

钡原子高激发态双光子光谱*

吴东宏 张在宣** 米辛 李芳黛

(吉林大学物理系)

丁大军

(吉林大学原子与分子物理研究所)

提 要

利用自制 YAG 三倍频泵浦的染料激光器激发钡原子。采用热二极管检测双光子共振离化信号,得到钡原子偶宇称三个里德堡系列: $6sns^1S_0$ ($n=11\sim 46$)、 $6snd^1D_2$ ($n=9\sim 60$)、 $6snd^3D_2$ ($n=10\sim 28$); 五个双电子激发组态: $5d8s^3D_2$ 、 $5d8s^1D_2$ 、 $5d7d^3F_2$ 、 $5d7d^1D_2$ 和 $5d7d^3P_0$ 。用 Lu-Fano 图进行了讨论。

近年来有关碱土族元素的高激发态研究工作引起人们很大兴趣。碱土元素能级结构的一个主要特点是一次离化限具有几个不同值,收敛于这些不同离化限的里德堡系在一定条件下会出现很强的组态相互作用和自旋轨道相互作用,使得其光谱结构呈现很多新的特征。六十年代建立起来的多通道量子亏损理论^[1,2]已能对较复杂的碱土元素的光谱结构进行分析、处理。

本文利用双光子吸收离化检测方法获得了钡原子偶宇称高激发态光谱,并试图用多通道量子亏损理论中的 Lu-Fano 图^[3]对实验结果进行分析讨论。

一、实验方法与结果

实验装置如图 1 所示。激光器为实验室自制 Nd:YAG 泵浦的可调谐染料激光器,其三倍频输出约 5~8 mJ 的紫外激光泵浦 LD490 染料,获得在 4700~5100 Å 区域内连续可调

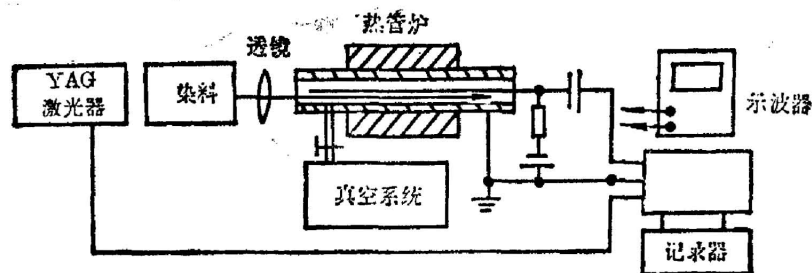


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

收稿日期: 1985年5月20日

* 此论文曾在 1984年10月全国原子分子物理学术会议(上海)宣读。

** 现在地址: 杭州市国家计量局计量专科学校。

谱输出。染料激光脉宽 15 ns, 线宽约 0.1 Å, 聚焦后的峰值功率密度 80 kW/cm² 左右, 激光器重复频率 1 pps。

钡原子蒸汽在热管炉内产生, 控制炉温在 820~870°C 之间, 得到 7~12 cm 长的均匀工作区, 相应钡的饱和蒸汽压为 1~1.7 Torr。约 1 Torr 的氩气用作缓冲气体。热管炉中心的钨探针和管壁形成热二极管装置, 在工作温度下, 两极间电位差 0.16 V, 可测出几十微安的静态电流。

当钡原子受到染料激光双光子共振激发时, 基态钡原子跃迁到偶宇称高激发态, 然后辐射跃迁或被解离。热二极管检测装置可以收集解离后的离子, 并因热二极管的放大作用给出很强的离化脉冲电流信号。信号由 Boxcar 信号平均器处理。当激光器扫描时, 我们记录到上百条共振结构的谱线。

图 2 给出部分实验光谱曲线。参考有关文章^[4,5] 已将绝大多数谱线识别。三个偶宇称里德堡系列分别为: $6sns^1S_0$ ($n=11\sim46$)、 $6snd^1D_2$ ($n=9\sim60$)、 $6snd^3D_2$ ($n=10\sim28$); 五个偶宇称双电子激发组态为: $5d8s^3D_2$ 、 $5d8s^1D_2$ 、 $5d7d^3F_2$ 、 $5d7d^1D_2$ 和 $5d7d^3P_0$ 。

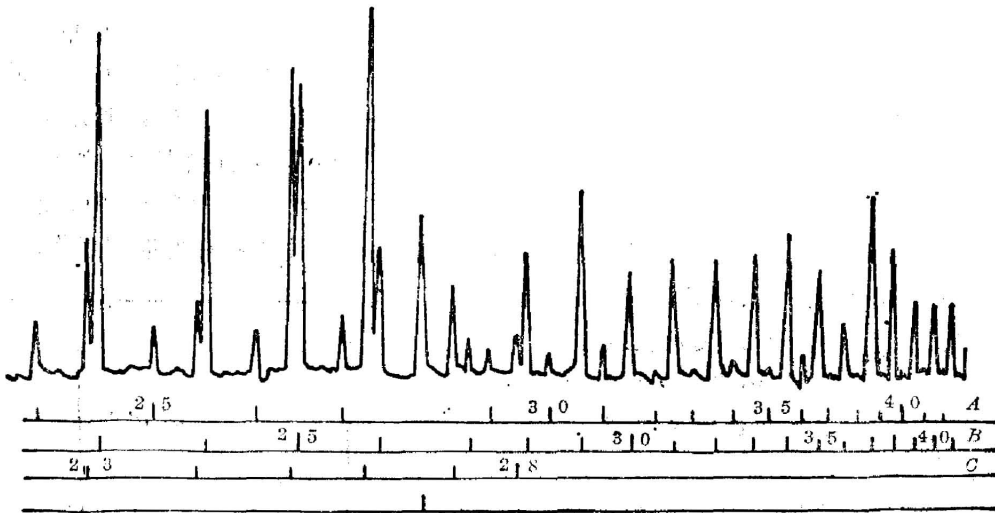


图 2 钡原子双光子共振吸收光谱

Fig. 2 Two-photon resonance absorption spectrum of Ba I

二、讨 论

钡原子偶宇称的部分能级如图 3 所示。钡原子有五个不同值的一次离化限, 图中只给出最低的三个。本文研究的光谱范围在 $6s^1S_{1/2}$ 离化限下, 均为分立结构的偶宇称组态。借助多通道量子亏损理论中提出的 Lu-Fano 图方法, 讨论里德堡系和双电子激发组态之间的相互作用问题。

碱土原子的里德堡公式可表为

$$E = I_i - (R/\nu_i^2), \quad i=1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中 R 是里德堡常数, E 是实验测出的能级位置, I_i 是不同值的离化限值, N 是不同的离

化限数目, ν_i 是由第 i 个离化限求出的有效主量子数。取两个最低的离化限值^[5]分别为

$$\left. \begin{aligned} I(6s_{1/2}) &= I_1 = 42035.04 \text{ cm}^{-1}, \\ I(5d_{3/2}) &= I_2 = 46908.89 \text{ cm}^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将 (2) 式代入实验得到的能级值可得两个不同的有效主量子数 ν_1 和 ν_2 。

Lu-Fano 图是将 ν_2 作为横座标, 纵座标用 ν_1 换算成量子亏损的模 μ_1 表示。本文以 $J=0$ 的 Lu-Fano 图为例进行讨论, 同时将另几个双电子组态也在图中标出作为参考, 如图 4 所示。

(1) 根据多通道量子亏损理论, 离子实的态与外层价电子的态和它们之间的耦合构成通道。每一通道的分立能级部分可在 Lu-Fano 图上直接表示。如不存在通道相互作用, 同一系中各能级量子

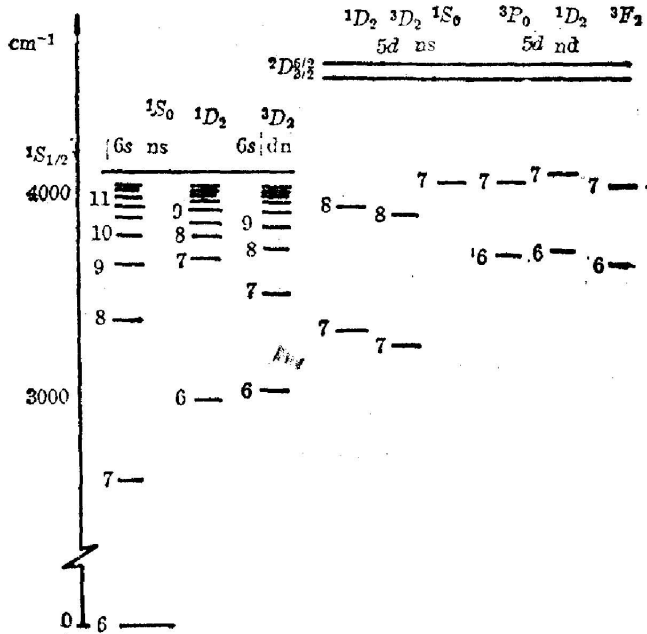


图 3 Ba I 偶宇称能级图

Fig. 3 Even-Parity level diagram of Ba I

亏损的模 μ_1 近似相等, Lu-Fano 图上的点可基本连成直线。由于存在通道相互作用, 有些能级的将发生偏离, 水平线断开斥向两边, 通道相互作用越大, 排斥越严重, 其延长线通过产生干扰的组态。因此 Lu-Fano 图可定性地反映通道相互作用的强度及其对里德堡系能级位置的影响。

(2) 无外场存在时, 原子体系的总角动量子数一般总为实用量子数, 所以有相互作用的两个通道也要求 J 必须一致。这点可从图 4 中明显看出。如 $5d7d^3P_0$ 态与 $6s ns^1S_0$ 系发生相互作用, 满足 J 相同的要求, 因此该能级位置必在 $6s ns^1S_0$ 系相斥曲线之一的延长线上。但另外几个 $J \neq 0$ 的双电子组态的横座标附近没有这样的相斥现象, 所以它们之间不存在通道相互作用。这个结果对未知干扰组态的识别十分有益。只从实验光谱曲线看, 一个干扰能级附近同时存在属于不同里德堡系的能级, 很难制定它对哪个系产生干扰, 但在 Lu-Fano 图上就可一目了然, 并据此定出这个干扰能级的总角动量。

(3) 注意双电子干扰组态 $5d7d^3P_0$ 与 $6s ns^1S_0$ 系的轨道角动量子数 L 和自旋角动量子数 S 都不同, 这表明存在通道相互作用时, 高激发态原子波函数中轨道角动量 L 和自

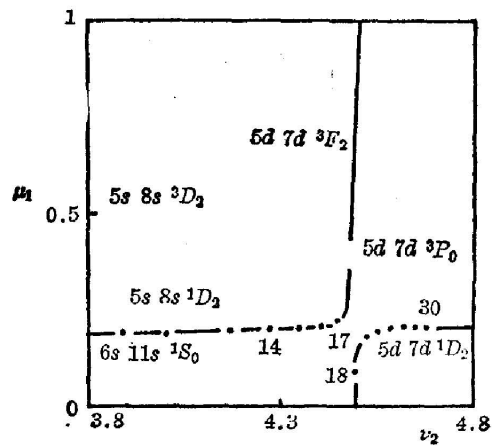


图 4 $J=0$ 的 Lu-Fano 图

Fig. 4 Lu-Fano plot with $J=0$

旋自动量 S 都不是实用量子数, 即 LS 耦合近似不成立, 从经典的观点看, 高激发态原子的两个外层电子处于相隔较远的轨道上。它们之间的库仑作用必然很弱, 而磁相互作用即自旋轨道相互作用将占主要地位。

(4) Lu-Fano 图直接反映的是里德堡系能级位置受到的干扰, 结合实验结果可进一步讨论通道相互作用对跃迁几率的影响。由图 2 可见当主量子数 n 相同时, $6snd^3D_2$ 系的谱线强度大多小于 $6snd^1D_2$ 系的谱线强度, 但在双电子组态 $5d7d^1D_2$ 附近, 两个系的谱线强度变化很大, 跃迁几率的这种突变表明了通道相互作用的影响。在本文的实验结果中 $J=2$ 的双电子激发组态有四个: $5d8s^3D_2$ 、 $5d8s^1D_2$ 、 $5d7d^3F_2$ 和 $5d7d^1D_2$, 其中 $5d7d^3F_2$ 和 $5d7d^1D_2$ 对 $J=2$ 的两个里德堡系的谱线强度影响最为显著。

由上述讨论可以看到 Lu-Fano 图对碱土元素的光谱分析很有用, 特别有助于未知谱线的识别。求出光谱能级在 Lu-Fano 图中的座标位置, 就可以容易确定它是属于哪一个里德堡系或是否为干扰组态, 总角动量 J 是多少。但对未知双电子激发组态的确定还需其它资料。

在本文的实验中, 有两个能级 $6s9d^1D_2$ 和 $5d8s^3D_2$ 是第一次用激光光谱方法测到的。利用已知谱系资料定标, 我们获得新的结果。现将所得的实验结果与常规方法的测量结果^[6]比较如下:

表 1 钡原子两个偶宇称能级测量结果比较

Table 1 Comparison between measurement results for two even-parity levels of Ba I

组 态	常规光谱方法	激光光谱方法
$6s9d^1D_2$	39334.94	39333.9
$5d8s^3D_2$	39464.97	39465.8

参 考 文 献

- [1] M. J. Seaton; *Proc. Phys. Soc. (London)*, 1966, **88**, 801.
- [2] U. Fano, J. W. Cooper; *Rev. Mod. Phys.*, 1968, **40**, No. 3 (Jul), 441.
- [3] K. T. Lu, U. Fano; *Phys. Rev. (A)*, 1970, **A2**, No. 1 (Jul), 81.
- [4] J. B. Rubbmark, S. A. Borgstrom *et al.*; *J. Phys. (B)*, 1977, **B10**, No. 3 (Feb), 421.
- [5] M. Aymar, P. Camus *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1978, **A18**, No. 5 (Nov), 2173.
- [6] C. E. Moore; *Atomic Energy Levels*, (NBS (U. S. A.) Circular, 1958), 467.

Two-photon spectra of neutral Barium in high-lying states

WU DONGHONG ZHANG ZAIKUAN MI XIN AND LI FANGDAI
(Optics Laboratory, Department of Physics, Jilin University)

DING DAJUN
(Atomic and Molecular Physics Institute, Jilin University)

(Received 20 May 1985; revised 22 July 1985)

Abstract

Barium atoms pumped by a dye laser can absorb two photons and transit to high-lying states. By using a heat diode to detect ionization signals, we obtained three even-parity Rydberg series $6s ns \ ^1S_0$ ($n=11\sim 46$), $6s nd \ ^1D_2$ ($n=9\sim 60$) and $6s nd \ ^3D_2$ ($n=10\sim 28$), as well as five perturbing levels $5d 8s \ ^3D_2$, $5d 8s \ ^1D_2$, $5d 8s \ ^1D_2$, $5d 7d \ ^3F_2$, $5d 7d \ ^3P_0$ and $5d 7d \ ^1D_2$. The Lu-Fano plot is used in our discussion.

扫描式投影光刻机通过鉴定

中国科学院上海光学精密机械研究所研制的“扫描式投影光刻机”于一九八五年八月廿一日通过了由上海市科委和中科院上海分院联合组织的鉴定。上海光学精密机械研究所采用的是反射式 1:1 成像镜头，像区为一弧形狭带，通过掩模和硅片同步扫描，使整个硅片曝光。

经专家们鉴定，确认该机的主要技术指标为

最大硅片尺寸	$\phi 75$;
光刻分辨率	全片均匀光刻实用线宽为 $3\mu\text{m}$ (胶厚 $1\sim 1.8\mu\text{m}$)，目视分辨率为 $1.5\mu\text{m}$;
套刻精度	$\leq 1\mu\text{m}$;
狭缝照明均匀性	$\pm 5\%$;
焦深	$1.5\mu\text{m}$ 。

扫描式投影光刻机的研制成功，为我国大规模集成电路专用设备填补了一项空白。待改进定型后可小批量生产。(外形图见本期 1081 页)