

Sr 原子自电离态的电场效应*

邱济真 梅式民 徐云飞 张 森
(浙江大学 物理系, 杭州)

提 要

用多步激发的方法, 将 Sr 原子从基态 $5s^2$ 经价态 $4d^2$ 激发至 $(4d_{3/2}np, nf)_{J=1}$ 和 $(4d_{5/2}np, nf)_{J=1}$ 自电离系列, 观察其在外电场 $0\sim 5\text{ kV/cm}$ 内的光谱。对所观察到的 $n=12, 13, 14$ 附近的斯塔克谱图进行了分析与讨论。

关键词: 自电离态、斯塔克态。

一、引 言

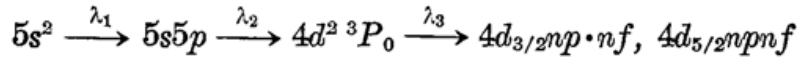
本文在观察和测定 Sr 原子 $(5P_{1/2}ns)_{J=1}$ 、 $(5P_{3/2}ns, nd)_{J=3}$ 系列自电离态和 Sr 原子里德堡态在外电场中的斯塔克 (Stark) 效应的基础上, 观察了 Sr 原子 $(4d_{3/2}np, nf)_{J=1}$ 和 $(4d_{5/2}np, nf)_{J=1}$ 系列的自电离谱及其在外电场中的效应。与作者过去所用的孤立原子实的多步激发方法不同, 在本实验中, 将 Sr 原子从基态 $5s^2$ 激发至 $5s5p$, 然后再激发至价态 $4d^2\ ^3P_0$ 。最后通过第三束激光扫描, 得到在 $5s^+$ 电离限 45932.20 cm^{-1} 以上的 $4d(^2D_{5/2})np\left[\frac{3}{2}\right]^0$ 、 $4d(^2D_{5/2})nf\left[\frac{3}{2}\right]^0_1$ 、 $4d(^2D_{5/2})nf\left[\frac{1}{2}\right]^0_1$ 、 $4d(^2D_{3/2})nf\left[\frac{3}{2}\right]^0_1$ 、 $4d(^2D_{3/2})np\left[\frac{3}{2}\right]^0_1$ 和 $4d(^2D_{3/2})np\left[\frac{1}{2}\right]^0_1$ 等六个自电离系列。这一激发过程有可能得到 l 较大的态。如 nf 系列的光谱, 同时也大大简化了实验步骤, 一次实验可以同时得到这一能量区域内全部六个系列的自电离谱图。Gallagher 等人曾观察 Ba 原子在 $6s^+$ 电离限以上能量区域内 $6P_{1/2}12l$ 斯塔克簇^[1,2], 其方法是 Ba 原子从基态 $6s^2$ 激发至束缚里德堡斯塔克态 $6s12l$, 然后再激发至 $6p12l$ 每一次实验得到一个单一的斯塔克态。而本文则是在上述获得自电离态的步骤基础上, 加上一直流电场, 由第三束光扫描而直接得到能量在 59700 cm^{-1} 至 59950 cm^{-1} 区域内的斯塔克簇及各零场非简并态的能级位移及其与斯塔克簇的相互作用。

二、实 验

Sr 原子束从加热至 750°C 左右的原子炉中射出, 在作用区与三束激光相正交。作用区上下各一平行板电极, 间隔 10 mm 。原子电离后的离子由电子倍增器收集。然后将输出信号送入示波器显示并放大, 再输入 Boxcar 积分平均后, 由 X-Y 记录仪记录。Boxcar 积分常数为 $10\ \mu\text{s}$, 门宽为 $8\ \mu\text{s}$, 详见文献[3]。在观察零场自电离态时, 激发步骤为

收稿日期: 1989年6月2日; 收到修改稿日期: 1990年4月18日

* 国家自然科学基金资助的课题。



此时电极间加一延迟 $0.5 \mu\text{s}$, 60 V 的脉冲电压。观察自电离态的电场效应时, 激发步骤相同, 只是 λ_3 扫描得到的是斯塔克谱图。此时电极间加上 $0 \sim 5 \text{ kV/cm}$ 的直流电场。第一束激光 $\lambda_1 = 4609 \text{ \AA}$, 由 YAG 激光器的三倍频光泵浦一台香豆素 460 染料激光器获得, $\lambda_2 = 4380.7 \text{ \AA}$, 由同一激光器泵浦香豆素 450 染料激光器获得, 第三束激光 λ_3 则在 6500 \AA 左右 200 \AA 范围内扫描, 它是由同一台 YAG 的倍频光泵浦 LDS 染料激光器而得到的。激光线宽 $< 0.2 \text{ \AA}$, 重复率为 10 pps 。观察电场效应时, λ_3 的光路中加一平行于外场方向的线偏器, 从而得到 $m=0$ 的斯塔克簇。实验中, 用氖的光电流谱作为波长的绝对标识, 标准具的干涉谱用于对波长定标。考虑到其他多光子激发过程有可能存在, 所以在测定零场自电离态能级时, 将第二束激光遮住, 得到由 λ_1 单光子和 λ_3 双光子激发而得到的 $5p^2$ 两条谱线, 从而将它们从自电离谱中分辨出来。

在观察 Ca 的里德堡态的电场效应的实验中, 发现价态 $3d^2 \ ^3P_0$ 和 $3d^2 \ ^3P_2$ 随电场 F 的增大 ($F > 1.5 \text{ kV/cm}$) 明显受到 $n=12$ 的斯塔克簇的排斥, 能级位置发生偏移。因而, 在本实验中, 在所观察的电场范围内, 对 Sr 原子的 $4d^2 \ ^3P_0$ 的能级位置进行了测定, 并与零场中 $4d^2 \ ^3P_0$ 的位置进行比较, 得出了该能级在这一电场范围内不发生偏移的结论, 因而, 在描绘斯塔克谱图时无需进行能级校正。

三、结果与分析

根据所得谱线的线型、强度及所对应的能级的量子亏损和有关的参考文献^[4,5], 将观察到的零场自电离态归入 $4d(^2D_{5/2})np \left[\frac{3}{2} \right]_1^0$ 、 $4d(^2D_{5/2})nf \left[\frac{3}{2} \right]_1^0$ 、 $4d(^2D_{5/2})nf \left[\frac{1}{2} \right]_1^0$ 、 $4d(^2D_{3/2})nf \left[\frac{3}{2} \right]_1^0$ 、 $4d(^2D_{3/2})np \left[\frac{3}{2} \right]_1^0$ 和 $4d(^2D_{5/2})np \left[\frac{1}{2} \right]_1^0$ 等六个自电离系列, 确定了它们的能级位置, 计算其有效量子数 n^* 。此外, 实验还得到一组尚未能确定电子组态的能级数据, 按照收敛于电离限 60768.2 cm^{-1} 计算出其有效量子数, 初步认为它们是一组 $4d_{5/2}nl$ 自电离态。但只根据这一实验难以确定 l 值。按照偶极跃迁选择定则所允许的六个系列均已得到, 所以有可能这一自电离系列是由于 $4d^2$ 价态是混合态而产生, 这点有待于其他实验进一步验证。从谱图中还可看到 np 系列的谱线明显表现出不对称的 Beutler-Fano 线型, 而相比之下, nf 系列的谱线则显示出是较为对称的。从这里也可以得到不同自电离态与连续态相互作用及它们之间相互作用程度的信息。表 1 给出了观察斯塔克谱图所在的能量范围内的有关数据, 全部数据和分析见另文。

图 1 是当外加电场为 $0 \sim 5 \text{ kV/cm}$ 时, 能量在 50700 cm^{-1} 至 59950 cm^{-1} 范围内, $n=12, 13, 14$ 的斯塔克谱图。与过去观察到的碱金属 Na 及碱土金属 Sr、Ca 里德堡态斯塔克谱图相比^[6~8], 其共同点为: 当电场 F 不太大时 ($F < 1/3n^5$), 斯塔克态仍满足 $E = [(-1/2n^2) + (3/2)n(n_1 - n)F]$ 的关系式, 表现出线性斯塔克簇。相邻斯塔克态能级间隔仍为 $\Delta E = 3nF$, 如图 2 所示。簇内部分斯塔克态由于与邻近的偶极跃迁态混合不足及可能存在的通道跃迁矩的干涉而未出现或谱线强度减弱。因而观察到的斯塔克态的数目小于 $(n-3)$ (除

Table 1 Energy levels of Sr atom

number	configuration	energy level (cm^{-1})	effective quantum number
1	$4d(^2D_{3/2})15p[3/2]_1^{\circ}$	59761.1	12.285
2	$4d(^2D_{3/2})16p[3/2]_1^{\circ}$	59871.6	13.341
3	$4d(^2D_{3/2})17p[3/2]_1^{\circ}$	59947.8	14.251
4	$4d(^2D_{3/2})15p[1/2]_1^{\circ}$	59761.1	12.285
5	$4d(^2D_{3/2})16p[1/2]_1^{\circ}$	59865.4	13.274
6	$4d(^2D_{3/2})17p[1/2]_1^{\circ}$	59947.8	14.251
7	$4d(^2D_{3/2})12f[3/2]_1^{\circ}$	59721.1	11.960
8	$4d(^2D_{3/2})13f[3/2]_1^{\circ}$	59829.0	12.903
9	$4d(^2D_{3/2})14f[3/2]_1^{\circ}$	59925.5	13.966
10	$4d(^2D_{5/2})13p[3/2]_1^{\circ}$	59740.3	10.330
11	$4d(^2D_{5/2})14p[3/2]_1^{\circ}$	59906.8	11.282
12	$4d(^2D_{5/2})10f[3/2]_1^{\circ}$	59662.1	9.958
13	$4d(^2D_{5/2})11f[3/2]_1^{\circ}$	59829.0	10.807

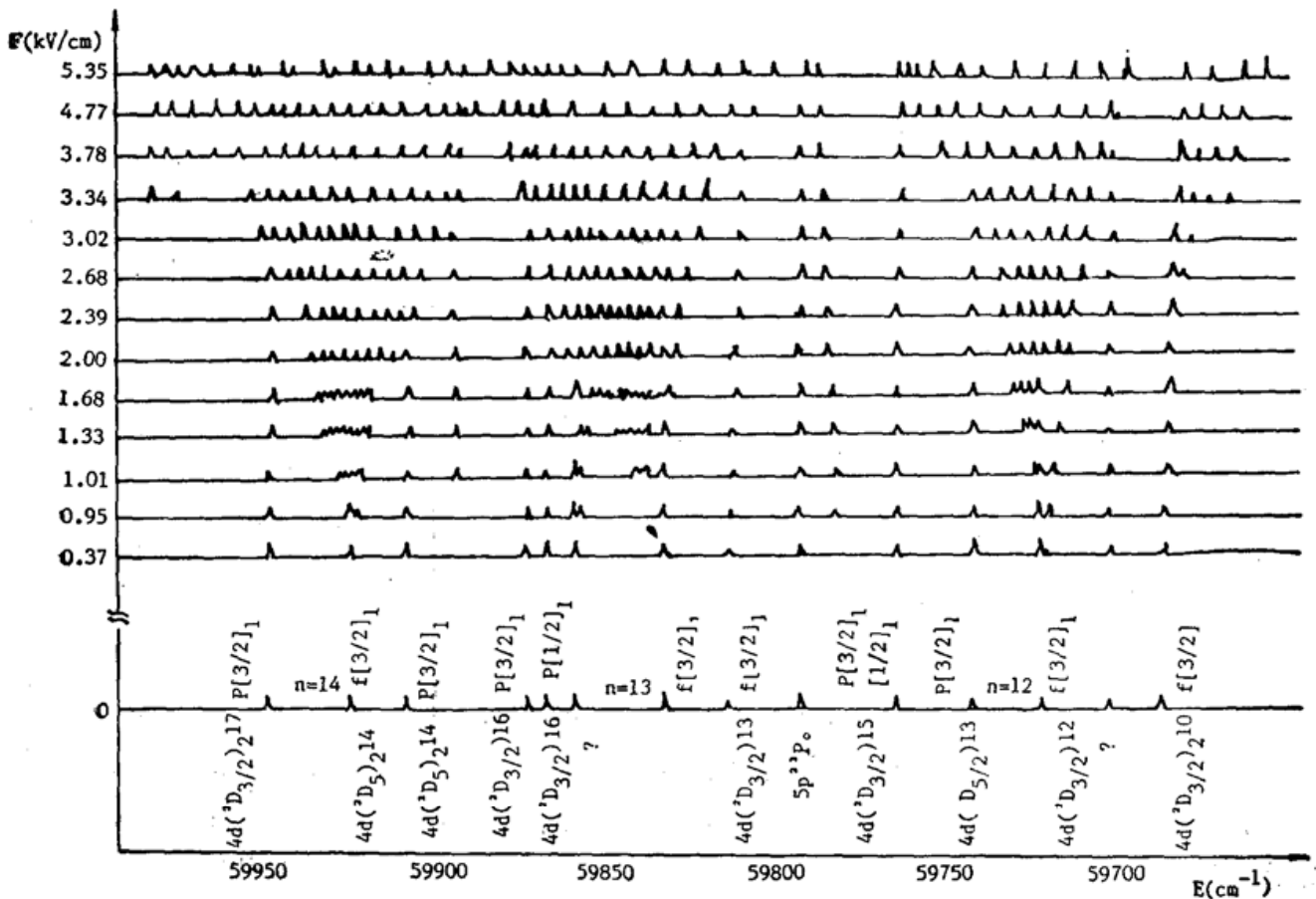


Fig. 1 Stark map of autoionizing states of Sr “?”— states with uncertain configuration

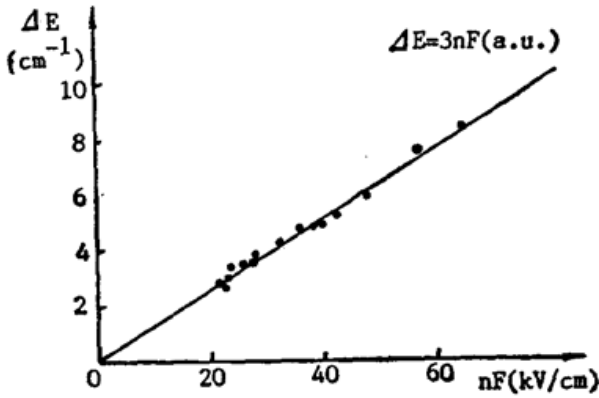


Fig. 2 Separation of Stark levels of Sr atoms "..." observed dates for $n=12, 13, 14$ the line is determined by $\Delta E=3nF(\text{a.u.})$

用双光子激发使 Sr 原子从基态至 $5s7s$, 然后再由第二束激光扫描得到的 $n=12$ 的斯塔克态的结果是一致的。对于 $n=14$ 的斯塔克簇, 完全类似地可看到 F 增大时, $4d15d$ 出现并逐渐并入斯塔克簇。而对于 $n=13$ 这一簇, 由于零场测得的 $4d13f$ 的量子亏损 $\delta_f=0.1$ (大于 $12f, 14f$ 的量子亏损 $\delta_f=0.04$), 因而加上外电场时, $4d14d$ 未能明显观察到, 极有可能与 f 态简并, 然后随 F 增大而混合在斯塔克簇内。

$4d(^2D_{3/2})np \left[\frac{3}{2} \right]_1^0$ 的量子亏损 $\delta_p=2.73$ 。当 F 较小时, 斯塔克位移不明显, 随着 F 增大, 能级发生位移, 表现出二阶斯塔克效应, 这一特性与里德堡态电场效应是类似的。在 $15p$ 和 $16p$ 附近, 当 F 增大至 1 kV/cm 左右, 各出现一个态, 可以初步断定这是 $4d16s$ 和 $4d17s$ 态, 其量子亏损 $\delta_s=3.45$ 。在 F 不是太大时, s 态基本不发生偏转。 s 态在零场中同样是禁迁的, 因而它的出现必然是由于与 p 态的混合。从图 3 中很明显地看到, 随着 F 的增大, s 态峰值不断增大, 而 p 态则由于通道间干涉及斯塔克混合而峰值变小、变宽, 逐渐混入斯塔克簇内。

需要说明的一点是图 1 给出的斯塔克簇所对应的 n 的数值是对于 $4d_{3/2}^+$ 电离限 60487.9 cm^{-1} 来确定的。对应于 $4d_{5/2}^+$ 电离限, 在相应能量范围内 ($E=59861.3 \text{ cm}^{-1}$ 附近) 应存在一个 $n=11$ 的斯塔克簇。由于实验从零场自电离态的谱图中观察到收敛于 $4d_{3/2}^+$ 的各态峰值均较小, 说明 $4d$ 电子中 $j=5/2$ 的成分较小, 因而这一斯塔克簇不明显。且由于 n 较小。只在 F 较大时才出现。

经济态激发上去通道数较多, 通道间组态相互作用较为复杂。本实验提供了部分组态

去零场中非简并的 s, p, d 三态)。这些共同点表明, 虽然本实验中外层电子为激发态 $4d$, 而不是基态 $5s$, 但当 n 较大时, 外场对原子能级结构仍起主导作用, 表现出类氢的斯塔克结构。

对于 $n=12$ 的斯塔克簇, 当 $F \approx 1 \text{ kV/cm}$ 时, 可以看到由于与 $4d(^2D_{5/2})12f \left[\frac{3}{2} \right]_1^0$ 态的混合, 在它右边出现了在零场中按照偶极跃迁选择定则禁迁的 $4d13d$ 态, 其量子亏损 $\delta_d=1.04$ 。随着电场 F 逐渐增大, $4d13d$ 并入斯塔克簇内。这一结果与 Freeman 等人^[9]

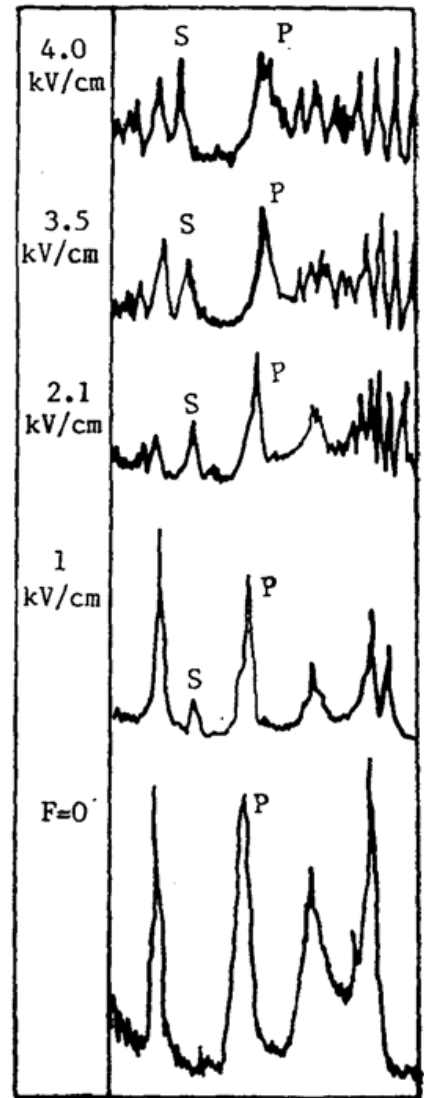


Fig. 3 Comparison of S and P states in different fields

相互作用及其随电场变化的信息。对于这些信息的研究有待于进一步的理论分析和实验测定。

参 考 文 献

- [1] K. A. Safinya, J. F. Delpech *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1980, **A22**, No. 3 (Sep), 1062~1071.
- [2] S. M. Jaffe *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1984, **A30**, No. 4 (Oct), 1828~1835.
- [3] 陆杰等;《光学学报》,1986, **6**, No. 5 (May), 469~470.
- [4] W. R. S. Garton, K. Codling; *J. Phys. (B)*, 1968, **2**, No. 1 (Jan), 106~113.
- [5] C. M. Brown, M. S. Longmire *et al.*; *J. O. S. A.*, 1983, **73**, No. 8 (Aug), 985~988.
- [6] 邱济真等;《光学学报》,1988, **8**, No. 3 (Mar), 212~215.
- [7] 张森等;《物理学报》,1988, **37**, No. 6 (Jun), 983~988.
- [8] 张森等;《物理学报》,1989, **38**, No. 3 (Mar), 481~486.
- [9] R. R. Freeman, G. C. Bjorklund; *Phys. Rev. (A)*, 1978, **A40**, No. 2 (Jan), 118~121.

Electric field effects on autoionizing states of Sr atom

QIU JIZHEN, MEI SHIMING, XU YUNFEI AND ZHANG SEN

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou)

(Received 2 June 1989; revised 18 April 1990)

Abstract

By using the multi-step excitation technique, Sr atoms are excited from ground state $5S^2$ to $(4d_{3/2}np, nf)_{J=1}$ and $(4d_{5/2}np, nf)_{J=1}$ autoionizing states via valence state $4d^2\ ^3P_0$. Their Stark spectra near $n=12, 13, 14$ in an electric field of $0\sim 5$ kV/cm are observed and discussed.

Key words: autoionizing state; Stark state.