

Yb原子的6snp各里德堡系列的总角动量J的确定

王 云 仙

(浙江大学物理系, 杭州 310027)

提 要

用两束圆偏振光和一束线偏振光实现三步激发得到Yb原子的6snp各里德堡系列的谱图, 并利用磁量子数的选择定则确定了各条谱线所代表的原子态的总角动量量子数J。另外, 还首次测得6sns³S₁ (n=26~31)的能级数据。

关键词: 里德堡系列, 总角动量J, 维格纳-艾卡特(Wigner-Eckart)定理。

一、引 言

原子的相同电子组态的各里德堡系列的总角动量量子数J, 一般可以利用跃迁选择定则对几种不同激发方案所获得的谱图进行分析和比较之后得出^[1]。该方法需要进行几种不同方案的多级激发实验, 因而工作量很大。有时也可以利用同一里德堡系列的量子亏损接近的规律来确定。但是由于各里德堡系列间的相互作用以及价态对邻近里德堡态的干扰, 使得在干扰态附近的能级量子亏损有偏移。当几个里德堡系列的量子亏损很接近时, 也很难利用量子亏损来确定某一能级归属于哪个里德堡系列。本文介绍在Yb原子的三步激发过程中利用偏振技术来区分终态6snp¹P₁、³P_{0,1,2}四个系列的方法。进行一种方案的实验就可以直接判断出与第三束激光扫描范围对应的全部能量区域中的各个6snp里德堡态的J值。

二、原 理

设原子在激光作用下, 从 $|\alpha JM\rangle$ 态向 $|\alpha' J' M'\rangle$ 态作电偶极跃迁。 α 是除J、M之外的其它量子数。电偶极跃迁的矩阵元为 $\langle \alpha' J' M' | \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{d} | \alpha JM \rangle$, 其中 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为光的电场矢量, $\mathbf{d} = -e\mathbf{r}$ 为原子的电偶极矩。把 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 和 \mathbf{d} 按球分量展开, 则有 $\boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{d} = \sum_q \varepsilon_q^* d_q$, ($q=0, \pm 1$), 矢量 \mathbf{d} 是一秩不可约张量, 由维格纳-艾卡特定理^[2]得

$$\left. \begin{aligned} \langle \alpha' J' M' | \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{d} | \alpha JM \rangle &= \sum_q \varepsilon_q^* \langle \alpha' J' M' | d_q | \alpha JM \rangle, \\ \langle \alpha' J' M' | d_q | \alpha JM \rangle &= (-1)^{J'-M'} \begin{pmatrix} J' & 1 & J \\ -M & q & M \end{pmatrix} \langle \alpha' J' || \mathbf{d} || \alpha J \rangle, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $\langle \alpha' J' \| d \| \alpha J \rangle$ 为约化矩阵元, 与 M, M' 无关。根据 $3j$ 符号的性质

$$\begin{pmatrix} J' & 1 & J \\ -M & q & M \end{pmatrix} \neq 0 \tag{2}$$

的条件是 $-M' + q + M = 0$ 和 $(J' \ 1 \ J)$ 满足 $\Delta(J' \ 1 \ J)$, 所以

$$\left. \begin{aligned} J' + J \geq 1, \Delta J = J' - J = 0, \pm 1, \\ \Delta M = M' - M = q = 0, \pm 1 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

(3) 式就是电偶极跃迁的选择定则。如果激发光是偏振光, 则其磁量子数 M 的选择定则分别如下所述:

(1) 激发光的偏振化方向为 Z 轴方向时, 对应于 $q = 0$, 由 (3) 式得磁量子数的选择定则为 $\Delta M = 0$ 。对于从 $|J \ 0\rangle$ 态到 $|J' \ 0\rangle$ 态的跃迁, 与 (1) 式相应的 $3j$ 符号为 $\begin{pmatrix} J' & 1 & J \\ 0 & J & 0 \end{pmatrix}$, 由 $3j$ 符号的性质:

$$\begin{pmatrix} J' & 1 & J \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = (-1)^{J'+1+J} \begin{pmatrix} J' & 1 & J \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

可知, $J' + 1 + J$ 必须是偶数, 因此 $\Delta J = J' - J =$ 奇数的跃迁才是允许的。即, 只有 $\Delta J = \pm 1$ 的跃迁是允许的, $\Delta J = 0$ 的跃迁是禁戒的。

(2) 当激发光为左旋圆偏振光时, 对应于 $q = 1$, 磁量子数 M 的选择定则为 $\Delta M = 1$; 当激发光为右旋圆偏振光时, 对应于 $q = -1$, 磁量子数的选择定则为 $\Delta M = -1$ 。

(3) 当激发光的偏振化方向在 x 或 y 方向时, 对应于 $q = \pm 1$, 磁量子数 M 的选择定则为: $\Delta M = \pm 1$ 。

我们对 Yb 原子采用了图 1 所示的激发方案。Yb 原子由 $6s^2 1S_0$ 态相继经过 $6s 6p^3 P_1$ 和 $6s 7s^3 S_1$ 两个中间能级, 三步激发到达 6snp 里德堡能级。 λ_1 和 λ_2 分别为左旋、右旋圆偏振光, λ_3 则为线偏振光。根据上述磁量子数 M 的选择定则各跃迁过程的 ΔM 值及各跃迁终态的磁量子数 M 分别如图 2 所示。

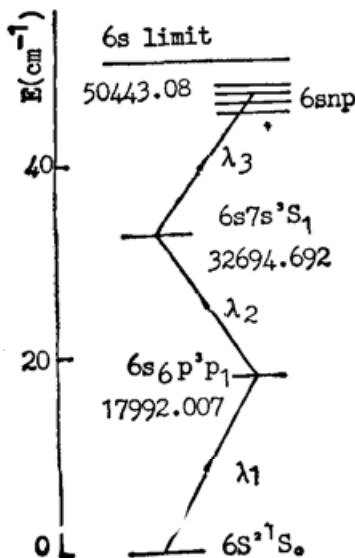


Fig. 1 Energy level diagram for the excitation of the 6snp states of Yb atom

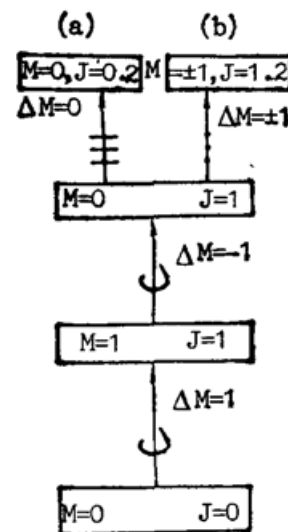


Fig. 2 The polarization schemes of the lasers and the selection rules for each excitation step

当 λ_3 的偏振化方向为 Z 方向时, 第三步跃迁的 $\Delta J = \pm 1$, 因而终态的 $J=0$ 或 2 , 如图 2(a) 所示, 当 λ_3 的偏振化方向在 x 方向时, 终态的 $M = \pm 1$, 这就要求终态的 $J \geq 1$, 因而 $\Delta J = 0, 1$ 从而定出终态的 $J=1$ 或 2 , 如图 2(b) 所示。因此, 在 λ_3 的偏振化方向为 Z 方向时得到的谱图中的 $6snp$ 系列, 只有 $J=0$ 和 2 的峰; 在 λ_3 的偏振化方向为 x 方向时得到的谱图中, $6snp$ 系列只有 $J=1$ 和 2 的峰。从而断定对于 $6snp$ 系列的谱峰在两种谱图中均出现的峰代表 $J=2$ 的态, 只在前一种谱图中出现的峰代表 $J=0$ 的态, 只在后一种谱图中出现的峰代表 $J=1$ 的态。从而可把 $6snp$ 系列中所有峰代表的态的 J 值者确定出来。

三、实 验

实验装置与文献 [3] 相似。不同的只是第三束染料激光是以与原子束的方向相反的方向射入作用区与第一、第二两束激光正交。如图 3 所示。光电离后的 Yb^{+} 离子由电子倍增器收集, 倍增后的离子讯号经 Boxcar 积分平均后, 由 X-Y 记录仪记录。

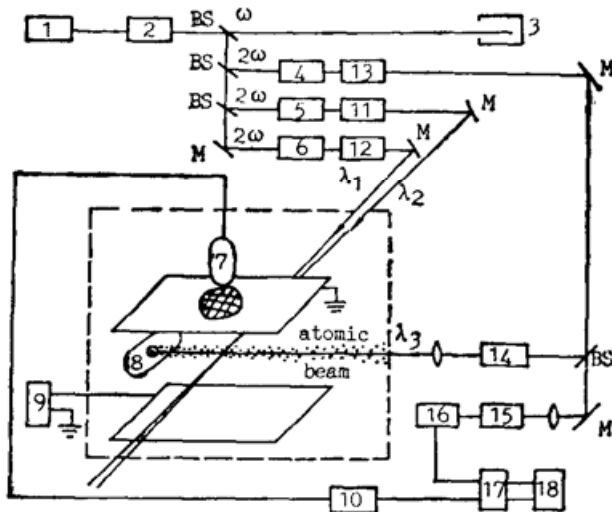


Fig. 3 Experimental setup

1—Nd:YAG laser; 2—second harmonic generator; 3—black box; 4, 5, 6—dye laser; 7—electron multiplier; 8—atomic oven; 9—45 V pulse generator; 10—oscilloscope; 11, 12—linear polarizer and Fresnel's rhombus; 13—half-wave plate; 14—linear polarizer; 15—F-P etalon; 16—photodiode; 17—boxcar averager; 18—X-Y recorder; BS—beam splitter; M—mirror; L—lens

第一束和第二束染料激光的波长是固定的。它们分别是图 1 所示的两个能级间的共振激发波长 ($\lambda_1 = 555.8 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 680.1 \text{ nm}$)。而第三束染料激光的波长则分别在 $617.0 \text{ nm} \sim 586.0 \text{ nm}$ 和 $583.0 \text{ nm} \sim 564.0 \text{ nm}$ 范围内扫描。在 λ_1 和 λ_2 的光路中均插进线偏振器和菲涅耳斜方体 (Fresnel's rhombus) 用以形成左旋或右旋的圆偏振光。在 λ_3 的光路中插进线偏振器。通过旋转线偏振器的方位, 可以使 λ_3 的偏振化方向分别为 x 方向和 z 方向。三束光的偏振化情况如图 4 所示。由于染料激光器输出的激光是部分偏振光, 为了避免处于上述两种偏振方式时 λ_3 的光强差别太大, 使用 $1/2$ 波片改变第三束染料激光的偏振方向, 使通过线偏振器后的光强尽可能一致。

第三束激光在扫描的过程中也会把一些原子从 $6snp \ ^3P_1$ 能态激发到低能级的里德堡态。

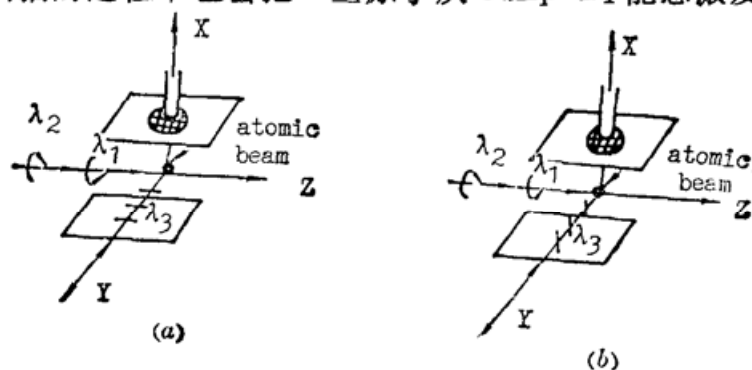


Fig. 4 The arrangement of three laser beams

为了识别代表这种态的谱峰, 挡去第二束激光让 λ_3 扫描得到了这种 $\lambda_1 + \lambda_3$ 的偶宇称谱峰。并借助于文献[4]确定出它的能级值, 把这种谱峰作为 λ_3 波长的绝对标识, 标准具的干涉谱作为波长分度。从而计算出各光电离峰相应的能级位置。

四、结果与分析

图 5(a)、5(b)、6(a)、6(b) 是实验得到的 Yb 原子的光电离谱图。图 5(a) 和 6(a) 是第三束激光的偏振化方向为 z 方向时得到的; 图 5(b) 和 6(b) 是第三束激光的偏振化方向为 x 方向时得到的。图中 A、B 两峰是 $\lambda_1 + \lambda_3$ 的标志峰, 其中 A 峰是 $6s 6p \ ^3P_1 \xrightarrow{\lambda_3} 6s 7s \ ^1S_0 \rightarrow$ 光电离的讯号, B 峰是 $4f^{14} ({}^1S) 6s 6p \ ^3P_1 \xrightarrow{\lambda_3} 4f^{13} ({}^2F_{7/2}^0) 6s^2 \ 6P_{3/2} (J=2) \rightarrow$ 光电离的讯号。为了清楚起见, 把从谱图中分析出的结果列于表 1 中。凡是在谱图中出现的 6snp 系列的谱峰的总角动量量子数 J 值均已根据其 λ_3 取不同偏振方向时是否出现的情况而被确定, 并填在表 1 的 J 值栏目下。根据各个峰的能量实验值, 对照文献[1, 3~5] 确定出相应的原子态并填在表 1 的组态栏目下。从表 1 中明显地看出直从两种谱图的比较中定出的 J 值与文献给出的完全符合。

谱峰 7 在谱图 5(b) 上强度相当大, 在谱图 5(a) 上非常小, 并未完全消失。这是由于 λ_3 的偏振化方向还不是完全平行于 z 轴, 它还含有在 x 方向上偏振的分量, 因此谱峰 7 是 $J=1$ 的态而不是 $J=2$ 的态。谱峰 24 的情况与此类似, 也是属于 $J=1$ 的态。

除 6snp 的四个系列以外, 实验还得到两个系列的谱峰, 在图 6(b) 中分别标以 * 和 Δ , 相应的能级数据列于表 2。根据能级数据、量子亏损以及电四极跃迁的选择定则, 并与文献[5]中的测量结果对照, 判断出标有 * 的一组是 $6snd \ ^1D_2$ 系列。标有 Δ 的一组, 在已发表的

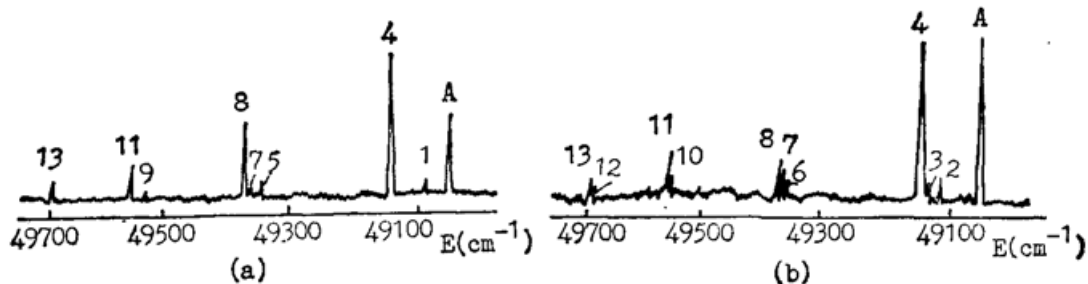


Fig. 5 The photoionization spectra of Yb atom. The polarization of the third laser was parallel to z axis in (a) and to x axis in (b)

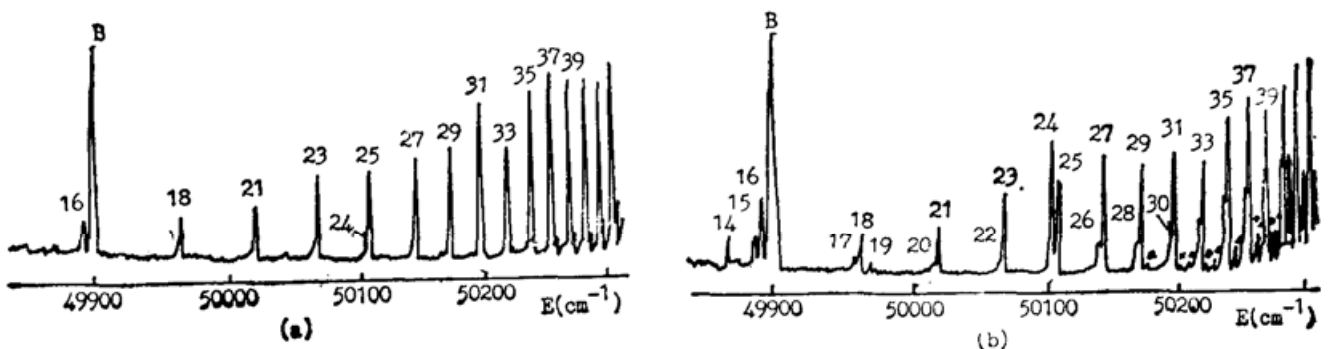


Fig. 6 The photoionization spectra of Yb atom. The polarization of the third laser was parallel to z axis in (a) and to x axis in (b)

Yb 原子能级数据中找不到相应的原子态。但是,其量子亏损与文献[4]中低激发态的 $6sns\ ^3S_1$ ($n=9\sim 13$) 系列较接近。暂时将它们归入 $6sns\ ^3S_1$ 系列。 $6s7s\ ^3S_1 \rightarrow 6sns\ ^3S_1$ 的跃迁与 LS 耦合的电四极跃迁选择定则并不完全符合,很有可能是由于它们不是纯的 LS 耦合之故。电四极跃迁与电偶极跃迁的几率之比的数量级可由下式估算^[6]:

$$\frac{A_{E_2}}{A_{E_1}} \sim \left(\frac{r}{\lambda}\right)^2$$

一般情况下,原子的线度 $r \sim 10^{-8}$ cm, 辐射波长 $\lambda \sim 10^{-5}$ cm。由此得: $A_{E_2}/A_{E_1} \sim 10^{-6}$ 。原子的线度 r 正比于 n^2 , 因而对于高里德堡态, 当 $n \sim 30$ 时

$$\left(\frac{r}{\lambda}\right)^2 \text{ 的数量级为 } 10^{-1} \sim 10^{-2}, \text{ 即 } \frac{A_{E_2}}{A_{E_1}} \sim (10^{-1} \sim 10^{-2})$$

所以对于 n 较大的原子能观察到电四极跃迁, 而且电四极跃迁的几率随 n 的增大而增大。正如谱图 6(b) 中 * 和 † 两个系列的谱峰所示。

结论: 利用偏振光激发下的电偶极跃迁的磁量子数选择定则, 可以直接从谱图上确认出对应于 λ_3 扫描范围的整个能量区域内的 $6snp$ 系列的 J 值。方法简便、准确。可以预言, 只要激发方案选择合适, 利用偏振光激发技术就可以大大提高光谱分析的效率。

参 考 文 献

- [1] M. Aymar *et al.*; *J. Phys. (B): Atom. & Mol. Phys.*, 1984, **17**, No. 18 (Sep), 3645.
- [2] R. D. Cowan; *Theory of Atomic Structure & Spectra*, (University of California press, Berkeley, 1981), 307~308.
- [3] Wu Biru *et al.*; *J. Phys. (B): Atom. & Mol. Phys.*, 1991, **24**, No. 1 (Jan), 49~55.
- [4] W. G. Martin *et al.*; *Atomic Energy Levels of the Rare-Earth Elements*, (NSRDS-NBS 60, Washington, D. C.: US Govt. Printing Office, 1978), 375~381.
- [5] M. Aymar *et al.*; *J. Phys. (B): Atom. & Mol. Phys.*, 1980, **13**, No. 6 (Mar), 1089.
- [6] A. Corney; *Atomic & Laser Spectroscopy*, (Oxford U. P., 1977), 180~184.

Determination of total angular momentum J for the $6snp$ Rydberg series of neutral ytterbium

WANG YUNXIAN

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 14 May 1991)

Abstract

The spectrum for the $6snp$ Rydberg series of Yb Atom were obtained by using three-step laser excitation. The laser for the first and second step of excitation were oppositely circularly polarized and for the third step was linearly polarized. By the selection rules of the magnetic quantum number m the J value for each spectral line was determined. Some new levels belonging to the $6sns\ ^3S_1$ series ($n=26\sim 31$) were detected.

Key Words: Rydberg series; total angular momentum J ; Wigner-Eckart theorem.