子数增加对激光吸收增强,使参与电离的光子数减少等原因引起的。 $4S-4D$  的双光子共振三光子电离信号较弱。

### 参 考 文 献

- 1 Li Changyong, Xiao Liantuan, Li Qian *et al.*. Two-photon resonant three-photon ionization of atomic potassium [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(12): 1604~1607 (in Chinese)
- 2 C. Vadla, K. Niemax, J. Brust. Energy pooling in cesium vapor [J]. *Z. Phys. D*, 1996, **37**(3): 241~247
- 3 Xiao Liantuan, Li Changyong, Guo Shuqin *et al.*. Dif-fused-band radiation of molecular potassium generated by the energy-pooling effect [J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **68**(4): 727~729
- 4 S. N. Atutov, V. Biancalana, S. Brandt *et al.*. Obser-vation of sodium molecular formation induced by resonant laser atomic excitation and three-body collisions [J]. *Opt. Comm.*, 1999, **168**(5-6): 355~362
- 5 Wang Yong, Jia Suotang, Qin Lijuan *et al.*. Wave-mixing processes with various stimulated radiation in atomic potassium [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(9): 936~939 (in Chinese)
- 6 Jia Suotang, Qin Lujuan, Qian Zuliang *et al.*. Genera-tion of molecular diffuse-band stimulated radiation through multiple excitation mechanism in potassium molecule-atom system [J]. *Science in China(A)*, 1997, **40**(2): 191~200
- 7 Juin-huei Tsai, Mao-hong Lu. A rich spectrum from potassium vapor on the  $4^2S_{1/2}-3^2D_{5/2}$  two-photon resonance [J]. *Appl. Phys. B*, 1990, **51**(6): 386~394
- 8 Xia Huirong, Wang Zugeng. Introduction of Molecular Spectroscopy and Laser Spectroscopy [M]. Shanghai: Press of East China Normal University, 1989. 418~421 (in Chinese)