

超冷 nS Rydberg 原子的态转移*

王勇 张好 陈杰 王丽梅 张临杰 李昌勇 赵建明† 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10月27日收到; 2013年1月7日收到修改稿)

本文从实验上研究了超冷 nS Rydberg 原子在外电场脉冲作用下的态转移现象. 采用双光子激发超冷基态原子制备超冷 Rydberg 原子, 通过脉冲场电离法探测超冷 Rydberg 原子的离子信号, 实验研究了由外加脉冲电场产生的 nS 能级和多重态的避免交叉, 获得了在外电场脉冲作用下 nS 态原子的态转移现象, 实验与理论计算的结果相一致.

关键词: Rydberg 原子, 态转移, 能级避免交叉

PACS: 32.80.Rm, 32.60.+i

DOI: 10.7498/aps.62.093201

1 引言

Rydberg 原子是指具有很高主量子数 (n) 的激发态原子. Rydberg 原子具有原子半径大, 电偶极矩大以及原子寿命长等特点, 同时由于外层电子的弱束缚, 很容易受到外场的干扰^[1]. 这些特性使得 Rydberg 原子在原子分子物理的研究中经久不衰. 上世纪 70 年代可调谐染料激光器的问世可以使人们获得确定激发态的 Rydberg 原子, 为进一步研究其强相互作用以及其他相关特性奠定了坚实的基础. 热原子样品由于热运动动能远大于 Rydberg 原子间的强相互作用能, 阻止了 Rydberg 原子的进一步研究进展. 借助于激光冷却与俘获技术我们可以制备超冷 Rydberg 原子, 热运动被大大地减弱, 在实验的时间尺度内可认为原子是静止的, 这时 Rydberg 原子的动力学过程主要由原子间的相互作用来确定. 同时由于超冷 Rydberg 原子在量子信息存储和量子计算方面潜在的应用前景^[2], 使超冷 Rydberg 原子间相互作用的研究受到广泛的关注.

Rydberg 原子具有很大的极化率, 与 n^7 成正比, 对电场极其敏感. 人们可用电场精确调节原子能级, 产生 Förster 共振^[3-5], 增强 Rydberg 原子间相互作用

用^[6], 并获得一些不能直接用激光激发的 Rydberg 态^[7,8]. 另外一个重要的特点是电场的 Stark 频移使低 $-l$ (l 为角动量量子数) Rydberg 态和它附近的多重态能级相重叠形成能级的避免交叉. Zimmerman 等^[9] 数值计算了碱金属原子的 Stark 能谱, 我们研究组也对 Cs 原子 Rydberg 态的 Stark 效应做了研究^[10] 并测量了 nD 态原子的极化率. 由于碱金属原子具有较大的量子亏损, 在能级交叉处产生避免交叉现象. Chao 等^[11] 通过数值计算, 分析了静电场中氢原子 Rydberg 态的 l 混合的动力学过程. Sun 等^[12] 研究了离子束与钠 Rydberg 低 l 态原子的相互作用, 结果表明重新分布产生的高 l 态与离子或电子束的速度有密切的关系. 利用含时的经典方程精确求解获得了氢原子由 nl 态到 nl' 态的跃迁概率^[13].

本文在超冷 ^{133}Cs 原子磁光阱中, 采用两步激发获得超冷 nS 态 Rydberg 原子, 用选择脉冲场电离的方法获得 Rydberg 原子的离子信号, 改变外加电场脉冲研究外场引起的 nS 态原子与多重态的能级交叉以及态转移现象^[14].

2 实验装置

实验装置如图 1(a) 所示^[15,16], 我们在磁光阱

* 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 (2011DFA12490), 国家自然科学基金 (批准号: 11274209, 10934004, 60978018, 61078001) 和国家基础科学人才培养基金 (批准号: J1103210) 和山西省自然科学基金 (批准号: 2012011003-2) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhaojm@sxu.edu.cn

中利用激光冷却与俘获技术制备超冷铯原子^[17,18]. 两步激发超冷原子得到超冷铯 Rydberg 原子. 其中, 第一步激发光实现 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ 的跃迁, 由俘获冷原子的波长为 852 nm 的半导体激光器提供, 第二步激发光实现 $6P_{3/2} \rightarrow nS_{1/2}$ 的跃迁, 由输出波长为 510 nm 的连续倍频绿光激光器提供. 在磁光阱中心有一对间距为 15 mm 的平行栅极板, 在其中一个栅极上施加一个斜坡电场, 电离 Rydberg 原子, 产生的离子在电场作用下加速到微通道板探测器 (MCP) 上, 探测 Rydberg 原子的离子信号. 在另一个栅极上施加一个脉冲电场用以研究 nS 态原子的 Stark 效应和态转移现象, 同时减弱直流电场补偿杂散电场的影响. 探测的信号送入积分平均器 (Boxcar) 进行数据处理, 并由计算机记录, 示波器监视. 由两个数字延迟脉冲发生器 (DG535) 来触发和控制整个实验过程. 图 1(b) 是实验的时序控制示意图. 第二步激发光 510 nm 的激光制备超冷 Rydberg 原子后, 施加脉冲宽度为 1 μs 的电场脉冲, 用于研究 nS 态原子的 Stark 效应和态转移现象. 然后由脉冲场电离法探测离子信号.

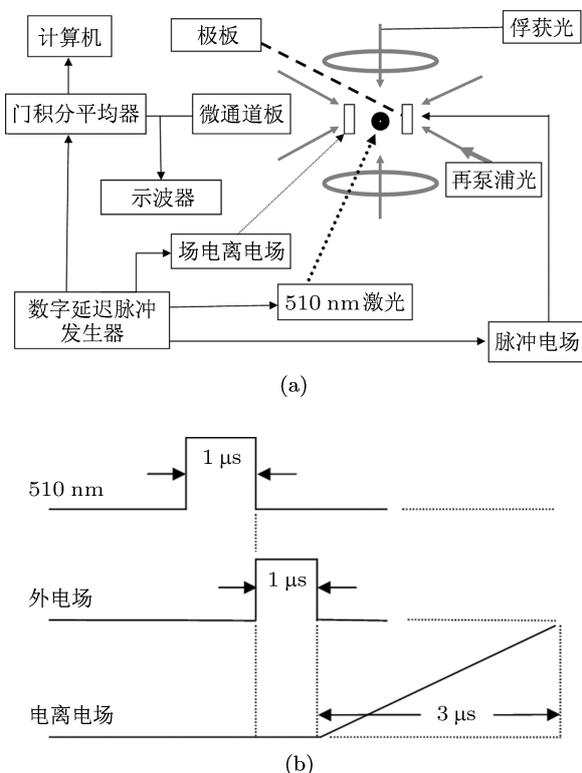


图 1 实验装置 (a) 和时序控制; (b) 示意图

3 实验结果与分析

如图 2 是实验中三个不同电场脉冲条件下观

测到的 49S 态 Rydberg 原子的飞行时间谱 (TOF) 图. 图中红色虚线的位置为自由离子信号, 虚线框中的信号为 49S 态信号, 阴影区域的信号表示由于电场的 Stark 效应和态混合产生的新态信号 (Product state), 用 “P” 表示该信号. “P” 态对应于较大的电离阈值电场. 当没有电场或所加电场较小的时候, 我们得到一个干净的 S 态信号 (如图 2 中黑色实线所示). 只有当脉冲电场的电压增大到一定值的时候才可以观察到 “P” 态信号 (如图中的红色虚线), 随着电场的增加, “P” 态信号逐渐增大, 如图 2 中的蓝色点化线所示.

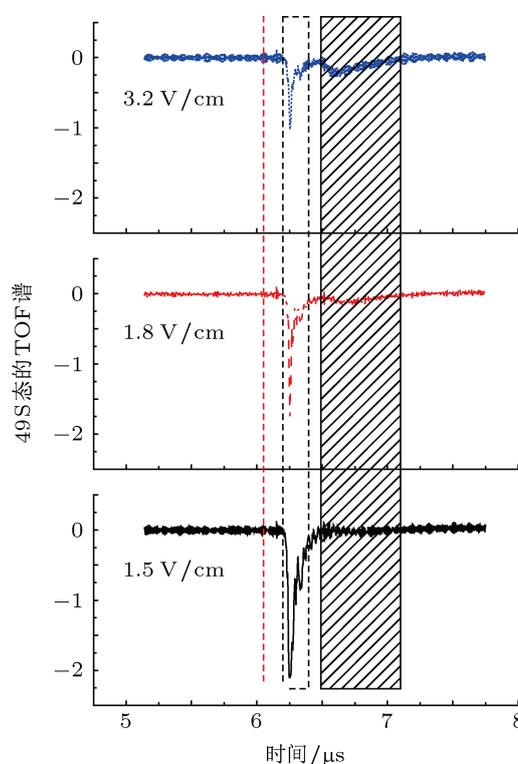


图 2 三种脉冲电场条件下 49S 态原子的 TOF 谱 (虚线, 虚线框和阴影区分别表示自由离子, 49S 态和 “P” 态信号的位置)

为了进一步了解 “P” 态信号产生的机制, 我们采用数值方法计算了 Cs 原子 49S 态能级附近的 Stark 能谱^[9,10], 如图 3 所示. 当所加电场较小时, 电场使 49S 态产生能级频移, Rydberg 多重态的能级简并解除. 由图可知, 当所加电压大于 1.0 V/cm 时, 49S 态能级与 $n = 45$ 的 Stark 多重态能级混合, 由于较重的原子实和较大的量子亏损, 导致外场 Stark 效应在能级交叉处出现了能级的避免交叉现象, 如图 3 中的插图所示. 实验中我们施加直流电场, 直接激发原子至 49S 及 Stark 多重态, 测量了 5.1 V/cm 附近避免交叉点的离子谱, 证实了避免交叉的存

在 [19]. 随着脉冲电场的增加 S 态能级经过避免交叉点, 非绝热的经避免交叉点跃迁到高 $-l$ 态, 发生态转移, 即产生 P 态信号.

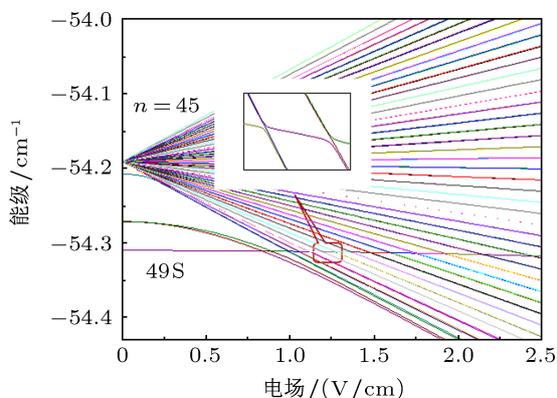


图3 铯原子 49S 态附近的 Stark 能级图, 插图为 49S 态与 $n = 45$ 多重态形成的避免交叉

原子在避免交叉点经非绝热过程的跃迁概率表示为 [20]

$$P = \exp\left(-2\pi \frac{(v_{ij})^2}{\hbar(dW/dt)}\right), \quad (1)$$

其中, v_{ij} 是在避免交叉点两 Stark 态 $|i\rangle$ 与 $|j\rangle$ 之间的耦合, 可表示为

$$v_{ij} = \langle \psi_i^{(s)} | e\mathbf{r} \cdot \mathbf{E} | \psi_j^{(s)} \rangle, \quad (2)$$

其中

$$\Psi_k^{(s)} = \sum_n \sum_{l=|m|}^{n-1} \alpha_{n,l}^{n_1, n_2}(E) \phi_{nlm}, \quad (3)$$

$\Psi_k^{(s)}$ 指的是 Stark 态的波函数, 是零电场波函数 (Φ_{nlm}) 的线性组合, W 是 Stark 态的能量, 同时有

$$dW/dt = (dW/dE) \cdot (dE/dt),$$

其中, dW/dE 表示 Stark 能级随电场的变化, dE/dt 表示电场的变化率. 根据方程 (1), 可以计算 Cs 原子 49S 态在不同避免交叉点处的跃迁概率, 如图 4 中的蓝色圆点所示.

实验中, 我们将 510 nm 激发光的波长调谐到 49S 附近, 扫描激发光波长, 测量初始激发的 Rydberg 态和 “ P ” 态原子的数目, 从而获得由于电场的作用形成 “ P ” 态的比率, 图 4 中的黑色方点表示实验测量的 “ P ” 态与初始激发的 49S 态原子的比率 (态转移率) 与外加电场脉冲幅度的依赖关系. 由图可知, 当电场小于 1.0 V/cm 时, 几乎观察不到 “ P ” 态信号, 这是由于所加电场太小, 不足以使 49S 态能级与 $n = 45$ 的多重态产生能级交叉, 如图 2 所示.

当所加电场大于 1.0 V/cm, 49S 态能级与 $n = 45$ 的多重态形成态混合和能级的避免交叉, 49S 态原子经避免交叉非绝热的跃迁到高 $-l$ 态, 从而形成 “ P ” 态原子. 随着电场的增加, 49S 态能级完全融入到 $n = 45$ 的多重态中, 形成 “ P ” 态原子的概率增加, 在外加电场小于 4.0 V/cm 的电场条件下, 实验测量的结果与理论计算相一致.

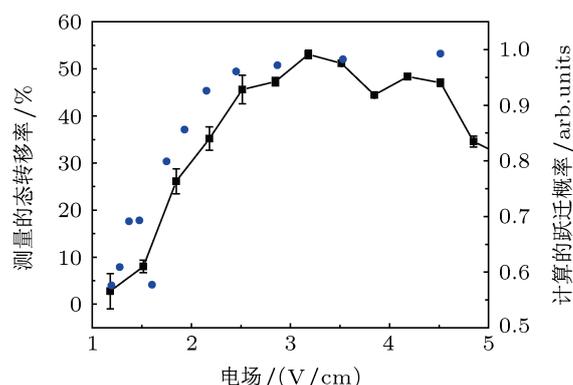


图4 实验测量的态转移率 (黑色正方形) 和理论计算的经避免交叉点的跃迁概率 (蓝色圆点) 和外加电场脉冲幅度的依赖关系

实验测量与理论计算的误差主要包含两方面, 其一, 补偿电场的测量所引起的误差. Rydberg 原子对外场非常敏感, 我们利用 $60D_{3/2,5/2}$ 态的 Stark 分裂来确定杂散电场, 并在栅极上同时加一弱直流电场以补偿杂散电场. 由于磁光阱中栅极的限制实验中只补偿了水平方向的电场. 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; 其二, 测量结果的误差表示多次测量的标准偏差, 小于 3%.

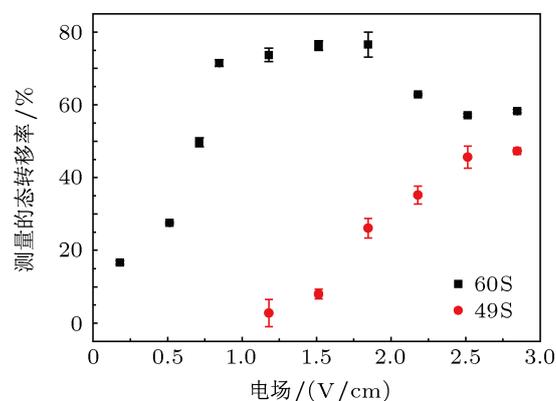


图5 测量的 49S (红色圆点) 和 60S (黑色正方形) 的态转移率与外加电场脉冲幅度的依赖关系

由上述的态转移机理可知, 当 n 增加时, nS 态原子与 $(n-4)$ 多重态产生能级交叉所需要的电场减少, 即在较小的电场下就可以观测到态混合现象.

图 5 所示为 60S 和 49S 态 Rydberg 原子态转移率的比较. 由图 5 可知, 60S 态原子观察到“P”态所需的电场大大减小, 在电场为 0.2 V/cm 时即可观测到约 18% 的转移率. 与 49S 相比, 可以获得更大的态转移率. 与我们理论预测的结果一致.

4 结论

在磁光阱中用激光冷却与俘获技术获得超冷原子, 在超冷铯原子中用双光子激发的方法得到超

冷 Rydberg 原子, 采用态选择场电离的方法探测超冷 Rydberg 原子和“P”态原子的离子信号. 实验表明, 脉冲电场较小时不会出现态混合而产生“P”态, 当脉冲电场增加到一定强度时就会出现态混合和态转移, 并随着脉冲电场的增大, 产生“P”态比率增加. 随着 n 的增加, 观察态混合和态转移所需的电场减少, 本文提供了一种制备高 $-l$ 态的方法, 电场产生的能级的避免交叉对 Rydberg 分子的制备具有重要的意义 [21].

- [1] Gallagher T F 1994 *Rydberg Atoms* (Cambridge University Press) p5
- [2] Saffman M, Walker T G 2010 *Rev. Mod. Phys.* **82** 2313
Isenhower L, Urban E, Zhang X L, Gill A T, Henage T, Johnson T A, Walker T G, Saffman M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 010503.
- [3] Reinhard A, Cubel Liebisch T, Younge K C, Berman P R, Raithel G 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 123007
- [4] Amthor T, Denskat J, Giese C, Bezuglov N N, Ekers A, Cederbarm L S, Weidemüller M 2009 *Eur. Phys. J. D* **53** 329
- [5] Comparat D, Pillet P 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** A208
- [6] Tauschinsky A, van Ditzhuijzen C S E, Noordam L D, van Linden van den Heuvell H B 2008 *Phys. Rev. A* **78** 063409
- [7] Vogt T, Viteau M, Zhao J, Chotia A, Comparat D, Pillet P 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 083003
- [8] Vogt T, Viteau M, Chotia A, Zhao J, Comparat D, Pillet P 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 073002
- [9] Zimmerman M, Littman M, Kash M, Kleppner D 1979 *Phys. Rev. A* **20** 2251
- [10] Zhu X B, Zhang H, Feng Z G, Zhang L J, Zhao J M, Li C Y, Jia S T 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 2401 (in Chinese) [朱兴波, 张好, 冯志刚, 张临杰, 赵建明, 李昌勇, 贾锁堂 2010 物理学报 **59** 2401]
- [11] Chao S D, Hayashi M, Lin S H, Schlag E W 1998 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **31** 2007
- [12] Sun X, MacAdam K B 1993 *Phys. Rev. A* **47** 3913
- [13] Vrinceanu D, Flannery M R 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 4880
- [14] Liu L, Liu C L, Wang J G, Zhao Y Q, Xue P 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 3248 (in Chinese) [刘玲, 刘春雷, 王建国, 赵益清, 薛平 2009 物理学报 **58** 3248]
- [15] Zhang L J, Feng Z G, Li A L, Zhao J M, Li C Y, Jia S T 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1838
- [16] Zhang L J, Feng Z G, Li A L, Zhao J M, Li C Y, Jia S T 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 1362
- [17] Chu S, Bjorkholm J E, Ashkin A, Cable A 1986 *Phys. Rev. Lett.* **57** 314
- [18] Raab E L, Prentiss M, Cable A, Chu S, Pritchard D E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 2631
- [19] Wang L M, Zhang H, Li C Y, Zhao J M, Jia S T 2013 *Acta. Phys. Sin.* **62** 013201 (in Chinese) [王丽梅, 张好, 李昌勇, 赵建明, 贾锁堂 2013 物理学报 **62** 013201]
- [20] Hiroki N 2012 *Nonadiabatic Transition* (World Scientific press)
- [21] Overstreet K R, Schwettmann A, Tallant J, Booth D, Shaffer J P 2009 *Nature Phys.* **5** 581

State transfer of ultracold nS Rydberg atoms*

Wang Yong Zhang Hao Chen Jie Wang Li-Mei Zhang Lin-Jie
Li Chang-Yong Zhao Jian-Ming[†] Jia Suo-Tang

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

(Received 27 October 2012; revised manuscript received 7 January 2013)

Abstract

The state transfer of nS Rydberg atoms induced by external pulsed electric field has been investigated. Cold nS Rydberg atoms are prepared by the two-photon transition and the selective field-ionization method is used to detect the Rydberg atoms and “ P ” state due to the state mixing. The avoided crossing of nS and $(n-4)$ manifold is studied and the dependence of the state transfer rate on the strength of pulsed field is obtained. Experimental result is interpreted by using Stark effect of electric field and it shows consistency between experiment and calculation.

Keywords: rydberg atoms, state mixing, energy transfer

PACS: 32.80.Rm, 32.60.+i

DOI: 10.7498/aps.62.093201

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grants No. 2012CB921603), the International science & technology cooperation program of China (Grants No. 2011DFA12490), the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 11274209, 10934004, 60978018, 61078001), the National Fundamental Fund of Personnel Training (Grant No. J1103210), and the Natural Science Foundation of Shanxi province (Grant No. 2012011003-2).

[†] Corresponding author. E-mail: zhaojm@sxu.edu.cn