

Eu 原子 $6p_{1/2} nl$ ($l = 0, 2$) 自电离 Rydberg 态的相互作用

杨金红^{1,2} 王 曦^{1,2} 沈 礼^{1,2} 戴长建^{1,2}

¹ 天津理工大学理学院, 天津 300384
(² 显示材料与光电器件教育部重点实验室, 天津 300384)

摘要 为了系统地研究 Eu 原子的自电离光谱并讨论其多种不同的光谱特性, 采用三步孤立实激发技术, 分步将 Eu 原子从基态经中间态 ($4f^7 6s6p^6 P_{5/2}$ 或 $4f^7 6s6p^8 P_{5/2}$) 共振激发到 $4f^7 6sns$ ($n=7$ 和 8) 或 $4f^7 6s7d$ Rydberg 态, 然后将其进一步激发至 $4f^7 6p_{1/2} ns$ 及 $4f^7 6p_{1/2} 7d$ 自电离态。不仅观察到了 $4f^7 6p_{1/2} ns$ ($n=7$ 和 8) 和 $4f^7 6p_{1/2} nd$ 自电离 Rydberg 系列间的组态相互作用, 而且还识别出了混合于 $4f^7 6p_{1/2} ns$ 自电离光谱中的属于其他系列的复杂结构, 并对其光谱特征进行了详细分析和讨论。另外, 报道了相关自电离态的能级位置、线宽和线形等重要信息, 讨论了孤立实激发技术的适用条件。

关键词 光谱学; Eu 原子; 孤立实激发; 自电离光谱; 自电离系列相互作用

中图分类号 O433 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1030002

Interaction of Eu Atom $6p_{1/2} nl$ ($l = 0, 2$) Autoionizing Rydberg States

Yang Jinhong^{1,2} Wang Xi^{1,2} Shen Li^{1,2} Dai Changjian^{1,2}

¹ School of Science, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China
(² Key Laboratory of Display Materials and Photoelectric Devices, Ministry of Education, Tianjin 300384, China)

Abstract In order to systematically study autoionization spectra of the Eu atom and discuss their spectral characteristics, the three-step isolated core excitation (ICE) is used in the present experiment. The atom is excited from its ground state via the $4f^7 6s6p^6 P_{5/2}$ or $4f^7 6s6p^8 P_{5/2}$ intermediate state to the $4f^7 6sns$ ($n=7$ or 8) or $4f^7 6s7d$ Rydberg state, from which it is further populated to the $4f^7 6p_{1/2} ns$ ($n=7$ or 8) or $4f^7 6p_{1/2} 7d$ autoionizing state. Not only the profound interaction between the $4f^7 6p_{1/2} ns$ ($n=7$ or 8) and $4f^7 6p_{1/2} nd$ autoionization Rydberg series revealed, but also the fingerprints of other series mixed in the $4f^7 6p_{1/2} ns$ ($n=7$ or 8) autoionization spectrum are identified. Moreover, the information of level energy, line width and line shape of these autoionizing states is reported, while the validity of ICE method is discussed.

Key words spectroscopy; Eu atom; isolated-core-excitation; autoionization spectra; autoionization series interaction

OCIS codes 300.6210; 300.6350; 300.6360

1 引 言

由于激光器及其相关技术的进步^[1-3], 使得激光光谱技术在原子光谱方面的研究取得了很大进展。近十年来, 尽管对碱土金属原子^[4-9]和少量稀土如 Yb 原子^[10]自电离态的研究已有很多, 但是对

其他稀土原子的研究相对较少。目前, 对于 Eu 原子的束缚态和自电离态^[11-16]都有一些报道, 但是关于其自电离系列间的相互作用和线形等光谱信息却仍然缺乏。因此, 对 Eu 原子的自电离光谱及其特性开展进一步的研究仍然是必要的。

收稿日期: 2013-04-07; 收到修改稿日期: 2013-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(10674102, 11174218)

作者简介: 杨金红(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事稀土元素光谱方面的研究。E-mail: yangjoene66@163.com

导师简介: 戴长建(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事稀土元素光谱方面的研究。E-mail: daicj@126.com

(通信联系人)

通常,不同电子波函数的组态混合会导致组态的相互作用(CI),如在 Xe 原子和 Ba 原子的自电离光谱中都观察到了这一现象^[17-19]。另一方面,组态的相互作用可能会影响自电离光谱的线形。例如,在 Ba 原子上已经观测到了具有不同量子数 n 和 l 的自电离 Rydberg 系列间的相互作用对自电离光谱线形的影响^[20]。由于 Eu 原子具有比碱土金属原子更复杂的结构,可以预想其组态相互作用会更强烈,并与 Ba 原子的自电离系列的相互作用有所不同。为了证实这些预想,本文将关注 Eu 原子 $4f^7 6p_{1/2} ns$ ($n = 7$ 和 8) 及 $4f^7 6p_{1/2} nd$ 的自电离 Rydberg 系列的相互作用,并将其与 Ba 原子对应系列的相互作用进行比较。

孤立实激发(ICE)技术已经广泛深入地应用于碱土金属原子自电离态的研究之中,自电离光谱峰的位置和宽度分别表示能级位置和自电离速率^[21]。目前,多步共振电离光谱和 ICE 技术也应用到了 Eu 原子^[22-25]和 Sm 原子的自电离 Rydberg 系列的研究上,因此检验它对量子数 n 较低的态的适用性也是很有意义的。尽管之前的工作已经使用 ICE 技术对 Eu 原子 $4f^7 6pns$ 自电离态进行了研究^[26],但

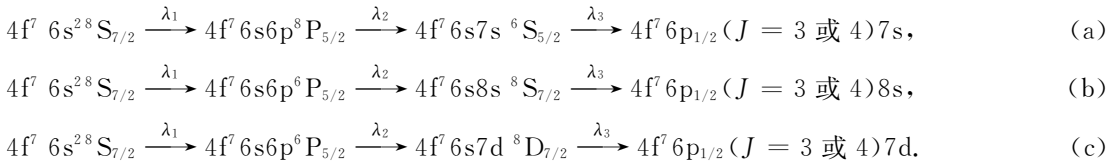
是关于 $4f^7 6pns$ 自电离态的总角动量及其与其他自电离 Rydberg 系列的相互作用等信息却仍然缺乏。另外,对于 $4f^7 6p7d$ 和 $4f^7 6p8s$ 自电离态,当 $4f^7 6s$ 态被激发的时候,由于它可能不再是孤立的,所以预想 ICE 技术的优势也就显现不出来了。

基于以上论述,有必要对 Eu 原子 $4f^7 6p_{1/2} ns$ ($n=7$ 和 8) 和 $4f^7 6p_{1/2} nd$ 态的光谱特性进行更深入的研究,即对具有相同电子组态的不同自电离态进行识别等研究。例如,探测 $4f^7 6pns$ 自电离态既可选择能量为 30619.49 cm^{-1} 的 Rydberg 态 $4f^7 6s7s \ ^6S_{5/2}$ 作为中间态,又可选择能量分别为 39496.56 cm^{-1} 和 39242.56 cm^{-1} 的 $4f^7 6s8s \ ^8S_{7/2}$ 和 $4f^7 6s7d \ ^8D_{7/2}$ Rydberg 态作为中间态。显然,即使具有相同的 $4f^7 6pns$ 电子组态,通过不同的激发路径所激发得到的原子终态也可能完全不同。因此,本工作不但会发现一些新的自电离态,而且预想也可能得到系列相互作用的一些不同特征。

2 实验原理及实验装置

2.1 实验原理

在本工作中,所采用的三条不同的 ICE 激发路径如下:



在路径(a)中,采用波长为 629.12 nm 的第一束激光把 Eu 原子从基态 $4f^7 6s^2 \ ^8S_{7/2}$ 激发到 $4f^7 6s6p \ ^8P_{5/2}$ 态。然后,采用波长为 678.73 nm 的第二束激光

把它激发到 $4f^7 6s7s \ ^6S_{5/2}$ Rydberg 态。最后,第三束激光的波长就可以根据具体要求在一定范围内进行变化。例如,当 λ_3 从 445 nm 到 470 nm 变化时, Eu 原子

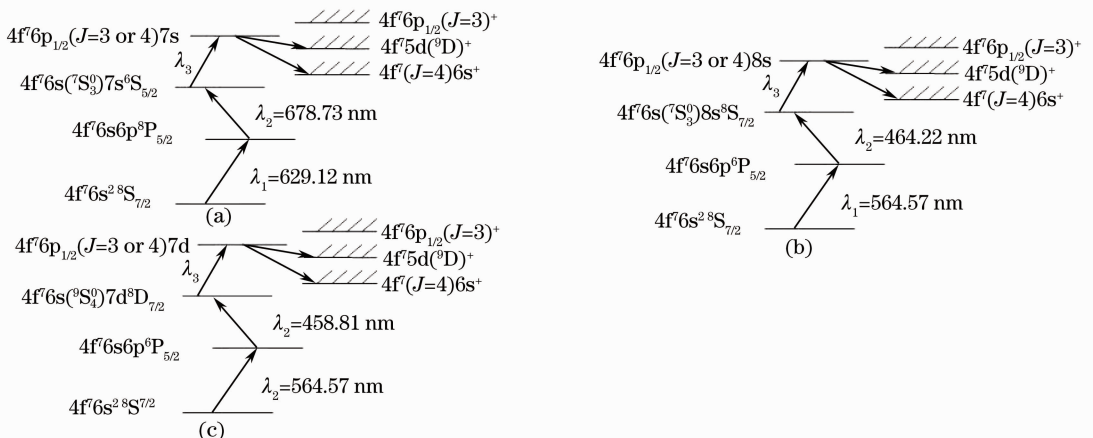


图 1 实验采用的三条 ICE 激发路径图

Fig. 1 Three ICE schemes used in the experiment

就从 $4f^7 6s 7s \ ^6S_{5/2}$ 态跃迁到 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 或 4) $7s$ 自电离态。对于路径(b)和(c),第一束激光的波长都固定在 564.57 nm ,使 Eu 原子从基态 $4f^7 6s^2 \ ^8S_{7/2}$ 激发到 $4f^7 6s 6p \ ^6P_{5/2}$ 态。然后,两个路径的第二束激光分别固定在 464.22 nm 和 458.81 nm 使其分别激发到 $4f^7 6s 8s \ ^8S_{7/2}$ 和 $4f^7 6s 7d \ ^8D_{7/2}$ 态。最后,第三束激光分别根据需要在一定波长范围内扫描。当 λ_3 从 431 nm 增加到 470 nm 时,对于两个路径 Eu 原子就分别从 $4f^7 6s 8s \ ^8S_{7/2}$ 态跃迁到 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$

或 4) $8s$ 自电离态、从 $4f^7 6s 7d \ ^8D_{7/2}$ 态跃迁到 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 或 4) $7d$ 自电离态。总的激发路径如图 1 所示,Eu 原子通过迅速衰变到离子态 $4f^7 6s^+$ 或 $4f^7 5d^+$ 并弹射出电子,从而完成自电离过程。

2.2 实验装置

实验装置前文^[6]已有详细的介绍,如图 2 所示,包括三部分:激光系统,原子束系统和数据采集与处理系统。

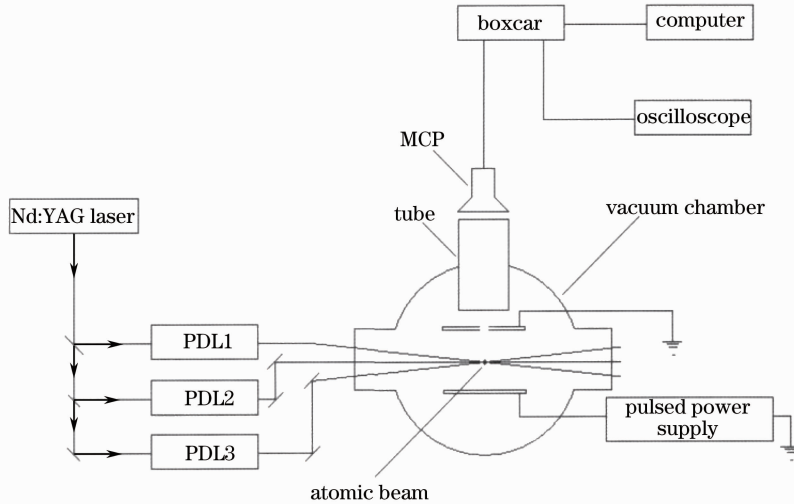


图 2 实验用装置图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

激光系统包括一台脉冲为 20 Hz 的 Nd:YAG 固体激光器和三台线宽为 0.1 cm^{-1} 、线偏振可调谐染料激光器。三台染料激光器由脉宽为 $6\sim 8\text{ ns}$ 的 Nd:YAG 固体激光器产生的二倍频和三倍频光抽运。

Eu 原子源是由真空腔内的不锈钢锅里的纯度为 99.99% 的 Eu 料受热喷射的原子束构成的。原子束打到距离为 1 cm 的两个平行电极板之间,并垂直打在染料激光器发出的激光上以避免多普勒展宽。

数据采集与处理系统包括一个微通道板(MCP)探测器,一个 Boxcar 门积分器,一台装有数据采集和处理软件的电脑。为了避免斯塔克效应,用一个数字脉冲发生器控制的脉冲电场,延迟约 $0.5\text{ }\mu\text{s}$ 。同时,为了收集激发到自电离态后衰变的离子信号,数据输出端通过 Boxcar 门积分器把信息存储在电脑里,以便将来进行分析。

在实验中,为了消除噪音就必须使信号同时依赖三束激光,同时为了提高信噪比通过电脑程序控制使激光在给定波长上固定足够长的时间,并对该时间段内的所有数据进行平均。另外,为了避免饱和效应对自电离光谱的影响,需要调节第三束激光

的强度使离子信号随着其强度线性变化。通过使用高分辨率的光谱计对由于扫描而产生的非线性的第三束激光进行定标,降低了系统误差从而提高了实验数据的准确性,并且采用多次扫描的方式减少随机误差。不确定度约为 0.2 cm^{-1} 。

3 结果与讨论

通过前面的实验,得到了一些自电离态的光谱,例如,在激发路径(a)中的 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 或 4) $7s$ 态的光谱,如图 3 所示。

当 λ_3 在 $445\sim 470\text{ nm}$ 之间扫描时,其光子能量覆盖了 $21269.45\sim 22463.5\text{ cm}^{-1}$ 的能域,因而包含了跃迁 $4f^7 6s(^7S_3^0)^+ \rightarrow 4f^7 6p_{1/2}(J=3\text{ 或 }4)^+$ 所需的能量。如果 ICE 技术是有效的,那么 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 或 4) $7s$ 自电离态的光谱应该是一个对称的线形。但是,图 3 里的光谱具有复杂的特征,只是底部大致对称。因此,对于主量子数较低的 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 或 4) $7s$ 自电离 Rydberg 态,ICE 技术几乎不再有效。

在图 3 中, $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 或 4) $7s$ 自电离态的中

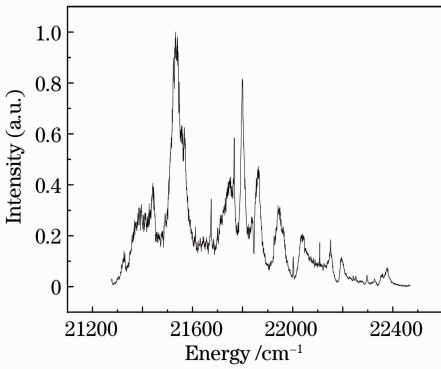


图 3 Eu 原子自电离态 $4f^7 6p_{1/2} (J=3 \text{ 或 } 4) 7s$ 的光谱
Fig. 3 Spectrum of the Eu atom $4f^7 6p_{1/2} (J=3 \text{ 或 } 4) 7s$ autoionizing state

心能量为 52345.7 cm^{-1} , 这低于能量分别为 62569.6 cm^{-1} 和 55657.9 cm^{-1} 的 $4f^7 5d(^7D)^+$ 和 $4f^7 5d(^9D)^+$ 离子限。根据自电离态的宽度和 $(n^*)^3$ 成反比, 其中 n^* 是自电离态的有效量子数, 图 3 中的窄峰是应该收敛于 $4f^7 5d^+$ 电离限的自电离态, 其 n^* 值比 $4f^7 6p_{1/2} (J=3 \text{ 或 } 4) 7s$ 自电离态的要大得多。同样的方法, 可以进一步把其归类为收敛于 $4f^7 5d^+$ 电离限的两个自电离系列。由于收敛于不同电离限的态具有不同的主量子数 n , 所以它们应该具有不同的宽度。例如, 在这些窄峰之中, 最宽的为 50.9 cm^{-1} , 最窄的为 5.1 cm^{-1} 。因此, 较窄的峰可归为 $4f^7 5d(^9D)nl$ 自电离系列, 较宽的峰可归为 $4f^7 5d(^7D)nl$ 系列。另外, 在图 3 中, 许多自电离态, 如: $4f^7 6p_{1/2} (J=3 \text{ 或 } 4) 7s$, $4f^7 5d(^9D)nl$ 和 $4f^7 5d(^7D)nl$ 态的线形都是不对称的, 这是由于不同系列间的相互作用和激发干涉效应的影响所致。

基于上述分析, 有必要进一步研究 ICE 技术的有效性。即检测 ICE 技术对于 $4f^7 6p_{1/2} (J=3 \text{ 或 } 4) 8s$ 自电离态是否比图 3 展示的 $4f^7 6p_{1/2} (J=3 \text{ 或 } 4) 7s$ 自电离态更有效。为此, 选择 $4f^7 6s(^7S_3^0) 8s^8 S_{7/2}$ 奇宇称为初态将它激发到 $4f^7 6p_{1/2} (J=3 \text{ 或 } 4) 8s$ 自电离态。图 4 展示了在 $39200 \sim 39600 \text{ cm}^{-1}$ 能域的双色三步光电离光谱。首先, 波长为 564.57 nm 的第一束激光把 Eu 原子从基态激发到 $4f^7 6s 6p^6 P_{5/2}$ 态。然后, 第二束激光在 $456.5 \sim 465 \text{ nm}$ 之间扫描, 将其进一步激发到各个奇宇称态。

图 4 中的 4 个态都是 $4f^7 6snl (l=0, 2)$ 奇宇称态, 处于其上的原子只需再吸收一个第二束激光的光子便可被光电离从而被探测到。它们分别收敛于 $4f^7 6s(^7S_3^0)^+$ 和 $4f^7 6s(^9S_{40})^+$ 这两个电离限, 其中 $4f^7 6s(^7S_3^0) 8s^8 S_{7/2}$ 态与 $4f^7 6s(^9S_{40}) 7d^8 D_{7/2}$ 态之间

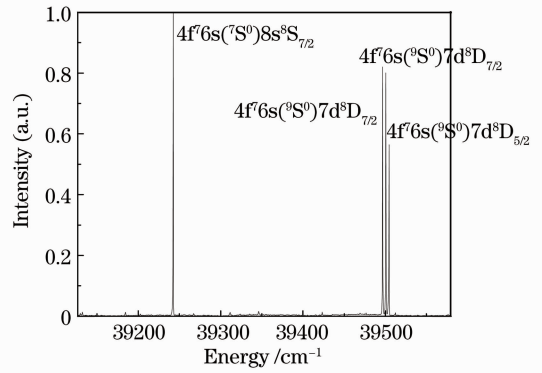


图 4 Eu 原子的双色分步激发束缚态光谱
Fig. 4 Bound spectrum of the Eu atom detected with photoionization after the two-colour stepwise excitation

几乎没有组态相互作用, 而显得非常孤立。这一结果与本课题组的另一报道^[24]形成了鲜明对比, 因为在那里 $4f^7 6s(^9S_{40}) 8s^8 S_{7/2}$ 和 $4f^7 6s(^7S_3^0) 6d^6 D_{7/2}$ 态之间存在着明显的组态相互作用。

当 $4f^7 6snl (l=0, 2)$ Rydberg 态的能量位置确定时, 其就可以作为激发路径 (b)、(c) 中的激发自电离态的初态。如果按照路径 (b), 选择 $4f^7 6s(^9S_{40}) 8s^8 S_{7/2}$ 态作为 Rydberg 态, 在离子 $4f^7 6s(^7S_3^0)^+ \rightarrow 4f^7 6p_{1/2} (J=3)^+$ 或 $4f^7 6s(^7S_3^0)^+ \rightarrow 4f^7 6p_{1/2} (J=4)^+$ 范围扫描第三束激光就得到了 $4f^7 6p_{1/2} (J=3 \text{ 或 } 4) 8s$ 自电离态的光谱, 如图 5 所示。

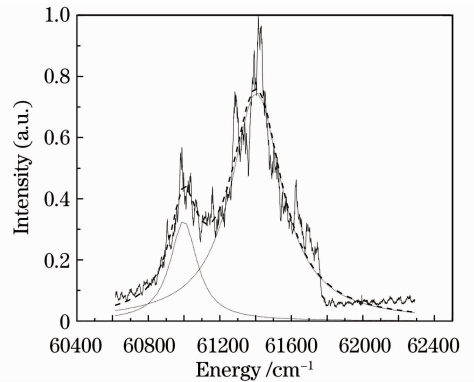


图 5 Eu 原子 $4f^7 6p_{1/2} (J=3 \text{ 或 } 4) 8s$ 自电离态的光谱图
Fig. 5 Experimental spectrum of the Eu atom $4f^7 6p_{1/2} (J=3 \text{ 或 } 4) 8s$ autoionizing state

显然, $4f^7 6p 8s$ 态的原子可以通过如下两种路径光电离: 1) $4f^7 6s^+$ 实激发到 $4f^7 6p_{1/2}^+$; 2) $8s$ Rydberg 电子激发到连续态。如果 ICE 技术对于 $n=8$ 的态是有效的, 那么当激发时 $8s$ Rydberg 电子可以作为旁观者, 而 $4f^7 6p_{1/2} (J=3 \text{ 或 } 4) 8s$ 自电离态在激发过程中应该主要的, 这样可设想 $4f^7 6p_{1/2} (J=3 \text{ 或 } 4) 8s$ 自电离态基本上应该是双峰的洛伦兹线形。

为了验证上述设想,利用洛伦兹线型对 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 或 4) $8s$ 自电离态的光谱进行了拟合,如图 5 所示,并得到了其能级和线宽。图 5 中的实线是实验得到的 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 或 4) $8s$ 自电离态的光谱,粗虚线是总的洛伦兹拟合线形,虚线分别是两个洛伦兹拟合线形。左侧峰的中心能级为 61002.6 cm^{-1} 、线宽为 198.6 cm^{-1} ,而右侧峰的中心能级为 61411.1 cm^{-1} 、线宽为 336.4 cm^{-1} 。显然,拟合和实验符合得非常好,这也和前面的设想一致。

由于两个电离限 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 和 4) $^+$ 离得非常近,当第三束光在 $21270.2 \sim 23248.8 \text{ cm}^{-1}$ 能域扫描时,其包含了 $4f^7 6s(J=3)^+ \rightarrow 4f^7 6p_{1/2}(J=3)^+$ 和 $4f^7 6s(J=3)^+ \rightarrow 4f^7 6p_{1/2}(J=4)^+$ 的离子跃迁,分别对应图 5 中的左右两个峰。这两个峰的能量差为 408.5 cm^{-1} ,与电离限 $4f^7 6p_{1/2}(J=3)^+$ 和 $4f^7 6p_{1/2}(J=4)^+$ 的能量差 433.6 cm^{-1} 有一点差异。这种差异是由从 $4f^7 6s8s$ 态到 $4f^7 6p_{1/2}8s$ 态跃迁时的能量转化造成的,因为这两个态的离子亏损是不一样的。上述现象也表明,尽管使用了 ICE 技术,但是当离子由 $4f^7 6s(J=3)^+$ 实激发到 $4f^7 6p_{1/2}(J=3$ 和 $4)^+$ 时 $8s$ 外电子不再是旁观者。

在图 5 可以明显地发现在自电离态 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 和 4) $8s$ 主要结构上叠加了一些复杂的结构,这种现象不仅证明了在收敛于不同电离限的不同系列间的相互作用,而且这些复杂结构是 $4f^7 5d$ (7D) nl 态的特征而非 $4f^7 6p_{1/2}(J=3$ 和 $4)nl$ 态或 $4f^7 6p_{3/2}(J=3$ 和 $4)nl$ 态的。另外,由于 $4f^7 6p_{1/2}(J=3$ 和 $4)^+$ 两个离子态离得非常近,在 $4f^7 6p_{1/2}(J=3)ns$ 、 $4f^7 6p_{1/2}(J=4)ns$ 、 $4f^7 5d$ (7D) nl 自电离系列间的相互作用就比较强,这就导致了图 5 中的光谱的非对称性。

总之,由 $4f^7 6p_{1/2}(J=3$ 和 $4)8s$ 态光谱和 $4f^7 6p_{1/2}(J=3$ 和 $4)7s$ 光谱可知,前者的对称性要比后者的好很多,即在主量子数 n 从 7 到 8 这么小的变化中就可以说明 ICE 技术更适用于主量子数较大的态。

为了验证 ICE 技术对于 $4f^7 6p_{1/2}7d$ 自电离态是否仍然有效,按照激发路径(c)把第三束激光在 $430.7 \sim 448.7 \text{ nm}$ 范围内扫描,所得到的 $4f^7 6p_{1/2}7d$ 自电离态光谱如图 6 所示。

与 $4f^7 6p_{1/2}7s$ 自电离态类似,图 6 的基座是 $4f^7 6p_{1/2}(J=3$ 或 $4)7d$ 自电离态,而其上叠加的窄峰是收敛于 $4f^7 5d$ (7D) $^+$ 电离限的自电离态。峰之间的较小空间表明这些自电离态具有更大的主量子

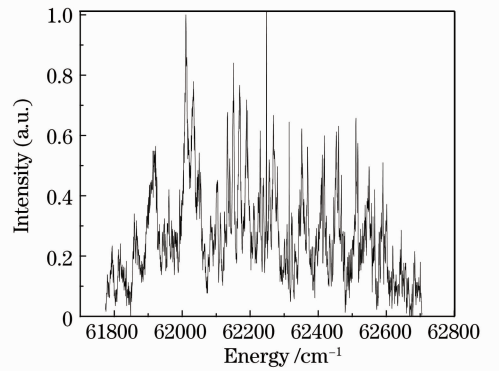


图 6 Eu 原子 $4f^7 6p_{1/2}7d$ 自电离态光谱
Fig. 6 Spectrum of the $4f^7 6p_{1/2}(J=3$ or $4)7d$ autoionizing state of Eu atom

数。从图 6 可以明显地发现由于不同自电离系列相互作用产生的重要的非对称性,并且窄峰的宽度、空间等特征是杂乱无章的,没有一点规律性,也很难分类。这也表明很多电离限是相互干涉的。因此,把这些峰标上序号,并和能级、半峰全宽一起列在表 1 及表 2 里。

表 1 中所列能级和线宽的不确定度约为 0.2 cm^{-1} 。尽管表 1 所展示的宽度随着能级变化趋势并不明显,但是会发现有些相邻的值之间有非常明显的不同,如 No. 1 和 No. 2。而在其他自电离态中这种线宽的变化也列在了表 2 里。

在表 1 和表 2 中,由于 ICE 技术的选择定则和单电子的选择定则相同,当 Rydberg 态的角动量为 $5/2$ 时,自电离态的总角动量可能为 $3/2$ 或 $5/2$ 。Rydberg 态的角动量为 $7/2$ 时,自电离态的总角动量可能为 $7/2$ 或 $9/2$ 。通过对实验数据的分析可知,这些自电离 Rydberg 系列的可能归属为 $4f^7 5d$ (7D_J) nl , $J=J_f-1, J_f, J_f+1$, 其中 J_f 代表自电离态总的角动量, $J'=1-5$, $l=1$ 或 3 。

另外,收敛于不同离子限的有效量子数可以通过 Ritz 公式来求,即

$$n^* = \sqrt{\frac{R_{\text{Eu}}}{T_0 - E_{\text{Ryd}}}}, \quad (\text{d})$$

其中 R_{Eu} 代表 Rydberg 常数, T_0 代表 Eu 原子第一电离限, E_{Ryd} 代表 Rydberg 态的能级。量子亏损(δ)可以由公式 $n^* = n - \delta$ 进行计算。并且,由于这些自电离态收敛于 $4f^7 5d({}^7D)^+$ 或 $4f^7 5d({}^9D)^+$ 电离限,这些自电离 Rydberg 系列可以通过所计算的数据进行讨论。例如,当 $J'=5$ 时,对于表 1,可以计算出有效量子数 n^* 如表 3 所示。

表 1 $4f^7 5d(^7D)nl$ 自电离态的能级(E)和线宽(Γ)

Table 1 Energy level (E) and line width (Γ) of autoionization state of $4f^7 5d(^7D)nl$

No.	E / cm^{-1}	Γ / cm^{-1}	No.	E / cm^{-1}	Γ / cm^{-1}	No.	E / cm^{-1}	Γ / cm^{-1}
1	51945.5	7.3	21*	59777.3	37.8	41	61921.8	36.0
2	52015.8	32.8	22*	59814.2	35.2	42	62014.7	10.4
3	52054.1	19.5	23*	59870.7	10.1	43	62037.7	10.5
4	52152.9	50.9	24	60905.9	14.8	44	62054.5	7.5
5	52365.1	49.9	25	60987.7	21.1	45	62087.8	8.0
6	52417.9	14.1	26	61033.5	32.2	46	62106.7	6.2
7	52482.2	22.7	27	61065.4	18.4	47	62136.5	5.0
8	52565.4	42.4	28	61160.5	11.2	48	62154.5	8.8
9	52660.5	35.7	29	61284.9	27.7	49	62172.9	7.6
10	52771.0	20.6	30	61340.5	12.9	50	62192.8	10.2
11	52814.0	23.1	31	61390.0	3.5	51	62214.2	5.1
12	52945.5	5.1	32	61430.6	28.9	52	62235.5	6.6
13	52993.9	6.9	33	61504.4	8.9	53	62272.7	5.6
14*	58269.1	41.9	34	61570.9	8.4	54	62355.3	5.7
15*	58313.8	49.4	35	61627.7	16.3	55	62413.2	2.5
16*	58417.2	41.1	36	61694.7	26.1	56	62456.8	4.9
17*	58447.7	28.1	37	61742.6	23.0	57	62516.4	2.8
18*	58512.3	18.5	38	61793.5	9.6	58	62550.6	2.0
19*	59686.7	36.2	39	61818.3	16.9			
20*	59717.4	31.1	40	61858.7	25.9			

标 * 号的是引用文献的数据^[24]

表 2 $4f^7 5d(^9D)nl$ 自电离态的能级(E)和线宽(Γ)

Table 2 Energy level (E) and line width (Γ) of autoionization state of $4f^7 5d(^9D)nl$

No.	E / cm^{-1}	Γ / cm^{-1}	No.	E / cm^{-1}	Γ / cm^{-1}	No.	E / cm^{-1}	Γ / cm^{-1}
1	51945.5	7.3	6*	52390.3	11.4	11*	52734.9	5.2
2	52015.8	32.8	7	52417.9	14.1	12	52771.0	20.6
3	52054.1	19.5	8	52482.2	22.7	13	52814.0	23.1
4	52152.9	50.9	9	52565.4	42.4	14	52945.5	5.1
5	52365.1	49.9	10	52660.5	35.7	15	52993.9	6.9

标 * 号的是引用文献的数据^[24]

表 3 Eu 原子自电离态 $4f^7 5d(^7D)nl(J'=5)$ 的能级(E)和有效量子数(n^*)

Table 3 Energy level (E) and effective quantum number (n^*) of autoionization state of $4f^7 5d(^7D)nl$

E / cm^{-1}	n^*	E / cm^{-1}	n^*	E / cm^{-1}	n^*	E / cm^{-1}	n^*
51945.5	3.20	58417.2*	5.12	61390.0	9.54	62106.7	14.98
52015.8	3.21	58447.7*	5.14	61430.6	9.70	62136.5	15.46
52054.1	3.22	58512.3*	5.18	61504.4	10.02	62154.5	15.77
52152.9	3.24	59686.7*	6.14	61570.9	10.34	62172.9	16.11
52365.1	3.27	59717.4*	6.17	61627.7	10.64	62192.8	16.51
52417.9	3.28	59777.3*	6.24	61694.7	11.03	62214.2	16.96
52482.2	3.29	59814.2*	6.28	61742.6	11.34	62235.5	17.45
52565.4	3.30	59870.7*	6.35	61793.5	11.72	62272.7	18.43
52660.5	3.32	60905.9	8.05	61818.3	11.91	62355.3	21.36
52771.0	3.34	60987.7	8.26	61858.7	12.23	62413.2	24.52
52814.0	3.35	61033.5	8.38	61921.8	12.79	62456.8	28.11
52945.5	3.37	61065.4	8.46	62014.7	13.74	62516.4	37.21
52993.9	3.38	61160.5	8.74	62037.7	14.02	62550.6	49.37
58269.1*	5.04	61284.9	9.15	62054.5	14.24		
58313.8*	5.06	61340.5	9.35	62087.8	14.70		

标 * 号的是引用文献的数据^[24]

从表 3 很容易发现,当 n^* 的小数部分在 0.30~0.37 之间时,它们收敛于相同的 Rydberg 系列。因为相同的系列具有相似的离子亏损,其基本上是个常数。同理,当 $J'=1,2,3,4$ 时,可以分别识别另外一些 Rydberg 系列。

线宽代表自电离的速率,是自电离态的一个重要参数,如图 3,5 和 6 中展示的自电离态 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 或 4)7s, $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$)8s, $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=4$)8s 和 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 或 4)7d 的线宽分别为 686.7, 74.7, 358.2, 659.7 cm^{-1} 。这些结果基本上符合具有不同 n 和 l 值的自电离态的线宽变化规律。这些参数也能帮助识别光谱的不同特征。例如,在宽度较宽的态附近,有一些收敛于不同 Rydberg 系列的宽度较窄的态,这个现象就可以解释为系列的相互作用,如图 5 所示。在 1700 cm^{-1} 能域范围内,光谱展示出一些具有非常不同的线宽峰,最宽的为 36.0 cm^{-1} ,最窄的为 2.0 cm^{-1} 。它们都是收敛于 $4f^7 5d$ (7D)⁺ 电离限的不同 Rydberg 系列。

4 结 论

测得了能域在 51900~53100 cm^{-1} 范围的 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 或 4)7s 自电离态,还测得了能域在 60600~62300 cm^{-1} 范围的 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 或 4)8s 自电离态,并通过孤立实激发结合共振电离光谱技术测得了能域在 61774.6~62705.1 cm^{-1} 范围内的 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 或 4)7d 自电离态。另外,还从 $4f^7 6p_{1/2}$ ($J=3$ 或 4) ns ($n=7$ 和 8) 自电离光谱上叠加的复杂结构中识别出了 $4f^7 5dnl$ 系列的光谱特征,并提供了这些自电离态的能级位置、线形及线宽等光谱信息。最后,通过解释实验观察到的尖锐结构、线形的对称性、非对称性及谱线的展宽等光谱特性讨论了不同自电离系列间的相互作用,并对具有相同电子组态 $4f^7 6pns$ 的不同自电离态进行了比较。

参 考 文 献

- 1 Wang Jianlei, Shi Xiangchun, Zhu Xiaolei. Optimization design and modeling of high peak power Yb:YAG pulsed lasers with high efficiency [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2278-2283.
王建磊, 施翔春, 朱小磊. 高效率高功率脉冲 Yb:YAG 片状激光器优化设计与模拟[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2278-2283.
- 2 Hou Junyan, Shu Shijiang, Wang Yuefeng, *et al.*. High power high beam quality LD dual-end-pumped Z folded resonator Nd:YVO₄ laser [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2299-2305.
侯军燕, 舒仕江, 汪岳峰, 等. 激光二极管双端抽运高功率高光束质量 Z 型折叠腔 Nd:YVO₄ 激光器[J]. 光学学报, 2010, 30

- (8): 2299-2305.
- 3 Tang Hao, Zhu Xiaolei, Meng Junqing, *et al.*. High reputation rate short pulse width LGS electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 137-141.
唐昊, 朱小磊, 孟俊清, 等. 高重复频率窄脉宽 LGS 光电调 Q Nd:YVO₄ 激光器[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 137-141.
- 4 Liu Yongping, Dai Changjian, Li Shibei. The experimental study of Ba $6p_{nk}$ ($M=0, 1$) autoionizing series [J]. J Electron Spectrosc Relat Phenom, 2005, 142(2): 91-96.
- 5 Li Shibei, Dai Changjian. Spectroscopic properties of Ba $6p_{nk}$ autoionizing Stark series [J]. J Electron Spectrosc Relat Phenom, 2003, 130(5): 43-48.
- 6 Zhang Yan, Dai Changjian, Li Shibei. The spectroscopic properties of Ba $6p_{3/2}nd$ ($J=1, 3$) autoionizing states [J]. J Electron Spectrosc Relat Phenom, 2004, 135: 63-71.
- 7 Zhang Yan, Dai Changjian, Li Shibei, *et al.*. The study of Ba $6p_{1/2}nd$ ($J=1, 3$) autoionizing states [J]. J Electron Spectrosc Relat Phenom, 2004, 136(8): 273-280.
- 8 Qin Wenjie, Dai Changjian, Xiao Ying. The study of autoionizing states of the samarium atom [J]. J Quant Spectrosc Radiat Transfer, 2010, 111(7-8): 997-1004.
- 9 Lü Jun, Dai Changjian, Li 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.
- 10 E Biemont, P Quinet, Dai Zhenwen, *et al.*. Lifetime measurements and calculations in singly ionized ytterbium [J]. J Phys B: At Mol Opt Phys, 2002, 35(22): 4743-4749.
- 11 B A Bushaw, W Nortershauser, K Blaum, *et al.*. Studies of narrow autoionizing resonances in gadolinium [J]. Spectrochim Acta Part B 2003, 58(6): 1083-1095.
- 12 S G Nakhate, M A N Razvi, S A Ahmad. New odd parity energy levels of europium atom in the 43200~45000 cm^{-1} region by laser photoionization spectroscopy [J]. J Phys B: At Mol Opt Phys, 2000, 33(2): 191-199.
- 13 S Bhattacharyya, M A N Razvi, S Cohen. Odd-parity $J=11/2$ autoionizing Rydberg series of europium below the $5d^9 D_1$ threshold: spectroscopy and multichannel quantum-defect-theory analysis [J]. Phys Rev A, 2007, 76(1): 0125021.
- 14 S Bhattacharyya, S G Nakhate, T Jayasekharan, *et al.*. Multichannel quantum-defecttheory analysis of the observed odd-parity $5dnd$ autoionization Rydberg series of neutral europium [J]. Phys Rev A, 2006, 73(6): 0625061.
- 15 S Bhattacharyya, R D Souza, P M Rao, *et al.*. Investigation of new odd-parity autoionization Rydberg levels of neutral europium [J]. Spectrochimica Acta Part B, 2003, 58(3): 469-478.
- 16 Ye Shiwei, Dai Changjian, Zhao Yanhong. Investigation of even-parity highly excited states of Eu I with electric field ionization method [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0230001.
野仕伟, 戴长建, 赵艳红. Eu 原子偶宇称高激发态的场电离探测[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0230001.
- 17 G M Meye, A Marquette, C Delisle, *et al.*. Two-colour studies of the even-parity autoionization series $5p^{5/2}n'l$ ($l=p, f$) in atomic xenon [J]. J Phys B: At Mol Opt Phys, 2005, 38: 285-296.
- 18 M L Bajema, R van Leeuwen, E Murgu, *et al.*. Configuration interaction and Raman redistribution in perturbed Ba Rydberg states [J]. Phys Rev A, 2000, 61(2): 0234141.
- 19 L F'eret, J Pascale. Configuration-interaction Hartree-Fock calculations for two-electron atoms using a pseudopotential [J]. Phys Rev A, 1998, 58(5): 3585-3596.
- 20 R R Jones, P M Fu, T F Gallagher. Channel interactions in the Ba $6d_{nl}$ autoionizing series for $l=2, 3$ and 4 [J]. Phys Rev A, 1991, 44(7): 4265-4279.
- 21 G W Schinna, Dai Changjian, T F Gallagher. Mg $3pns$ and $3pnd$

- ($J = 1$) autoionizing series [J]. Phys Rev A, 1991, 43(5): 2316–2327.
- 22 Zhang Yan, Dai Changjian, Li Shibei. Channel interaction of Ba $6pnd$ ($J = 1, 3$) autoionizing states [J]. J Electron Spectrosc Relat Phenom, 2005, 148(1): 11–16.
- 23 S Cohen, M Aymar, A Bolvinos, *et al.*. Experimental and theoretical analysis of the $5pnp$ $J = 0^{\circ}; 1^{\circ}; 2^{\circ}$ autoionizing spectrum of Sr [J]. Eur Phys J D, 2001, 13(5): 165–180.
- 24 Wang Xi, Shen Li, Dai Changjian. Interaction among different Rydberg series of the europium atom [J]. J Phys B: At Mol Opt Phys, 2010, 45(16): 165001.
- 25 Xie Jun, Dai Changjian, Li Ming. Investigation of europium atom by two-color three-photo resonant ionization spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2142–2148.
谢 军, 戴长建, 李 鸣. 镧原子双色三光子共振电离光谱的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2142–2148.
- 26 Xiao Ying, Dai Changjian, Qin Wenjie. Experimental study of bound and autoionizing Rydberg states of the europium atom [J]. Chin Phys B, 2010, 19(6): 32021–32027.

栏目编辑: 李文喆