

钐原子的两步激发共振光电离光谱^{*}

赵洪英 戴长建[†] 关 锋

(显示材料与光电器件教育部重点实验室, 天津 300191)

(天津理工大学理学院, 天津 300384)

(2008 年 5 月 6 日收到, 2008 年 6 月 6 日收到修改稿)

采用两步激发共振光电离技术研究了 Sm 原子的偶宇称高激发态光谱. 实验采用了两条激发路线: 1) 第一束激光的波长固定在 478.44 nm 以便将 Sm 原子从 $4f^6 6s^2 [^7F_1]$ 态激发至 $4f^6 6s 6p [^7D_1]$ 态, 再用第二束激光使其波长从 480 nm 扫描至 530 nm, 将 Sm 原子进一步激发至待测的高激发态; 2) 第一束激光的波长固定在 574.81 nm 以便将 Sm 原子从 $4f^6 6s [^7F_2]$ 态激发至 $4f^6 6s 6p [^5G_3]$ 态, 再用第二束激光使其波长从 460 nm 扫描至 470.5 nm, 将 Sm 原子进一步激发至待测的高激发态. 最后, 利用第三束激光通过光电离技术对处于上述高激发态上的 Sm 原子进行探测. 通过对光电离光谱的详细分析, 测定了第一电离限以下分别处于 $39465\text{--}39932\text{ cm}^{-1}$ 和 $40000\text{--}42010\text{ cm}^{-1}$ 这两个能量范围内的 26 个和 76 个偶宇称高激发原子态. 报道了它们的能级位置和相对光谱强度, 还对其光谱归属进行了讨论. 通过与文献值进行比对, 发现所测定的 51 个原子态数据与文献相一致, 而其余 51 个原子态则为本实验首次发现.

关键词: Sm 原子, 光谱, 分步激发, 共振电离

PACC: 3280, 3270F, 3690

1. 引 言

近年来, 随着激光器件和技术的进步, 原子高激发态的光谱研究取得了很大的进展. 其中, 激光分步激发、共振电离技术^[1,2]是研究多电子原子高激发态光谱的有效方法. 单光子吸收和发射光谱技术^[3,4]是早期探测原子低能级位置的常用手段, 但是这种方法在研究原子高激发态时存在着很大缺陷: 1) 不能获得与基态宇称相同原子态的相关信息; 2) 由于原子吸收单光子跃迁至高激发原子态的跃迁概率很小, 导致高激发原子态上的原子数目较少, 因此测到的高激发原子态光谱信号很弱. 而激光分步激发、共振电离技术克服了上述传统光谱测量的困难, 是一种测量原子高激发态光谱的有效方法. 采用此方法可以将原子从基态或任何热布居的低能级沿设定的激发路线激发到任何宇称的高激发原子态, 并且激发截面相对较大, 之后再采用光电离或场电离技术使原子电离成离子/电子对, 再利用微通道板 (MCP) 收集离子、电子信号, 高增益、快响应微通道

板的应用进一步增强了探测信号的灵敏度.

稀土元素具有许多优异性能, 在科技和生产的许多方面都有着重要的应用. 稀土元素由于未充满的 4f 支壳层, 其高激发态光谱中不仅存在类似于碱土金属的最外层电子被激发的高激发态^[5-8], 而且存在 4f 支壳层电子被激发的高激发态, 其原子光谱非常复杂, 因此稀土元素原子光谱的研究工作更具难度与挑战性. 目前国际上光谱研究的焦点已从碱土金属原子转移到了这些能级结构更加复杂的稀土原子上. 国际上对于稀土原子 Gd, Lu 及 Yb 高激发态光谱的研究报道较多^[9-13], 然而人们对于 Sm 原子高激发态的光谱报道却较少, 至今对 Sm 原子态的了解仍很不完整. Martin 等人^[14]给出 31200 cm^{-1} 能域以下 58 个偶宇称的能级位置以及 35200 cm^{-1} 能域以下 404 个奇宇称能级位置; Jia 等人^[15]给出在 $35700\text{--}37100\text{ cm}^{-1}$ 能域内的 7 个偶宇称的能级位置; Jayasekharan 研究小组^[16,17]报道了 $32000\text{--}45519\text{ cm}^{-1}$ 能域内共 600 多个偶宇称的原子态数据; Gomonai 等人^[18]用单色三光子共振电离光谱技术对 $34713.1\text{--}40526.7\text{ cm}^{-1}$ 能量范围内能级位置进行了

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 30574098, 10674102) 和天津市自然科学基金 (批准号: 05YFJMJC05200) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: daicj@126.com.

研究,又观测到 15 个偶宇称新能级.

虽然在上述能域发现了大量的 Sm 原子高激发态,但是由复杂原子的光谱简并性可知,若采用不同的激发路线则会在这些能域中发现许多不同的原子状态.换句话说,即使在同一能域内只要所采用的激发路线不同,则可以将 Sm 原子从不同的初态激发到相应的终态.具体的结果取决于光谱的谱线强度和相关的跃迁选择定则.根据上述调研结果和光谱学原理,本文采用了与文献[17]所不同的激发路线并利用两步共振光电离方法,测定了大量的处于第一电离限以下的具有偶宇称的高激发原子态,不但验证了一批文献发表的光谱数据,还通过许多新实验数据进一步地丰富了 Sm 原子的能级结构数据和光谱信息.

2. 实验原理与装置

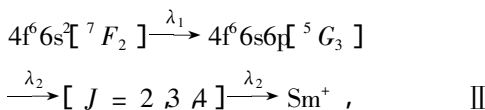
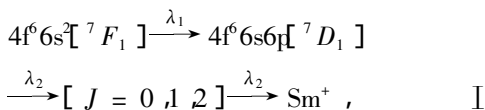
2.1. 实验原理

Sm 原子具有多个价电子,基态存在多个精细结构分裂,原子态为 $4f^6 6s^2 [^7F_J]$,总角动量

表 1 在不同温度下各原子态上的热布居(原子数占总数的百分比)

温度/K	7F_0	7F_1	7F_2	7F_3	7F_4	7F_5	7F_6
800	21.67	38.42	25.16	10.41	3.27	0.86	0.20
750	23.18	39.67	24.41	9.31	2.66	0.63	0.13
700	24.88	40.90	23.44	8.15	2.09	0.44	0.08

本实验采用二台染料激光器激发和探测 Sm 原子高激发态.一台 Nd:YAG 固体脉冲激光器输出波长为 532 nm 绿光及 355 nm 紫外激光分别抽运两台染料激光器,其中一台染料激光器输出固定波长激光 λ_1 ,另一台染料激光器输出波长连续变化的激光 λ_2 .为避免两束激光的重叠,控制光路使第二束激光延迟第一束激光 8 ns 进入真空室.本实验选取的激发路线为



在第一条激发路线中 $\lambda_1 = 478.44$ nm,在第二条激发路线中 $\lambda_1 = 574.81$ nm.下面以激发路线 I 为例说明

$J = 0-6$ 共 7 个,能级分别为 $0 \text{ cm}^{-1} (^7F_0)$, $292.58 \text{ cm}^{-1} (^7F_1)$, $811.92 \text{ cm}^{-1} (^7F_2)$, $1489.55 \text{ cm}^{-1} (^7F_3)$, $2273.09 \text{ cm}^{-1} (^7F_4)$, $3125.46 \text{ cm}^{-1} (^7F_5)$ 和 $4020.66 \text{ cm}^{-1} (^7F_6)$.因此在所用的加热温度下,不可避免地同时布居上述七个态,各原子态上布居的原子数目服从热力学玻尔兹曼分布.很显然,激发起始态在不同的能级上布居给实验造成了两个严重后果:其一处于激发起始态(7 个原子态之一)上的原子数目显著减少,从而减弱了跃迁的信号强度;其二由于激发起始态不能确定,使第一步激发的唯一性遭到了破坏,给后续的光谱识别带来巨大的不确定性.表 1 给出原子炉设定温度 T 在 700, 750, 800 K 时 $^7F_{J=0-6}$ 各原子态上布居的原子数目百分比.

从表 1 可以看出,在各个温度下绝大多数 Sm 原子集中在 7F_0 , 7F_1 和 7F_2 三个原子态上,因此若选择这三个态作为第一步激发的初态则有可能获得比较强的光谱信号.本实验采用两条激发路线探测 Sm 原子态,分别选择 7F_1 和 7F_2 作为两条激发路线的第一步原子跃迁的初态.

Sm 原子的激发电离过程.图 1 为激发路线 I 的示意图.

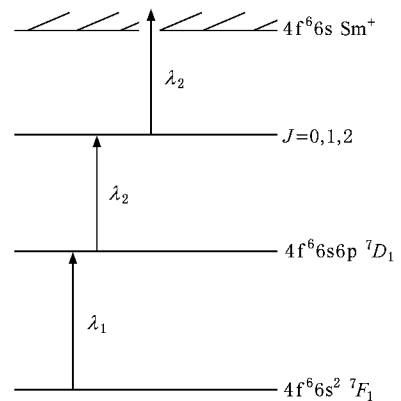


图 1 激发路线 I 示意图(两步共振激发电离)

Sm 原子先吸收一个 λ_1 光子从 $4f^6 6s^2 [^7F_1]$ 态(能级为 292.58 cm^{-1})共振跃迁到 $4f^6 6s 6p [^7D_1]$ 态,

其能级为 21193.68 cm^{-1} , 再依次吸收两个 λ_2 光子, 第一个 λ_2 光子使 Sm 原子共振跃迁至要探测的高激发态, 其能级为 $E = 292.58 \text{ cm}^{-1} + \omega_1 + \omega_2 = 21193.68 \text{ cm}^{-1} + \omega_2$, ω_1 为 λ_1 光子能量, ω_2 为 λ_2 光子能量, 然后第二个 λ_2 光子作为探测光使 Sm 原子跃迁到电离限以上, 将 Sm 原子光电离成离子/电子对, 电子/离子信号被 MCP 探测器接收并经过 BOXCAR 积分平均放大后输入计算机, 得到光电离光谱. 对于第二条激发路线, 中间态 $4f^6 6s 6p [^5 G_3]$ 能级为 18208.97 cm^{-1} , 因此相应的待探测高激发原子态能级 $E = 18208.97 \text{ cm}^{-1} + \omega_2$.

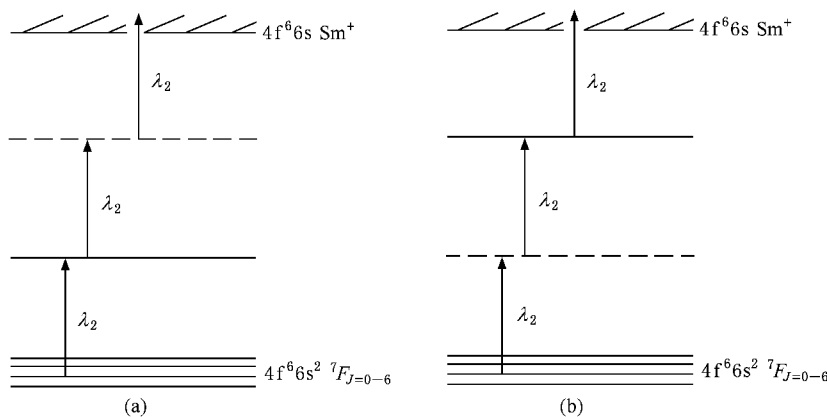


图 2 单色多光子激发共振电离示意图 (a) $\lambda_2 + 2\lambda_2$ (b) $2\lambda_2 + \lambda_2$

在图 2(a) 中基态 Sm 原子先吸收一个 λ_2 光子, 跃迁至一低激发态, 然后再同时吸收两个 λ_2 光子并被电离, 探测到的共振电离峰对应低激发原子态能级 $E = \text{基态 } ^7F_{J=0-6} + \omega_2$; 在图 2(b) 中基态 Sm 原子先同时吸收两个 λ_2 光子, 跃迁至一高激发态, 然后再吸收一个 λ_2 光子被电离, 探测到的共振电离峰对应高激发原子态能级 $E = \text{基态 } ^7F_{J=0-6} + 2\omega_2$. 在本实验中, 我们需要采取手段, 认真辨别和消除这些只由第二束激光产生的单色多光子跃迁所导致的干扰峰.

2.2. 实验装置

本实验所采用的实验装置如图 3 所示: 包括激光系统、原子束产生系统、信号采集和分析系统. 激光系统包括一台 Quanta System 公司生产的 Nd:YAG 固体激光器和两台染料激光器. Nd:YAG 固体激光器输出频率为 20 Hz 的 1064 nm 的基频脉冲激光, 经倍频、和频及分束后可输出 532 nm 与 355 nm 脉冲

值得注意的是, 在光电离光谱中并不是所有的共振峰都对应一个高激发态能级, 这是因为由于基态具有复杂的精细结构分裂(7 个原子态), 热布居将原子分散在基态的七个子能级上, 在固定第一束激光的波长 λ_1 而扫描第二束激光的波长 λ_2 时, 各个热布居的基态 Sm 原子有可能不吸收 λ_1 光子而靠吸收多个 λ_2 光子使其光电离, 即通过单色多光子激发过程也可产生电离信号, 对于这种情况实验中必须予以去除. 单色多光子激发电离过程包括 $\lambda_2 + 2\lambda_2$ 或 $2\lambda_2 + \lambda_2$, 激发路线如图 2 所示.

激光, 用于抽运两台染料激光器. 所用激光染料包括 Rhodamine6G(532 nm 激光抽运), Coumarin480(355 nm 激光抽运) 和 Coumarin460(355 nm 激光抽运). 激光线宽为 0.1 cm^{-1} .

图 3 中圆周线内的部分包括原子束产生装置、光子-原子作用区及离子/电子探测装置. 这些装置都处于真空环境中, 其真空度可达 10^{-4} Pa . 将 Sm 原子置于不锈钢坩埚中, 用钼丝线圈进行电加热, 一般将加热炉温度控制在 800 K 以下, 以便使光子-原子作用区的 Sm 原子数密度为 10^8 原子/cm^3 . Sm 原子束经准直孔到达作用区并与通过石英玻璃窗口进入的激光束垂直相交. 当 Sm 原子被光电离后, 可用高增益(可达 10^8) 快响应 MCP 探测器接收并经美国 AMETEK 公司 Model 4100 Boxcar 积分平均器处理后送入计算机. 利用 Acquire 数据采集和分析软件, 便可对所获得的光谱信息进行实时显示以及后续的分析 and 处理. 另外, 为避免 Stark 效应对光谱的影响, 采用 AMETEK 公司的 9650A 型脉冲延迟发生器控制收集电场的脉冲, 使其比光脉冲延迟 500 ns.

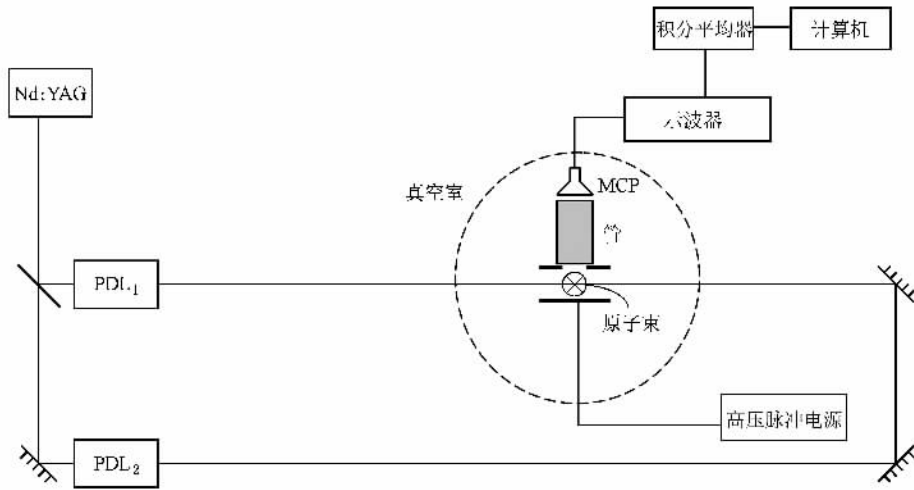


图3 实验装置示意图

实验中,利用空心阴极灯的标准谱线对扫描的激光波长进行了绝对定标,而用 F-P 标准具对光电离光谱进行了相对定标,以便消除光谱测量过程中的系统误差.同时,本文对同一波段进行了多次扫描,然后对其进行平均,以减小测量过程中的随机误差.经过对所有光谱测量的误差分析和估算,本实验中激光波长的不确定度为 $\pm 0.01 \text{ nm}$.

3. 理论依据

本实验通过测量分析激光两步共振光电离光谱,探测 Sm 原子偶宇称高激发原子态.光谱中每条谱线(共振峰)对应一个原子态(待测高激发态),若光谱中某一谱线的强度较弱,则有可能被噪声淹没,那么通过此光谱就探测不到对应的原子态.光电离光谱谱线强度

$$I \propto N_{j_a} W(\alpha_a J_a, \alpha_b J_b) = N_{j_a} |\langle \alpha_b J_b | \mathbf{r} | \alpha_a J_a \rangle|^2, \quad (1)$$

式中 N_{j_a} 表示待测高激发态上的原子数密度, J 为总角动量, α 表示除总角动量之外的其他量子数,脚标 a 代表跃迁初态,这里为待测高激发态, b 代表跃迁终态,这里为电离态, $W(\alpha_a J_a, \alpha_b J_b)$ 表示原子由待测高激发态 $|\alpha_a J_a\rangle$ 到电离态 $|\alpha_b J_b\rangle$ 的跃迁概率.

对于一个给定的激发路线

$$A \xrightarrow{\lambda_1} B \xrightarrow{\lambda_2} X \xrightarrow{\lambda_2} C (\text{Sm}^+),$$

激发起始态为 A 态,吸收一个 λ_1 光子跃迁至 B 态,吸收一个 λ_2 光子跃迁至 X 态(要探测的高激发态),再吸收一个 λ_2 光子原子被光电离至 C 态(电

离态),设激发路线的每一步都满足电偶极跃迁选择定则 $\Delta J = 0, \pm 1$ ($0 \rightarrow 0$).

现假设由不同的激发路线探测同一个高激发 X 态,因为电离态为连续态,属于非共振电离,不同激发路线下由 X 态向电离态的跃迁概率可近似相等,所以在不同激发路线下获得的光电离光谱中 X 态对应的共振峰的谱峰强度均取决于各自 X 态上的原子数密度 N_X ,而很显然 X 态上的原子数密度正比于布居在基态 A 上的原子数密度,同时正比于每一步激发的原子跃迁概率.在某个激发路线下,若由 B 态向 X 态的跃迁概率很小或跃迁禁戒,那么在光电离光谱中就不会出现 X 态对应的共振峰,反之由 B 态向 X 态的跃迁概率大,光电离光谱中就会有 X 态对应的共振峰,因此激发路线不同,在同一能域能检测出的原子态也很可能不相同.

4. 结果与讨论

按照激发路线 I,第一台激光器输出固定波长 $\lambda_1 = 478.44 \text{ nm}$ 激光,使 Sm 原子由 $4f^6 6s^2 [^7 F_1]$ 跃迁至 $4f^6 6s 6p [^7 D_1]$ 态,第二台激光器输出连续波长 λ_2 激光, λ_2 从 480 nm 扫描至 530 nm ,在测量的两步激发共振光电离光谱中共出现 82 个共振峰.同样,按照激发路线 II,第一台激光器输出固定波长 $\lambda_1 = 574.81 \text{ nm}$ 激光,使 Sm 原子由 $4f^6 6s^2 [^7 F_2]$ 跃迁至 $4f^6 6s 6p [^5 G_3]$ 态,第二台激光器输出的激光波长 λ_2 从 460 nm 扫描至 470.5 nm ,光电离光谱中共出现 33 个共振峰.图 4 展示了 Sm 原子的两步激发共振光

电离光谱的两个实例.

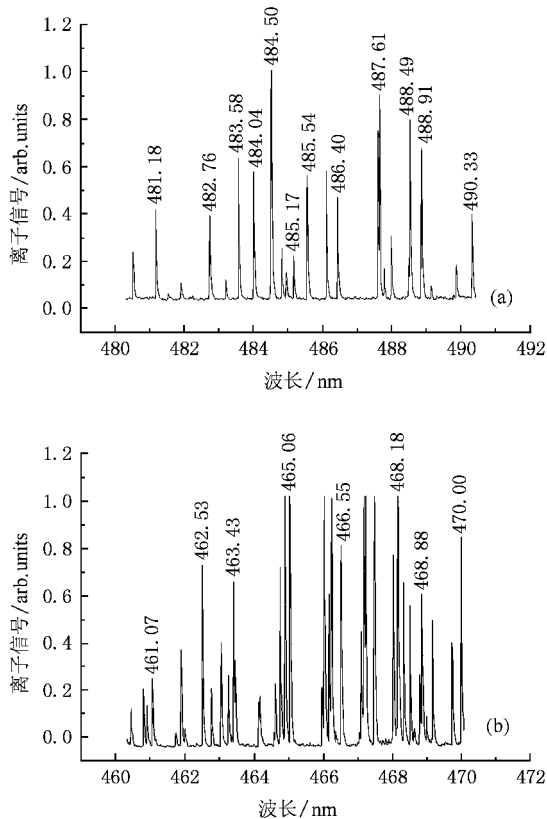


图4 Sm 原子两步激发共振电离光谱图 (a) 调谐 λ_1 波长为 478.44 nm, λ_2 在 480—490 nm 范围扫描 (b) 调谐 λ_1 波长为 574.81 nm, λ_2 在 460—470 nm 范围扫描

根据 Sm 原子两步激发共振电离光谱可确定每一个峰所对应的 λ_2 波长,由激发路线 I 获得的光谱显示 82 个共振谱峰,相应地得到 82 个 λ_2 波长值,由激发路线 II 获得的光谱显示 33 个共振谱峰,相应地得到 33 个 λ_2 波长值.

然而这些 λ_2 波长值数据可能包含 λ_2 单色多光子电离干扰峰波长值数据,我们采取了如下措施将其排除:通过示波器观察共振峰,如果是两光子分步激发电离共振峰,则挡住 λ_1 激光,示波器上的共振电离信号消失;反之,挡住 λ_1 激光,示波器上的共振电离信号不消失,则此峰肯定为 λ_2 单色多光子电离干扰峰.通过此辨别方法,我们确定出两条激发路线探测的光谱中共有 13 个谱峰为单色多光子共振电离峰,对应的 λ_2 波长值分别为 460.32 nm, 461.79 nm, 462.91 nm, 464.77 nm, 466.16 nm, 467.00 nm, 468.39 nm, 484.95 nm, 488.49 nm, 491.21 nm, 494.70 nm, 504.53 nm 和 526.70 nm,在讨论分步激发共振

电离探测高激发原子态时应该去除.

由此得出在激发路线 I 下测得的光谱 82 个共振电离峰中有 76 个,在激发路线 II 下测得的光谱 33 个共振电离峰中有 26 个属于两步激发共振光电离.

采用分步激发共振电离技术探测高激发原子态,根据共振峰对应波长 λ_2 求出第二束激光光子能量 ω_2 ,在激发路线 I 下,按照 $E = 21193.68 \text{ cm}^{-1} + \omega_2$ 计算能级,得到 40000—42010 cm^{-1} 能量域内 76 个高激发原子态,详见表 2.

表 2 采用激发路线 I 所探测到的钐原子高激发态的能级位置 E 、谱线的相对强度 I 及其可能的总角动量 J

序号	能级/ cm^{-1}	总角动量	相对强度
1	42003.60	2	w
2 [#]	41975.74	0, 1, 2	m
3 [#]	41944.68	0, 1, 2	w
4	41907.70	2	w
5	41887.76	1	w
6 [#]	41872.99	0, 1, 2	s
7	41853.34	1	m
8 [#]	41833.71	0, 1, 2	s
9	41819.66	1	w
10	41805.20	1	w
11	41789.49	2	m
12	41765.16	1, 2	m
13 [#]	41753.06	0, 1, 2	m
14	41702.03	1, 2	s
15	41694.04	2	w
16	41685.64	2	w
17	41647.48	1	m
18 [#]	41637.03	0, 1, 2	w
19 [#]	41606.84	0, 1, 2	w
20 [#]	41588.11	0, 1, 2	m
21 [#]	41563.60	0, 1, 2	w
22 [#]	41558.73	0, 1, 2	w
23 [#]	41528.80	0, 1, 2	m
24	41516.51	1, 2	w
25	41508.25	1, 2	w
26 [#]	41481.45	0, 1, 2	m
27	41434.21	2	m
28 [#]	41417.76	0, 1, 2	m
29	41393.72	2	s

续表 2

序号	能级/cm ⁻¹	总角动量	相对强度
30 [#]	41344.81	0, 1, 2	w
31 [#]	41329.39	0, 1, 2	m
32	41324.94	2	m
33 [#]	41302.71	0, 1, 2	w
34	41293.81	2	w
35 [#]	41273.19	0, 1, 2	w
36	41235.38	2	s
37	41223.32	0	w
38	41161.72	2	w
39 [#]	41130.26	0, 1, 2	s
40	41108.42	1	w
41	41060.93	1, 2	m
42 [#]	41049.13	0, 1, 2	w
43	40996.00	1, 2	m
44	40968.97	1	w
45 [#]	40956.07	0, 1, 2	w
46 [#]	40948.26	0, 1, 2	w
47 [#]	40923.38	0, 1, 2	w
48 [#]	40890.74	0, 1, 2	w
49 [#]	40845.84	0, 1, 2	w
50 [#]	40839.94	0, 1, 2	m
51 [#]	40819.89	0, 1, 2	s
52	40761.49	2	m
53 [#]	40740.45	0, 1, 2	w
54 [#]	40725.18	0, 1, 2	m
55 [#]	40662.42	0, 1, 2	w
56 [#]	40621.34	0, 1, 2	w
57 [#]	40616.06	0, 1, 2	w
58 [#]	40588.94	0, 1, 2	m
59 [#]	40572.77	0, 1, 2	w
60 [#]	40568.64	0, 1, 2	w
61 [#]	40510.81	0, 1, 2	w
62 [#]	40508.02	0, 1, 2	w
63 [#]	40489.18	0, 1, 2	w
64 [#]	40474.88	0, 1, 2	w
65 [#]	40422.97	0, 1, 2	w
66 [#]	40415.35	0, 1, 2	w
67	40379.57	0	s
68 [#]	40367.06	0, 1, 2	m
69	40297.81	2	s

续表 2

序号	能级/cm ⁻¹	总角动量	相对强度
70	40217.38	2	w
71 [#]	40207.70	0, 1, 2	m
72 [#]	40159.72	0, 1, 2	w
73	40115.16	0	w
74 [#]	40091.20	0, 1, 2	w
75	40084.77	1	w
76	40076.97	2	w

在激发路线 II 下,按照 $E = 18208.97 \text{ cm}^{-1} + \omega_2$ 计算能级,得到 39465—39932 cm^{-1} 能量域内 26 个高激发原子态,详见表 3. 根据电偶极跃迁选择定则 $\Delta J = 0, \pm 1 (0 \rightarrow 0)$, 在激发路线 I 下探测的原子态总角动量应为 $J = 0, 1, 2$, 在激发路线 II 下探测的原子态总角动量应为 $J = 2, 3, 4$. 根据原子跃迁的宇称守恒定律,可确定两条激发路线下探测的原子态宇称都为偶宇称. 另外,表 2 与表 3 还给出了在本实验设定的两条激发路线下获得的各个光谱谱线的相对强度,按照信号强弱划分为 w (强度为 0—0.3), m (强度为 0.3—0.6) 和 s (强度为 0.6—1).

表 3 采用激发路线 II 所探测到的钐原子高激发态的能级位置 E 、谱线的相对强度 I 及其可能的总角动量 J

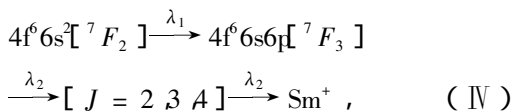
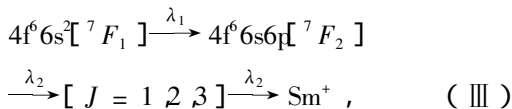
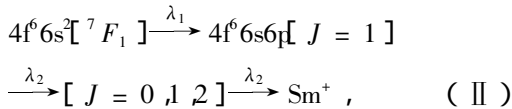
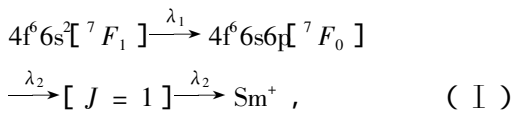
序号	能级/cm ⁻¹	总角动量	相对强度
1	39927.89	2	w
2	39909.98	3, 4	w
3	39905.74	3, 4	w
4	39897.73	2	w
5	39829.25	2	s
6 [#]	39817.10	2, 3, 4	w
7 [#]	39787.25	2, 3, 4	m
8	39753.77	2	w
9 [#]	39731.50	2, 3, 4	w
10	39725.48	3	s
11 [#]	39711.60	2, 3, 4	s
12	39667.75	2	w
13	39664.53	3, 4	s
14	39657.62	2	s
15 [#]	39642.91	2, 3, 4	s
16 [#]	39612.62	2, 3, 4	s
17	39598.42	2	s
18 [#]	39573.74	2, 3, 4	s
19	39568.26	4	s

续表

序号	能级/cm ⁻¹	总角动量	相对强度
20	39560.96	3	<i>m</i>
21	39539.55	3	<i>w</i>
22	39536.36	4	<i>m</i>
23	39522.72	3	<i>m</i>
24	39497.31	3	<i>m</i>
25	39485.53	4	<i>s</i>
26	39473.31	2	<i>s</i>

将表 2 与表 3 中高激发原子态数据与文献 [17] 进行比对,发现表 2 中有 32 个、表 3 中有 19 个原子态在文献 [17] 也被探测到了,经分析并且参考文献 [17] 部分地确定了这些态的总角动量.在表 2 中有 44 个原子态,表 3 中有 7 个原子态为本次实验首次发现,已发表文献中没有这些原子态的报道.本实验新发现的原子态,其序号在表 2 与表 3 中以“#”号标出.再有,我们还发现文献 [17] 列出的某些原子态本实验未能检测到,如能级为 39608.98 cm⁻¹, 40336.32 cm⁻¹ 和 41581.60 cm⁻¹ 的原子态.

本实验探测 Sm 原子高激发态所用的激发路线与文献 [17] 不同,文献 [17] 的激发路线为



正是由于激发路线选取的不同,导致所能探测的原子态并不完全相同,对同一能域原子态的检测,有一

些本实验与文献 [17] 都检测出来了,有一些在文献 [17] 中被发现,而我们未能检测到,还有一些在文献 [17] 中未被发现,而为本次实验首次发现.在所给定的激发路线下,对于那些未能被检测的原子态,我们认为有两个原因:1) Sm 原子由第一步激发后的中间态向待测原子态的跃迁为禁戒跃迁,因此无法探测到这些原子态;2) Sm 原子由第一步激发后的中间态向待测原子态的跃迁虽然符合选择定则,但是待测原子态上的原子数密度太小,这导致光电离谱线的强度太弱并被噪声所淹没.

在本实验中,采用激发路线 I 在 40000—42010 cm⁻¹ 能域内共检测到 44 个新的原子态,采用激发路线 II 在 39465—39932 cm⁻¹ 能域检测到 7 个新的原子态,这说明我们对激发路线的设计是成功的.

5. 结 论

综上所述,本实验采用两步激发共振光电离技术,使 Sm 原子按照本实验设定的两条激发路线被激发电离,根据测量的光电离谱分析 Sm 原子的高激发原子态,对所获得的 Sm 原子光谱进行了详细的分析,剔除了由第二束激光产生的单色多光子共振电离干扰峰,分别检测出在 39465—39932 cm⁻¹ 能域内的 26 个,在 40000—42010 cm⁻¹ 能域内的 76 个偶宇称高激发原子态,给出了它们的能级数据,并且分析了它们的总角动量.另外,本实验还给出两条激发路线下获得的两步激发共振光电离谱谱谱峰的相对强度,同时分析了激发路线不同可能导致在同一能域检测出不同原子态的原因.

通过与发表文献的比对,我们确认了通过激发路线 I 获得的高激发原子态中有 44 个,通过激发路线 II 获得的高激发原子态中有 7 个为本实验首次发现,丰富了 Sm 原子能级结构数据.实验结果证实我们的理论分析是正确的,选用本实验设定的激发路线探测 Sm 原子高激发原子态是成功的.

[1] Verma R D, Chanda A 1988 *J. Opt. Soc. Am.* B **5** 86
 [2] Jayasekharan T, Razvi A N M, Bhale G L 2000 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **33** 3123
 [3] Garton W R S, Codling K 1960 *Proc. Phys. Soc. London* **75** 87
 [4] Blaise J, Morillon C, Schweighofer M G, Verges J 1969 *Spectrochim. Acta* B **24** 405

[5] Liu H P, Quan W, Li S 2007 *Phys. Rev. A* **76** 013412
 [6] Liu Y P, Dai C J, Li S B 2005 *J. Electron Spectrosc. and Related Phen.* **142** 91
 [7] Zhang Y, Dai C J, Li S B 2005 *J. Electron Spectrosc. and Related Phen.* **148** 11
 [8] Li S B, Dai C J 2007 *Chin. Phys.* **16** 2

- [9] Bushaw B A , Nortershauser W , Blaum K , Wendt K 2003 *Spectrochimica Acta* B **58** 1083
- [10] Blaum K , Geppert C , Schreiber W G , Hengstler J G , Muller P , Nortershauser W , Wendt K , Bushaw B A 2002 *Anal. Bioanal. Chem.* **372** 759
- [11] Dai Z W , Jiang Z K , Xu H L 2003 *J. Phys. B : At. Mol. Opt. Phys.* **36** 479
- [12] Biemont E , Quinet P , Dai Zhen-wen 2002 *J. Phys. B : At. Mol. Opt. Phys.* **35** 4743
- [13] Biemont E , Gamir H P , Lokhnygin V 2001 *J. Phys. B : At. Mol. Opt. Phys.* **34** 1869
- [14] Martin W C , Zalubas R , Hagan L , 1978 *Atomic energy levels-the rare-earth elements* (Washington : U. S. Government Printing Office) p162
- [15] Jia L J , Jing C Y , Zhou Z Y , Lin F C 1993 *J. Opt. Soc. Am. B* **10** 1317
- [16] Jayasekharan T , Razvi M A N , Bhale G L 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 641
- [17] Jayasekharan T , Razvi M A N , Bhale G L 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 1607
- [18] Gomonai A I , Plekan O I 2003 *J. Phys. B : At. Mol. Opt. Phys.* **36** 4155

Two-step resonant photoionization spectra of Sm atom^{*}

Zhao Hong-Ying Dai Chang-Jian[†] Guan Feng

(Key Laboratory of Display Materials and Photoelectric Devices , Ministry of Education , Tianjin 300191 , China)

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

(Received 6 May 2008 ; revised manuscript received 6 June 2008)

Abstract

Resonant ionization spectra of Sm atom are studied with a two-step photoexcitation and photoionization method. Two different excitation paths are carried out as the following : In the path 1 , the first laser whose wavelength is fixed at 478.44 nm excites the Sm atom from the $4f^6 6s^2 [^7 F_1]$ state to the $4f^6 6s 6p [^7 D_1]$ state , and then the second laser whose wavelength λ_2 is scanned from 480 nm to 530 nm excites it further to the high-lying state with even parity. In the path 2 , the first laser whose wavelength is fixed at 574.81 nm excites the Sm atom from the $4f^6 6s^2 [^7 F_2]$ state to the $4f^6 6s 6p [^5 G_3]$ state , and then the second laser whose wavelength λ_2 is scanned from 460 nm to 470.5 nm excites it further to the high-lying state with even parity. These Sm atoms in the high-lying state are probed by photoionization via the third laser. All together 26 and 76 states of Sm atom in the 39465—39932 cm^{-1} and the 40000—42010 cm^{-1} energy region , respectively , have been detected below the first ionization limit. The energy levels and relative strengths of these states have been determined. Among them , 51 states are newly discovered , while the rest agree well with the values published in literature. In addition , efforts are also made to determine their spectral designation.

Keywords : Sm atom , spectrum , stepwise excitation , resonant ionization

PACC : 3280 , 3270F , 3690

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10574098 , 10674102) and the Natural Science Foundation of Tianjin , China (Grant No. 05YFJMJC05200).

[†] Corresponding author. E-mail : daicj@126.com