

原子两步激发禁戒态寿命及环境辐射的影响*

谢卫军⁺ 方达涓[#] 舒晓武 张 森

(浙江大学物理系, 杭州 310027)

(1995 年 6 月 1 日收到; 1995 年 9 月 26 日收到修改稿)

在 167 V/cm 的静电场中, 借助 Stark 态混合使 Na 原子两步激发禁戒的 np 态得到布居. 用延迟脉冲场电离方法测定了 $np(n=19-23)$ 态的寿命值, 并与理论计算值作了比较. 讨论了外电场及环境辐射等因素对高激发态寿命的影响.

PACC: 3270; 3280

1 引 言

近年来对碱金属原子里德堡态辐射寿命的测量已进行了不少工作^[1-4], 其中多数实验工作是对较低($n < 20$)的激发态用激光感生荧光方法得出辐射寿命值. 由于里德堡态原子寿命随 n^3 增加, 高里德堡态的自发辐射荧光很弱, 因此, 用荧光方法测定高里德堡原子寿命受到光学探测灵敏度的限制. 为了测定原子高激发态寿命, 我们用延迟脉冲场电离法, 改变原子的光激发与场电离之间的延迟时间, 测量电离讯号幅值随延迟时间的衰减, 由衰减曲线即可直接求得能态寿命.

通常用可调谐激光分步激发方法只能获得偶极跃迁允许的各里德堡态的较大的布居, 为了测量偶极跃迁禁戒态的寿命, 我们施加一个较小的直流电场, 借助 Stark 态混合使禁戒态得到布居. 本文报道 Na 原子 $n=19-23$ 两步激发跃迁禁戒的里德堡 p 态寿命的实验测定结果和用数值积分法计算的相应态及邻近态的寿命值, 理论计算与实验结果基本符合. 文中对环境辐射的影响作了讨论和修正.

2 实验方法与结果

场电离方法用来检测特定的里德堡态原子具有简单、高效和较强的选择性. 实验中先使原子激发到有效量子数为 n^* 的里德堡态, 然后施加脉冲电场, 则当电场达到经典场电离阈 $F_0 = 1/16(n^*)^4$ 时, 原子电离.

实验装置见文献[5]. 装有金属 Na 的原子炉加热到 350 °C, 通过作用区的原子束密

* 国家自然科学基金资助的课题.

⁺ 江西省九江师范专科学校物理系, 九江 332000.

[#] 中国计量学院基础部, 杭州 310034.

度小于 10^9 cm^{-3} . 对低密度原子束, 碰撞可忽略. 首先用两束激光把 Na 原子分步从基态 $3s^2S_{1/2}$ 经中间态 $3p^2P_{3/2}$ 激发到各里德堡态. 为了得到 np 态的布居, 在作用区上下相距 0.6 cm 的两平行极板间加 100 V 的直流电压, 产生 $167 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的静电场. 由于偶极跃迁态与 np 态的 Stark 态混合, 允许至 np 的跃迁发生. 在光激发后由高压脉冲电源产生的矩形高压脉冲与直流电压一起迭加到作用区上下两极板上, 用以电离里德堡原子. 电压脉冲相对于光脉冲有一时间延迟, 以避免光激发时存在脉冲电场引起的 Stark 位移. 实验时先改变脉冲电压幅值, 以改变作用区的峰值场强. 脉冲电压的 $1000:1$ 取样信号和由电子倍增管放大的电离信号, 经 Boxcar-XY 记录仪绘出电离讯号与场强的关系图, 从图上可直接得出被测态的电离阈值^[6]. 测量寿命时, 取脉冲电压与直流电压迭加值恰大于被测态的电离阈值, 改变延迟时间, 得出场电离讯号-延迟时间图(见图 1). 由电离信号随时间的衰减曲线, 经拟合得出的 Na 原子 $np(n=19-23)$ 态寿命列于表 1.

忽略环境辐射和碰撞的影响, 原子里德堡态的自发辐射寿命与 $(n^*)^3$ 成比例. 图 2 给

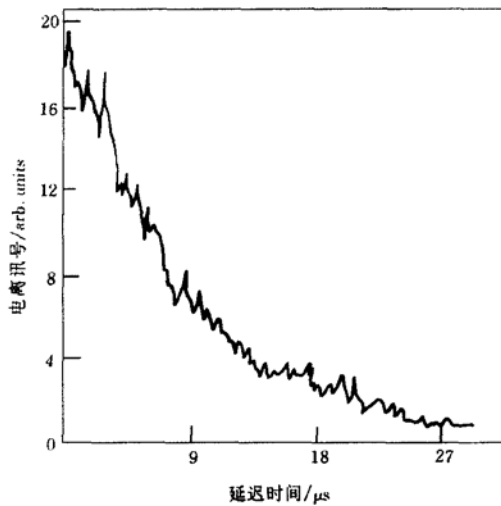


图 1 Na 原子 23p 态的电离讯号-延迟时间图

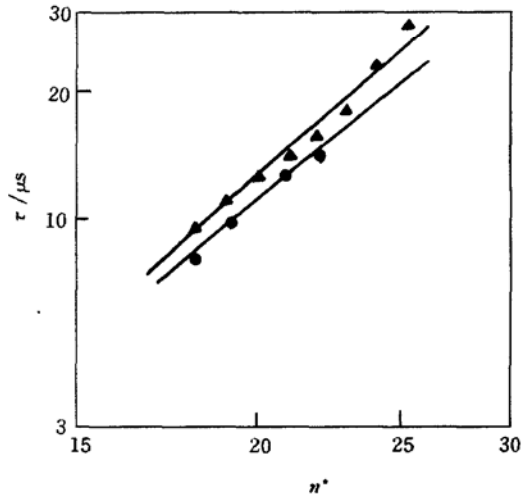


图 2 Na 原子 p 态寿命 τ 与有效量子数 n^* 的关系

●为实验结果; ▲为理论计算

表 1 $T = 300 \text{ K}$ 时 Na 原子 p 态寿命的实验测定值与理论计算值(其中 $A = \sum_{n' < n} A_{nn'}$, $B\rho = \sum_{n' < n} B_{nn'} \rho_{nn'}$)

主量子数 n	实验结果 $\tau/\mu\text{s}$	理论计算结果/ μs			
		$1/(A+B\rho)$	$1/A$	$1/B\rho$	$B\rho/(A+B\rho)$
19	7.8	7.8	9.8	36.5	0.21
20	9.8	8.4	10.5	40.1	0.21
21	11.7	9.2	11.7	43.8	0.21
22	12.3	10.4	13.3	47.7	0.22
23	13.4	12.1	15.6	51.6	0.23
24	-	14.1	18.9	55.6	0.25
25	-	16.9	23.5	59.6	0.28
26	-	20.4	29.9	63.7	0.32

出 Na 原子 p 态寿命的实验测定值及自发辐射寿命理论计算值与 n^* 的关系. 这一关系以 $\tau = \alpha n^{*3}$ 表示, 则上升率 α 的实验值和理论值分别为 1.33 和 1.55 ns.

3 环境辐射的影响

对高激发态原子, 由于能级间隔很小, 实验环境的黑体辐射会引起能级间的受激跃迁, 从而引起激发态的重新布居^[7], 并对原子激发态的实际寿命产生显著的影响. 为了观察环境辐射引起的能级再布居效应, 在实验中分别测定了 Na 原子 21p 态在光激发后延迟 0.1 μs 施加脉冲电场的电离信号-场强图(见图 3 曲线 a)和光激发后延迟了 3 μs 的电离信号-场强图(见图 3 曲线 b). 由图 3 可见, 延迟 3 μs 的电离信号在电离阈值以前的幅度明显升高, 这种升高显然对应于一部分 21p 态的原子被黑体辐射激发到更高的能态, 并且由于 21p 态原子数相对减少, 电离阈值变得模糊. 在本文的实验中, 实际测量的是被测态及其以上能态(包括连续态)的原子数随时间的衰减, 这种衰减仅由自发辐射和向被测态以下能态的受激跃迁引起. 当被测态能级位置不太高时, 由于被测态以下的能级总数远小于被测态以上的能级总数, 黑体辐射引起的受激下跃迁总速率一般应比受激上跃迁的总速率小得多. 此外, 由于环境温度下的黑体辐射谱中与受激下跃迁的相关能级差对应的光子数密度很小($h\nu > kT$), 由此引起的受激下跃迁速率通常比自发跃迁速率小得多. 由表 1 中的计算结果可见, 对实验测定的诸能态, 环境辐射引起的下跃迁速率与总下跃迁速率之比最大为 23% (23p 态), 并且激发态越高, 比值越大, 这是与高激发态具有更大的自发辐射寿命, 因而环境辐射具有更大的影响相一致, 亦与图 2 给出的实验结果相一致.

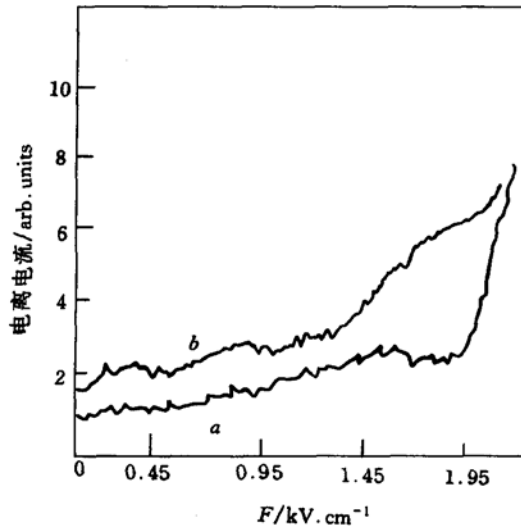


图 3 Na 原子 21p 态电离信号与电离场强的关系 曲线 a 为电离脉冲延迟时间 0.1 μs ; 曲线 b 为电离脉冲延迟时间 3 μs

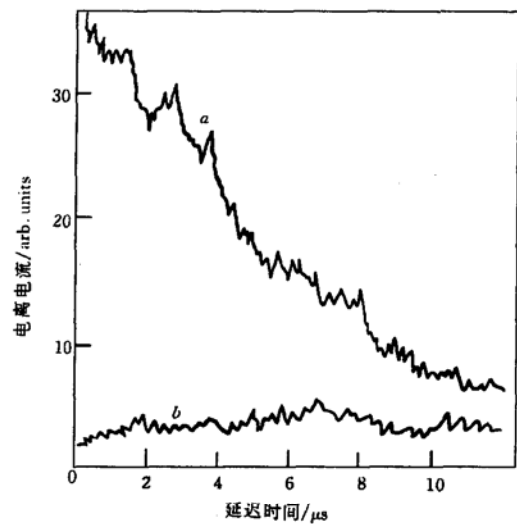


图 4 Na 原子 19p 态的电离讯号与延迟时间的关系 曲线 a 为脉冲电场高于电离阈值时电离讯号-延迟时间图; 曲线 b 为脉冲电场低于电离阈值时电离讯号-延迟时间图

为了直接观察环境辐射引起的能级再布居对寿命的影响,在实验中先测定了 Na 原子 19p 态在光激发后延迟施加略高于该态电离阈值的脉冲电场,得出 19p 态及其以上各能态上的原子场电离讯号-延迟时间图(见图 4 曲线 a),由图 4 得到寿命值为 7.8 μs . 然后降低电离脉冲场幅值,仅使 19p 能级以上的原子电离,得出电离讯号-延迟时间图(见图 4 曲线 b). 将两曲线上同一延迟时间的对应点讯号强度相减,得出仅与 19p 态粒子数对应的讯号强度. 由此得出的寿命值为 4.4 μs . 可见环境辐射引起的向上受激跃迁使里德堡原子的实际寿命更为显著地减少. 本文的实验工作虽然对这种受激上跃迁的影响作了直接的校正,但是由于未考虑布居到被测态以上的原子与被测态上原子向低能级的自发下跃迁速率的差异,这种校正仍然是不完全的.

4 理论计算

当环境温度 $T \neq 0$ 时,考虑背景黑体辐射产生的受激发射和吸收引起的跃迁, n 激发态原子的衰减速率可表为

$$\tau_n^{-1} = \sum_{n' < n} A_{nn'} + \sum_{n' \neq n} B_{nn'} \rho_{nn'} + \int B \rho dE, \quad (1)$$

式中 $A_{nn'}$ 为 n 态到 n' 态的自发跃迁概率,

$$A_{nn'} = \frac{4e^2 \omega_{nn'}^3}{3\hbar c^3} |\mathbf{r}_{nn'}|^2, \quad (2)$$

$B_{nn'}$ 为 n 态至 n' 态的受激跃迁系数, $\rho_{nn'}$ 为与跃迁频率对应的黑体辐射能量密度,

$$B_{nn'} \rho_{nn'} = \frac{4e^2 \omega_{nn'}^3}{3\hbar c^3} \frac{|\mathbf{r}_{nn'}|^2}{\exp(\hbar \omega_{nn'}/kT) - 1}. \quad (3)$$

(1) 式等号右端第三项的积分对连续态进行,位于正能区. 从上述的实验方法可见,实验观察寿命

$$\begin{aligned} \tau_{\text{exp}} &= \left[\sum_{n' < n} (A_{nn'} + B_{nn'} \rho_{nn'}) \right]^{-1} \\ &= \left[\sum_{n' < n} \frac{4e^2 \omega_{nn'}^3}{3\hbar c^3} \left(1 + \frac{1}{\exp(\hbar \omega_{nn'}/kT) - 1} \right) |\mathbf{r}_{nn'}|^2 \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

通过对径向波函数进行数值积分求出零场矩阵元 $|\mathbf{r}_{nn'}|$, 代入(4)式即可得里德堡态原子的寿命. 计算结果见表 1.

5 讨 论

1. 由于实验中在两极板上加了一定的直流电压,在外电场中不同 l 态之间存在 Stark 态混合,被测态已不是纯 n_p 态. 另外,在外电场中的能态寿命应与场强相关. 为了确定所加的外电场对 n_p 态寿命的影响,分别取 180, 100 和 60 V 直流电压值,对应于在 300, 167 和 100 $\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的三种静电场中测得 19p 及 20p 态的寿命分别为 7.19, 7.78, 7.27 μs 及 8.97, 9.78, 9.01 μs . 其寿命值相差均小于 10%. 由于在低电场中 n_p 态附近无其他 Stark 态的干扰,其寿命值不会产生随外场的急剧变化^[8], 由此可近似认为在所加电

场中测得的 np 态寿命与零场中的寿命相差不大于 10 %.

2. 实验中,在光激发至场电离的延迟时间内,由于部分激发原子飞离收集区,将使测量的寿命值减小.忽略原子炉喷口处的膨胀冷却效应,根据实验中的原子炉温度,对定向 Na 原子束按 Maxwell 速度分布作粗略估算,在 20, 10 和 6 μs 内飞行距离超过离子收集孔半径(1 cm)的 Na 原子数约分别占作用区原子总数的 13 %, 2.4 % 和 0.04 %.为减小受激原子逸出收集区对寿命测量的影响,对实验曲线仅取延迟时间小于 10 μs 的一段进行拟合,得出表 1 中的实验寿命值.在此延时范围内对原子的逸出进行修正,由修正后的讯号衰减曲线拟合的寿命值与表 1 中的实验寿命值相差均小于 1.5 %.

对刘正东教授在本文理论计算中给予的指导和徐云飞副教授及陈星工程师在实验工作中给予的帮助,一并表示感谢.

- [1] T. N. Chang and Rong-qi Wang, *Phys. Rev.*, **A44**(1991), 80.
- [2] W. A. van Wijngaarden and J. Sagle, *Phys. Rev.*, **A45**(1992), 1502.
- [3] C. E. Tanner, A. E. Livingston, R. J. Rafac *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **69**(1992), 2765.
- [4] A. Sasso and W. Demtroder, *Phys. Rev.*, **A45**(1992), 1670.
- [5] S. Zhang, J. Z. Qiu, G. Wang, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **42**(1989), 19.
- [6] 郦菁、徐云飞、王云仙、张森, *物理学报*, **42**(1993), 231.
- [7] W. E. Cooke and T. F. Gallagher, *Phys. Rev.*, **A21**(1980), 588.
- [8] 蒋孟衡、张森, *物理学报*, **44**(1995), 357.

LIFETIMES OF FORBIDDEN TRANSITION STATES FOR TWO-STEP EXCITATION OF ATOM AND INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL RADIATION

XIE WEI-JUN FANG DA-WEI SHU XIAO-WU ZHANG SEN
(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 1 June 1995; revised manuscript received 26 September 1995)

ABSTRACT

The populations of np forbidden transition states for two-step excitation of Na atom have been obtained by applying the static field of strength 167 V/cm. We have obtained lifetimes of np ($n = 19-23$) states by the method of delaying ionization in pulsed electric field, and have compared the calculation values with the measured data. The influence of applied fields and environmental radiation on the determination of the lifetimes of the highly excited states were discussed.

PACC: 3270; 3280