

# 用光电离技术探测钷原子的奇宇称束缚激发态的光谱\*

杨騄 戴长建<sup>†</sup> 赵艳红

(显示材料与光电器件教育部重点实验室, 天津 300384)

(天津理工大学理学院, 天津 300384)

(2012年5月18日收到; 2012年10月26日收到修改稿)

采用光电离探测方法, 对钷原子奇宇称束缚激发态进行了系统研究. 通过设计三条不同的激发路径, 采用共振激发方式, 先将钷原子分三步从基态激发到不同的束缚激发态, 然后采用光电离手段对其进行探测. 通过对第三步激发光的波长进行大范围的扫描, 在同一能域内获得了三组不同的光谱. 通过对比三条路径所得到的三组光谱, 不仅精确确定了大量奇宇称束缚激发态的能级位置, 而且还获得了相应跃迁的相对强度的信息. 最后, 通过运用三条不同的激发路径的选择定则, 还确定了上述能级的总角动量.

**关键词:** 钷原子, 束缚激发态, 奇宇称, 光电离探测

**PACS:** 32.30.-r, 32.80.Fb

**DOI:** 10.7498/aps.62.053201

## 1 引言

共振电离光谱 (RIS) 技术是研究原子的能级结构的重要手段之一<sup>[1,2]</sup>. 采用激光分步激发和 RIS 技术, 可以使处于基态或亚稳态的原子按预先设计的激发路径在任意给定的高激发态上布局. 同时, 利用高增益、快响应的微通道板 (MCP) 探测器也能显著增强光电离信号的信噪比和时间分辨率. 所以, 人们利用上述技术已经在研究碱土<sup>[3,4]</sup> 和稀土原子<sup>[5,6]</sup> 光谱领域取得了丰硕的成果.

目前, 国际上对于钆 (Gd)<sup>[7,8]</sup> 和镱 (Yb)<sup>[9,10]</sup> 等重稀土原子高激发态的实验研究较多, 而对于钷 (Sm) 原子等轻稀土原子的研究相对较少, 其主要原因是钷原子的实验研究具有如下的困难: 1) 它具有半满填充的 4f 壳层, 是一个非常复杂的多体问题, 导致其原子光谱非常复杂; 2) 在制备原子束的所需温度下, 它不仅处于基态, 在多个亚稳态上也形成了显著的热布居. 这些特征不仅显著降低了给定

激发路径的信号强度, 也使得多个激发过程因吸收同一光子而发生干扰, 致使其光谱识别想当困难.

近几年, 关于钷原子光谱方面的研究虽然已经取得了较大的进展<sup>[11-17]</sup>, 但人们对于钷原子的认识依然很粗浅. 比如, 在多个能域只有部分态的能级位置得到确定; 许多态的相应谱线的强度信息尚未获得; 接近钷原子第一电离限的较高能域内的光谱信息几乎空白. 针对上述问题, 本实验设计并采用了多个新的激发路径, 利用三色多步激发方式, 将钷原子先布居到  $44443.5-45111.8 \text{ cm}^{-1}$  能域内, 再利用 RIS 技术对该能域内的奇宇称束缚激发态的光谱进行系统的研究, 期望能显著丰富该能域内的钷原子的光谱信息.

## 2 实验原理与装置

### 2.1 实验原理

由于钷原子的两个 6s 价电子和 6 个 4f 电子都很活泼, 导致其最低的七个态分别为  $4f^6 6s^2$

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10674102, 11174218) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: daicj@126.com

[ ${}^7F_J$ ], 其中  $J = 0-6$  为精细结构分裂, 其能量分别为  $0 \text{ cm}^{-1}$  ( ${}^7F_0$ ),  $292.58 \text{ cm}^{-1}$  ( ${}^7F_1$ ),  $811.92 \text{ cm}^{-1}$  ( ${}^7F_2$ ),  $1489.55 \text{ cm}^{-1}$  ( ${}^7F_3$ ),  $2273.09 \text{ cm}^{-1}$  ( ${}^7F_4$ ),  $3125.46 \text{ cm}^{-1}$  ( ${}^7F_5$ ) 和  $4020.66 \text{ cm}^{-1}$  ( ${}^7F_6$ ). 在制备原子样品时, 当加热温度分别为 700, 750 和 800 K 时, 钐原子在上述各态的热布居百分比如表 1 所示.

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

由表 1 可知, 在不同温度下钐原子主要集中在  ${}^7F_0$ ,  ${}^7F_1$  和  ${}^7F_2$  这三个原子态上. 从原理上讲, 在设

$$\text{I. } 4f^6 6s^2 7F_0 \xrightarrow{\lambda_1=714.31 \text{ nm}} 4f^6 6s 6p 9G_1 \xrightarrow{\lambda_2=679.87 \text{ nm}} 4f^6 6s 7s 9F_1 \xrightarrow{\lambda_3} E_J \quad (J = 0, 1, 2); \quad (1)$$

$$\text{II. } 4f^6 6s^2 7F_1 \xrightarrow{\lambda_1=709.83 \text{ nm}} 4f^6 6s 6p 9G_2 \xrightarrow{\lambda_2=682.28 \text{ nm}} 4f^6 6s 7s 9F_2 \xrightarrow{\lambda_3} E_J \quad (J = 1, 2, 3); \quad (2)$$

$$\text{III. } 4f^6 6s^2 7F_0 \xrightarrow{\lambda_1=709.02 \text{ nm}} 4f^6 6s 6p 9G_3 \xrightarrow{\lambda_2=683.25 \text{ nm}} 4f^6 6s 7s 9F_3 \xrightarrow{\lambda_3} E_J \quad (J = 2, 3, 4). \quad (3)$$

采用上述精心设计的三条不同激发路径, 并控制三台激光器的波长便可使钐原子被激发到同一能域. 通过对比三条路径中所探测到的信号, 根据总角动量  $J$  的选择定则, 便可确定不同终态的总角动量  $J$  值.

在实验中, 通过一台 Nd : YAG 固体激光器的二倍频光 (波长为 532 nm) 和三倍频光 (波长为 355 nm) 分别抽运三台染料激光器, 以便实现对钐原子束缚激发态的分步激发和探测. 三束激光沿同一直线水平入射到真空室中, 并与垂直方向的原子束正交, 以便减小 Doppler 展宽效应. 另外, 还需对三束

激光的脉冲进行控制, 使其分别延迟 8—10 ns 按顺序进入真空室, 确保激发和探测过程是按照预先设定的顺序进行.

关于激发路径的选择, 必须考虑两种因素: 1) 能有效地激发原子到给定宇称的原子态; 2) 控制三台激光器的波长, 使通过三条不同激发路径而获得的光谱处于相同的能域. 为此, 本实验选用了热布居数最多的原子态  ${}^7F_0$  和  ${}^7F_1$  作为第 I, II 和 III 路径的跃迁初态. 再根据跃迁选择定则, 分别选定  $4f^6 6s 6p {}^9G_1$  和  $4f^6 6s 7s {}^9F_1$  态、 $4f^6 6s 6p {}^9G_2$  和  $4f^6 6s 7s {}^9F_2$  态以及  $4f^6 6s 6p {}^9G_3$  和  $4f^6 6s 7s {}^9F_3$  态作为三条不同激发路径的两个中间态, 所设计的三种激发路径如下式所示:

激光的脉冲进行控制, 使其分别延迟 8—10 ns 按顺序进入真空室, 确保激发和探测过程是按照预先设定的顺序进行.

图 1 以 (1) 式所示的路径 I 为例, 展示了其激发和探测的原理. 先将  $\lambda_1$  固定在 714.31 nm, 使钐原子从基态  $4f^6 6s^2 {}^7F_0$  共振跃迁到第一中间态  $4f^6 6s 6p {}^9G_1$ , 再将  $\lambda_2$  固定在 679.87 nm, 使钐原子进一步共振跃迁到第二中间态  $4f^6 6s 7s {}^9F_1$ , 然后, 扫描光  $\lambda_3$  使其在奇宇称高激发态 ( $J = 0, 1, 2$ ) 上布居. 随后, 处于这些态上的原子再吸收一个  $\lambda_3$  光子到达连续态, 通过光电离而被探测到.

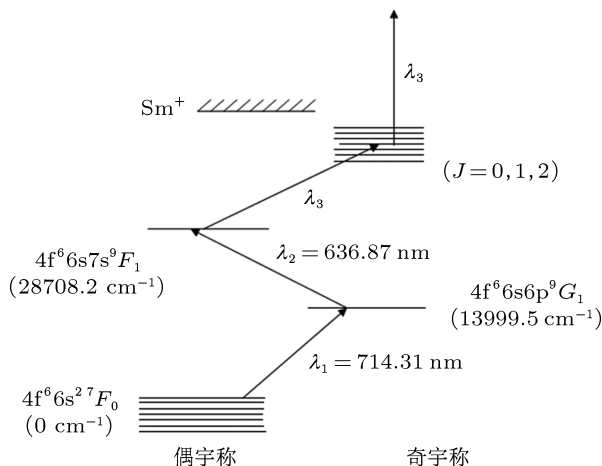


图 1 采用四步三色激发和探测钐原子的原理图

同理, 路径 II 和路径 III 的激发和探测原理基本相同, 只是所选的跃迁初态或中间态与路径 I 不同, 具体情况如 (2) 和 (3) 式所示.

总之, 上述的三种路径都是先将第一台染料激光器的波长固定, 使钐原子从选定的初态跃迁到由  $4f^6 6s 6p$  电子组态所构成的三个不同的原子状态, 再将第二束激光的波长分别固定, 使钐原子进一步跃迁至由  $4f^6 6s 7s$  电子组态所构成的三个不同的原子状态上; 最后, 控制第三台激光器的波长使其在给定的波段内扫描, 使原子在待测的奇宇称态上布居. 处于这些待测态上的原子再吸收一个  $\lambda_3$  光子便可进一步被激发至连续态, 通过光电离实现了对

其探测的目的.

在三个激光脉冲结束之后, 约 500 ns 时施加一个脉冲电场, 便可将光电离的离子推向 MCP 探测器, 实现对其进行收集和放大. 最终将其输出信号分别传给数字示波器和平均积分器, 信号经过模数转换后传输给计算机进行储存和分析.

## 2.2 实验装置

本实验采用的装置由激光系统、原子束制备系统、信号采集与分析系统这三部分组成, 如图 2 所示.

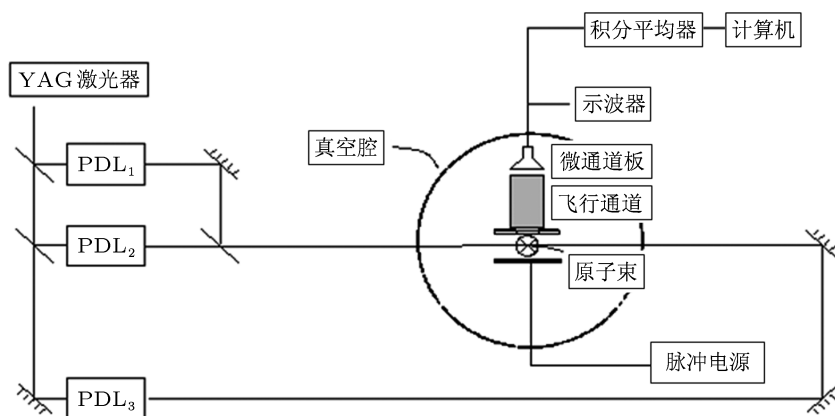


图2 实验装置示意图, 其中的 PDL 为脉冲染料激光器

其中, 激光系统包括一台作为抽运源的 Nd : YAG 固体激光器和三台波长可调谐的染料激光器. 固体激光器的输出脉冲宽度为 6—8 ns, 频率是 20 Hz, 线宽为  $0.2 \text{ cm}^{-1}$ , 产生的基频光的波长为 1064 nm, 经倍频与和频后产生波长分别为 532 nm 和 355 nm 的激光, 用于分别抽运三台染料激光器.

原子束制备系统处于高真空环境中, 通过机械泵和分子泵使其真空度优于  $10^{-4} \text{ Pa}$ . 通过直流加热方式加热坩埚, 使其内部的高纯度钐金属产生原子蒸气, 达到所需的原子数密度. 通过热电偶与温控仪监控原子炉的温度, 炉温通常控制在 800 K 以下. 通过一个准直装置将原子蒸气变为原子束, 以便与三束激光正交, 从而减小光谱的 Doppler 加宽效应.

信号采集与分析系统采用高增益快速响应的微通道板 (MCP) 作为探测器, 将信号放大约  $10^8$  倍, 放大后的信号输入到平均积分器中, 以便对信号进

行取样平均和积分, 在脉冲信号进入平均积分器的同时, 通过一台示波器进行同步检测, 最后把输出的直流信号输入到计算机中. 计算机软件通过控制染料激光器的扫描速度, 同时记录收到的信号和与其对应的波长信息. 为避免 Stark 效应对光谱结果的影响, 通过脉冲延迟发生器控制收集脉冲电场比光脉冲延迟 500 ns.

## 3 结果与讨论

本实验中, 激发路径 I 在  $43789.5\text{—}45111.8 \text{ cm}^{-1}$  能域内共探测到钐原子的奇宇称高激发态 88 个, 其  $J = 0, 1, 2$ . 激发路径 II 在  $44111.8\text{—}45511.8 \text{ cm}^{-1}$  能域内探测到 151 个钐原子的奇宇称高激发态, 其  $J = 1, 2, 3$ . 激发路径 III, 在  $44443.5\text{—}45511.8 \text{ cm}^{-1}$  能域内探测到 89 个的钐原子的奇宇称高激发态, 其  $J = 2, 3, 4$ .

图 3 展示了路径 II 在 44400—44650  $\text{cm}^{-1}$  能域内扫描到的奇宇称束缚激发态光谱, 其中有一些标有“\*”的电离峰, 其属于  $\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_3$ ,  $\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_3$  或  $\lambda_3 + \lambda_3 + \lambda_3$  过程所产生的信号. 这些信号不是按照设定的激发路径产生的, 主要因为钐原子的结构比较复杂造成的, 这些信号会对给定的光电离过程造成干扰. 因此, 我们采取以下办法将其确定并排除: 1) 挡住第一束激光, 获得原子通过  $\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_3$  激发过程所产生的光谱, 将其与之前获得的光谱进行比较, 便可甄别并剔除这些意外的跃迁信号. 2) 挡住第二束激光, 得到  $\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_3$  过程所产生的干扰信号, 并按同样方法进行比较甄别. 3) 将第一束激光和第二束激光都挡住, 单独扫描  $\lambda_3$ , 这样便可找到由  $\lambda_3 + \lambda_3 + \lambda_3$  过程所产生的干扰信号.

通过对信号强度进行归一化处理, 将得到的信号按其强度分为 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. 上述实验过程与数据分析的结果分别由表 2, 表 3 和表 4 列出.

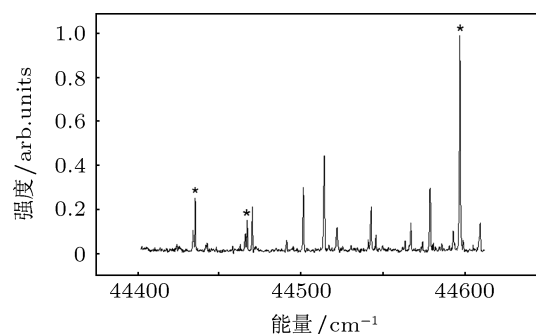


图 3 由激发路径 II 所探测到的部分光谱图

表 2 列出了采用激发路径 I 所探测到的 30 个钐原子的奇宇称高激发态的光谱数据.

表 2 由激发路径 I 所探测到的钐原子的奇宇称束缚态的光谱数据

序号	能级位置/ $\text{cm}^{-1}$	相对强度	序号	能级位置/ $\text{cm}^{-1}$	相对强度
1	44851.6	W	16	44631.2	W
2	44831.2	W	17	44626.6	W
3	44813.2	W	18	44605.2	W
4 <sup>#</sup>	44782.8	W	19	44580.5	W
5	44772.9	W	20	44559.7	W
6	44770.4	W	21	44550.4	W
7	44767.4	M	22	44513.8	M
8	44749.2	S	23	44501.4	W
9 <sup>#</sup>	44735.6	W	24 <sup>#</sup>	44491.2	M
10	44692.9	S	25	44476.4	W
11	44689.4	W	26	44475.3	S
12 <sup>#</sup>	44687.1	W	27	44472.8	W
13	44665.1	W	28	44470.4	W
14	44643.7	W	29 <sup>#</sup>	44469.1	M
15	44641.7	W	30 <sup>#</sup>	44452.0	S

# 该能级值已发表过<sup>[18]</sup>.

由偶极跃迁的选择定则可知, 这些态的总角动量的可能取值为  $J = 0, 1$  或  $2$ . 其中, 只有少数态的能级位置曾发表过. 对于这些态, 本文不但验证了其测量结果, 而且又增加了其对应跃迁的相对谱线强度的信息.

当采用激发路径 II 时, 共探测到了 117 个 Sm 原子的奇宇称高激发态, 其总角动量的可能取值为  $J = 1, 2$  或  $3$ , 其结果如表 3 所示.

利用类似的方法, 表 3 给出了采用不同激发路径所得到的的光谱数据, 在与表 2 相同的能域内, 根据选择定则, 激发路径的变化使最终得到不同的电子组态. 通过归一化处理确定了每个能级的相对强度, 使每个能级数据都有其相对应的强度信息.

通过相同方法, 在激发路径 III 探测到 89 个钐原子的奇宇称高激发态的光谱数据, 其总角动量

$J = 2, 3, 4$ . 如表 4 所示.

表 3 由激发路径 II 所探测到的钐原子的奇宇称束缚态的光谱数据

序号	能级位置/cm <sup>-1</sup>	相对强度	序号	能级位置/cm <sup>-1</sup>	相对强度
1	45511.8	W	60	44982.9	M
2	45511.2	W	61	44977.8	W
3	45496.0	W	62	44975.3	W
4	45464.7	W	63 <sup>#</sup>	44973.9	W
5	45404.2	W	64	44944.1	W
6	45391.8	W	65	44924.6	W
7	45383.5	W	66	44923.5	M
8	45372.5	W	67 <sup>#</sup>	44916.7	W
9	45362.9	W	68	44911.6	S
10	45337.8	W	69	44903.1	S
11	45331.6	W	70	44899.7	W
12	45317.1	M	71 <sup>#</sup>	44878.1	W
13	45312.2	M	72	44876.7	W
14	45302.9	W	73	44872.9	M
15	45291.1	W	74	44855.8	M
16	45279.8	W	75 <sup>#</sup>	44852.2	W
17	45274.6	W	76	44851.0	M
18	45265.0	W	77	44816.3	W
19	45260.2	W	78	44809.0	M
20	45227.1	W	79	44797.5	M
21	45210.9	W	80	44791.4	W
22	45206.2	W	81 <sup>#</sup>	44782.9	W
23	45198.4	W	82	44776.2	W
24	45190.4	W	83	44771.7	M
25	45189.8	W	84	44767.6	M
26	45184.6	M	85	44761.1	W
27	45180.6	M	86	44758.8	M
28	45176.5	W	87	44744.6	W
29	45167.5	M	88	44739.5	W
30 <sup>#</sup>	45160.0	S	89	44729.9	W
31	45151.7	W	90	44728.4	W
32	45132.4	S	91	44726.6	W
33 <sup>#</sup>	45128.7	W	92	44722.8	W
34	45125.4	W	93	44719.3	W
35	45118.4	M	94	44704.0	M
36 <sup>#</sup>	45114.5	W	95	44680.6	W
37	45108.7	W	96	44671.7	W
38	45106.8	W	97	44665.4	W
39	45101.7	S	98	44647.3	M
40	45100.1	M	99 <sup>#</sup>	44642.9	W
41	45091.6	W	100	44630.3	M
42	45078.6	M	101	44626.6	W
43 <sup>#</sup>	45077.4	W	102	44621.2	W
44	45072.7	M	103 <sup>#</sup>	44609.3	W
45 <sup>#</sup>	45069.9	W	104	44592.9	W
46 <sup>#</sup>	45069.9	M	105	44578.3	M

表 3 (续表)

序号	能级位置/cm <sup>-1</sup>	相对强度	序号	能级位置/cm <sup>-1</sup>	相对强度
47	45060.2	W	106	44573.7	W
48	45057.3	M	107	44566.5	W
49	45055.0	W	108	44563.2	W
50	45049.2	W	109	44545.7	W
51	45041.5	M	110	44542.6	W
52	45032.6	M	111	44541.2	W
53	45021.8	W	112	44522.5	W
54	45020.0	W	113	44513.9	M
55	45016.7	M	114	44501.4	M
56	45009.7	M	115 <sup>#</sup>	44491.3	W
57	45002.7	M	116	44470.5	W
58	44992.1	M	117	44466.3	W
59 <sup>#</sup>	44987.9	W			

#该能级值已发表过<sup>[18]</sup>.

如前所述, 本次实验由于采用了与前人不同的激发路径, 故可以在各个能域内探测之前未被发现的原子态. 因此, 本工作不仅获得了各激发态的光谱信息 (能级位置和跃迁谱线的相对强度等), 还确定了其总角动量  $J$  的值. 当采用不同的激发路径时, 其跃迁终态的  $J$  会有不同的取值. 所以, 通过比较三种不同激发路径所获得的光谱结果, 便可唯一确定各态的  $J$  值, 具体方法和结果见表 5 和图 4. 其中, 表 5 直观地说明了通过对比三条不同激发路径所获得的光谱, 如何确定各态的  $J$  值.

如表 5 所示, 若某一个跃迁只存在于第一条路径所获得的光谱中, 则可以排除  $J = 1, 2, 3$  和 4 的可能, 从而确定此激发态的总角动量为 0; 若某一个跃迁同时存在于第一和第二条激发路径所获得的光谱中, 则可确定其  $J = 1$  或 2. 通过进一步观察其是否存在于第三条路径所获得的光谱中, 便可唯一确定其  $J$  值: 若第三条路径所获得的光谱中有跃迁, 则可排除  $J = 1$  的可能, 唯一确定其  $J = 2$ . 否则, 便可排除  $J = 2$  的可能, 确定其  $J = 1$ . 同理, 也可唯一确定  $J = 3$  和 4 的激发态.

图 4 展示了通过三条不同激发路径所获得的光谱结果. 通过对比并结合表 5 的原理, 便可唯一确定各态的总角动量  $J$  的取值.

图 4 对部分原子态给出了其  $J$  的赋值. 例如, 用第 I 条激发路径所探测到的最左侧的激发态, 并未出现在用第 II 和第 III 条路径所探测到光谱中, 故可以唯一确定此态的  $J = 0$ . 同理, 其它各态的  $J$  值也可以依照表 5 的结果唯一地确定.

表 4 由激发路径III所探测到的钐原子的奇宇称束缚态的光谱数据

序号	能级位置/cm <sup>-1</sup>	相对强度	序号	能级位置/cm <sup>-1</sup>	相对强度
1 <sup>#</sup>	45490.6	S	46	44844.7	W
2	45489.6	M	47	44818.5	W
3 <sup>#</sup>	45485.2	M	48	44808.8	M
4	45477.3	W	49	44803.3	W
5 <sup>#</sup>	45469.7	W	50	44791.4	M
6 <sup>#</sup>	45429.2	M	51	44780.8	S
7 <sup>#</sup>	45408.6	W	52	44775.0	M
8	45403.4	M	53	44769.8	W
9	45401.1	W	54	44760.8	W
10 <sup>#</sup>	45394.1	W	55	44758.8	M
11	45389.1	W	56	44750.4	W
12	45378.9	W	57	44748.6	W
13	45331.0	M	58	44746.4	W
14	45320.0	W	59	44744.6	M
15	45307.7	W	60	44739.6	M
16	45298.2	W	61	44738.8	M
17	45245.4	W	62	44730.1	W
18 <sup>#</sup>	45111.3	W	63	44728.3	M
19	45108.2	W	64	44724.0	W
20	45068.0	W	65	44722.4	W
21	45066.8	W	66	44720.2	M
22 <sup>#</sup>	45065.7	W	67	44719.4	M
23	45057.2	W	68	44717.1	W
24	45055.6	W	69 <sup>#</sup>	44715.0	W
25	45051.8	W	70	44713.6	M
26	45049.0	W	71	44707.0	M
27	45035.8	M	72	44703.3	S
28	45032.6	W	73	44697.0	M
29	45009.0	W	74	44680.5	W
30	44998.0	W	75	44678.9	M
31	44986.6	W	76	44675.0	W
32	44961.2	W	77	44671.5	M
33	44957.2	W	78	44652.3	W
34	44923.6	W	79	44648.9	W
35	44918.1	M	80	44648.1	W
36	44911.5	M	81	44625.0	M
37	44902.2	W	82	44578.5	M
38	44899.6	W	83	44549.3	M
39 <sup>#</sup>	44896.6	W	84	44513.7	M
40	44895.0	W	85	44501.3	M
41	44881.1	W	86	44496.2	M
42 <sup>#</sup>	44878.0	M	87	44482.4	S
43	44863.1	M	88	44462.8	M
44	44860.4	W	89	44443.5	M
45	44855.9	M			

#该能级值已发表过<sup>[18]</sup>.

表 5 五种情况下唯一确定原子态的总角动量  $J$  的方法

情况	路径 I ( $J = 0, 1, 2$ )	路径 II ( $J = 1, 2, 3$ )	路径 III ( $J = 2, 3, 4$ )	确定的 $J$ 值
1	有	无	无	0
2	有	有	无	1
3	有	有	有	2
4	无	有	有	3
5	无	无	有	4

表 6 唯一确定了总角动量的能级

序号	能级位置/cm <sup>-1</sup>	总角动量 $J$	序号	能级位置/cm <sup>-1</sup>	总角动量 $J$
1 <sup>#</sup>	44452	0	56	44462.8	4
2 <sup>#</sup>	44469.1	0	57	44482.4	4
3	44472.8	0	58	44496.2	4
4	44475.3	0	59	44549.3	4
5	44476.4	0	60	44625	4
6	44550.4	0	61	44648.1	4
7	44559.7	0	62	44648.9	4
8	44580.5	0	63	44652.3	4
9	44605.2	0	64	44675	4
10	44631.2	0	65	44678.9	4
11	44641.7	0	66	44697	4
12	44643.7	0	67	44703.3	4
13 <sup>#</sup>	44687.1	0	68	44707	4
14	44689.4	0	69	44713.6	4
15	44692.9	0	70	44717.1	4
16 <sup>#</sup>	44735.6	0	71	44720.2	4
17	44749.2	0	72	44724	4
18	44772.9	0	73	44738.8	4
19	44813.2	0	74	44746.4	4
20	44831.2	0	75	44748.6	4
21	44470.4	1	76	44750.4	4
22 <sup>#</sup>	44491.2	1	77	44775	4
23	44626.6	1	78	44780.8	4
24	44665.4	1	79	44803.3	4
25	44767.6	1	80	44818.5	4
26 <sup>#</sup>	44782.8	1	81	44844.7	4
27	44851.6	1	82	44860.4	4
28	44501.4	2	83	44863.1	4
29	44513.8	2	84	44895	4
30	44770.4	2	85	44902.2	4
31	44578.5	3	86	44918.1	4
32	44671.5	3	87	44957.2	4
33	44680.5	3	88	44961.2	4
34	44719.4	3	89	44986.6	4
35	44722.4	3	90	44998	4
36	44728.3	3	91	45009	4
37	44730.1	3	92	45035.8	4
38	44739.6	3	93	45066.8	4
39	44744.6	3	94	45068	4
40	44758.8	3	95	45111.3	4
41	44760.8	3	96	45245.4	4
42	44791.4	3	97	45298.2	4
43	44808.8	3	98	45307.7	4
44	44855.9	3	99	45320	4
45	44899.6	3	100	45378.9	4
46	44911.5	3	101 <sup>#</sup>	45394.1	4
47	44923.6	3	102	45401.1	4
48	45032.6	3	103	45403.4	4

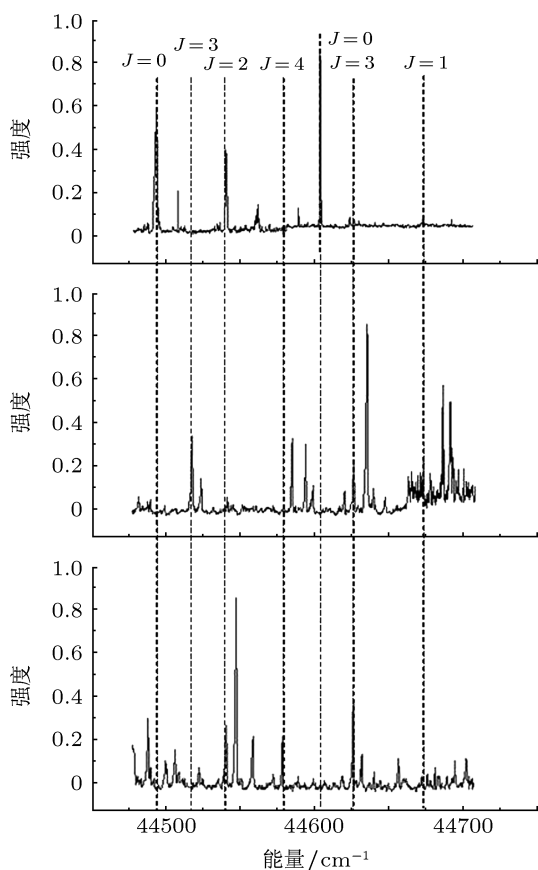


图 4 上、中、下三幅图分别对应于路径 I, II 和 III 的光谱结果和部分态的  $J$  值

通过采用上述分析方法和对比, 本文共唯一确定了 110 个奇宇称束缚态的总角动量  $J$  值, 如表 6 所示.

表 6 中所列出的光谱数据基本上都是首次报道的, 而且通过前面所述的方法也唯一确定了其总角动量  $J$  的数值. 对于那些能级位置已有报道的能级, 本文不但在前面的各个表格中, 补充了其对应跃迁的相对谱线强度, 也在表 6 中展示了唯一确定其总角动量的结果.

表 6 (续表)

序号	能级位置/cm <sup>-1</sup>	总角动量 $J$	序号	能级位置/cm <sup>-1</sup>	总角动量 $J$
49	45049	3	104 <sup>#</sup>	45408.6	4
50	45055.6	3	105 <sup>#</sup>	45429.2	4
51	45057.2	3	106 <sup>#</sup>	45469.7	4
52	45108.2	3	107	45477.3	4
53	45331	3	108 <sup>#</sup>	45485.2	4
54	45389.1	3	109	45489.6	4
55	44443.5	4	110 <sup>#</sup>	45490.6	4

#该能级值已发表过<sup>[18]</sup>.

## 4 结论

本实验通过三色多步激发和光电离探测技术,对钐原子在 45511.8—44443.5 cm<sup>-1</sup> 范围内的奇宇

称束缚激发态进行了系统研究,获得 194 个高激发态的能级位置,确定了其对应跃迁的相对谱线强度.对于其中的 110 个激发态,本文唯一确定了其总角动量.总之,本文不但对前人采用其他方法所测得的部分态的能级位置进行了验证,补充了对应跃迁的相对谱线强度和总角动量方面的信息,还首次给出了大量从未报道过的高激发态的光谱数据,包括其能级位置、谱线相对强度和总角动量等信息.

必须指出,要完全确定本文新探测到的激发态的光谱归属,还需要确定除了总角动量之外的另外三个量子数.这些信息即需要更加系统的实验工作,也有待于关于钐原子等多电子系统的相关理论的指导.显然,国际上对于那些光谱结构非常复杂的原子系统,无论在实验和理论方面都需要进一步的努力和探索.

- [1] Kondo T, Angom D, Endo I, Fukumi A, Horiguchi T, Iinuma M, Takahashi T 2003 *The European Physical Journal D* **25**(2) 103
- [2] Xiao Y, Dai C J, Zhao H Y, Qin W J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3071 (in Chinese) [肖颖,戴长建,赵洪英,秦文杰 2009 物理学报 **58** 3071]
- [3] Yuan W G, Dai C J, Xin S, Zhao H Y, Guan F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4076 (in Chinese) [袁卫国,戴长建,靳嵩,赵洪英,关锋 2008 物理学报 **57** 4076]
- [4] Liu H P, Quan W, Shen L, Connerade J P, Zhan M 2007 *Phys. Rev. A* **76** 013412
- [5] Xiao Y, Dai C J, Qin W J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 063202
- [6] Gomonai A I, Kudelich O I 2002 *Optics and Spectroscopy* **93**(2)
- [7] Bushaw B A, Nortershauser W, Blaum K 2003 *Spectrochimica Acta B* **58** 1083
- [8] Kim J T, Yi J, Rhee Y 1999 *Journal of the Korean Physical Society* **35** 194
- [9] Olmschenk S, Hayes D, Matsukevich D N, Maunz P, Moehring D L, Younge K C, Monroe C 2009 *Phys. Rev. A* **80** 022502
- [10] Ali R, Nadeem A, Yaseen M, Aslam M, Bhatti S A, Baig M A 1999 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **32** 4361
- [11] Qin W J, Dai C J, Xiao Y 2010 *J. Quant Spectrosc Radiat Transfer*, **111** 63
- [12] Qin W J, Dai C J, Xiao Y 2010 *J. Quant Spectrosc Radiat Transfer*, **111** 997
- [13] Jayasekharan T, Razvi M A N, Bhale G L 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* (17) 1607
- [14] Pulhani A K, Shah M L, Dev V 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* (22) 1117
- [15] Li M, Dai C J, Xie J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 228 (in Chinese) [李鸣,戴长建,谢军 2010 物理学报 **59** 228]
- [16] Zhao Y H, Dai C J, Ye S W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 033201 (in Chinese) [赵艳红,戴长建,野仕伟 2012 物理学报 **61** 033201]
- [17] Li M, Dai C J, Xie J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** (in Chinese) [李鸣,戴长建,谢军 2012 物理学报 **61**]
- [18] <http://physics.nist.gov/cgi-bin/ASD/energy1.pl> 2012-3-19



# Photoionization of odd-parity bound excited states of Sm atom\*

Yang Lu Dai Chang-Jian<sup>†</sup> Zhao Yan-Hong

(Key Laboratory of Display Materials and Photoelectric Devices, Ministry of Education, Tianjin 300384, China)

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

(Received 18 May 2012; revised manuscript received 26 October 2012)

## Abstract

The photoionization detection method is employed to systematically study the odd-parity bound-excited states of Sm atom. Three different excitation paths are designed to carry out three-step excitation and photoionization processes for the Sm atom in the same energy region. By scanning the wavelength of third-step dye laser not only the level energies of a large number of odd-parity bound-excited states are determined, but also the information about relative intensity of the corresponding transition is obtained. Comparison of the three groups of spectra corresponding to the three paths enables us to assign the  $J$ -value, the total angular momentum of the excited states of Sm atom uniquely. In addition, a small number of level energies measured with different methods previously are also confirmed in this work.

**Keywords:** samarium atom, odd parity, bound excited state, photoionization detection

**PACS:** 32.30.-r, 32.80.Fb

**DOI:** 10.7498/aps.62.053201

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10674102, 11174218).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: daicj@126.com