

Yb 原子奇宇称受扰里德堡系 n^1P_1 、 n^3P_1 能级 自然辐射寿命的研究*

蒋占魁 彭慰先

(吉林大学物理系, 长春 130023)

郭川 于英宁 于华

(中国科学院长春应用化学研究所, 长春 130022)

提 要

通过激光与原子束相互作用, 三步激发及时间分辨光谱术, 测量了 Yb 原子奇宇称受扰里德堡系 $6snp^1\cdot^3P_1$ 21 个能级和两个干扰能级的自然辐射寿命, 分析了各种因素对测量值的影响.

关键词 Yb 原子, 里德堡态, 寿命.

1 引 言

十多年来, 关于里德堡原子的研究多集中于碱金属和碱土元素. 稀土元素由于 4f 壳层电子的影响, 一般具有比较复杂的光谱结构. Yb 是稀土元素中最简单的一个, 它的 4f 壳层已经填满, 闭合壳层外有两个价电子, 原子的基态为 $4f^{14} 6s^2 \ ^1S_0$. 因此形成类碱土原子光谱. 但是由于 4f 电子容易被激发, 形成 $4f^{13}nl'n' \ l' \ n'' \ l''$ 的四电子组态, 它们强烈地干扰 $4f^{14}6snl$ 里德堡系. Camuse 等人^[1]对 Yb 偶宇称里德堡系能级位置进行了研究, Boumann 等^[2]测量了低激发态能级寿命, 蒋占魁、王大地等^[3,4]测量了偶宇称高激发态能级的寿命, 刘文学等^[5]对实验结果进行了量子亏损理论理论分析, Aymar 等^[6]用量子亏损理论理论分析了奇宇称里德堡系的能位, 但没给出单重态 (1P_1) 和三重态 (3P_1) 的归属. 吴璧茹等^[7]对 $n^3P_{0,2}$ 里德堡系的能位给了新的补充. Jiang 等^[10]用 VUV 光子一步激发, 测量了 $6snp \ ^1\cdot^3P_1$ 系列 20 个里德堡态的自然辐射寿命.

本文用三步激发方法测量了 $6snp \ ^1\cdot^3P_1$ 系列 23 个能级的寿命, 结果与文献[10]基本一致, 并补充了三个新数据, 为理论分析提供了必要的数据.

2 实验与结果

为了使 Yb 原子激发至 $6snp$ 里德堡态, 采用三步激发方案, 如图 1 所示. 第一步用 555.8 nm 的激光将 Yb 原子从基态激发至 $6s6p^3P_1$ 态, 第二步用 680.15 nm 的激光激发至 $6s7s^3S_1$ 态,

收稿日期: 1992 年 9 月 18 日; 收到修改稿日期: 1992 年 11 月 4 日

* 国家自然科学基金资助课题.

第三步用 570 nm~640 nm 的激光再将 Yb 原子激发至所研究里德堡态. 实验装置如图 2 所示, Nd : YAG 脉冲激光器 (Molelectron MY-34) 泵浦两台可调谐染料激光器, 作为第一步和第二步激发光源, 另一台 Nd : YAG 激光器 (Quanta Ray DCR-2) 泵浦染料激光器作为第三步激发光源. 激光的脉宽为 8 ns, 一般远小于里德堡态能级的寿命, 激光的光谱宽度为 0.01 nm, 脉冲重复率 10 Hz, 单脉冲能量约 0.3~0.6 mJ, 两台 YAG 激光器的触发时间由电子学时控器控制, 三束激光以一定的时间延迟与原子束作用, 保证最佳的时间匹配. 原子束系统由三部分组成:

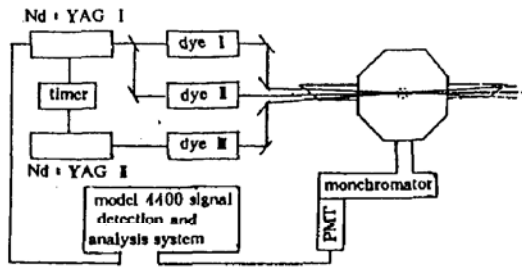


Fig. 1 The relevant energy levels of the three-step laser excitation of Yb

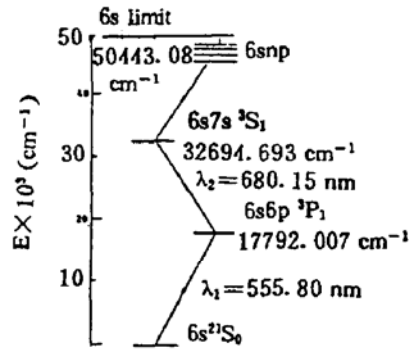


Fig. 2 Experimental setup

真空机组、作用室及原子蒸气发生炉, 作用室内的真空度可达 1×10^{-4} Pa. 原子蒸气发生炉由不锈钢坩锅及 Al_2O_3 加热套管组成, 套管由绕在其外壁的电加热丝加热, 温度可达 1300 K. 不锈钢坩锅顶盖有直径 0.5 mm 的小孔, 原子蒸气从孔中飞出, 经一系列准直孔后形成原子束进入作用室. Yb 的加热温度维持在 800 K. 三束激光以大约 1 mrad 的夹角在作用室中心相交, 原子束通过三束激光的交点. 激光的入口和出口由长臂导管及两端的布儒斯特窗构成, 以减少进入探测器的杂散光. 三步激发后, 里德堡原子产生的衰变荧光由光学系统收集并聚焦于单色仪的入射狭缝, 选择适宜的荧光波长, 由置于单色仪出射狭缝的光电倍增管 (R450) 接收, 时间衰变的电信号送入 Model 4400 (EG&G PARC) 电子学系统进行存贮和事后处理. 记录的典型的荧光衰变曲线如图 3 所示. 利用 4400 系统的 EFIT 功能, 可以对实验数据进行最小二乘法的指数

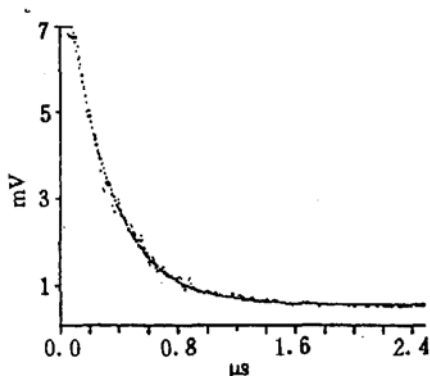


Fig. 3 An example of a typical fluorescence decay curve

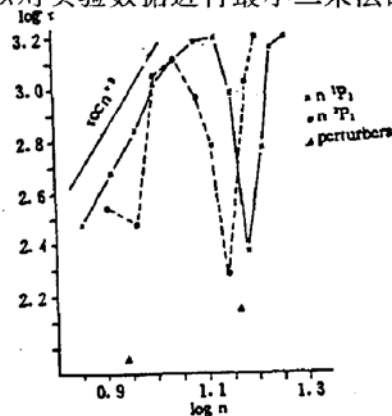


Fig. 4 The lifetimes of the $1^{-3}P_1$ sequences plotted vs the effective quantum number on log-log scale

拟合, 图 3 中的实线就是拟合的指数曲线, 根据理论荧光衰规律可表示为 $I = I_0 e^{-t/\tau}$, 其中 τ 是能级寿命, 因此从指数曲线可得寿命的实验值. 每一能级在不同条件下多次测量, 对所得结果进行统计平均. 本实验测量了 Yb 原子奇宇称两个里德堡系列 $6snp^1P_1$ 和 $6snp^3P_1$ 21 个能级及

两个干扰态 $4f^{13}5d^26s$ (49005.89 cm^{-1} 和 49920.02 cm^{-1}) 的自然辐射寿命, 全部结果见表 1. 理论预言, 当里德堡系无干扰态存在时, 自然辐射寿命 τ 与有效量子数 n^* 的三次方成正比, 即 $\log n^* \sim \log \tau$ 关系曲线是斜率为 3 的直线. 图 4 给出了 $\log n^* \sim \log \tau$ 实验曲线, 可以看出在干扰态附近的里德堡态能级寿命受到极大的干扰, 在 Yb 偶宇称里德堡系中也有类似的情况发生^[3], 这是由于组态的相互作用而产生的波函数混合的结果. 详细的量子亏损理论理论分析将另文发表.

Table 1 Experimental lifetime values for the n^1P_1 and n^3P_1 sequences of YbI

term	energy cm^{-1}	lifetime (ns)		term	energy cm^{-1}	lifetime (ns)	
		this work	ref. [10]			this work	ref. [10]
11^1P_1	48258.45	306	330				
12^1P_1	48761.81	487	510	12^3P_1	48719.17	357	380
13^1P_1	49110.07	710	630	13^3P_1	49127.40	308	270
14^1P_1	49360.60	1076	950	14^3P_1	49352.47	1150	1150
15^1P_1	49546.55	1310	1150	15^3P_1	49536.43	1310	1300
16^1P_1	49688.55	1550	1430	16^3P_1	49677.59	953	990
17^1P_1	49799.20	1600	1750	17^3P_1	49786.39	621	620
18^1P_1	49886.82	979		18^3P_1	49867.87	193	250
19^1P_1	49969.10	241	160	19^3P_1	49957.87	1070	
20^1P_1	50021.26	640	750	20^3P_1	50015.96	1580	
21^1P_1	50067.64	1460	1470	$4f^{13}5d^26s$	49005.89	91	70
22^1P_1	50107.50	1600		$4f^{13}5d^26s$	49920.02	146	140

3 讨 论

寿命测量值的准确度受到诸多实验条件影响, 里德堡原子一般寿命较长, 某些因素的影响是不容忽视的, 以下是在实验中注意到的一些问题

黑体辐射效应 Bhatia 等人^[8]详细研究了黑体辐射效应对铯原子里德堡态寿命的影响, 结果指出在室温测得的寿命比在液氮温度下测得的寿命小 2.5%, 本实验采用了液氮冷阱, 使黑体辐射的影响大大降低.

辐射陷阱 根据 Marek 等人^[9]的研究, 当原子密度小于 $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 时, 辐射陷阱的影响可以忽略, 本实验保持在这个密度之下.

飞离视场效应 激发态寿命长的原子, 由于热运动, 在发射荧光光子之前飞出光学收集的视场, 从而使测量的寿命值偏小, 称之为飞离视场效应. 根据 Yb 原子的热运动速度及本实验的收集系统的视场角, 可算出该效应的影响, 计算结果表明, 当寿命值小于 $3 \mu\text{s}$ 时该效应可忽略不计.

塞曼量子拍效应 如果在作用区存在弱磁场, 如地磁场, 使原子能级产生微小的塞曼 (Zeeman) 分裂, 当脉冲光同时激发这些子能级时, 会产生低频荧光量子拍, 从而破坏指数衰变规律, 因此必须消除弱磁场的影响. 本实验利用一组亥姆霍兹线圈, 在作用区产生较强的磁场, 使量子拍的频率足够高, 以至超过仪器的时间分辨率, 使记录的荧光衰变仍保持指数规律.

光电倍增管的非线性效应 在较强或较弱光的作用下, 光电倍增管的光电流与入射光强呈非线性关系, 使记录的荧光衰变曲线呈非指数曲线, 因此测量的寿命值有偏差. 在数据处理过

程中通过截取曲线的适当部位(光电倍增管的线性部分)可以部分消除非线性效应的影响,但最好的办法是采用光子记数方法(如延迟复合技术),可完全消除这一影响。

分析上述因素所造成的系统误差及多次测量的统计误差,估计本实验的寿命测量值相对误差为 10%

参 考 文 献

- [1] P. Cumus, A. Debarre, C. Morillon, High excited levels of neutral ytterbium I two-photon and two-step spectroscopy of even spectra. *J. Phys. B*, 1980, **13**(5):1073~1087
- [2] M. Bauman, M. Braun, J. Maier, Hyperfine structure and isotope shift of some even parity levels in the YbI spectrum. *Z. Phys. D*, 1991, **21**:145~151
- [3] Jiang Zhankui, Wang Chenfi, Wang Dadi, Natural radiative lifetime of Yb in the perturbed $6snd\ ^{1,3}D_2$ sequences. *Phys. Rev. A*, 1987, **36**(7):3184~3186
- [4] Wang Dadi, Wang Chenfi, Jiang Zhankui, Natural radiative lifetime of Yb in the perturbed $6sns\ ^1S_0$ sequences, *J. Phys. B: At. Mol. Phys.*, 1987, **20**(16):L555
- [5] Liu X. W., Wang Z. W., 量子亏损理论 of lifetime for highly excited states of atoms, calculation of Yb lifetimes in the perturbed $6sad\ ^{1,3}D_2$ sequences, *Phys. Rev. A*, 1989, **40**(4):1838~1842
- [6] M. Aymar, R. J. Champeau, C. Delsart *et al.*, Three-step laser spectroscopy and multichannel quantum defect analysis of odd-parity Rydberg states of neutral ytterbium. *J. Phys. B At. Mol. Phys.*, 1984, **(18)**:3645~3661
- [7] Wu Biru, Zheng Youfeng, Xu Yunfei *et al.*, The $6snp\ ^3P_{0,2}$ Rydberg series of neutral ytterbium, *J. Phys. B*, 1991, **24**:49~55
- [8] K. Bhatia, P. Grafstrom, C. Levinson *et al.*, Lifetimes of Rydberg levels in the perturbed $6snd\ ^{1,3}D_2$ series of BaI, *Z. Phys. A.*, 1981, **303**:1~5
- [9] J. Marek, P. Münster, Lifetime measurements of Sm I by use of dye laser excitation, *Astron Astrophys.*, 1978, **62**:245~247
- [10] Jiang Zhankui, J. Larsson, Perturbations in the $np\ ^{1,3}P$ Rydberg sequences of neutral Yb probed by Zeeman-effect and lifetime measurements, *Z. Phys. D*, 1991, **22**:387~389

Studies on natural radiative lifetime in perturbed Rydberg odd parity sequences of Yb I

JIANG Zhankui PENG Weixian

(Department of Physics, Jili University, ChangChun 130023)

GUO Chuan YU Yingning YU Hua

(Institute of Applied Chemistry, Academia Sinica, Changchun 130022)

(Received 18 September 1992; revised 4 November 1992)

Abstract

Laser-atomic-beam and time resolved laser spectroscopy have been used to measure natural radiative lifetimes of 23 levels in perturbed Rydberg odd parity sequences of Yb with three-step excitation. The influence of several effects on measured lifetime values has been analyzed.

Key words Yb atom, Rydberg states, lifetimes.