

# Sr 原子自电离谱线的观察和分析\*

胡素芬 张 森 陆 杰 邱济真 孙家祯  
(浙江大学物理系)

## 提 要

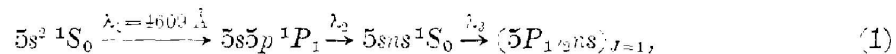
本文报道了用偏振光束分步激发的方法,对 Sr 原子  $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$  及  $(5P_{1/2}nd)_{J=1,3}$  自电离谱的观察,测定了 Sr 的  $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$  系列 ( $n=10\sim 26$ ) 的自电离能级位置和量子亏损,并对  $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$  及  $(5P_{1/2}nd)_{J=1,3}$  两种自电离谱线的不同特点进行了分析。

## 一、引 言

近年来对原子自电离态的研究成为人们相当感兴趣的课题。对碱土金属原子的自电离态的能级位置和线宽<sup>[1,2]</sup>、线型<sup>[3~5]</sup>、精细结构<sup>[6,7]</sup>、自电离能级系列之间相互作用<sup>[8]</sup>等方面已有一些系统的研究。在文献[2]中,我们采用了分步激发的方法,已对 Sr 原子  $5P_{1/2}ns$  系列自电离谱作了观察,测定了 Sr 的  $5P_{1/2}ns$  系列 ( $n=10\sim 17$ ) 的能级位置。但在该实验中,没有使用偏振光技术,终态  $5P_{1/2}ns$  的总角动量  $J$  是不确定的,得到的  $5P_{1/2}ns$  自电离态能级是  $(5P_{1/2}ns)_{J=0,1}$  的混合态能级。本文报道了最近我们用三束同方向的线偏振激光分步激发,对 Sr  $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$  及  $(5P_{1/2}nd)_{J=1,3}$  的观察,并对所获得的不同自电离谱线特征进行了分析。

## 二、实验和结果

详细的实验装置已在文献[2]中描述,与文献[2]不同的是:三束染料激光经线偏振器使之成为同方向的线偏振光,使最后的自电离态为  $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$ ,分步激发的过程可用下式表示:



为了避免离子收集电场引起的 Stark 位移,两平行板电极之间的电压由一脉冲电压源提供,电压脉冲由光信号触发,在光脉冲结束后延迟  $0.5\ \mu\text{s}$ ,产生一脉宽  $40\ \text{ms}$ ,幅度  $40\ \text{V}$  的脉冲电压,使离子进入电子倍增器。电离信号经 Boxcar 平均后,由 X-Y 记录仪描绘出原子自电离态的激发谱。

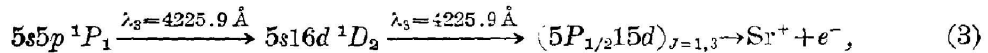
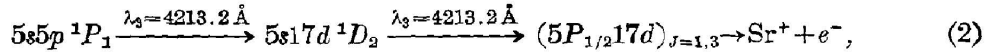
实验观察和测量了 Sr  $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$  ( $n=10\sim 26$ ) 的自电离谱。由于  $n\geq 17$  时,  $5sns\ ^1S_0$  能级与  $5s(n-1)d\ ^1D_2$  能级十分接近,而我们的染料激光的线宽  $\sim 1\ \text{cm}^{-1}$ ,当调谐第二束激

收稿日期: 1985年12月3日; 收到修改稿日期: 1986年3月7日

\* 中国科学院自然科学基金资助的课题。

光波长  $\lambda_3$ , 实现  $5s5p^1P_1 \rightarrow 5sns^1S_0$  激发时, 也能使  $5s(n-1)d^1D_2$  态布居, 这样当  $\lambda_3$  在  $Sr^+$   $5s-5P_{1/2}$  共振线附近扫描时, 也能实现  $5s(n-1)d^1D_2 \rightarrow (5P_{1/2}(n-1)d)_{J=1,3}$  的激发。所以实验中还观察到  $(5P_{1/2}nd)_{J=1,3} (n=17\sim 25)$  的自电离谱。

图 1 是第三束激光功率较低时, 由 X-Y 记录仪记录的  $5s16s^1S_0 \rightarrow (5P_{1/2}16s)_{J=1}$  的激发谱。图中用  $s$  表示出  $(5P_{1/2}16s)_{J=1}$  的自电离峰位置。在  $23663.7 \text{ cm}^{-1}$  及  $23734.8 \text{ cm}^{-1}$  处出现的窄的尖峰, 分别对应于下列过程的跃迁:



实验中作为  $\lambda_3$  波长的定标<sup>[2]</sup>。由图 1 可见, 这时谱线的特点是只见到一个强的自电离峰。谱线的线型呈 Lorentz 型, 自电离峰的中心位置  $S$  靠近  $Sr^+$   $5s-5P_{1/2}$  共振线 ( $23715.3 \text{ cm}^{-1}$ )。

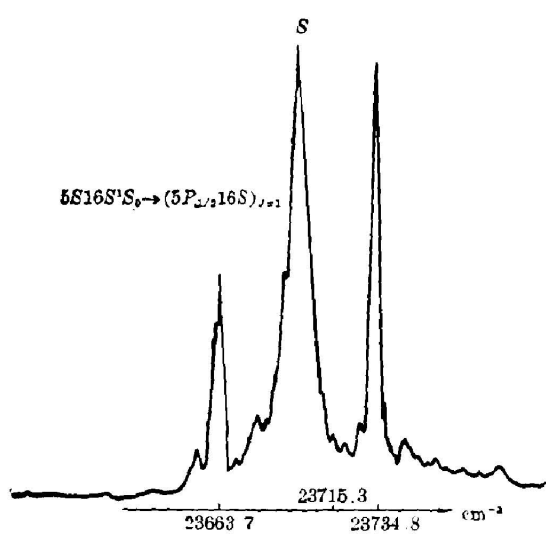


Fig. 1 Excitation spectrum of  $5s16s^1S_0 \rightarrow (5P_{1/2}16s)_{J=1}$  transition of Sr with a low laser power

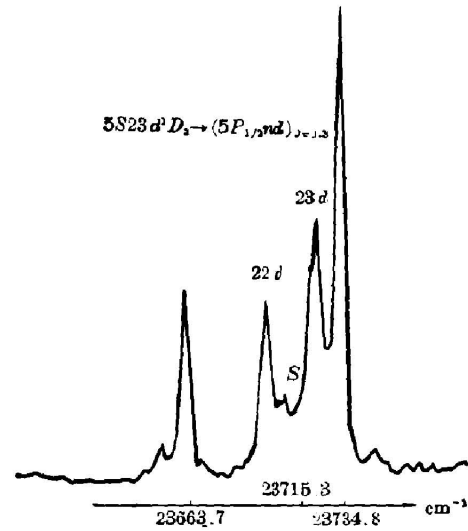


Fig. 2 Excitation spectrum around  $5s23d^1D_2 \rightarrow (5P_{1/2}nd)_{J=1,3}$  transition of Sr with a low laser power

图 2 是第三束激光功率较低时, 由 X-Y 记录仪所记录的  $5s23d^1D_2 \rightarrow (5P_{1/2}nd)_{J=1,3}$  的跃迁。实验中, 我们可分辨出  $(5P_{1/2}nd)_{J=1}$  和  $J=3$  的分裂。由图 2 可见, 这时谱线的特点是: 见到两个强的自电离峰, 它们分别对应于  $n=23$  和  $n=22$  的跃迁。两个强峰之间的小峰对应于  $5s24s^1S_0 \rightarrow (5P_{1/2}24s)_{J=1}$  的激发。

图 3 和图 4 分别是激光功率较强时, 由 X-Y 记录仪记录的  $5s16s^1S_0 \rightarrow (5P_{1/2}ns)_{J=1}$  和  $5s23d^1D_2 \rightarrow (5P_{1/2}nd)_{J=1,3}$  附近的激发谱。这时见到对应于图 1 和图 2 的中央大峰有倒空加宽<sup>[4,6]</sup>。在大峰的两翼还见到若干个较小的伴峰, 伴峰所对应的  $n$  值已在图中标出。

表 1 列出了实验测得的 Sr 的  $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$  的能级位置  $E$ , 有效量子数  $n^*$ , 量子亏损  $\delta$  以及使  $5sns^1S_0 \rightarrow (5P_{1/2}ns)_{J=1}$  跃迁的第三束激光的波长  $\lambda_3$ 。计算中  $5s5p^1P_1$  能级取  $E(5s5p^1P_1) = 21698.48 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[10]</sup>, 第一电离限的能量  $E(5s^+) = 45932.1 \text{ cm}^{-1}$ ,  $Sr^+$  离子的  $5s-5P_{1/2}$  共振线能量  $\Delta W = 23715.2 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[10]</sup>。表 1 中  $n^*$ ,  $\delta$  均为多次测量的平均值。由表 1

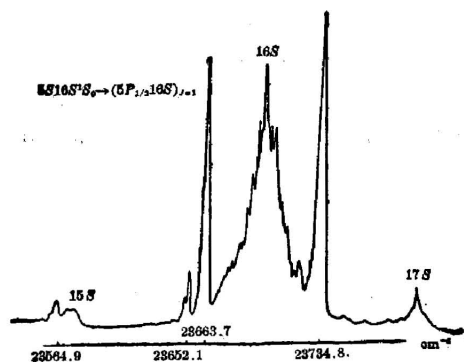


Fig. 3 Excitation spectrum around  $5s16s^4S_0 \rightarrow (5P_{1/2}ns)_{J=1}$  transition of Sr with a high laser power

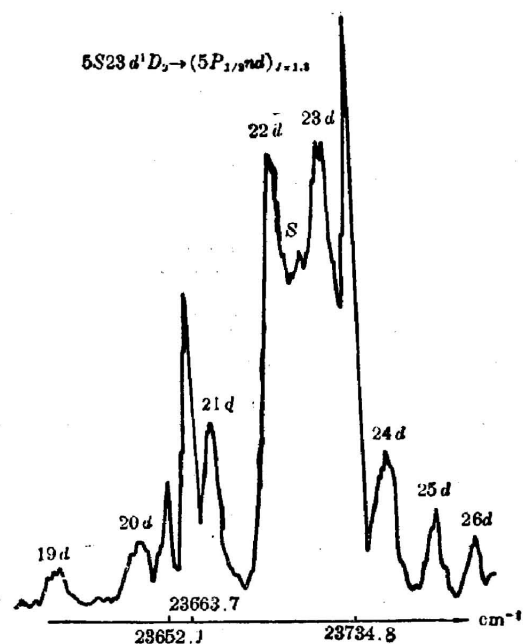


Fig. 4 Excitation spectrum around  $5s23d^1D_2 \rightarrow (5P_{1/2}nd)_{J=1,3}$  transition of Sr with a high laser power

Table 1 Measured values of  $E$ ,  $\lambda_3$ ,  $n^*$ ,  $\delta$  for the series  $(5P_{1/2}ns_{1/2})_{J=1}$  of Sr

autoionized state	$E(5P_{1/2}ns)_1$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\lambda_3(\text{\AA})$	$n^*$	$\delta$
$(5P_{1/2}10s)_1$	$67126.1 \pm 0.8$	$4234.8 \pm 0.1$	6.597	3.403
$(5P_{1/2}11s)_1$	$67736.8 \pm 0.4$	$4230.1 \pm 0.1$	7.579	3.421
$(5P_{1/2}12s)_1$	$68165.0 \pm 0.7$	$4224.4 \pm 0.1$	8.604	3.396
$(5P_{1/2}13s)_1$	$68450.1 \pm 0.6$	$4223.6 \pm 0.1$	9.574	3.426
$(5P_{1/2}14s)_1$	$68669.7 \pm 0.4$	$4221.2 \pm 0.1$	10.593	3.407
$(5P_{1/2}15s)_1$	$68829.3 \pm 0.7$	$4220.4 \pm 0.1$	11.582	3.418
$(5P_{1/2}16s)_1$	$68956.7 \pm 0.2$	$4219.1 \pm 0.1$	12.606	3.394
$(5P_{1/2}17s)_1$	$69053.2 \pm 0.5$	$4218.9 \pm 0.1$	13.591	3.409
$(5P_{1/2}18s)_1$	$69131.7 \pm 0.9$	$4218.5 \pm 0.2$	14.588	3.412
$(5P_{1/2}19s)_1$	$69195.9 \pm 0.8$	$4218.2 \pm 0.1$	15.590	3.410
$(5P_{1/2}20s)_1$	$69249.8 \pm 0.6$	$4217.7 \pm 0.1$	16.614	3.386
$(5P_{1/2}21s)_1$	$69293.4 \pm 0.9$	$4217.6 \pm 0.2$	17.607	3.393
$(5P_{1/2}22s)_1$	$69329.8 \pm 0.8$	$4217.6 \pm 0.1$	18.589	3.411
$(5P_{1/2}23s)_1$	$69362.0 \pm 0.5$	$4217.3 \pm 0.1$	19.609	3.391
$(5P_{1/2}24s)_1$	$69388.1 \pm 0.6$	$4217.4 \pm 0.1$	20.573	3.427
$(5P_{1/2}25s)_1$	$69411.6 \pm 0.6$	$4217.3 \pm 0.1$	21.574	3.426
$(5P_{1/2}26s)_1$	$69432.6 \pm 0.4$	$4217.1 \pm 0.2$	22.604	3.396

可见,  $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$  的  $\delta$  值近于常数, 其平均值  $\bar{\delta} = 3.407$ 。这表明  $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$  自电离系列在  $n = 10 \sim 26$  范围较少受其它自电离系列的干扰。

表 2 列出了文献[2]的测量值按  $Sr^+$  的  $5s$  电离限  $I(5s) = 45932.1 \text{ cm}^{-1}$  重新计算所得的结果\*。由表 1 和表 2 比较可以看出,  $n = 10 \sim 14$  几个态的  $(5P_{1/2}ns)_{J=2}$  的能级位置比  $J = 0, 1$  混合的  $(5P_{1/2}ns)$  能级低, 并且  $n$  越小偏低越明显。 $n > 15$  时, 在误差范围内两次实验得出的能级位置十分接近。这表明在  $n$  较小时, 可望测出  $Sr$  的  $(5P_{1/2}ns)$   $J = 0$  和  $J = 1$  的精细结构分裂。

Table 2 Measured values for the series  $(5P_{1/2}ns)$  of  $Sr$  in the Ref. [2] (modified)

autoionized state	$E(5P_{1/2}ns)$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\lambda_s(\text{\AA})$	$n^*$	$\delta$
$5P_{1/2}10s$	67131.3	4233.8	6.604	3.396
$5P_{1/2}11s$	67738.6	4229.8	7.582	3.418
$5P_{1/2}12s$	68165.8	4224.2	8.606	3.394
$5P_{1/2}13s$	68451.8	4223.3	9.580	3.420
$5P_{1/2}14s$	68671.2	4220.9	10.602	3.398
$5P_{1/2}15s$	68828.8	4220.5	11.578	3.422
$5P_{1/2}16s$	68957.3	4219.1	12.610	3.390
$5P_{1/2}17s$	69053.9	4218.8	13.597	3.403

### 三、谱线特征的分析

运用量子亏损理论和孤立实激发模型, S. A. Bhatti 和 W. E. Cooke<sup>[6]</sup>, N. H. Tran<sup>[5, 12]</sup>, R. Kachru<sup>[7]</sup>等曾对 Ba 原子自电离谱线的特征进行了分析。

考虑 Sr 原子从  $5snl^1S_0$  态到  $(5P_{1/2}nl)$  系列 ( $l = s$  或  $d$ ) 的激发, 由分步激发方案可知, 这个过程基本上是  $Sr^+5s-5P_{1/2}$  的跃迁, 而外边的里德堡电子可看作是一个“旁观者”。应用量子亏损理论可得出这一过程的光激发截面  $\sigma$  为:

$$\sigma(n^*) \propto \mu^2 O^2(n_b^*, n^*) Z_l^2(n^*) \quad (4)$$

式中  $\mu$  表示  $\langle 5s | \mu | 5P \rangle$ , 是  $Sr^+5s-5P$  偶极跃迁矩阵元;  $O(n_b^*, n^*)$  表示  $\langle n_b^* l | n^* l \rangle$ , 是有效量子数为  $n_b^*$  的束缚里德堡  $5snl$  与有效量子数为  $n^*$  的自电离态  $5P_{1/2}nl$  的  $l$  电子的库仑径向波函数的重叠积分, 由文献[3]可知,

$$O^2 = |\langle n_b^* l | n^* l \rangle|^2 = \frac{4n_b^* n^*}{(n_b^* + n^*)^2} \left( \frac{\sin \pi(n^* - n_b^*)}{\pi(n^* - n_b^*)} \right)^2, \quad (5)$$

由(5)式可见,  $O^2$  是一个  $\sin C$  函数。当  $n^* = n_b^*$  时,  $O^2$  有极大值; 当  $n^* = n_b^* \pm i$  ( $i$  为除零以外的正整数) 时,  $O = 0$ ; 当  $n^* = n_b^* \pm i + \frac{1}{2}$  时,  $O^2$  有次极大;  $Z_l^2$  是自电离态  $5P_{1/2}nl$  的谱密度, 它是  $n^*$  的周期函数, 峰值在自电离态的有效量子数  $n^* = n - \delta$  处 ( $\delta$  为  $5P_{1/2}nl$  态的量子亏损)。(4)式中  $\mu^2$  是一个常数, 所以光激发截面正比于  $O^2$  和  $Z_l^2$  的乘积。

图 5 画出了由  $5s16s$  激发到  $5P_{1/2}ns$  系列的谱密度  $Z_l^2$  和重叠积分平方  $O^2(12.733, n^*)$

\* 文献[2]中取  $I[5s] = 45925.6 \text{ cm}^{-1}$  是来自文献[10]的数据。

的示意图,横坐标表示有效量子数  $n^*$ 。图中粗实线表示  $O^2$ , 细实线表示  $Z_s^2$ 。对  $5s16s\ ^1S_0$  态的  $n_b^* = 12.733$ <sup>[11]</sup>, 由本实验得  $(5P_{1/2}16s)_{J=1}$  的  $n^* = 12.606$ 。由图 5 可清楚看出, 由于  $O^2$  的主峰位置与  $(5P_{1/2}16s)$  的  $Z_s^2$  峰值位置之差  $\Delta n^* = n_b^* - n^* = 0.1$  (即  $n^* \simeq n_b^*$ ), 这样由  $O^2$  和  $Z_s^2$  合成的结果, 呈现在  $|n^* - n_b^*| < 1$  的范围内  $6(n^*)$  只有一个极大值, 这相当于在实跃迁线附近只有一个极大的自电离峰被观察到。由图 5 还可看到, 由  $O^2$  和  $Z_s^2$  合成的结果, 在  $|n^* - n_b^*| > 1$  处, 能见到较弱的伴峰, 但由于  $\sin C$  函数的特点以及  $5P_{1/2}ns$  态的  $Z_s^2$  极大接近  $O^2$  的极小, 所以伴峰很弱, 只有在高激光功率时才能看到。这些结论与实验观察(见图 1 及图 3)很好地符合。由于对  $Sr(5P_{1/2}ns)_{J=1}$  ( $n=10 \sim 26$ ) 系列有恒定的量子亏损 ( $\delta=3.407$ ),  $\Delta n^* = n_b^* - n^*$  均为 0.1 左右, 所以观察到的  $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$  的自电离谱均有相似的特点。

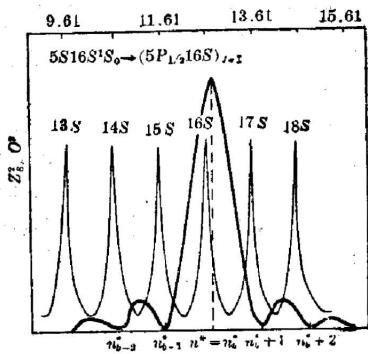


Fig. 5 Schematic of the density  $Z_s^2$  of  $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$  series near  $5P_{1/2}16s$  and the overlap integral squared  $O^2(12.733, n^*)$  from the  $5s16s\ ^1S_0$  state  $n_b^* = 12.733$ , where  $Z_s^2$  is shown by thin solid lines and  $O^2$  is shown by thick solid lines

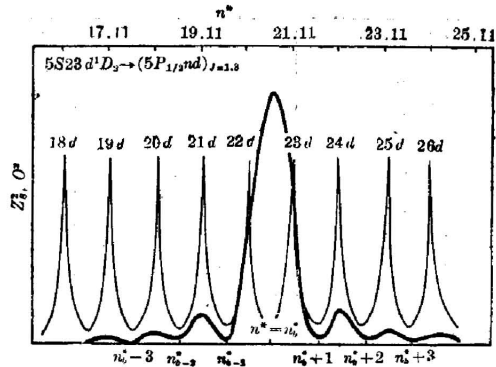


Fig. 6 Schematic of the density  $Z_d^2$  of the  $(5P_{1/2}nd)$  series near  $5P_{1/2}23d$  and the overlap integral squared  $O^2(20.721, n^*)$  from the  $5s23d\ ^1D_2$  states  $n_b^* = 20.271$ , where  $Z_d^2$  is shown by thin solid lines and  $O^2$  is shown by thick solid lines

图 6 是  $5s23d\ ^1D_2 \rightarrow (5P_{1/2}nd)_{J=1,3}$  激发的谱密度  $Z_d^2$  和重叠积分平方  $O^2(20.721, n^*)$  的示意图。[对  $5s23d\ ^1D_2$  态的  $n_b^* = 20.721$ <sup>[11]</sup>,  $(5P_{1/2}23d)_{J=1,3}$  的  $n^* = 21.111$ ]。由图 6 可清楚地看出, 由于这时  $\sin C$  函数的主峰内有两个  $Z_d^2$  的极大值, 这样  $Z_d^2$  与  $O^2$  合成的结果, 将在  $|n^* - n_b^*| \leq 1$  范围内见到  $6(n^*)$  有两个极大峰, 这相当于在实跃迁线两边有两个大的自电离峰。又因这时  $n^* - n_b^* = 0.4$ , 所以应见到  $(5P_{1/2}23d)$  峰比  $(5P_{1/2}22d)$  峰稍高<sup>[12]</sup>。由图 6 还可看出, 在  $|n^* - n_b^*| > 1$  范围, 这时  $Z_d^2$  的各极大值几乎与  $O^2$  的各边极大值重合, 这样合成的结果, 能较容易地见到若干个伴峰。但由于  $\sin C$  函数的特点, 这些伴峰似比主峰弱得多。这些结论与实验观察(见图 2 和图 4)一致。由于  $(5P_{1/2}nd)$  系列的量子亏损  $\delta$  不是常数, 使这系列  $\Delta n^*$  是变化的, 合成的  $6(n^*)$  线形也不尽相同。但因这时  $\Delta n^*$  均不为零, 所以在  $|n^* - n_b^*| \leq 1$  范围均可见到有两个极大的  $6(n^*)$  峰。实验观察的  $(5P_{1/2}nd)$  系列 ( $n=17 \sim 25$ ) 的有效量子数  $n^*$  与相应的里德堡态的有效量子数  $n_b^*$  之差  $\Delta n^*$  在  $0.4 \sim 0.5$  之间, 所以见到的两个极大峰均接近等高。当  $n \geq 17$ ,  $\lambda_3$  在  $Sr^+5s-5P_{1/2}$  共振线附近扫描而使  $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$  与  $(5P_{1/2}nd)_{J=1,3}$  谱同时激发时, 我们可以根据以上分析的这两个系列谱线的不同特点来识别它们。由于谱线线型随自电离态的谱密度以及自电离态与里德堡态的  $l$  电子的库仑径向波

函数的重叠积分的变化而灵敏地变化,使我们有可能由谱线的特征来了解自电离态的有关结构,这也许可作为研究自电离态的有用的光谱学探针<sup>[5]</sup>。

感谢陈哲人教授和 W. E. Cooke 教授的指导;感谢吴璧如副教授的有益讨论和帮助。

### 参 考 文 献

- [1] W. E. Cooke *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1978, **40**, No. 3 (Jan), 178.
- [2] 陆杰等;《物理学报》, 1985, **34**, No. 12 (Dec), 1567.
- [3] S. A. Bhatti *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1981, **24**, No. 1 (Jul), 161.
- [4] W. E. Cooke *et al.*; *Opt. Lett.*, 1982, **7**, No. 2 (Feb), 69.
- [5] N. H. Tran *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1982, **26**, No. 5 (Nov), 3016.
- [6] W. E. Cooke and T. F. Gallagher; *Phys. Rev. Lett.*, 1978, **41**, No. 24 (Dec), 1648.
- [7] R. Kachru *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1985, **31**, No. 2 (Feb), 700.
- [8] F. Gounand *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1983, **27**, No. 4 (Apr), 1925.
- [9] S. A. Bhatti and W. E. Cooke; *Phys. Rev. A*, 1983, **28**, No. 2 (Aug), 756.
- [10] C. E. Moore; *Atomic Energy Levels*. (N. B. S., 1971), 190.
- [11] J. R. Rubbmark *et al.*; *Phys. Scr.*, 1978, **18**, 196.
- [12] N. H. Tran *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1984, **29**, No. 5 (May), 2640.

## Observation and analysis of autoionizing spectra of Sr

HU SUFEN, ZHANG SEN, LU JIE, QIU JIZHEN AND SUN JIAZHEN

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou)

(Received 3 December 1985; revised 7 March 1986)

### Abstract

We report the observation of  $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$  and  $(5P_{1/2}nd)_{J=1,3}$  autoionizing spectra of Sr, by using the polarized multi-step laser excitation approach. The energy levels and quantum defects of Sr  $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$  series ( $n=10\sim 26$ ) have been measured. Some characteristics of  $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$  and  $(5P_{1/2}nd)_{J=1,3}$  autoionizing spectra of Sr have been analysed.