

Yb 的激光三步激发自电离谱

沈俊锋 徐云飞 吴璧如 郑幼凤 陆 杰 王云仙

浙江大学物理系, 杭州 310027

1991 年 4 月 4 日收到

用激光三步共振激发研究 Yb 原子的自电离谱, 测得能量在 $50443\text{--}57750\text{cm}^{-1}$ 范围内的 16 个自电离能级. 并用偏振光技术测定两个自电离态的 J 值.

PACC: 3280

一、引 言

近年来, Yb 的自电离谱的研究一直引起人们的兴趣. 因其 4f 电子充满壳层, 光谱结构在镧系元素中属最简单; 而且 Yb 的饱和蒸气压较高, 容易蒸发原子束. 但是, 由于其 4f 壳层电子很易激发形成 $4f^{13}nln'l'n''l''$ 的电子结构, 这些态在第一电离限以上有较丰富的能级, 使得在第一电离限附近的自电离谱较为复杂. 尽管有不少人用光吸收或电子碰撞激发等技术获得一些自电离能级的数据^[1-6], 但前者由于受光吸收选择定则的限制, 不同激发方案可达到布居的终态不同, 后者测量精度不高. 因之尚需从不同方法获得充分的能级数据才可进行系统的分析. 我们曾由 $6s6p^3P_1$ 作为中间态, 再经双光子吸收得到一些奇宇称的自电离能级^[7]. 本文报道用激光三步激发获得的一些自电离能级的结果.

二、实验方法与条件

实验装置与条件类似于文献[8], 第一束和第二束染料激光保持平行同向入射到作用区, 而第三束染料激光与第一、二束激光反向入射. 三台染料激光器由同一台 Nd:YAG 激光器的倍频输出抽运. 第一台用 Rhodamine 560 染料, 调谐 $\lambda_1 = 5558.0 \text{ \AA}$ (真空中波长), 实现 Yb 原子从基态 $6s^2^1S_0$ 共振激发到 $6s6p^3P_1$ 态(能量为 $17992.007 \text{ cm}^{-1}$); 第二台染料激光器以 LDS 为染料, 调谐 $\lambda_2 = 6801.5 \text{ \AA}$ (真空中波长), 实现原子由 $6s6p^3P_1$ 共振激发到 $6s7s^3S_1$ 态(能量为 $32694.693 \text{ cm}^{-1}$); 第三台激光相继使用 DPS, Stilben420, Coumarin

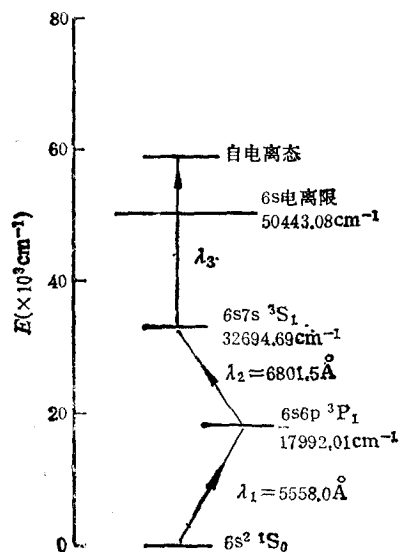


图 1 Yb 原子三步激发有关能级

460, Coumarin480, Coumarin500 和 Rhodamine560 等染料, 使 λ_3 波长在 $3991\text{--}5634 \text{ \AA}$ 范围连续扫描, 以实现 Yb 原子由 $6s7s^3S_1$ 共振激发到奇宇称 $J = 0, 1, 2$ 的自电离态. 激

光束线宽小于 1cm^{-1} .

图 1 给出各步跃迁和相应的能级概图.

三、实验结果与讨论

1. 自电离谱

图 2 至图 7 分别为 λ_3 在相应范围连续扫描时经 Boxcar, 且由 X-Y 记录仪记录的 Yb 原子从 $6s7s^3S_1$ 态激发到 $J = 0, 1, 2$ 奇宇称态不同能量的自电离谱. 图中有“ Δ ”

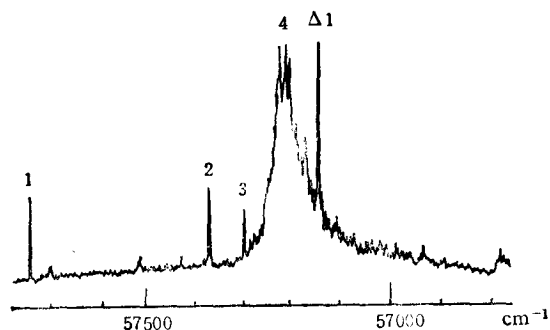


图 2 λ_3 采用 DPS 时的自电离峰

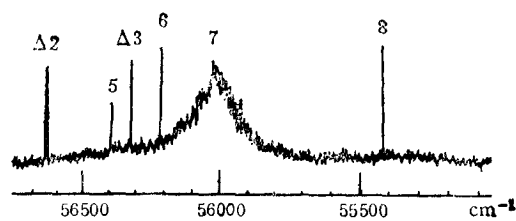


图 3 λ_3 采用 Stilben 时的自电离峰

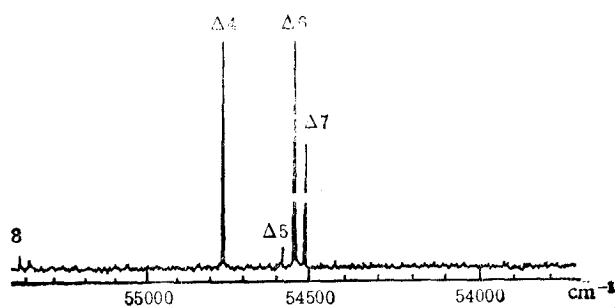


图 4 λ_3 采用 C460 时的自电离峰

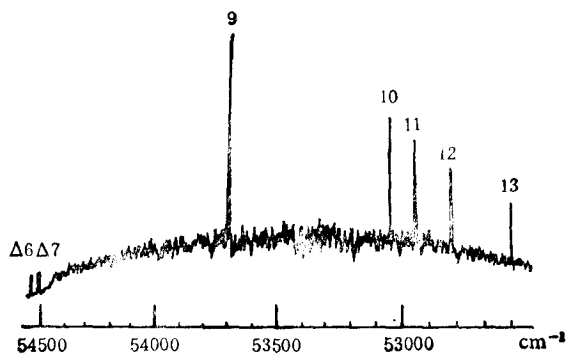
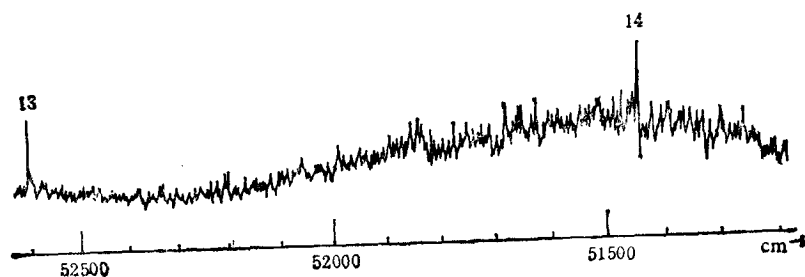
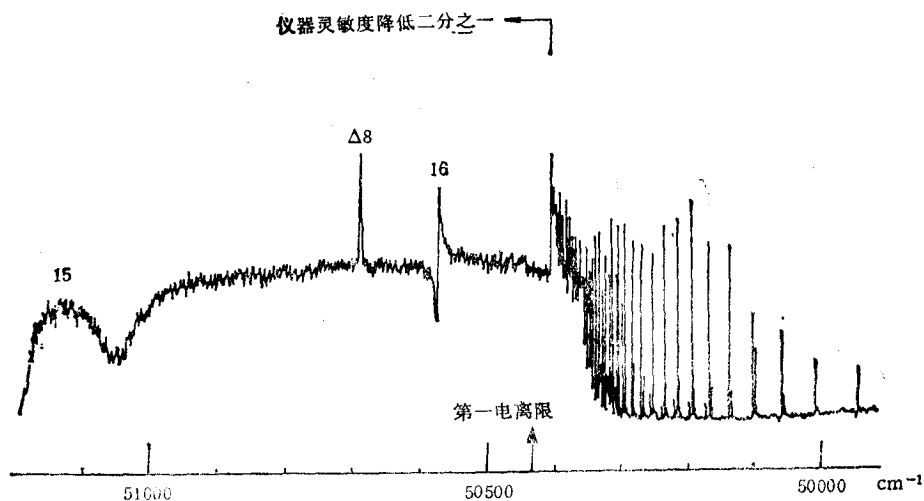


图 5 λ_3 采用 C480 时的自电离峰

图 6 λ_2 采用 C500 时的自电离峰图 7 λ_2 采用 R560 时的自电离峰

符号者为 $\lambda_1 + \lambda_2$ 两步跃迁后所布居的偶宇称态的光电离峰, 用它们作为波长定标的标志峰, 相应的激发态组态及 λ_2 值列于表 1 中. 而各个自电离峰统一以序号(从 1 到 16)表示在图上, 测得 16 个自电离能级值列于表 2 的第一列中. 能级的测量精度取决于 λ_2 波长的定标与确定. 为了减小偶然误差, 用多次测量取平均值来定出能级的位置, 它的精度小于 1 cm^{-1} . 对个别较宽峰所对应的能级, 测量误差较大, 其多次测量的平均偏差记于表 2 的括号内.

表 1 标志峰的组态和 λ_2 波长

Δi	态	$\lambda_2 (\text{\AA})$
$\Delta 1$	$6p^2 \ ^3P_0$	4090.8
$\Delta 2$	$6s8s \ ^1S_0$	4175.1
$\Delta 3$	$6s8s \ ^3S_1$	4233.1
$\Delta 4$	$6s6d \ ^1D_2$	4531.1
$\Delta 5$	$(5d6s6p)_{J=2}$	4568.6
$\Delta 6$	$6s6d \ ^3D_2$	4577.4
$\Delta 7$	$6s6d \ ^3D_1$	4583.6
$\Delta 8$	$6s6p \ ^2P_1^o$	5558.0

* 由 λ_1 一步激发.

表 2 Yb 原子的能量范围在 50443—57750 cm⁻¹ 的奇宇称自电离能级

经由不同中间态的多光子激发					单光子 UV 吸收		发射谱	
本 工 作			吴 ^[7]	Borisov ^[11]	Parr ^[12]	Kozlov ^[13]	Wyart ^[12]	Aymar ^[19]
序号	λ_s (Å)	能级 E (cm ⁻¹)	(cm ⁻¹)	(cm ⁻¹)	($\times 10^4$ cm ⁻¹)	(cm ⁻¹)	(cm ⁻¹)	(cm ⁻¹)
1	3992.2	57743.8						
			57511					
2	4053.0	57367.6						
3	4064.9	57295.8						
4	4078.8	57211.7 (5.4)						
			56840					
5	4218.6	56399.4						
6	4253.0	56207.5						
			56103					
7	4288.1	56015.1 (4.8)						
8	4400.1	55421.4						
						55386 5d6p ¹ P ₁	55400 5d6p ¹ P ₁	
			55301					
						54700		
			54441					
					5.447 6s ² 6d ³ P ₁	54407 6s ² 6d ³ P ₁	54407 5d ² 6s ³ S ₁	
			54059					
						54042 5d ² 6s ³ D ₁	54042 5d ² 6s ³ D ₁	
9	4764.3	53684.2	53686					
					5.322 5d6p ³ P ₁	53276 5d6p ³ P ₁		
							53226 5d ² 6s ³ S ₁	
10	4913.4	53047.0						
11	4936.7	52951.3						
12	4968.5	52821.7						
				52612 5d ² 6s				
13	5023.6	52600.9	52602					
				52358 5d ² 6s				

续表 2

经由不同中间态的多光子激发				单光子 UV 吸收		发射谱		
本 工 作			吴 ^[7]	Borisov ^[11]	Parr ^[13]	Kozlov ^[12]	Wyart ^[12]	Aymar ^[9]
序号	λ , (Å)	能级 E (cm^{-1})	(cm^{-1})	(cm^{-1})	($\times 10^4 \text{cm}^{-1}$)	(cm^{-1})	(cm^{-1})	(cm^{-1})
			52195					
				52186 6s6p ² 5d ² 6s				
				51821 6s6p ²				
					5.176 5d6p ³ D ₁	51797 5d6p ³ D ₁	51797 5d ³ 6s ² D ₁	
14	5334.2	51441.5						
15	5414.7	51162.6 (5.7)						
16	5595.6	50566.0						

50566.0 cm⁻¹ 处第 16 峰的能级与 Aymar^[9] 曾提到过的数据完全一致。这个态具有

很典型的 Fano 不对称线型, 它在高能量端线型比在低能量端陡, 这说明其 Fano 不对称因子 q 是负的。用 Shore 等人^[10] 提出的办法从线型估算了 q 值, 即由峰高 h 及谷深 d (见图 8) 得

$$q = -(h/d)^{1/2} \\ = -1.2 \pm 0.1.$$

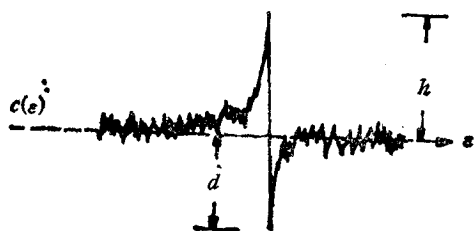


图 8 第 16 自电离峰的 Fano 线型 $c(\varepsilon)$ 为内推的背景线

能级 9(53684.2 cm⁻¹) 和能级 13(52600.9 cm⁻¹) 与文献[7]的结果很相近, 该文中它们

分别为 53686 和 52602 cm⁻¹。由于文献[7]中用的是双光子过程, 因波长定标的精度而引起对能级测量精度的影响较大, 本文结果较之文献[7]更为精确。

2. 总角动量 J 的测定

为了确定自电离态的 J 值, 用偏振光技术重复上述三步激发过程, 使第一、二束激光分别为旋转方向相反的圆偏振光, 它们的传播方向仍保持同方向; 这将限定 $6s7s^3S_1$ 态的磁量子数为 $m_i = 0$ 。此时以光传播方向为量子化方向, 将第三束光变为线偏振光, 其传播方向与上述两束激光垂直(见图 9), 且其振动方向分别为平行或垂直于量子化方向。相应的跃迁能级的 J 及 m 值表示于图 10 中。

对于第 3 步跃迁, 由偶极跃迁的选择定则可知: 在第一种情形(见图 10(a)) 时, 只有 $\Delta m = m_f - m_i = 0$ 才允许跃迁, 而 $m_i = 0$, 所以 $m_f = 0$ 。而对于 $|J_i 0\rangle \rightarrow |J_f 0\rangle$ 的电偶极跃迁, 只有 $J_i + J_f$ 为奇数才允许跃迁, 因 $J_i = 1$, 故终态只能是 $J_f = 0$ 或 2 的自电离态。在第二种情形(见图 10(b)) 时, 由于 $\Delta m = m_f - m_i = \pm 1$ 才允许跃迁, 而

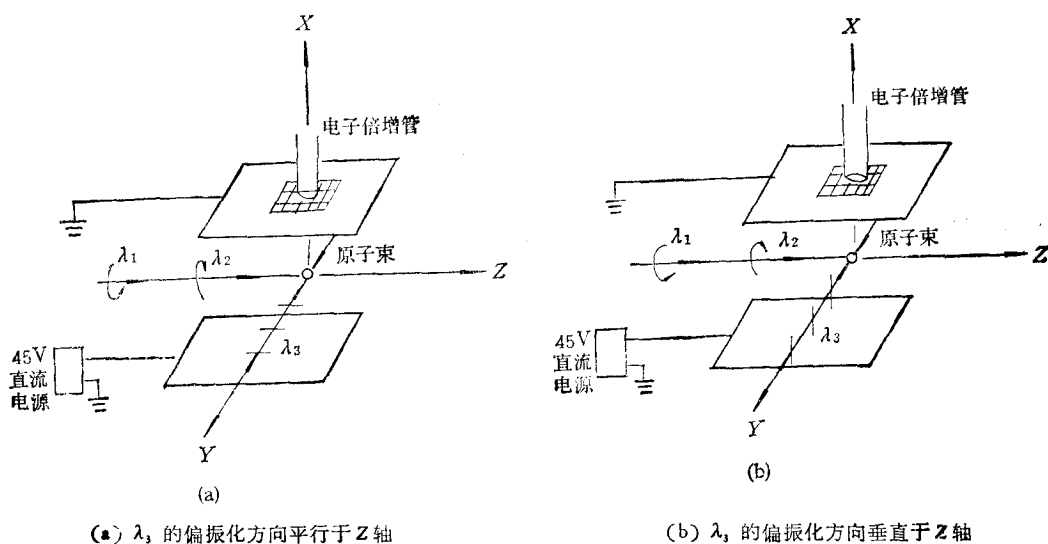


图9 激光束的偏振模式

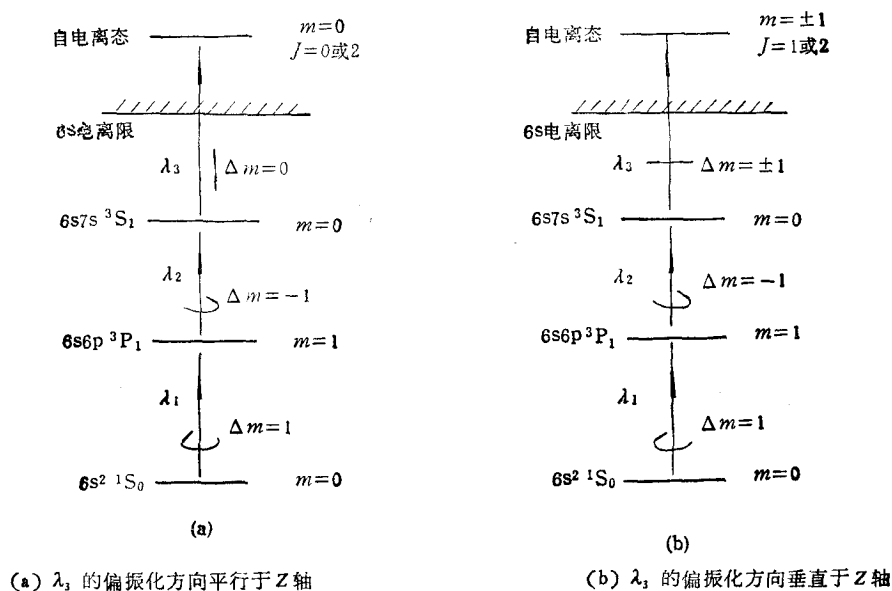
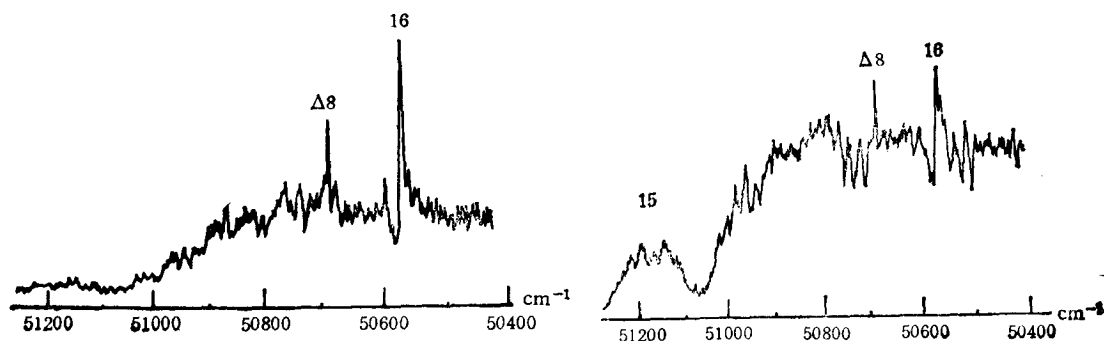


图10 磁量子数的选择定则

$m_i = 0$, 所以 $m_f = \pm 1$. 即 $J_f \geq 1$. 即终态自电离态的 J_f 只能为 1 或 2.

图 11(a)和图 11(b) 分别为 λ_3 作上述两种偏振方向时获得的两种自电离谱. 由比较可见, 自电离能级 16 在图 11(a) 和 (b) 中均出现, 所以其 J 值为 2. 这与 Aymar 等人^[9]所指出的一致. 而 15 号自电离峰在图 11(b) 中出现, 在图 11(a) 中消失, 说明该峰的 J 值为 1. 这项实验要求染料激光器有较高的能量输出. 由于我们的激光在 $\lambda_3 < 5335 \text{ \AA}$ 区域的能量较低, 目前无法用本方法来测定其它各自电离态的 J 值. 这有待今后进一步改善实验条件再确定.

(a) λ_2 的偏振化方向平行于 Z 轴(b) λ_2 的偏振化方向垂直于 Z 轴图 11 λ_2 处于不同偏振化方向时自电离谱的比较

3. 讨论

表 2 中还列出有关文献报道过的在这一能域内已测得的 Yb 原子的奇宇称自电离能级。由对照可见,不同的激发方式测得的能级不太一致。这可能是由于处于 4f 壳层的电子很易激发、导致 Yb 在第一电离限附近有极丰富的自电离态。而不同的激发方式各受其所应遵循的选择定则的限制,能达到的终态也就不一定相同。因之尚有必要用不同的激发方案进行测定,互为补充,以期得到比较系统、完整的自电离谱。

另外,我们只获得部分自电离能级的数据,由于测定的能域比较窄(仅 7300cm^{-1}),也难于确认其所属的原子态。这有待于理论计算及其它实验来进一步确定。

- [1] A. C. Parr and F. A. Elder, *J. Chem. Phys.*, **49**(1968), 2665.
- [2] M. G. Kozlov, S. A. Kotochigova and B. E. Krylov, *Opt. Spectrosc. USSR*, **42**(1977), 368.
- [3] M. G. Kozlov, S. A. Kotochigova and V. N. Nikolaev, *Opt. Spectrosc. USSR*, **41**(1976), 4.
- [4] M. G. Kozlov and S. A. Kotochigova, *Opt. Spectrosc. USSR*, **43**(1978), 616.
- [5] M. A. Baig and J. P. Connerade, *J. Phys. B*, **17**(1984), L469.
- [6] L. F. Forrest, V. Pejcev, G. J. Daniell and K. J. Ross, *J. Phys. B*, **18**(1985), 2601.
- [7] 吴璧如、徐云飞、郑幼凤、胡永炎、陆杰, *物理学报*, **39**(1990), 1064.
- [8] Wu Bi-ru, Zheng You-feng, Xu Yun-fei, Pan Li-gang, Lu Jie and Zhong Jian-wei, *J. Phys. B, At. Mol. Opt. Phys.*, **24**(1991), 49.
- [9] M. Aymar, R. J. Champeau, C. Delsart and O. Robaux, *J. Phys. B*, **17**(1984), 3645.
- [10] B. W. Shore, *J. Opt. Society of America*, **57**(1967), 881.
- [11] S. K. Borisov, S. A. Kotochigova, N. A. Karpov, V. A. Mishin and A. M. Stelmash, *Opt. Spectrosc. USSR*, **61**(1986), 448.
- [12] J. F. Wyart and P. Camus, *Physica Scripta*, **20**(1979), 55.

THE AUTOIONIZATION SPECTRA OF NEUTRAL YTTERBIUM BY LASER THREE-STEP EXCITATION

SHEN JUN-FENG XU YUN-FEI WU BI-RU ZHENG YOU-FENG LU JIE WANG YUN-XIAN

Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027

(Received 4 April 1991)

ABSTRACT

The autoionization spectra of Yb have been observed and studied by three-step Laser excitation. Sixteen autoionization levels of Yb in the energy range from 50443 cm^{-1} to 57750 cm^{-1} have been investigated. The total angular momentums J of two autoionization levels were determined by a polarization technique.

PACC:3280