

文章编号: 0253-2239(2010)07-2142-07

铈原子双色三光子共振电离光谱的研究

谢 军 戴长建 李 鸣

(天津理工大学理学院, 天津 300384)

摘要 利用双色三光子共振电离光谱技术,对处于 $42896\sim 44854\text{ cm}^{-1}$ 能域内的铈(Eu)原子奇宇称高激发态的光谱特性进行了研究,报道了该能域内 93 个高激发态的光谱信息。一方面,采用了三种不同的激发路径,不仅测量了这些高激发态的能级位置,还给出了它们的光电离信号的相对强度;另一方面,结合电偶极跃迁的选择定则,对所得光谱数据进行了细致地分析和比较,唯一确定了各原子态的总角动量 J 。通过与相关文献资料进行对比,不仅确认了许多高激发态的研究结果,还发现了 25 个新的奇宇称高激发态。此外,还对文献中的少数高激发态的光谱归属进行了修正,并唯一地确定了这些高激发态的 J 值。

关键词 原子与分子物理学;奇宇称高激发态光谱;多步共振激发;铈原子

中图分类号 O433 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.2142

Investigation of Europium Atom by Two-Color Three-Photon Resonant Ionization Spectroscopy

Xie Jun Dai Changjian Li Ming

(School of Science, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract The spectral properties of odd-parity highly excited states of europium Eu atom have been investigated with the technique of two-color three-photon resonant ionization spectroscopy in the energy region of $42896\sim 44854\text{ cm}^{-1}$. The spectral information of 93 highly excited states of europium atom has been reported in this energy region. On the one hand, three different excitation pathways are used, not only the energy values of these states have been measured, but also the relative strengths of their photoionization signals are given. On the other hand, according to the selection rules of the electric dipole transition, the total angular momentum quantum numbers J of these states have been uniquely determined by analyzing and comparing the spectral data obtained in the experiment. Comparisons with the published literatures, 25 new odd-parity highly excited states of europium atom have been discovered, which lie in the region of the present investigation, except for confirming some of the states reported in the literatures. In addition, the spectral information of several highly excited states from the literatures has been amended, and the J values of these states also have been assigned uniquely.

Key words atomic and molecular physics; the spectra of odd-parity highly excited state; multi-step resonance excitation; europium atom

1 引 言

近年来,激光技术、受控核聚变技术、同位素分离技术的不断发展,以及波长可调谐激光器与高分辨光谱技术的广泛应用,为研究高激发态原子提供了有利条件。同时激光分步激发和共振电离技术^[1~4]又为研究多电子原子的高激发态光谱提供了

有效方法,使得早期对于碱土金属原子高激发态的研究获得了较大进展^[5~9]。稀土元素由于具有丰富的电子能级,并具有优异的光、磁、电、热性能,在开发新技术及探索新型材料中具有重要的应用。对于稀土元素原子高激发态的研究,在激光同位素分离、等离子体物理、天体物理及原子物理等学科中有着

收稿日期: 2009-09-17; 收到修改稿日期: 2009-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(10574098, 10674102)和天津市自然科学基金(05YFJMJC05200)资助课题。

作者简介: 谢 军(1984—),男,硕士研究生,主要从事稀土元素高激发态光谱方面的研究。E-mail: xiejun@yeah.net

导师简介: 戴长建(1957—),男,教授,主要从事激光和现代光谱技术等方面的研究。E-mail: Daicj@126.com(通信联系人)

重要的意义。随着研究的不断深入,对原子高激发态研究的焦点已逐渐由碱土金属原子转向结构更为复杂的稀土原子。

稀土原子大多具有未填满的 4f 支壳层,其上的电子非常活泼,随着 4f 支壳层电子的激发,稀土元素的原子光谱将变得非常复杂,因而对于稀土元素原子光谱的研究比碱金属原子更具挑战性。关于稀土元素的研究,文献中的报道主要集中在镱(Yb)、镱(Lu)等原子结构与碱土金属较相似的重稀土元素^[10~13],而对于轻稀土元素铕(Eu)的报道相对较少。有关 Eu 原子高激发态的研究,早期的文献中在 40000 cm^{-1} 以上至第一电离限(45734.9 cm^{-1})能域内只探测到了很少高奇宇称束缚态能级^[14,15];在 $45740\sim 47341\text{ cm}^{-1}$ 能域内,对 Eu 原子自电离光谱的研究也曾有过报道^[16,17]。近年来,随着可调谐激光器和激光分步激发技术的不断发展,对 Eu 原子高激发态也有了更加深入的研究^[18,19]。尽管如此,人们对于 Eu 原子的认识依然不足。这是由于 Eu 原子具有复杂的电子层结构 $4f^7 6s^2$,其中 4f 支壳层处于半满状态,其上的电子非常活泼,随着 4f 层电子的激发,其原子光谱将变得非常复杂,即使是在同一能域内,由于采用不同的实验条件或不同的激发路径,所获得的结果也存在很大的差异。

本文利用双色三光子共振电离技术,采用三种不同的激发路径,对 Eu 原子处于 $42896\sim 44854\text{ cm}^{-1}$ 能域内的 93 个高激发态的能级位置和相对强度进行

了测量,并结合电偶极跃迁的选择定则,通过对所得电离光谱进行对比和分析,唯一地确定了所探测原子态的总角动量 J 。

2 实验原理与装置

2.1 实验原理

实验中采用双色三光子激发和电离的方式研究了 Eu 原子高激发态光谱,所采用的具体激发路径如图 1 所示。用一台 Nd:YAG 固体脉冲激光器的三倍频光(波长为 355 nm)同时抽运两台染料激光器,其输出波长都可在 $427\sim 474\text{ nm}$ 内连续调谐。两束激光分别从前后两个方向进入真空室,并在作用区内与原子束正交,以减小多普勒(Doppler)展宽效应。实验中采用了三种不同的激发路径。根据激发路径 I:将第一台激光的波长固定在 $\lambda_1 = 466.32\text{ nm}$ (真空中波长值,下同),它使 Eu 原子由基态 $4f^7 6s^2\ ^8S_{7/2}$ 跃迁到图 1 中的中间态 $4f^7 6s 6p\ ^8P_{5/2}$,而第二台激光的波长 λ_2 从 427 nm 扫描至 467 nm ,它将 Eu 原子由中间态进一步共振激发到待测的高激发态,同时,该束激光又可完成另一项任务:作为探测光,使 Eu 原子进一步跃迁并实现光电离。同样地,若采用激发路径 II 和 III,则第一台激光的波长分别固定在 $\lambda_1 = 462.85\text{ nm}$ 和 459.53 nm ,可使 Eu 原子由基态 $4f^7 6s^2\ ^8S_{7/2}$ 分别跃迁到中间态 $4f^7 6s 6p\ ^8P_{7/2}$ 和 $^8P_{9/2}$,并且让第二台激光的波长 λ_2 分别在 $429\sim 470\text{ nm}$ 和 $432\sim 474\text{ nm}$ 这两个波段内扫描,最终实现光电离。

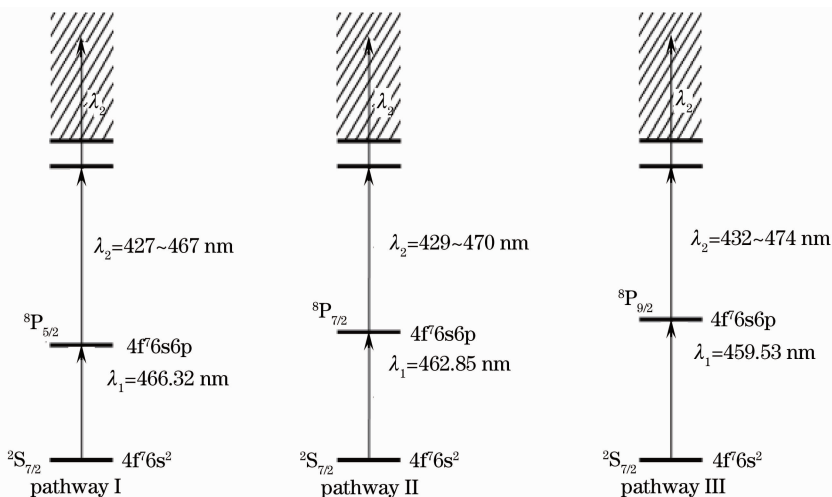


图 1 三种激发路径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three excitation pathways

在实验中,为了确保 Eu 原子能按图 1 所示的激发路径依次分步激发,避免来源于其他过程的信号,例如:Eu 原子直接吸收多个 λ_2 光子电离,从而

对给定的光电离过程产生干扰。为此,采取了如下措施:1)第二束激光的光脉冲相对于第一束激光的光脉冲保持一段时间的延迟(约 10 ns);2)经常确认

当第一束激光被挡住时,无任何光电离信号的出现。

2.2 实验装置

实验装置在文献[20]中已有过介绍,这里仅就与本实验相关的部分做一简单介绍。它主要包括三个部分:激光系统,原子束产生系统,信号采集和分析系统,如图 2 所示。激光系统主要由 Quanta System 公司生产的一台 Nd:YAG 固体脉冲激光器

(型号:GNT 0021-0805/L)和两台波长可调谐的染料激光器组成。该台固体激光器输出的基频光为 1064 nm,脉冲宽度为 6~8 ns,重复频率为 20 Hz,经倍频、和频及分束后,可输出波长为 355 nm 的紫外光,用于抽运两台染料激光器(PDL1,PDL2),其线宽约为 0.1 cm^{-1} 。

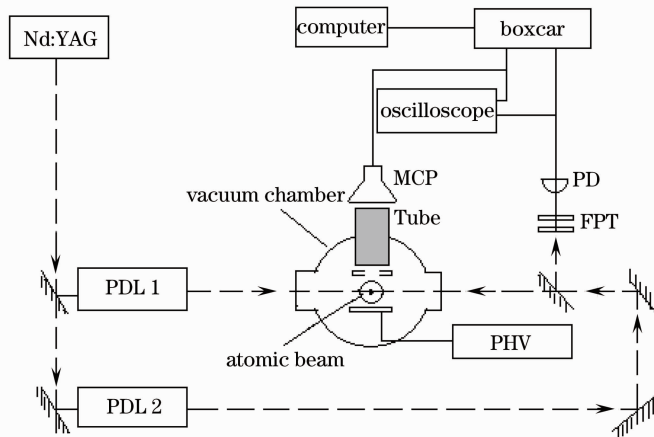


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three excitation pathways

原子束产生系统主要由真空室、原子炉、加热直流电源、温度控制仪等组成。利用机械泵-分子泵组合,维持真空室内的真空度优于 10^{-4} Pa ,以消除碰撞电离。使用直流电源所产生的焦耳热加热装有纯度为 99.99% 的 Eu 金属样品的原子炉,并利用铂-铑热电偶与温度控制仪监控原子炉的温度,实验中温度控制在 760 K。为了减小谱线的多普勒(Doppler)展宽效应,利用准直系统产生 Eu 原子束,并使其在作用区与激光束方向正交。

信号采集和分析系统包括快响应的微通道板(MCP)探测器、示波器、Boxcar 门积分器以及计算机控制和数据存储等单元。待测能级上的原子被光电离后,则可通过施加在作用区极板上的脉冲电场对其进行收集,并送入 MCP 探测器进行放大。同时,采用一台宽带数字型存储式示波器对脉冲电离信号进行同步监测,将预放大后的信号输入到一套由美国 AMETEK 公司生产的 Model 4100 Boxcar 平均积分器,以便对脉冲信号进行取样平均和积分并输出直流信号,然后经过模拟/数字转换后送入计算机,由 Acquire 数据采集和分析系统采集光谱信息,并对所采信息进行分析处理并贮存。此外,采用了一台由 AMETEK 公司生产的 9650A 型脉冲延迟发生器控制电场脉冲与 BOXCAR 的门信号的位置,不但有效地收集离子信号,还控制脉冲电场使其

比光脉冲延迟 500 ns,以避免斯塔克(Stark)效应对光谱的影响。利用空心阴极灯的标准谱线对染料激光的各个波段进行了系统的波长定标,以确保光谱的频率精度,从而降低测量过程中的系统误差。同时,还对同一波段进行了多次扫描,然后对其进行平均以减小测量过程的随机误差。经过对所有光谱测量的误差分析与估算,实验的系统误差优于 $\pm 0.04 \text{ cm}^{-1}$,随机误差优于 $\pm 0.05 \text{ cm}^{-1}$ 。在给出能级数据时,都列出了所对应的测量的不确定度。正如第 3 部分中的表格所示,实验的总体不确定度优于 $\pm 0.1 \text{ cm}^{-1}$ 。

3 结果与讨论

正如前文所述,Eu 原子具有复杂的原子结构,其原子光谱非常复杂,且在同一能域内存在较多的重叠和简并。为了区别具有各种不同总角动量的高激发态光谱,实验中采用了图 1 所示的三种不同的激发路径进行研究。在所涉及的能域内,通过激发路径 I、II 和 III 三种路径分别探测到了 57,55 和 58 个共振电离峰。图 3 为采用激发路径 II 探测到的 Eu 原子高激发态的部分光谱图,其纵坐标为离子信号的强度,横坐标为激光 λ_2 在 446~467 nm 范围内的扫描波长, λ_1 固定在 462.85 nm。图 3 中共

展示了 31 个共振电离峰,其中有 28 个峰是所设计的激发路径的光电离结果,而其余的 3 个峰并非如此,所以在图中用“×”标出。实验发现,在挡住激光 λ_1 时,对应于这三个峰的光电离信号并不消失,因此,它们应该是 Eu 原子接连吸收了几个 λ_2 光子所产生的光电离峰。需要说明的是,采用单色多光子激发的方案也曾经探测到这三个电离峰^[18,19],这与实验的判断也是一致的。

按照实验所设计的三种激发路径,第一束激光 λ_1 分别被固定在 466.32,462.85 和 459.53 nm 处,使 Eu 原子由基态共振跃迁到 3 个不同的中间态 $4f^7 6s6p \ ^8P_J (J=5/2,7/2,9/2)$,其对应光子能量 E_1 分别为 21444.58,21605.17 和 21761.26 cm^{-1} 。为了使 Eu 原子能够由不同的中间态共振跃迁到同一个能域 42896~44854 cm^{-1} ,则 λ_2 需分别在 427~467 nm,429~470 nm 和 432~474 nm 范围内进行扫描。再根据 Eu 原子双色三光子共振电离光谱

图,可确定每一个光电离峰所对应的波长 λ_2 ,进而可求出第二束激光的光子能量为 $E_2 = 1/\lambda_2$,单位是 cm^{-1} 。按照 $E = E_1 + E_2$ 计算能级,可得到 42896~44854 cm^{-1} 能域内 93 个高激发原子态。其中,部分原子态的能级位置和总角动量与文献[18,19]完全相符,如表 1 所示。

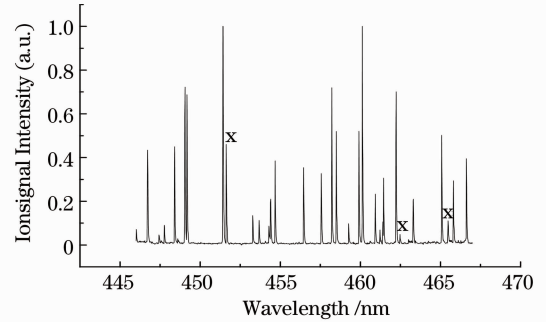


图 3 铕原子双色三光子共振电离光谱图

Fig. 3 Two-color three-photon resonant ionization spectrum of europium atom

表 1 探测到的奇宇称高激发态的能级位置 E , 相对强度 I 和总角动量 J

Table 1 Values of the energy level E , relative intensities I , and total angular momentum J of odd-parity high-lying states obtained by this experiment

SN	E / cm^{-1}	J	I	SN	E / cm^{-1}	J	I
1	42896.08±0.06	3/2	W	29	44081.12±0.09	5/2	M
2	42937.17±0.06	5/2	M	30	44092.79±0.06	7/2	W
3	43029.94±0.06	7/2	M	31	44100.57±0.06	5/2	W
4	43067.40±0.06	7/2	M	32	44256.69±0.07	5/2	S
5	43165.20±0.06	3/2	W	33	44283.09±0.06	3/2	W
6	43183.76±0.07	7/2	S	34	44287.48±0.06	9/2	S
7	43233.59±0.10	9/2	M	35	44348.11±0.06	3/2	M
8	43238.39±0.09	11/2	M	36	44362.30±0.08	5/2	S
9	43263.80±0.06	3/2	M	37	44381.67±0.06	9/2	S
10	43272.57±0.06	3/2	S	38	44386.00±0.06	7/2	M
11	43277.91±0.06	3/2	M	39	44417.40±0.07	11/2	S
12	43281.38±0.08	7/2	W	40	44426.09±0.10	9/2	W
13	43333.39±0.07	9/2	S	41	44471.35±0.06	7/2	S
14	43350.53±0.09	11/2	M	42	44480.14±0.06	5/2	M
15	43358.55±0.08	3/2	M	43	44489.62±0.08	11/2	M
16	43377.51±0.09	11/2	S	44	44494.32±0.06	11/2	S
17	43409.78±0.06	7/2	S	45	44500.36±0.06	9/2	M
18	43423.58±0.07	9/2	S	46	44561.65±0.07	3/2	W
19	43660.28±0.09	9/2	M	47	44597.56±0.06	11/2	M
20	43670.48±0.06	11/2	M	48	44645.52±0.06	9/2	W
21	43740.60±0.08	5/2	M	49	44671.34±0.09	7/2	W
22	43751.28±0.10	9/2	S	50	44672.24±0.09	11/2	W
23	43868.35±0.06	7/2	M	51	44676.39±0.07	11/2	W
24	43900.82±0.08	7/2	M	52	44760.09±0.06	11/2	S
25	43983.68±0.06	5/2	M	53	44811.97±0.06	9/2	M
26	44027.84±0.06	9/2	S	54	44825.98±0.09	5/2	W
27	44046.10±0.06	7/2	M	55	44828.68±0.06	7/2	M
28	44065.29±0.07	7/2	M	56	44854.57±0.06	11/2	W

表 1 中共列出了 56 个高激发原子态,这些态的能级位置在误差允许的范围都与文献[18,19]相一致。在本表中,除了给出各个原子态的能级位置和总角动量外,还确定了每条光谱线的相对强度。尽管这些能级和总角动量等信息在文献中已被报道,却没有给出所有谱线的强度信息。本文通过对谱线光电离信号强度的测量,提供了各条谱线的相对强度信息,并按照归一化后光电离信号的强弱,将谱线的强度分成了 W(强度为 0~0.3)、M(强度为 0.3~0.6)和 S(强度为 0.6 以上)三个等级。这些强度信息的获得,将为进一步研究和分析 Eu 原子的光谱结构提供指导作用。

通过与文献对比,在 42896~44386 cm⁻¹ 能域内,实验结果与文献报道符合得非常好。在该能域

内,文献中报道的所有的原子态在本文都得到了印证。然而,在 44386~44854 cm⁻¹ 能域,文献中报道的某些原子态在实验中却未能被探测到。造成有别于文献报道的原因,应有以下两个方面:1) 该能域处于激光 λ₂ 所用染料出光波长范围的边缘,激光的强度较弱,导致有些光电离谱线的信号强度太弱,以至于被噪声淹没而无法被探测到;2) 待测高激发态上的原子数密度太小,导致光电离信号强度太弱而被噪声所淹没。

为能进一步确定 Eu 原子高激发态的光谱归属,实验中采用了三种不同的激发路径,而经过每一种激发路径所到达终态的总角动量 *J* 都有三种可能性,如下式(1)~(3)式所示。对比同一终态所具有的可能 *J* 值,从而可以唯一确定所测原子态的总角动量。

$$\text{I. } 4f^7 6s^2 [^8S_{7/2}] \xrightarrow{\lambda_1} 4f^7 6s6p [^8P_{5/2}] \xrightarrow{\lambda_2} E = 42896 \sim 44854 \text{ cm}^{-1} [J = 3/2, 5/2, 7/2] \xrightarrow{\lambda_2} \text{Eu}^+, \quad (1)$$

$$\text{II. } 4f^7 6s^2 [^8S_{7/2}] \xrightarrow{\lambda_1} 4f^7 6s6p [^8P_{7/2}] \xrightarrow{\lambda_2} E = 42896 \sim 44854 \text{ cm}^{-1} [J = 5/2, 7/2, 9/2] \xrightarrow{\lambda_2} \text{Eu}^+, \quad (2)$$

$$\text{III. } 4f^7 6s^2 [^8S_{7/2}] \xrightarrow{\lambda_1} 4f^7 6s6p [^8P_{9/2}] \xrightarrow{\lambda_2} E = 42896 \sim 44854 \text{ cm}^{-1} [J = 7/2, 9/2, 11/2] \xrightarrow{\lambda_2} \text{Eu}^+, \quad (3)$$

根据原子跃迁的宇称守恒定律, Eu 原子从奇宇称基态经过偶宇称中间态共振跃迁到较高的激发态,可确定通过这三种激发路径探测到的原子态都具有奇宇称。由电偶极跃迁的选择定则 Δ*J*=0, ±1 (0↔0)可知:经过这三种激发路径, Eu 原子到达最

后终态的总角动量 *J* 处在 3/2~11/2 范围内。对比经过不同激发路径到达同一终态的 *J* 值,唯一确定了所测原子态的总角动量。通过与文献[15,18,19]的报道进行比较,对于一些原子态的光谱归属进行了修正,如表 2 所示。

表 2 部分高激发态的总角动量 *J* 的确定

Table 2 Determination of the total angular momentum *J* of some highly excited states

SN	Present work			Ref. [19]	Ref. [18]	Ref. [15]
	<i>E</i> /cm ⁻¹	Excitation pathways	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
1	42954.05±0.07	I, II	5/2		3/2	
2	43100.71±0.06	II, III	9/2		9/2	9/2, 11/2
3	43270.15±0.10	II, III	9/2		11/2	
4	43374.08±0.06	I, II	5/2	3/2		
5	43454.20±0.09	I, II	5/2	3/2		
6	43508.10±0.07	I, II, III	7/2	5/2		7/2, 9/2
7	43606.44±0.06	I, II, III	7/2	5/2		
8	43641.40±0.08	I, II, III	7/2	5/2		
9	44442.67±0.06	I, II, III	7/2	9/2		
10	44729.14±0.07	I, II, III	7/2	5/2		
11	44749.16±0.07	I, II, III	7/2	5/2		
12	44852.27±0.06	I, II, III	7/2	5/2		

表 2 中给出了 12 个 Eu 原子奇宇称高激发态的能级位置、总角动量以及能够探测到这些态所采用的激发路径。根据电偶极跃迁的选择定则,经过每一种激发路径到达的终态,其总角动量 *J* 都有三种可能

性。通过对比这些可能的 *J* 值,可以最终唯一确定每一个原子态的总角动量。以 *J*=5/2 的判断为例,由表 2 可知:首先,这些态都能够通过路径 I 和 II 被探测到,故 *J* 的值可能为 5/2 或 7/2;其次,通过路径 III 却未能

探测到这些态,故可排除掉 $J = 7/2$ 的可能。因此,这类原子态的总角动量只能为 $J = 5/2$ 。同理,可以唯一确定出 $J = 7/2$ 和 $J = 9/2$ 的能态。

此外,对于 43100.71 cm^{-1} 和 43508.10 cm^{-1} 两个激发态总角动量的识别,与文献有着不同的认识。对于前者的判断与文献[18]相同,都认为其总角动量为 $J = 9/2$,同时,这也与文献[15]报道该原子态可能的

J 值为 $9/2$ 或 $11/2$ 相吻合。至于后者,总角动量判断文献[19]报道其总角动量为 $J = 5/2$,本文判断为 $J = 7/2$,这与文献[15]的报道 $J = 7/2$ 或 $9/2$ 中的前一个值相同。因此,认为能级位置在 43508.10 cm^{-1} 处原子态的总角动量应该是 $J = 7/2$ 而并非 $5/2$ 。

除获得了以上的实验结果外,还发现了一些文献中不曾报道过的原子态,如表 3 所示。

表 3 本实验新发现的 Eu 原子奇宇称高激发态

Table 3 New odd-parity highly excited states of Eu atom

SN	E / cm^{-1}	J	I	Excitation pathways
1	43295.20 ± 0.07	$9/2$	M	II, III
2	43343.22 ± 0.06	$5/2$	W	I, II
3	43383.70 ± 0.07	$3/2$	M	I
4	43545.17 ± 0.06	$3/2$	W	I
5	43592.79 ± 0.08	$9/2$	M	II, III
6	43611.57 ± 0.07	$7/2$	W	I, II, III
7	43614.32 ± 0.06	$3/2$	W	I
8	43617.12 ± 0.06	$11/2$	W	III
9	43622.73 ± 0.07	$3/2$	W	I
10	43656.14 ± 0.06	$3/2$	W	I
11	43801.67 ± 0.07	$11/2$	W	III
12	43861.68 ± 0.08	$9/2$	M	II, III
13	43931.63 ± 0.06	$5/2$	W	I, II
14	43947.63 ± 0.06	$5/2$	W	I, II
15	44018.56 ± 0.07	$7/2$	W	I, II, III
16	44058.63 ± 0.08	$9/2$	M	II, III
17	44131.77 ± 0.07	$11/2$	W	III
18	44162.35 ± 0.07	$3/2$	M	I
19	44177.49 ± 0.06	$3/2$	W	I
20	44208.27 ± 0.07	$11/2$	W	III
21	44415.52 ± 0.09	$5/2$	M	I, II
22	44434.38 ± 0.07	$5/2$	M	I, II
23	44483.13 ± 0.06	$3/2$	W	I
24	44509.81 ± 0.07	$7/2$	W	I, II, III
25	44584.99 ± 0.06	$5/2$	M	I, II

表 3 中共列出了 25 个 Eu 原子奇宇称高激发原子态,并给出了它们的能级位置 E 、总角动量 J 、光谱线的相对强度 I 以及能够探测到这些原子态所采用的激发路径。其中,光谱线的相对强度按归一化后光电离信号的强弱分为:W($0 \sim 0.3$)、M($0.3 \sim 0.6$)和 S($0.6 \sim 1$)三个等级。需要说明的是,表 3 的数据表明,在对所列的原子态进行探测时,因为它们对应的光电离信号都较弱(多数为 W 级别),所以需要精心控制实验的条件,如:激光强度或信噪比等。当实验条件不理想时,这些光电离信号将会被噪声所淹没。由实验所得的结果可以解释为何过去

的文献都未能报道这些原子态的原因。

4 结 论

本文采用双色三光子共振电离光谱技术,研究了 Eu 原子处于 $42896 \sim 44854 \text{ cm}^{-1}$ 能域内 93 个奇宇称高激发态的光谱特性。不仅报道了这些高激发态的能级位置,还给出它们的光电离信号的相对强度。根据三种不同的激发路径和选择定则,通过分析和比较,唯一地确定了所探测原子态的总角动量。通过与已发表的文献进行比较,本文不但确认了许多高激发态的研究结果,还报道了新发现的 25 个高

激发态的光谱信息。另外,还对文献中的少量高激发态的光谱归属进行了修正,并唯一地确定了 12 个态的总角动量。但是,由于 Eu 原子光谱的复杂性,目前尚不能完全解决所测原子态的光谱归属问题。要完全确定它们的原子状态和电子组态等问题还有待于进一步的研究。

参 考 文 献

- Jin Changtai, Wang Chengfei, Liang Xiuqing *et al.*. Measurement of new high-lying levels of $4f^6s7S$ in samarium atom by two color three-photon resonant ionization[J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **19**(7): 533~537
金昌泰,王成飞,梁秀清等. 双色三光子共振电离测量钐原子高激发态 $4f^6s7S$ 新能级[J]. 中国激光, 1992, **19**(7): 533~537
- Dai Changjian, Zhao Xuean. Study of highly excited states of atomic strontium[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10): 1415~1420
戴长建,赵学安. Sr 原子高激发态光谱的研究[J]. 光学学报, 1996, **16**(10): 1415~1420
- T. Jayasekharan, M. A. N. Razvi, G. L. Bhale. Even-parity bound and autoionizing Rydberg series of the samarium atom[J]. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2000, **33**(2000): 3123~3136
- Li Zhiming, Zhu Fengrong, Zhang Zibin *et al.*. Identification of odd-parity high-lying level of Ce I by laser resonance ionization spectroscopy (I): $32042 \sim 34\ 575\ \text{cm}^{-1}$ [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, **22**(5): 709~712
李志明,朱芙蓉,张子斌等. 用激光共振电离光谱测定铈原子奇宇称高激发态(I): $32042 \sim 34575\ \text{cm}^{-1}$ [J]. 光谱学与光谱分析, 2002, **22**(5): 709~712
- Lü Jun, Dai Changjian, Lee Congqi *et al.*. Study of the Ba $6p_{3/2}ns$ autoionizing Rydberg states[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(7): 908~911
吕俊,戴长建,李从奇等. 钡原子 $6p_{3/2}ns$ 自电离里德伯态的研究[J]. 光学学报, 2000, **20**(7): 908~911
- Zhang Yanliang, Li Yongfang, Sun Zhenrong *et al.*. Enhanced effect of the collisional energy transfer between Na and Na_2 and diffuse band radiation in Na_2 [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7): 891~893
张衍亮,李永放,孙真荣等. 高激发态钠原子与分子碰撞能量转移及分子扩散带辐射的增强效应的研究[J]. 光学学报, 2001, **21**(7): 891~893
- Liang Liang, Xie Zunxian, Zhou Chao *et al.*. The study of Ca $4p_{1/2,3/2}ng$ ($J=3$) autoionizing Rydberg states[J]. *J. At. Mol. Phys.*, 2008, **25**(1): 217~220
梁良,谢尊贤,周超等. 钙原子 $4p_{1/2,3/2}ng$ ($J=3$) Rydberg 自电离光谱的研究[J]. 原子与分子物理学报, 2008, **25**(1): 217~220
- M. Yaseen, R. Ali, A. Nadeem *et al.*. Two-color three-photon resonant excitation spectrum of strontium in the autoionization region[J]. *Eur. Phys. J. D.*, 2002, **20**(2): 177~189
- Hu Sufen, Zhang Sen. The measures of highly excited states of atoms using the technique of polarized light and stepwise laser excitation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1992, **12**(3): 1~4
胡素芬,张森. 用偏振光分步激发技术测定原子高激发态光谱[J]. 光谱学与光谱分析, 1992, **12**(3): 1~4
- M. Miyabe, M. Oba, I. Wakaida. Analysis of the even-parity Rydberg series of Gd I to determine its ionization potential and isotope shift [J]. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 1998, **31**(20): 4559~4571
- R. Ali, A. Nadeem, M. Yaseen *et al.*. Three-color four-photon resonant excitation of the even-parity autoionizing resonances in Yb I [J]. *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.*, 1999, **32**(17): 4361~4371
- Wang Yunxian, Dai Changjian, Fang Dawei *et al.*. Stark spectra of highly excited Yb atom [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(11): 1142~1146
王云仙,戴长建,方达谓等. Yb 原子高激发态的斯塔克光谱[J]. 光学学报, 1994, **14**(11): 1142~1146
- Ch. Gerth, M. Martins, S. Brunken *et al.*. $5p^{-1}$ multiplet structure of atomic Lu studied by photoelectron spectroscopy[J]. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 1999, **32**(6): 133~138
- G. Smith, F. S. Tomkins. Absorption spectroscopy of laser excited europium vapour [J]. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1983, **387**: 389~406
- W. C. Martin, R. Zalubas, L. Hagan. Atomic Energy Levels—The Rare-Earth Elements[M]. Washington, D. C.: U. S. GPO, 1978. 185~208
- G. Smith, F. S. Tomkins. Autoionization resonances in the Eu I absorption spectrum and a new determination of the ionization potential[J]. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1975, **342**: 149~156
- Hu Sufen, Zhang Sen, Chen Xing. Observation and measurement of the autoionization spectra for $4f^76s(^7S)np$ series of Eu [J]. *Acta. Physica Sinica*, 1990, **39**(9): 1372~1378
胡素芬,张森,陈星. Eu 原子 $4f^76s(^7S)np$ 系列自电离谱的观察和测定[J]. 物理学报, 1990, **39**(9): 1372~1378
- S. G. Nakhate, M. A. N. Razvi, G. L. Bhale *et al.*. New odd-parity high-lying energy levels of the europium atom by resonance ionization spectroscopy[J]. *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.*, 1996, **29**(8): 1439~1450
- S. G. Nakhate, M. A. N. Razvi, S. A. Ahmad. New odd-parity energy levels of europium atom in the $43200 \sim 45000\ \text{cm}^{-1}$ region by laser photoionization spectroscopy[J]. *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.*, 2000, **33**(2): 191~199
- Qin Wenjie, Dai Changjian, Zhao Hongying *et al.*. Spectra of Rydberg states of Sm atom measured with autoionization detection method[J]. *Acta. Physica Sinica*, 2009, **58**(1): 209~214
秦文杰,戴长建,赵洪英等. 利用自电离探测技术研究 Sm 原子 Rydberg 态光谱[J]. 物理学报, 2009, **58**(1): 209~214