

## 铯 Rydberg 原子 Stark 态的避免交叉\*

王丽梅 张好 李昌勇 赵建明<sup>†</sup> 贾锁堂

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学激光光谱实验室, 太原 030006)

(2012年6月12日收到; 2012年8月9日收到修改稿)

在磁光阱中利用双光子激发制备 49S 铯 Rydberg 原子, 研究了超冷 49S 态原子在外加电场中的 Stark 效应和  $nS$  态原子与  $(n-4)$  多重态之间的避免交叉现象. 利用态选择脉冲场电离方法测量并获得了避免交叉点附近的离子谱, 测量了避免交叉点附近离子谱的变化情况, 并观察到避免交叉点附近由相互作用导致的态转移现象.

关键词: Rydberg 原子, 避免交叉, Stark 效应

PACS: 32.80.Ee, 32.80.Xx, 32.60.+i

DOI: 10.7498/aps.62.013201

## 1 引言

Rydberg 原子是外层电子被激发到主量子数很大 ( $n \gg 1$ ) 的激发态原子, 具有相互作用强 ( $n^4$ ), 辐射寿命长 ( $n^3$ ), 极化率大 ( $n^7$ ) 等奇特性质<sup>[1]</sup> 因而一直受到人们的广泛关注. 借助于激光冷却技术, 人们可制备超冷 Rydberg 原子. 在实验的时间尺度内, 与原子间距相比, 原子移动的距离可以被忽略, 超冷 Rydberg 原子被认为是冷冻的 Rydberg 气体 (frozen Rydberg gas), 从而可以更好地观测 Rydberg 原子之间的强相互作用产生的效应, 成为近年来研究的热点. 特别是超冷 Rydberg 原子系统中, 两个相邻 Rydberg 原子之间由于强偶极-偶极相互作用产生的偶极阻塞效应<sup>[2-7]</sup>, 使 Rydberg 原子成为实现可控量子逻辑门和量子信息处理潜在的备选介质<sup>[8]</sup>.

Rydberg 原子具有较大的极化率, 极易受到外加电场的影响. 而碱金属原子由于其离子实被 Rydberg 电子极化和贯穿, 导致在外加电场中低  $-l$  态能级与多重态能级产生耦合, 从而产生能级的避免交叉现象. 1986 年, Stoneman 小组利用 300 K 的黑体辐射研究了钾原子 Rydberg 态的避免交叉谱<sup>[9]</sup>.

1995 年, Gallagher 小组观测到 Cs 原子  $(n+4)S$  态和主量子数为  $n$  ( $20 < n < 24$ ) 的 Stark 能级中最低的三个能级之间的避免交叉现象<sup>[10]</sup>. 2009 年, 美国 Shaffer 小组观测到束缚在核间距约为 3—9  $\mu\text{m}$  的冷 Cs Rydberg 大分子<sup>[11]</sup>, 该束缚态分子是利用 Rydberg 原子能级由外加电场导致的避免交叉所产生的势阱而形成, 通过调节外加电场可以控制 Rydberg- 原子分子之间的相互作用.

本文由双光子激发超冷原子获得 49S 超冷 Cs Rydberg 原子, 利用脉冲场电离技术探测离子信号. 改变所加电场的大小研究了 49S 超冷 Cs Rydberg 态在外加电场的中的 Stark 效应, 观察到 49S 原子与多重态产生的避免交叉现象. 并通过和理论计算的 Stark 谱相对比, 解释了在避免交叉处离子谱信号发生变化的原因和机理.

## 2 实验装置

文献 [12,13] 已经详细地描述了该实验装置. 现简述如下: 将 Cs 原子俘获在一个标准的 MOT 中, 背景压强约为  $1 \times 10^{-8}$  Pa. 通过激光冷却技术, 约  $10^7$  个 Cs 原子被冷却到约 100  $\mu\text{K}$ , 其高斯半径约为 300  $\mu\text{m}$ , 最大原子密度为  $10^{11}$   $\text{cm}^{-3}$ . 双光子激

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB921603)、国家国际科技合作专项 (批准号: 2011DFA12490) 和国家自然科学基金 (批准号: 10934004, 60978018, 61078001, 60978001) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zhaojm@sxu.edu.cn

发超冷 Cs 原子到 Rydberg 态, 第一步激发由冷却光提供, 产生  $6S_{1/2} (F = 4) \rightarrow 6P_{3/2} (F' = 5)$  的跃迁, 冷却光由波长调谐范围可覆盖 Cs 原子  $D_2$  线的光栅反馈半导体激光器 (Toptica, DL100) 提供, 输出波长为 852 nm, 线宽小于 1 MHz. 第二步激发实现  $6P_{3/2} \rightarrow nS$  的跃迁, 由一台连续倍频绿光激光器 (Toptica, TASHG110) 提供. 它由一个外腔半导体激光器输出光经放大到最大功率为 1 W, 然后倍频输出 510 nm 的激光, 线宽小于 2 MHz, 连续可调谐范围 30 GHz. 整个时序的重复率为 10 Hz, 由信号延迟发生器 (DG645) 控制其时序, 如图 1 所示.

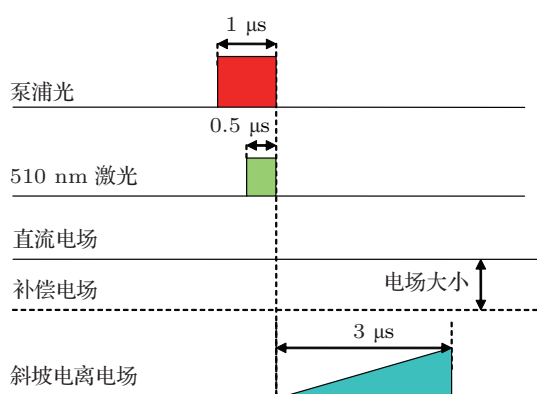


图 1 时序控制图

MOT 中心有两个相距 15 mm 的栅极. 当激发光脉冲关断后, 在其中一个栅极上施加高压斜坡电场电离初始产生的  $nS$  态 Rydberg 原子. 另一个栅极上加弱的直流电场用于补偿 MOT 中的残余电场, 同时施加直流电场研究 Rydberg 原子的 Stark 效应. 场电离离子信号由微通道板 (MCP) 探测, 通过门积分平均器 (Boxcar) 对信号进行取样平均, 得到的平均信号进入计算机由数据采集卡 (PCI-1714, Advantech) 记录. 实验中通过调节第二步激发光主激光器的光栅来改变 510 nm 激光的频率, 激发不同主量子数的 Rydberg 原子. 输出激光的波长由波长计 (High Finesse-Angstrom, WSU-30) 进行测量.

### 3 实验结果和分析

我们将第二步激发光的频率调谐到  $6P \rightarrow 47S$  的跃迁附近, 扫描激发光频率, 测量不同外加电场下的离子谱. 图 2(a) 是基于能量矩阵对角化的理论<sup>[14]</sup> 计算出的 Cs Rydberg 原子 47S 附近的 Stark 能级图, 图 2(b) 所示为测量的 Rydberg 原子数与电

场的依赖关系, 从图中可见, 随着电场的变化, 测量的原子数会在某几个电场处突然减少. 与图 2(a) 的 Stark 谱相比, 发现原子数突然减少的电场与 Stark 谱中的避免交叉点相对应 (如图中三条竖直虚线所示). 由此可推断, 该现象是由于在避免交叉点处不存在与激发光共振的能级导致原子的激发几率减小的缘故. 实验测得的避免交叉点和理论计算的 Stark 能谱的避免交叉点所对应的电场基本符合, 但计算的避免交叉点对应的电场值与测量结果有一些微小的差别, 其原因可能是: 1) 理论计算的是一个 Cs Rydberg 原子在电场下的 Stark 效应, 而实验中所激发的 Rydberg 原子数是原子系综的结果; 2) 实验中补偿电场的测量所引起的误差, 实验中所加的补偿电场只能补偿水平方向的电场, 竖直方向的电场由于 MOT 中栅极的限制没有补偿, 因此 MOT 中存在的竖直方向的杂散电场可能会对测量结果产生影响.

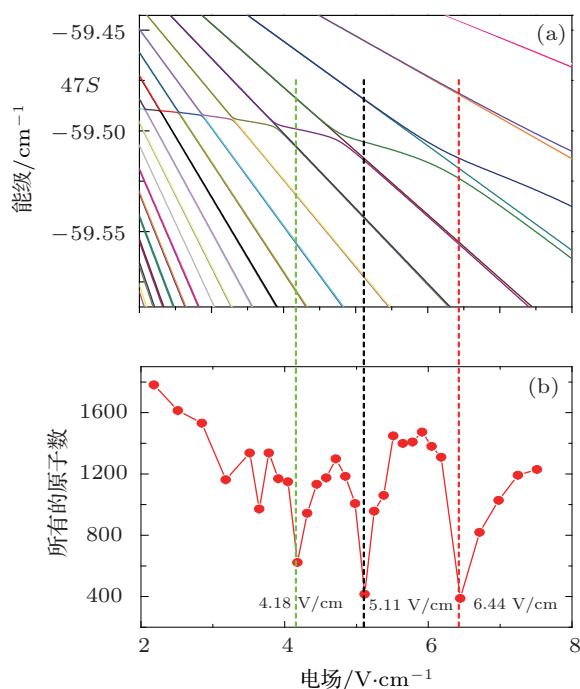


图 2 (a) 理论计算的外电场中 47S 和  $n = 43$  多重态能级附近的 Stark 谱; (b) 实验测得的 47S 总原子数随着电场的变化情况. 三条竖直的虚线表明在 4.18, 5.11 和 6.44 V/cm 处测得的原子信号的减小, 分别对应 Stark 谱的三个避免交叉点

为了进一步研究 Stark 态避免交叉点的特性, 将原子激发到 49S 态, 详细研究外加电场为 6.0 V/cm 附近的避免交叉现象, 结果如图 3 所示. 图 3(a) 中给出理论计算的 Cs Stark 谱中 49S 与主量子数为 45 的高  $-l$  态能级的避免交叉; 图 3(b) 和 (c) 分别为外加电场是 5.38 和 6.11 V/cm 时测得的相应

于图 3(a) 中 A (A') 和 B (B') 两个 Stark 态的离子谱. 可以看出, 测量的两个离子谱中各自两个信号峰的中心频率差基本与理论计算结果相符合 (如图中 4 条水平虚线所示). 从离子信号的相对强度粗略来看, 随着电场的变化, A 和 B 能级的原子布居数发生相应的变化.

为了更加详细地研究避免交叉处 A 与 B Stark 态的变化过程, 我们测量了更多电场下 A 和 B 两能级对应的离子谱, 得到能级间隔 (图 4(a)) 以及总的

原子数 (图 4(b)) 随电场的变化关系. 从图中可以看出: A 和 B 两能级对应的信号中心频率差即能级间隔  $\Delta x_c$  在实验所测的电场范围内出现先减小后增大的趋势, 其中对应的最小  $\Delta x_c$  为 240 MHz,  $\Delta x_c$  反映了电场引起原子能级间耦合强度的大小. 同时对应 A Stark 态测得的原子总数增大, B Stark 态测得的原子总数减小的趋势, 证明了由于电场的作用导致  $nS$  态能级与  $(n-4)$  多重态能级形成了避免交叉点, 以及经过避免交叉点时两态的变化过程.

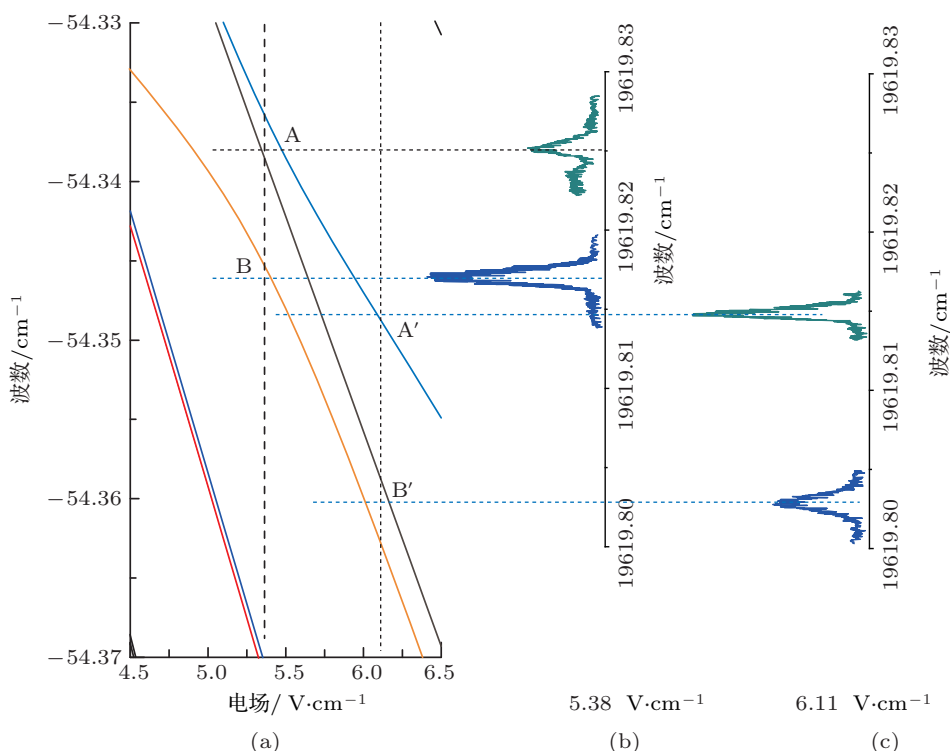


图 3 (a) 49S 在电场为 5.38 V/cm 附近的避免交叉; (b) 和 (c) 分别对应电场为 5.38 和 6.11 V/cm 处的离子谱信号. 测得的离子谱峰值频率间隔与理论计算基本符合 (如水平虚线所示)

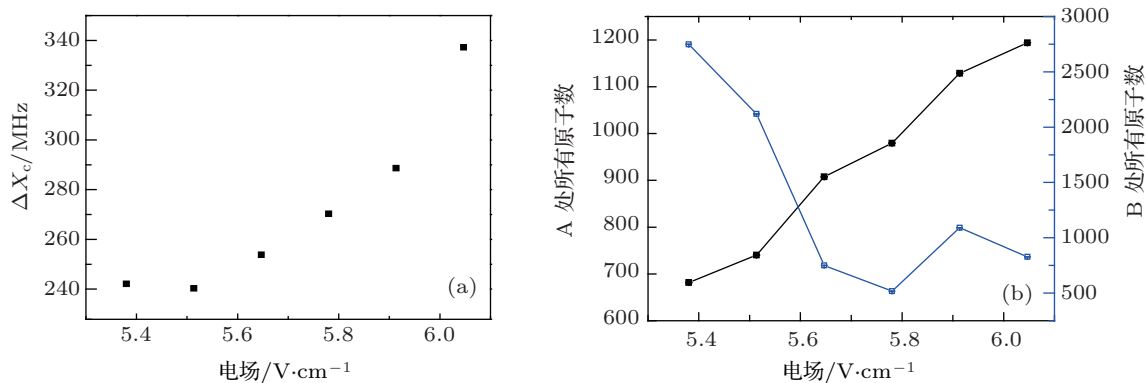


图 4 49S Rydberg 态在电场中回避交叉处相应于图 3(a) 中 A 和 B Stark 态中心频率差  $\Delta x_c$  (a), 原子数 (b) 与电场的依赖关系

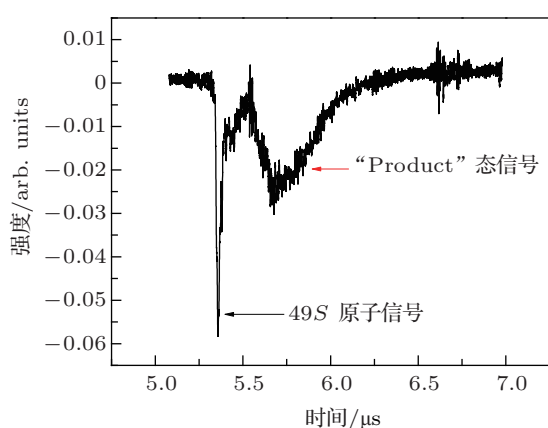


图5 49S Rydberg 态在电场强度为 5.38 V/cm 时的 TOF 信号, 第一个主峰为 49S 态的信号, 第二个峰为由于电场的作用产生的“Product”态的信号

实验中, 我们发现在电场的作用下初始激发的  $nS$  态原子经避免交叉可跃迁到高  $-l$  态. 图 5 所示为初始激发到 49S Rydberg 态在电场强度为 5.38 V/cm 时的时间飞行 (TOF) 信号. 在主信号 49S 的旁边产生了一个“Product”态, 实验测量的“Product”态的电离阈值远大于 49S 态的电离阈值. 研究发现, 它的产生依赖于外加电场的大小, 并且只有当外加电场大于 49S 与  $n = 45$  的多重态第一避免

交叉点对应的电场时才能观察到“Product”态的产生. 由此说明“Product”态的产生与 Rydberg 原子的 Stark 效应以及由此产生的避免交叉现象有关, 我们将另文详细研究这种现象. 我们可以利用这种新的实验方法克服禁界跃迁的限制来制备高  $-l$  态的原子, 同时我们也可以研究态转移制备的高  $-l$  态原子之间的相互作用以及它们在电场中的可控性.

## 4 结论

本文主要观测了超冷 Cs Rydberg 原子 49S 态在电场为 6.0 V/cm 附近离子谱的变化特征, 通过与理论计算的 Stark 谱对比, 分析了外电场作用下的  $nS$  态原子与主量子数为  $(n-4)$  高  $-l$  态相互作用导致的避免交叉现象. 并在实验中观察到由避免交叉产生的态转移现象, 这种现象提供了一种制备高  $-l$  态的方法, 为制备和研究高  $-l$  态原子之间的相互作用提供了新的实验手段. 另一方面, 在外电场产生的避免交叉点附近可以形成束缚势阱而形成巨型 Rydberg 分子<sup>[11]</sup>, 所以本文的研究为进一步研究形成超冷巨型 Rydberg 分子具有重要的意义.

- [1] Gallagher T F 1994 *Rydberg Atoms* (Cambridge: Cambridge University Press) p25
- [2] Gaëtan A, Miroshnychenko Y, Wilk T, Chotia A, Viteau M, Comparat D, Pillet P, Browaeys A, Grangier P 2009 *Nature Phys.* **5** 115
- [3] Urban E, Johnson T A, Henage T, Isenhower L, Yavuz D D, Walker T G, Saffman M 2009 *Nature Phys.* **5** 110
- [4] Comparat D, Pillet P 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** A 208
- [5] Tong D, Farooqi S M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 063001
- [6] Vogt T, Viteau M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 083003
- [7] Vogt T, Viteau M 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 073002
- [8] Jaksch D, Cirac J I, Zoller P, Rolston S L, Côté R, Lukin M D 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2208
- [9] Stoneman R C, Janik G, Gallagher T F 1986 *Phys. Rev. A* **34** 2952
- [10] Nosbaum P, Bleton A, Cabaret L, Yu J, Gallagher T F, Pille P 1995 *J. Phys. B* **28** 1707
- [11] Overstreet K R, Schwettmann A, Tallant J, Booth D, Shaffer J P 2009 *Nature Phys.* **5** 581
- [12] Zhang L, Feng Z, Zhao J, Li C, Jia S 2010 *Opt. Express* **18** 11599
- [13] Feng Z, Zhang H, Che J, Zhang L, Li C, Zhao J, Jia S 2011 *Phys. Rev. A* **83** 042711
- [14] Zimmerman M L, Littman M G, Kash M M, Kleppner D 1979 *Phys. Rev. A* **20** 2251

# Observation of the avoided crossing of Cs Rydberg Stark states\*

Wang Li-Mei Zhang Hao Li Chang-Yong Zhao Jian-Ming<sup>†</sup> Jia Suo-Tang

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Laser Spectroscopy Laboratory, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 12 June 2012; revised manuscript received 9 August 2012)

## Abstract

The Stark effect of ultra-cold Cs Rydberg atom is investigated in a magneto-optical trap, and the avoided crossing between  $nS$  state and  $(n-4)$  manifold is observed. The ion spectrum near the avoided crossing is obtained by using state-selective field pulse ionization technique. By changing the intensity of the applied electric field, we find that the relative intensities of two Stark states near the avoided crossing exchange obviously. Furthermore, state transfer from  $nS$  Rydberg state to high- $l$  state due to the avoided crossing is also obtained.

**Keywords:** Rydberg atom, Stark effect, avoided crossing

**PACS:** 32.80.Ee, 32.80.Xx, 32.60.+i

**DOI:** 10.7498/aps.62.013201

---

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB921603), International Science and Technology Cooperation Program of China (Grant No. 2011DFA12490) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10934004, 60978018, 61078001, 60978001).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zhaojm@sxu.edu.cn