

Sr 原子的 $5sns$ 及 $5snd$ 里德堡系列能谱*

陆 杰 胡素芬 张 森 孙家祯
(浙江大学物理系)

提 要

用两束脉冲激光二步激发的方法将 Sr 原子从基态激发到 $5sns$ 及 $5snd$ 系列里德堡态, 再用第三束脉冲激光使里德堡原子电离。测量了 70 余个里德堡态的能级和量子亏损。

一、引 言

随着调频激光器及有关技术的发展, 近十年来原子高激发态光谱学有了很大的发展。里德堡原子的研究就是其中一个十分引人注目的课题。这是由于里德堡原子有许多奇特的性质, 它给原子理论的新发展提供重要的信息和依据; 另外, 研究里德堡原子有许多实用价值, 如激光同位素分离, 等离子体诊断, 新型激光器的探索和射电天文学等等^[1,2]。

Sr 原子 $5sns$ 及 $5snd$ 里德堡系列已由 Esherick^[3] 用热管炉和双光子激发的方法和 Rubbmark^[4] 等用激光选择性激发 Sr 原子的吸收光谱方法测定; 本文采用共振电离光谱方法和原子束技术, 将 Sr 原子从基态分两步共振激发到 $5sns$ 或 $5snd$ 里德堡态, 再用第三束光使里德堡原子光电离, 得到了 Sr 的 $5sns^1S_0$ (n 从 10~20), $5snd^1D_2$ (n 从 9~50) 及十余个 $5snd^3D_2$ 的里德堡态能谱, 计算了相应能级的量子亏损。由于每一步激发均为共振激发, 只需要较低的激光功率, 并有更高的选择性, 且便于利用偏振光选取两步跃迁终态的 J 值, 以得到不同的里德堡系列。

二、实验装置和测量方法

实验装置如图 1, Nd:YAG 输出的脉冲光能量 700 mJ/pulse, 脉宽 9 ns, 重复率 8.3 pps, 经三倍频和分束后分别泵浦两台染料激光器, 第一台用香豆素 460 染料, 调谐在 $\lambda_1 = 4609 \text{ \AA}$ (真空中波长)。第二台用苾(stillbem)和香豆素 450 染料, 利用驱动装置使 λ_2 在 4100~4600 \AA 范围扫描。 λ_1, λ_2 线宽均约 0.3 \AA, 将 λ_1, λ_2 通过反射镜送入真空室, 并与真空室内的 Sr 原子束垂直相互作用。其中 λ_1 使 Sr 原子从基态 $5s^2^1S_0$ 共振激发至 $5s5p^1P_1$ 态; λ_2 扫描时使 Sr 原子从 $5s5p^1P_1$ 共振激发到 $5sns$ 及 $5snd$ 各里德堡态。在前两束光结束后, 由 YAG 输出的 $\lambda_3 = 1.06 \mu\text{m}$ 的红外光使里德堡原子光电离, 各步跃迁和有关能级如图 2。

真空室内作用区和离子收集装置已在文献[5]中描述。Sr 的里德堡态光电离产生的离子由 9642/4B 电子倍增器接收。为避免电场引起的斯塔克位移, 两平行板电极之间的离子

收稿日期: 1985年7月15日

* 中国科学院科学基金资助的课题。

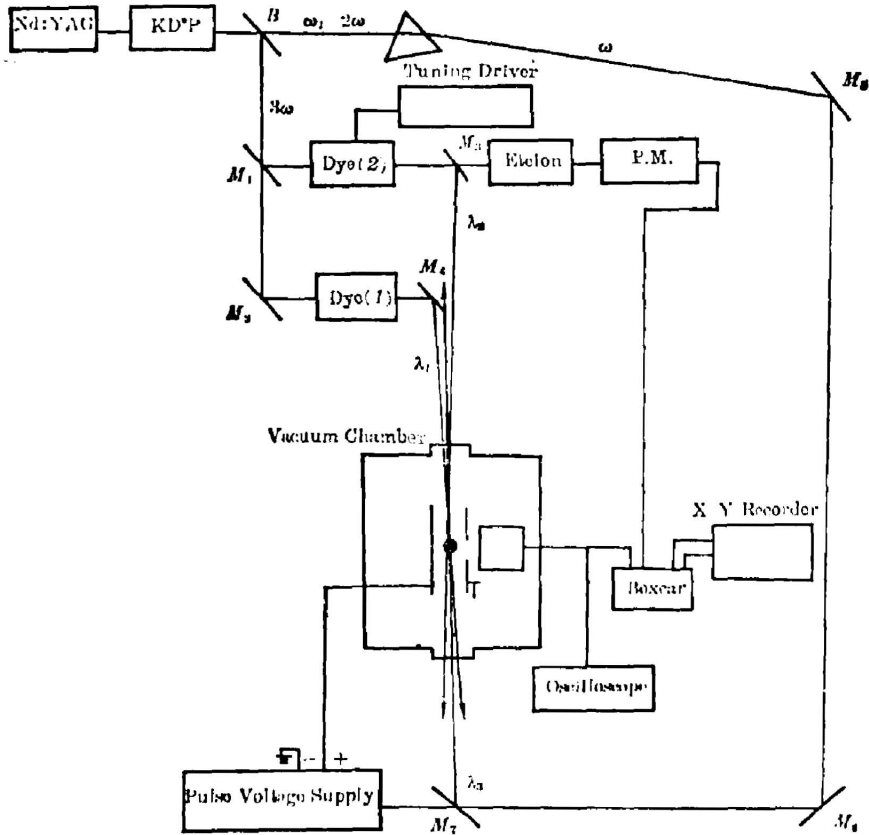


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

收集电压由一脉冲电源提供, 电压脉冲由光信号触发, 在光脉冲结束后延迟 $0.5 \mu s$, 产生一脉冲宽 40 ms , 幅度 40 V 的电压脉冲, 使离子进入电子倍增器, 其输出信号用示波器监视, 同时输入 Boxcar, 在 λ_2 波长扫描时, 由 X-Y 记录仪描绘出 Sr 原子里德堡态光电离谱。

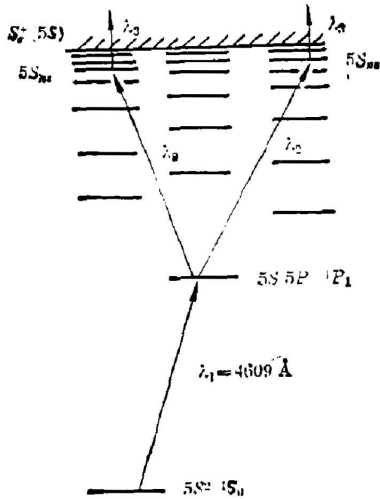


Fig. 2 Relevant levels of Sr

完成上述实验后, 在 λ_1 、 λ_2 光路中插入线偏振器及菲涅耳菱体, 使 λ_1 、 λ_2 光束变为两束旋转方向相同的圆偏振光, 重复测量。由于初态是 $5s^2 1S_0$, 所以得到的末态仅含 $J=2$ 系列的各里德堡态。将两个能谱图比较, 即可辨别 Sr 的 $5sns$ 系列及其他里德堡态的能谱。

λ_2 的波长用法布里-珀罗标准具定标。在 λ_2 扫描时, X-Y 记录仪上同时记录下标准具的干涉谱, 作为波长的分度, 并用已知的 Sr 原子标志谱线波长^[5] 确定标准具的自由光谱范围和作为波长的绝对定标。

三、实验结果

图 3(a)、(b) 分别是 λ_1 、 λ_2 为非圆偏振光时得出的 Sr 的 $5sns$ 及 $5snd$ 的部分里德堡态光电离谱, 图中上面记录的是标准具的干涉谱。图 3(a) 中左端标出的 45932.2 cm^{-1} 是 $\text{Sr}^+(5s)$ 限^[3]。

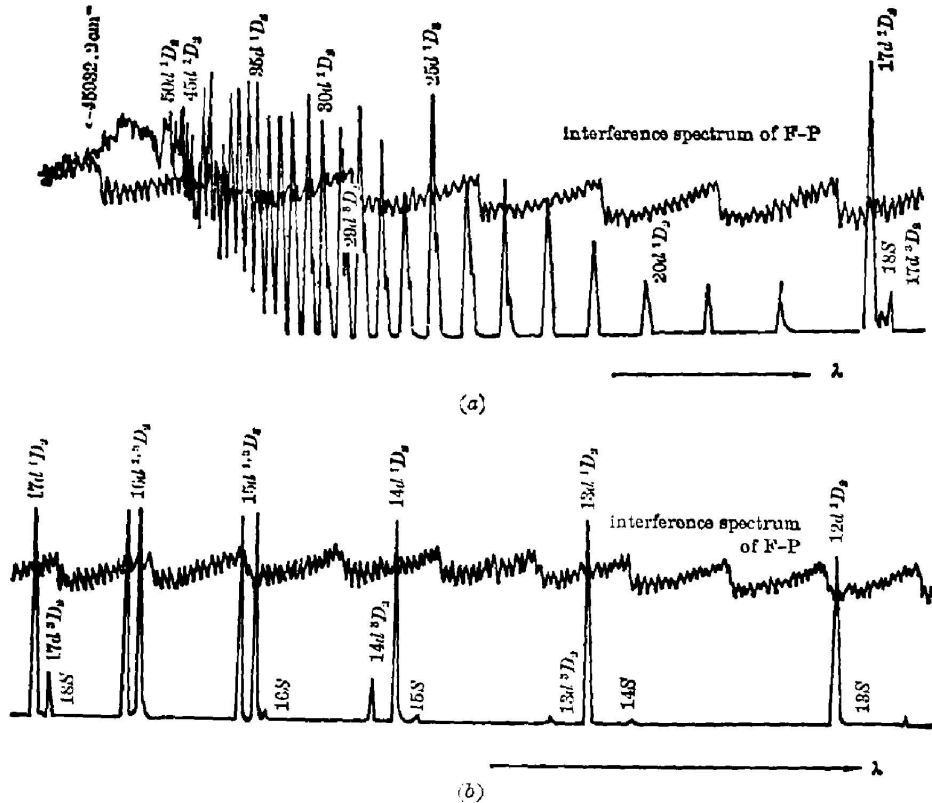


Fig. 3 (a), (b) The photoionization spectra of part of the $5sns$ and $5snd$ Rydberg series of Sr

表 1 列出了实验测得的 $5sns^1S_0$ (n 从 10~20) 的能级 E , 有效量子数 n^* , 量子亏损 δ 及 $5s5p^1P_1 \sim 5sns^1S_0$ 的激发光波长(真空中波长值)。计算中 $5s5p$ 能级取 21698.48 cm^{-1} ^[6], 表中 λ_2 、 n^* 、 δ 均为多次测量的平均值。这 11 个态的 δ 近于相等, 可说明 Sr 的 $5sns^1S_0$ 系列在 $n=10$ 以上的里德堡态是单纯的组态。实验得出的 $5sns^1S_0$ 态的量子亏损平均值为 $\bar{\delta} = 3.270$, 与 Esheriek 得出的结果^[3] 符合得很好; 比文献[5]得出的 Sr 原子的 $5P_{1/2}ns$ 自电离态的 $\bar{\delta}$ 小 0.14, 这是由于原子实极化不同引起的, 与 Cooke 等得到的结论^[7] 基本一致。20s 以上的 1S_0 态被更强的 $5snd$ 态所掩盖, 实验中不能分辨。

表 2 给出了实验测得的 Sr 原子的 $5snd^1,3D_2$ 态的能级 E , 有效量子数 n^* , 量子亏损 δ 及 $5s5p^1P_1 \sim 5snd^1,3D_2$ 的激发光波长 λ_2 , 由表 2 可见, Sr 的 $5snd D_2$ 系列的量子亏损 δ 值有起伏, 起伏情况与文献[3]基本一致。这表明 $5snd D_2$ 的里德堡态与其他通道有较复杂的耦合。

Table 1 Measured values of E , n^* , δ and λ_2 for the series $5sns\ ^1S_0$ of Sr

Rydberg State	$E(\text{cm}^{-1})$	n^*	δ	$\lambda_2 (\text{\AA})$
$5s10s\ ^1S_0$	43512.8	6.735	3.265	4584.1
$5s11s\ ^1S_0$	44097.4 ± 0.4	7.734	3.266	4464.5
$5s12s\ ^1S_0$	44492.5 ± 0.3	8.731	3.269	4387.1
$5s13s\ ^1S_0$	44773.6 ± 0.8	9.732	3.268	4333.7
$5s14s\ ^1S_0$	44979.9 ± 0.2	10.735	3.265	4295.3
$5s15s\ ^1S_0$	45134.7 ± 0.5	11.730	3.270	4263.9
$5s16s\ ^1S_0$	45234.7 ± 0.8	12.725	3.275	4245.2
$5s17s\ ^1S_0$	45350.3 ± 0.4	13.733	3.267	4228.0
$5s18s\ ^1S_0$	45426.4 ± 0.7	14.731	3.269	4214.4
$5s19s\ ^1S_0$	45489.1 ± 0.6	15.737	3.263	4203.3
$5s20s\ ^1S_0$	45538.8 ± 0.3	16.732	3.298	4194.5

Table 2 Measured values of E , n^* , δ and λ_2 for the series $5snd\ ^1,^3D_2$ of Sr

Rydberg state	$E(\text{cm}^{-1})$	n^*	δ	$\lambda_2 (\text{\AA})$
$5s9d\ ^1D_2$	43755.7 ± 0.4	7.100	1.900	4533.7
$5s10d\ ^1D_2$	44241.9 ± 0.2	8.057	1.943	4435.9
$5s11d\ ^1D_2$	44578.6 ± 0.4	9.004	1.996	4370.6
$5s12d\ ^1D_2$	44850.1 ± 0.4	9.979	2.021	4323.1
$5s13d\ ^1D_2$	45011.7 ± 0.4	10.919	2.081	4289.4
$5s13d\ ^3D_2$	45037.1 ± 0.6	11.072	1.928	4284.7
$5s14d\ ^1D_2$	45152.7 ± 0.9	11.865	2.135	4253.5
$5s14d\ ^3D_2$	45171.2 ± 0.8	12.008	1.992	4241.3
$5s15d\ ^1,^3D_2$	45238.0 ± 0.9	12.896	2.194	4243.7
$5s15d\ ^1,^3D_2$	45276.6 ± 0.4	12.938	2.062	4241.2
$5s16d\ ^1,^3D_2$	45350.5 ± 0.4	13.729	2.271	4228.0
$5s16d\ ^1,^3D_2$	45362.0*	13.873	2.127	4225.9
$5s17d\ ^3D_2$	45421.0 ± 0.4	14.651	2.349	4215.4
$5s17d\ ^1D_2$	45433.1*	14.829	2.171	4213.2
$5s18d\ ^3D_2$	45479.7 ± 0.5	15.573	2.427	4205.0
$5s18d\ ^1D_2$	45492.5 ± 0.5	15.798	2.242	4202.7
$5s19d\ ^1D_2$	45542.3 ± 0.4	16.776	2.224	4194.0
$5s20d\ ^1D_2$	45584.6 ± 0.7	17.768	2.232	4186.5
$5s21d\ ^1D_2$	45619.7 ± 0.6	18.739	2.261	4180.4
$5s22d\ ^1D_2$	45650.6 ± 0.5	19.740	2.260	4175.0
$5s23d\ ^1D_2$	45678.6 ± 0.6	20.720	2.280	4170.5
$5s24d\ ^1D_2$	45699.3 ± 0.7	21.707	2.293	4166.5
$5s25d\ ^1D_2$	45719.2 ± 0.3	22.698	2.302	4163.1
$5s26d\ ^1D_2$	45736.5 ± 0.2	23.680	2.220	4160.1
$5s27d\ ^1D_2$	45751.8 ± 0.5	24.664	2.336	4157.4

* Sr 的标志谱线^[5].

(continued)

Rydberg state	$E(\text{cm}^{-1})$	n^*	δ	$\lambda_2(\text{\AA})$
$5s28d\ ^1D_2$	45765.2 ± 0.3	25.634	2.366	4155.1
$5s29d\ ^3D_2$	45775.3	26.449	2.551	4153.4
$5s29d\ ^1D_2$	45777.9 ± 0.5	26.668	2.332	4152.9
$5s30d\ ^1D_2$	45788.7 ± 0.7	27.654	2.346	4151.1
$5s31d\ ^3D_2$	45796.3	28.416	2.584	4149.8
$5s31d\ ^1D_2$	45798.5 ± 0.5	28.649	2.351	4149.4
$5s32d\ ^3D_2$	45804.2	29.280	2.720	4148.4
$5s32d\ ^1D_2$	45807.0 ± 0.5	29.606	2.394	4147.9
$5s33d\ ^1D_2$	45815.3 ± 0.7	30.639	2.361	4146.5
$5s34d\ ^3D_2$	45821.3	31.451	2.549	4145.4
$5s34d\ ^1D_2$	45822.7 ± 0.5	31.657	2.343	4145.2
$5s35d\ ^3D_2$	45828.0	32.452	2.548	4144.3
$5s35d\ ^1D_2$	45829.6 ± 0.7	32.704	2.296	4144.0
$5s36d\ ^3D_2$	45834.1	33.446	2.554	4143.8
$5s36d\ ^1D_2$	45835.4 ± 0.7	33.670	2.330	4143.0
$5s37d\ ^3D_2$	45839.5	34.406	2.594	4142.3
$5s37d\ ^1D_2$	45840.7 ± 0.7	34.631	2.369	4142.1
$5s38d\ ^3D_2$	45844.5	35.373	2.627	4141.5
$5s38d\ ^1D_2$	45845.7 ± 0.5	35.618	2.382	4141.3
$5s39d\ ^3D_2$	45848.9	36.307	2.693	4140.7
$5s39d\ ^1D_2$	45850.4 ± 0.5	36.627	2.373	4140.5
$5s40d\ ^1D_2$	45854.7 ± 0.6	37.629	2.371	4139.7
$5s41d\ ^1D_2$	45858.3 ± 0.4	38.809	2.191	4139.1
$5s42d\ ^1D_2$	45862.2 ± 0.8	39.594	2.406	4138.4
$5s43d\ ^1D_2$	45866.2 ± 0.5	40.776	2.224	4137.8
$5s44d\ ^1D_2$	45869.4 ± 0.8	41.792	2.208	4137.2
$5s45d\ ^1D_2$	45871.9 ± 0.8	42.660	2.340	4136.8
$5s46d\ ^1D_2$	45875.0 ± 0.8	43.800	2.200	4136.2
$5s47d\ ^1D_2$	45877.6 ± 0.7	43.831	2.169	4135.8
$5s48d\ ^1D_2$	45879.9 ± 0.6	45.806	2.194	4135.4
$5s49d\ ^1D_2$	45882.7	47.098	1.902	4134.9
$5s50d\ ^1D_2$	45884.9	48.167	1.833	4134.6

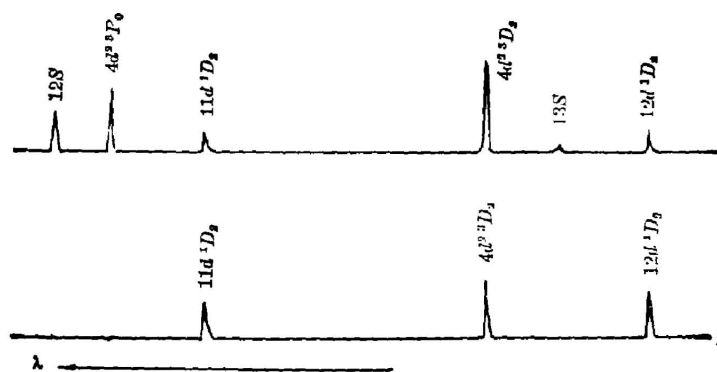


Fig. 4 Photoionization spectra for some Rydberg states

因受 λ_2 线宽的限制, 50 \AA 以上的态不能分辨。

图 4 给出了 λ_1 、 λ_2 为同方向旋转的圆偏振光(下图)和非圆偏振光(上图)时某些里德堡态光电离谱的比较。由图 4 可清楚地看出, λ_1 、 λ_2 为同方向旋转的圆偏振光时 1S_0 、 $4d^2\ ^3P_0$ 态消失或强度明显下降, 这是角动量选择定则所预料的。较强的 $4d^2\ ^3P_0$ 及 $12s$ 峰未完全消失, 是由于我们的圆偏振光实际为椭圆偏振的缘故。其中 1D_2 态强度反而增强, 与文献 [8] 观察的一致。

实验中还记录到 Sr 的 $4d^2\ ^3P_{2,1,0}$ 态, 表 3 列出了实验测得的 $4d^2\ ^3P_{2,1,0}$ 态的能级 E 及 $5s5p \sim 4d^2\ ^3P_{2,1,0}$ 的激发光波长 λ_2 。

Table 3

Rydberg state	Energy level $E(\text{cm}^{-1})$	Wavelength $\lambda_2(\text{\AA})$
$4d^2\ ^3P_0$	44525.9 ± 0.3	4350.7
$4d^2\ ^3P_1$	44595.2 ± 0.5	4367.4
$4d^2\ ^3P_2$	44730.2 ± 0.8	4371.8

本实验系统误差主要来自波长定标, 最大误差产生在离标志谱线较远的高 n 端和低 n 端, 误差范围小于 1 cm^{-1} 。

感谢吴大元副教授对本实验的有益帮助。

参 考 文 献

- [1] 李家明;《物理学报》, 1983, **32**, No. 1 (Jan), 84.
- [2] 张绮香;《物理》, 1981, **10**, No. 5 (May), 273.
- [3] P. Esherick; *Phys. Rev. (A)*, 1977, **15A**, No. 5 (May), 1920.
- [4] J. B. Rubbmark, S. A. Brogstrom; *Phys. Scr.*, 1978, **18**, 196.
- [5] 陆杰, 胡素芬等;《物理学报》, 待发表.
- [6] C. E. Moore; *Atomic Energy Levels*, (NBS, 1971), 190.
- [7] W. E. Cooke, T. F. Gallagher *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1978, **40**, No. 3 (Jan), 178.
- [8] J. A. Armstrong, F. Esherick *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1977, **15A**, No. 1 (Jan), 180.

Energy levels of $5sns$ and $5snd$ Rydberg series of Sr

LU JIE, HU SUFEN, ZHANG SEN AND SUN JIAZHEN
(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou)

(Received 15 July 1985)

Abstract

The $5snd$ and $5sns$ Rydberg series of Sr were selectively excited from the $5s^2 \ ^1S_0$ ground state by using two pulsed tunable dye lasers pumped by the harmonic of a Nd:YAG laser. Afterwards, the Rydberg atoms were photo-ionized by a third laser pulse. The energy levels and quantum defects have been measured for more than seventy Rydberg states of Sr.