

SrI 4dnp 和 4dnf 奇宇称 $J=1$ 系列 自电离态光谱*

张 森 梅式民 邱济真 徐云飞

浙江大学物理系, 杭州, 310027

1989年9月26日收到

用激光三步激发方法, 以 $4d^2\ ^3P_0$ 价态为中间态, 观察了 Sr 原子 4dnp 和 4dnf 奇宇称 $J=1$ 系列自电离态光谱. 在 $59570-60300\text{cm}^{-1}$ 范围内, 测定了 60 个自电离能级, 其中大多数可归属于分别收敛于 $4d^2D_{3/2}$ 和 $4d^2D_{5/2}$ 电离限的 6 个自电离系列. 讨论了光谱线的线型和组态相互作用.

PACC: 3280D; 3270

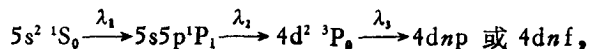
一、引 言

对 Sr 原子自电离态光谱的实验观察, 早期主要使用真空紫外单光子吸收法^[1-3]以及观察激波管和弧光光谱^[4]法. 这些方法的测量精度主要取决于光谱仪器, 并且自电离谱线的 Fano 非对称线型^[5]对能级位置的测定产生影响.

近年来, Cooke, Gallagher 等人开创的用“孤立实”分步激发观察原子双电子激发自电离态光谱法被广泛使用. 这一方法较之单光子吸收具有明显的优点^[6]. 利用激光分步激发方法, 对 Sr 原子 $(5p_{1/2}ns)_{J=1}$, $(5p_{1/2}nd)_{J=1,3}$, $(5p_{3/2}ns)_{J=1}$, $(5p_{3/2}nd)_{J=3}$ 等自电离态系列已经作了观察和分析^[7-9]. 但是, 按照通常使用的“孤立实”三步激发模式, 激发终态均为 $mpn1$ 自电离态. 为了用多步激发方法得到 $mdn1$ 自电离态光谱, 我们对 Sr 原子以光学可激发的 $4d^2\ ^3P_0$ 价态为中间态, 用第三束激光扫描得到了 4dnp 和 4dnf 奇宇称 $J=1$ 系列自电离态光谱, 测定了 60 个能级位置, 鉴别了这些能级在 6 个自电离系列中的归属, 并分析了光谱线线型和组态相互作用.

二、实验与结果

实验装置和方法与文献[10]相同. Sr 原子由三束可调谐激光经下列过程激发到自电离态:



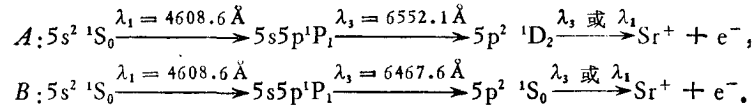
* 国家自然科学基金资助的课题.

其中波长 $\lambda_1 = 4608.6 \text{ \AA}$, $\lambda_2 = 4380.7 \text{ \AA}$, λ_3 在 $6300-6630 \text{ \AA}$ 范围扫描, 激发 $4d^2^3P_0$ 中的一个 $4d$ 电子至 np 或 nf , 得到 $4dnp \left[\frac{1}{2} \right]_1$, $4dnp \left[\frac{3}{2} \right]_1$, $4dnf \left[\frac{1}{2} \right]_1$ 和 $4dnf \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 四个三重态自电离系列, 同时由于单三态之间的混合, 使 $4dnp \left[\frac{3}{2} \right]_1 : ({}^1P_1)$ 和 $4dnf \left[\frac{3}{2} \right]_1 : ({}^1P_1)$ 单重态自电离系列也被激发^[1]. 激发终态的能量在 $5s^2S_{1/2}$ 和 $4d^2D_{3/2}$ 电离限之间.

在实验中为了避免光谱线的功率展宽, 先逐步减弱第三束激光, 观察光谱线型, 直到谱线宽度不受光强影响.

实验得出的自电离态光谱如图 1. 图 1 中下面为 λ_3 扫描时经过 F-P 标准具输出的干涉谱, 作为波长的相对定标; 中间为第三束激光同时激发的空心阴极灯中的 Ne 原子光电流谱, 光电流谱线的波长由文献[11]中得出(已折算为真空中波长), 作为 λ_3 的绝对定标.

为了判别第三束激光扫描时可能产生的其他多光子过程, 在实验中挡住第二束激光, 使 λ_3 扫描, 单独得到图 1 中标有 A, B 的两条谱线, 其对应的激发过程为



由于实验中的第三束激光较强, 使 $5p^2$ 价态的布居数较大^[12], 因此对应的光电离谱线具有较大的高度. 显然, 这两条谱线应从自电离光谱中剔除.

在实验得到的自电离光谱中, 包含 6 个自电离系列, 谱线较为复杂. 我们根据各光谱线的强度、线型、间距及量子亏损的大小, 对照文献[1]中在较低能量范围内已经得出的部分测量结果, 对各光谱线的归属作了鉴别. 表 1 给出了各自电离系列的能级位置. 计算中取 $4d^2^3P_0$ 中间态的能量值为 44525.83 cm^{-1} ^[12], 各能级均为四次测量的平均值, 各次测量值之间的偏差一般不超过 1 cm^{-1} . 但是, 由于自电离态谱线较宽, 并且实验的光谱分辨率

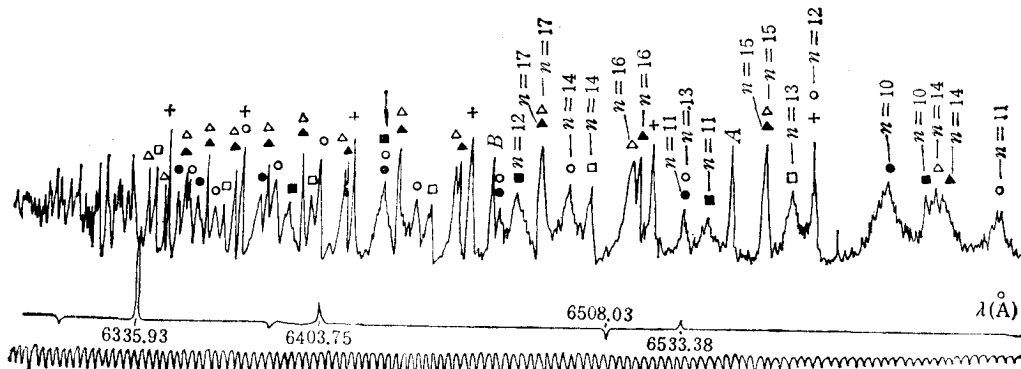


图 1 Sr 原子 4dnp 和 4dnf, $J=1$ 系列自电离态光谱

- — $4d({}^1D_{3/2})np \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 系列; ■ — $4d({}^1D_{3/2})nf \left[\frac{1}{2} \right]_1$ 系列; ○ — $4d({}^1D_{3/2})nf \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 系列;
● — $4d({}^1D_{3/2})nf \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 系列; △ — $4d({}^1D_{3/2})np \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 系列; ▲ — $4d({}^1D_{3/2})np \left[\frac{1}{2} \right]_1$ 系列;
+ — 特定谱线

表 1 Sr 原子 $4dnp$ 和 $4dnf, J=1$ 自电离态的能量和有效量子数的测量值

$4d(^1D_{3/2})np \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 系列: $\square$			$4d(^1D_{3/2})nf \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 系列: $\bullet$			$4d(^1D_{3/2})nf \left[\frac{1}{2} \right]_1$ 系列: $\blacksquare$		
n	$\nu(\text{cm}^{-1})$	n_1^*	n	$\nu(\text{cm}^{-1})$	n_1^*	n	$\nu(\text{cm}^{-1})$	n_1^*
13	59740.3	10.332	10	59662.1	9.960	10	59628.7	9.813
14	59906.8	11.287	11	59829.0	10.809	11	59808.5	10.693
15	60042.1	12.294	12	59982.2	11.816	12	59969.1	11.719
16	60148.6	13.308	13	60086.2	12.685	13	60086.2	12.685
17	60231.1	14.294	14	60199.4	13.890	14	60177.2	13.626
			15	60271.3	14.861	15	60252.9	14.593

$4d(^1D_{3/2})nf \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 系列: $\circ$			$4d(^2D_{3/2})np \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 系列: $\triangle$			$4d(^2D_{3/2})np \left[\frac{1}{2} \right]_1$ 系列: $\blacktriangle$		
n	$\nu(\text{cm}^{-1})$	n_1^*	n	$\nu(\text{cm}^{-1})$	n_1^*	n	$\nu(\text{cm}^{-1})$	n_1^*
11	59570.0	10.934	14	59620.4	11.247	14	59616.2	11.220
12	59721.1	11.963	15	59761.1	12.288	15	59761.1	12.288
13	59829.0	12.905	16	59871.6	13.344	16	59865.4	13.277
14	59925.5	13.969	17	59947.8	14.254	17	59947.8	14.254
15	59982.2	14.731	18	60019.5	15.306	18	60017.5	15.274
16	60058.3	15.982	19	60072.5	16.253	19	60072.5	16.253
17	60086.2	16.528	20	60122.0	17.318	20	60120.5	17.282
18	60143.1	17.840	21	60158.6	18.255	21	60158.6	18.255
19	60185.1	19.037	22	60190.6	19.212	22	60190.3	19.212
20	60214.8	20.045	23	60220.8	20.269	23	60220.8	20.269
21	60237.9	20.951	24	60244.6	21.237	24	60244.6	21.237
22	60262.1	22.045	25	60265.5	22.213			
			26	60285.3	23.273			
			27	60300.7	24.211			

n_1^* ——收敛于 $4d^2D_{3/2}$ 电离限; n_2^* ——收敛于 $4d^2D_{5/2}$ 电离限。

不高 ($\Delta\lambda_3 \sim 0.2 \text{ \AA}$), 在光谱图中部分谱线重迭, 使测量误差加大。

对各自电离系列能级分别按 $4d^2D_{3/2}$ 电离限 60488.10cm^{-1} 和 $4d^2D_{5/2}$ 电离限 60768.44cm^{-1} [13] 计算有效量子数 n_1^* 和 n_2^* , 按有效量子数的合理变化, 可以确定各系列分别收敛于哪一电离限和相应的 n^* 值。为便于和已有的结果对照, 表 1 中的电子组态仍用文献[1]中给出的符号。对图 1 中短波端的部分谱线, 由于归属难以鉴别, 未列入表内。

三、讨 论

1. 图 1 显示的各系列光谱线的宽度和高度的显著差别, 反映了不同系列自电离态具有显著不同的自电离速率和激发几率。

$$4d(^2D_{3/2})np \left[\frac{3}{2} \right]_1, 4d(^2D_{3/2})nf \left[\frac{3}{2} \right]_1 \text{ 和 } 4d(^2D_{3/2})nf \left[\frac{1}{2} \right]_1$$

三个系列的前两个系列在文献[1]中鉴定为 1P_1 态。这三个系列均收敛于 $^2D_{3/2}$ 电离限, 其

谱线较低而宽度较大, 其中 $4d(^2D_{5/2})nf \left[\frac{1}{2} \right]_1$ 系列的能级测定值恰与文献[1]中给出的低 n 区的能级值衔接, $4d(^2D_{5/2})np \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 和 $4d(^2D_{5/2})nf \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 两个系列的各能级测量值与文献[1]中给出的测量值接近, 但其中 13f 能级具有较大的偏差. 在图 1 中这一能级对应的谱线很宽(见箭头所指), 文献[1]中认为 $4d(^2D_{5/2})13f \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 与 $4d(^2D_{3/2})17f \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 两谱线在此处重迭, 由我们的测量结果可见, $4d(^2D_{5/2})13f \left[\frac{1}{2} \right]_1$ 能级亦在此位置附近, 在实验的光谱分辨率条件下, 三条谱线重迭, 使能级位置难以确定. 并且由于激发方式不同, 三条谱线的相对强度和线型与文献[1]中不同, 因此其迭加后的峰值位置较文献[1]中的实验结果有一定偏移. 这一偏移在谱线的宽度之内.

$$4d(^2D_{3/2})nf \left[\frac{3}{2} \right]_1, 4d(^2D_{3/2})np \left[\frac{3}{2} \right]_1 \text{ 和 } 4d(^2D_{3/2})np \left[\frac{1}{2} \right]_1$$

三个系列的后两个系列在文献[1]中鉴定为 3P_1 和 3D_1 态. 这三个系列均收敛于 $^2D_{3/2}$ 电离限, 其谱线一般较高, 反映了从 $4d^2\ ^3P_0$ 态激发一个 4d 电子至 nl 时, 终态为 $4d(^2D_{3/2})nl$ 的跃迁几率大于终态为 $4d(^2D_{5/2})nl$ 的跃迁几率. 在这三个系列中, 能级的测量值与文献[1]中在较低能域测得的部分结果接近, 并且均向高能域扩展. 其中 $4d(^2D_{3/2})np \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 与 $4d(^2D_{3/2})np \left[\frac{1}{2} \right]_1$ 两系列的量子亏损接近, 谱线有较多的重迭. 在文献[1]的实验中 $14p \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 与 $14p \left[\frac{1}{2} \right]_1$ 两谱线重迭, 但由图 1 可见, 在我们的实验中, 这两条谱线峰位是可以分辨的.

除以上谱线外, 尚有部分谱线不能归属于 6 个自电离态系列, 在图 1 上以十号标志. 这些谱线较高而宽度较小, 其对应的能量值列于表 2, 电子组态有待进一步研究确定. 其中编号为 1 和 5 的谱线分别与 $4d(^2D_{3/2})12f \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 和 $4d(^2D_{3/2})20f \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 谱线重迭, 这是根据 $4d(^2D_{3/2})nf \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 系列中这两条谱线明显增高认定的, 这种认定仅属假设, 故在表 2 中标以“?”号.

表 2 几个待定组态的能级

No.	$\lambda_1(\text{\AA})$	$\nu(\text{cm}^{-1})$	
1	6580.9	59721.1	?
2	6523.3	59855.4	
3	6459.3	60007.2	
4	6414.9	60114.5	
5	6373.9	60214.8	?
6	6346.9	60281.5	

2. 文献[13]对 Sr 原子单光子吸收光谱的观察得出, 在 $60150-60730\text{cm}^{-1}$ 能域内,

收敛于 $4d^2D$ 的通道之间不存在明显的相互作用, 与 $4d(^2D)n1$ 通道的主要相互作用来自 $5s^2S$ 开放通道, 仅在更低的能域内, 收敛于 $4d^2D$ 的通道与收敛于 $5p^2P$ 的通道之间存在相互作用。

表 1 中 $4d(^2D_{5/2})np \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 和 $4d(^2D_{3/2})np \left[\frac{1}{2} \right]_1$ 两系列中, 每一系列内各能级的量子亏损较为接近, 能级值不受其他组态的较强的干扰, 反映了在实验的能域内这两个系列与其他通道之间不存在较强的组态相互作用。

在 $4d(^2D_{5/2})nf \left[\frac{3}{2} \right]_1$, $4d(^2D_{5/2})nf \left[\frac{1}{2} \right]_1$ 和 $4d(^2D_{3/2})nf \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 系列中, 除 $4d(^2D_{5/2})13f \left[\frac{3}{2} \right]_1$, $4d(^2D_{5/2})13f \left[\frac{1}{2} \right]_1$ 和 $4d(^2D_{3/2})17f \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 三能级有较大的测量误差外, $4d(^2D_{5/2})10f \left[\frac{3}{2} \right]_1$, $4d(^2D_{5/2})10f \left[\frac{1}{2} \right]_1$ 和 $4d(^2D_{3/2})15f \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 各能级的量子亏损有较大的改变, 反映了在这些能级附近存在的组态相互作用使能级位置有明显的偏移。另外, 由图 1 可见, $4d(^2D_{5/2})np \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 系列和 $4d(^2D_{3/2})np \left[\frac{1}{2} \right]_1$ 系列在测量的能域内谱线接近或重迭, 但在 $n = 16$ 处谱线明显地分离, 并且 $4d(^2D_{3/2})16p \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 谱线增宽, 显示出与另外通道之间的较强的干涉。以上受干扰的能级均低于文献[13]的图 1 和图 2 中观察的能域。

3. 考虑自电离态与连续态的相互作用, 文献[5]和文献[14]得出, 从初态跃迁到自电离终态的总激发截面

$$\sigma = \sigma_s \frac{(q + \epsilon)^2}{1 + \epsilon^2} + \sigma_c \quad (1)$$

式中变量 $\epsilon = 2(E - E_0)/\Gamma$, E_0 为考虑分立态与连续区相互作用后的共振态能量, Γ 为

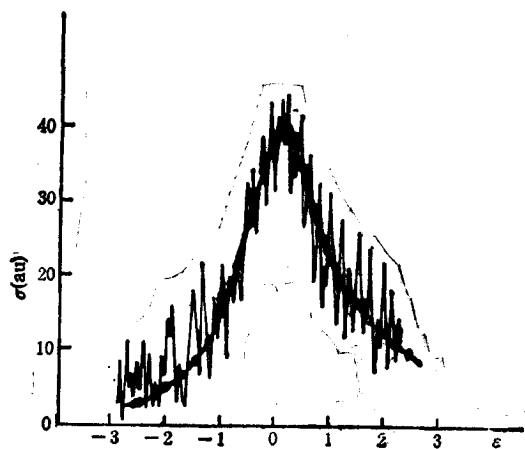


图 2 SrI $4d(^2D_{5/2})11f \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 态的实验谱线及其拟合自电离线型
○——拟合的理论值

自电离态的光谱宽度, σ_s 为与自电离态相互作用的未受干扰的连续态的激发截面, σ_c 为与自电离态无相互作用的其余连续态的激发截面, q 为 Fano 非对称参数。当 q 值较大, 在谱线宽度内满足 $q \gg \epsilon$ 时, 自电离谱线呈对称的 Lorentzian 线型; 当自电离态受到连续区的干扰较强时, q 具有较小值, 谱线呈 Fano 非对称线型。

在图 1 中, $4d(^2D_{5/2})11f \left[\frac{3}{2} \right]_1$ 态的谱线下部具有较为明显的非对称性, 谱线半宽度 $\Gamma = 13.6 \text{ cm}^{-1}$ 。以这一谱线与(1)式拟合, 考虑到在测量的能域内只有 $5s^2S$ 一个连续通道, 可取 $\sigma_c = 0$, 由计算机拟合曲线(图 2)得出 $q = 8.32$, $\sigma_s = 0.56$ (与 σ 取同一单位)。由于 q 值较大, 曲

线上部的非对称性不明显,因此连续态的干扰对谱线的峰位影响较小。

对图 1 中的其他谱线,由于谱线下部均与相邻谱线重迭,线型难以确定。

- [1] W.R.S. Garton and K. Codling, *J. Phys. B*, **1**(1968), 106.
- [2] W.R.S. Garton, G.L. Grasdale, W.H. Parkinson and E.M. Reeves, *J. Phys. B*, **1**(1968), 114.
- [3] J.P. Connerabe, *et al.*, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **A371**(1980), 297.
- [4] G.H. Newsom, S.O. Connor and R.C.M. Learner, *J. Phys. B*, **6**(1973), 2162.
- [5] U. Fano, *Phys. Rev.*, **124**(1961), 1866.
- [6] W.E. Cooke, T.F. Gallagher, S.A. Edelstein and R.M. Hill, *Phys. Rev. Lett.*, **40**(1978), 178.
- [7] E.Y. Xu, Y. Zhu, O.C. Mullins and T.F. Gallagher, *Phys. Rev.*, **A33** (1986), 2401.
- [8] 胡素芬、张森、陆杰、邱济真、孙家祯, *光学学报*, **6**(1986), 902.
- [9] 吴璧如、张森、钟建伟、邱济真、胡素芬、陆杰、孙家祯, *物理学报* **36**(1987), 444.
- [10] 张森、梅式民、徐云飞, *光学学报*, **9**(1989), 909.
- [11] 冶金工业部科技情报产品标准研究所编, *光谱线波长表*, 中国工业出版社, 北京, (1971), 705 页.
- [12] P. Esherick, *Phys. Rev.*, **A15** (1977), 1920.
- [13] C.M. Brown, M.S. Longmire and M.L. Ginter, *J. Opt. Soc. Am.*, **73**(1983), 985.
- [14] U. Fano and J.W. Cooper, *Phys. Rev.*, **137A**(1965), 1364.

AUTOIONIZATION SPECTRA OF 4dnp AND 4dnf, $J=1$ SERIES OF Sr I

ZHANG SEN MEI SHI-MIN QIU JI-ZHEN XU YUN-FEI

Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou, 310027

(Received 26 September 1989)

ABSTRACT

The autoionization spectra of the 4dnp and 4dnf, $J=1$ series of Sr atom have been observed in the range of 59570—60300 cm^{-1} using three-step laser excitation method. 60 lines have been obtained, most of them can be classified into six series converging to the $4d^2D_{3/2}$ and $4d^2D_{5/2}$ ionization thresholds, respectively. The profile of the line and configuration interaction are also discussed.

PACC: 3280D; 3270