

用共振激发延迟电离方法测定 原子激发态的光电离截面

张 森 陆 杰 吴璧如
(浙江大学物理系)

提 要

用两束脉冲激光,一束使原子共振激发,另一束使激发态原子电离,当电离光脉冲能量约达 $1\text{J}/\text{cm}^2$ 时,可使电离饱和。测量被电离原子数的相对大小与电离光脉冲能量之间的函数关系,可以方便地得出原子激发态的光电离截面。延迟电离光至激发光脉冲结束后到达作用区,可以修正激发光对电离的贡献,并避免电离光引起的 Stark 位移对共振激发的影响。应用共振激发延迟电离方法测定了 Cs 原子 $7^2P_{3/2}$ 态的光($\lambda=5320\text{\AA}$)电离截面,测量值 $\sigma_I=6.5\times 10^{-18}\text{cm}^2$,与 Manson 的计算值非常接近。

一、引 言

用饱和共振电离方法测定原子激发态的光电离截面,由于只需测量电离光的能量和截面,以及电离信号的相对大小,而毋需测量原子的密度,作用区体积,以及产生的离子的绝对数,因此是一种简便而又有较高精度的方法。利用饱和的方法,Heinzmann 等^[1]用单一光束两步电离测定了 Cs 原子 $7P$ 态的光($\lambda=4593\text{\AA}$, $\lambda=4555\text{\AA}$)电离截面, Амбарцумян 等^[2]用两光束两步电离测定了 Rb 原子 $6P$ 态的光($\lambda=6943\text{\AA}$, $\lambda=3471\text{\AA}$)电离截面, Smith 等^[3]用两束连续激光和一束脉冲激光测定了 Na 原子 $4D$ 态和 $5S$ 态的光($\lambda=1.06\mu\text{m}$)电离截面。

用两光束两步电离方法,电离光的波长不受原子共振跃迁波长的限制,可以测定原子激发态对不同波长的光电离截面。但是,如果激发能超过电离能的一半,则激发光也同时参与电离,特别是在饱和曲线下端的线性区,由激发光产生的离子数是不能忽略的。为了修正激发光对电离的贡献,我们使电离光延迟至激发光脉冲结束后到达作用区,并从两光束产生的离子总数中减去单独由激发光产生的离子数,从而得出仅对应于电离光的饱和曲线,使问题简化。

二、原 理

频率为 ω_1 的脉冲激发光使原子由基态 $|0\rangle$ 共振激发至受激态 $|1\rangle$,设激发能大于电离能的一半,当光脉冲能量足够大,而作用时间远小于原子激发态的寿命,并且原子密度不大时,忽略由 $|1\rangle$ 态向低能级的自发跃迁和无辐射跃迁,在一个光脉冲作用期间被电离的原子数为^[4]

$$N_i = N_0(0) \left[1 - \exp\left(-\frac{g_1}{g_0 + g_1} \sigma_i \phi_1(\omega_1)\right) \right], \quad (1)$$

其中 $N_0(0)$ 为作用开始时 $|0\rangle$ 态的原子数, $\phi_1(\omega_1)$ 为每脉冲通过单位面积的光子数, σ_i 为 $|1\rangle$ 态原子对频率为 ω_1 的光的电离截面, g_0 、 g_1 为 $|0\rangle$ 态和 $|1\rangle$ 态的简并度。

脉冲作用后, 能级 $|1\rangle$ 上剩余的原子数为

$$N_1 = \frac{g_1}{g_0 + g_1} N_0(0) \exp\left[-\frac{g_1}{g_0 + g_1} \sigma_i \phi_1(\omega_1)\right]. \quad (2)$$

设激发光脉冲结束后, 频率为 ω_2 的电离光到达作用区, 并且电离光脉冲的持续时间及相对于激发光的延迟时间均远小于原子在能级 $|1\rangle$ 的寿命, 则在电离光作用下 $|1\rangle$ 态原子集居数 n_1 的变化速率

$$\frac{dn_1}{dt} = -\sigma_I F_2(\omega_2) n_1,$$

其中 σ_I 为 $|1\rangle$ 态原子对频率为 ω_2 的光的电离截面, $F_2(\omega_2)$ 为电离光的光子通量。积分, 得每一电离光脉冲产生的离子数

$$N_I = N_1 [1 - \exp(-\sigma_I \phi_2(\omega_2))]. \quad (3)$$

当 $\sigma_I \phi_2(\omega_2) \gg 1$ 时,

$$N_I = N_1;$$

$\sigma_I \phi_2(\omega_2) \ll 1$ 时,

$$N_I = N_1 \sigma_I \phi_2(\omega_2).$$

在以上两直线的交点 A(图 4):

$$\sigma_I = \frac{1}{\phi_{2A}(\omega_2)}. \quad (4)$$

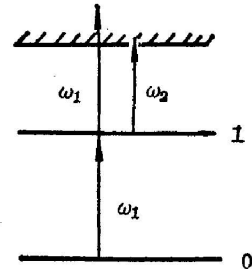


图 1 两步共振电离
Fig. 1 Two-step resonance ionization

三、实验装置和实验方法

实验装置如图 2 所示。YAG 激光器经倍频器 HG 输出的脉宽 6~7 ns 的三倍频光由

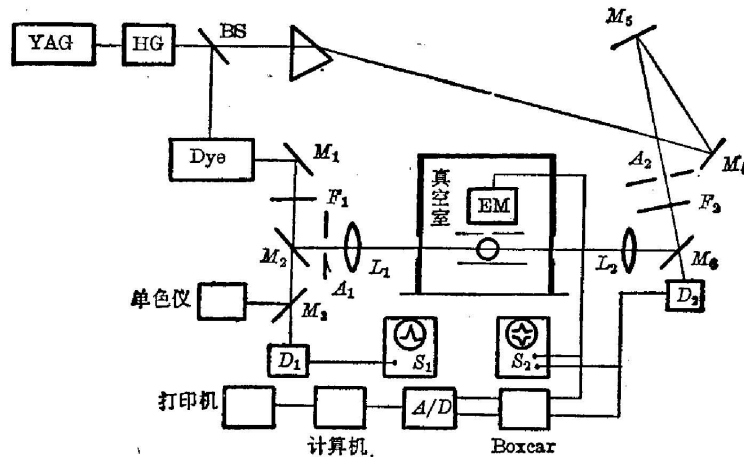


图 2 实验装置图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental arrangement

分束镜 BS 反射, 泵浦染料激光器。染料激光器输出的 $\lambda_1 = 4555 \text{ \AA}$ 的可调谐激光作为激发光, 使 Cs 原子由 $6^2S_{1/2}$ 基态共振激发至 $7^2P_{3/2}$ 态, 同时从 $7^2P_{3/2}$ 态电离一部分 Cs 原子。分束镜的透射光经三棱镜分选出 $\lambda_2 = 5320 \text{ \AA}$ 的倍频光, 作为电离光, 电离 $7^2P_{3/2}$ 态上剩余的 Cs 原子。两光束同轴反向。用各反射镜 M 调节光路长度, 使电离光比激发光延迟 10 ns 到达作用区, 两光脉冲的作用时间和延迟时间均比 Cs 原子 $7^2P_{3/2}$ 态的寿命 (130 ns^[41]) 小得多。

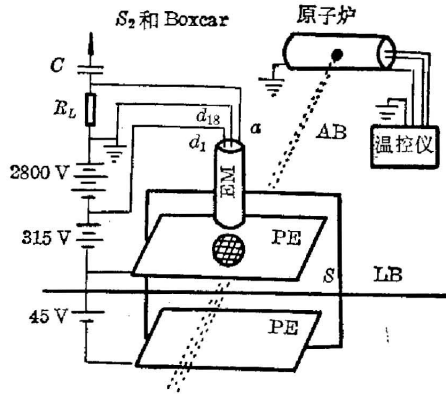


图 3 作用区和电子收集装置

Fig. 3 Interaction region and electron collection equipment

作用区如图 3。Cs 原子束 AB 通过屏板 S 上直径 1 cm 的孔, 垂直于激光束 LB 穿过作用区, 电离产生的电子通过平行板电极 PE 上的网孔进入电子倍增器 EM。电子倍增器输出的电离信号由 Boxcar 的 A 通道测量并输入计算机。电离光的脉冲能量由光电二极管 D_2 和 Boxcar 的 B 通道检测, 亦输入计算机, 检测系统在实验的光照条件下用 NJ-J1 型激光能量计标定。光电二极管 D_1 和示波器 S_1 用于监视激发光能量。

光束的截面积用针孔和光电二极管在作用区内扫描测定, 扫描时沿垂直于光束的 X 和 Y 方向每次步进 0.03 mm。

实验时用滤光片 F_1 选取合适的激发光能量, 用 F_2 改变电离光能量, 每改变一次进行两种测量: 1) 有电离光作用, 此时电离信号的峰值正比于 $N_t + N_i$; 2) 无电离光作用, 此时电离信号峰值正比于 N_t 。

四、实验条件和测量结果

真空度: 3×10^{-6} Torr。原子炉温度 $t = 140 \pm 1^\circ \text{C}$, 作用区内原子束密度估算为^[5] $9 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 。

Nd:YAG 激光器: 输出波长 $1.064 \mu\text{m}$, 线宽 $< 1 \text{ cm}^{-1}$, 脉宽 8~9 ns, 能量 700 mJ/脉冲, 重复率 2~20 次/秒。倍频光能量 200 mJ/脉冲, 实验时用光阑 A_2 选取能量分布较均匀的一部分, 经透镜 L_2 聚焦, 在作用区内光束截面积 $S_2 = 3.3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ 。

染料激光器: 用香豆素 450 染料, 输出波长 4555 \AA , 线宽 0.5 \AA , 能量 0.2 mJ/脉冲, 通过光阑 A_1 并经 L_1 聚焦, 在作用区内光束截面积 $S_1 = 1.4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, 在倍频光束截面 S_2 范围内, 能量分布基本均匀。

测量结果: 饱和曲线如图 4。曲线下端的直线部分由计算机对测量数据作直线拟合得

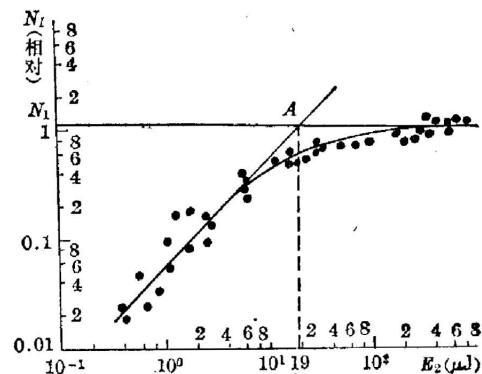


图 4 Cs 原子 $7^2P_{3/2}$ 态电离饱和曲线

Fig. 4 Saturation curve of ionization for the $7^2P_{3/2}$ state of Cs atoms

出。由饱和曲线求得 Cs 原子 $7^2P_{3/2}$ 态的光 ($\lambda = 5320 \text{ \AA}$) 电离截面

$$\sigma_I = 6.5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2.$$

测量值与 Manson 的计算值^[6]非常接近。

五、讨 论

在饱和两步共振电离方法中, 必须使整个电离过程 $|0\rangle$ 态和 $|1\rangle$ 态的原子集居数保持平衡, 才能得出离子数的简单表达式(1)^[4,6]。由于通常脉冲染料激光器的输出线宽多大于原子的吸收线宽, 在激发光的光谱宽度中, 只有一部分能量可用于原子的共振激发, 因此激发光必须具有较大的脉冲能量或很小的线宽。在两光束同时作用的实验(如文献[2])中, 如果原子的激发能大于电离能的一半, 必须使激发光的脉冲能量远小于电离光的能量, 才能忽略激发光对电离的贡献, 因此对激发光的线宽应有很高的要求, 而当激发光的线宽很窄时, 由电离光引起的 Stark 位移又足以使共振激发偏离^[3], 在饱和曲线上不同位置, 这种偏离的程度是不同的。在本实验应用的延迟电离方法中, 激发和电离过程都变成单一光束的作用过程, 只要激发光的脉冲能量不变, 式(3)中的 N_1 即为常数, 式(1)并不是必要的, 因此降低了对染料激光器的要求, 并且修正了由于激发光参与电离引起的误差, 也避免了 Stark 位移对测量的影响。

实验中由于光脉冲能量的起伏, 激发光每脉冲电离的原子数变化 $\frac{\Delta N_i}{N_i} < 9\%$ 。能量检测系统在测量范围内标定, 有较好的线性关系, 数据作直线拟合的相关系数为 0.986, 标定误差小于 10%。电离光束的能量为非高斯型分布, 取通过总能量 90% 的面积作为光束截面积。以上因素均引起测量误差。

感谢陈哲人博士的指导和本校激光教研组陆祖康等同志的帮助。参加本实验工作的还有钱朝元、胡素芬、吴大元、封荣、冷光垚、孙家楨、徐云飞以及共振电离光谱组的其他同志。

参 考 文 献

- [1] U. Heinzmann *et al.*; *Appl. Phys.*, 1977, **12**, No. 1 (Jan), 113.
- [2] Р. В. Амбарцумян и др.; *ЖЭТФ*, 1976, **70**, вып. 5, 1660; *Appl. Phys.*, 1976, **9**, No. 3 (Apr), 335.
- [3] A. V. Smith *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1980, **22**, No. 2 (Aug), 577.
- [4] G. S. Hurst *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1977, **15**, No. 6 (Jun), 2283.
- [5] 张祖仁等;《光学学报》, 1982, **2**, No. 6 (Nov), 535.
- [6] G. S. Hurst *et al.*; *Rev. Mod. Phys.*, 1979, **51**, No. 4 (Oct), 767, 777, 807.

Measuring photoionization cross section for excited of atoms by resonance excitation and delayed ionization

ZHANG SEN LU JIE AND WU BIRU

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou)

(Received 17 February 1984; revised 5 April 1984)

Abstract

Atoms are first excited and then ionized by two different laser pulses, respectively. When the energy per pulse of the ionizing laser is near $1\text{J}/\text{cm}^2$, the ionization is saturated. By measuring the relative number of ionized atoms versus the ionizing laser energy, we can easily obtain the photoionization cross section for the excited state of the atoms. The ionizing laser pulse is delayed until the exciting laser pulse is stopped. It aims to eliminate the contribution of the ionization signal produced by the exciting laser and to avoid the Stark shift produced by the ionizing laser. The photoionization cross section for Cs ($7^2P_{3/2}$) at 5320 \AA has also been measured. The measured value is $\sigma_I = 6.5 \times 10^{-18}\text{ cm}^2$, which is close to Manson's calculation.