

DOI: 10.3788/JQO20182402.0501<sup>②</sup>

## 超冷里德堡原子的俘获损耗光谱

王丽, 张好<sup>†</sup>, 张临杰

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

**摘要:** 本文提供了一种全新的基于俘获损耗荧光光谱技术的里德堡态原子布局测量的方法。相比于场电离光谱该方法可以实现对里德堡态原子数的非破坏测量。利用该方法我们测量了  $47D_{5/2}$  和  $47D_{3/2}$  里德堡态原子数与里德堡激发光功率的关系, 并使用三能级系统的布洛赫方程对实验结果进行了拟合。通过比较实验和理论结果, 我们发现当激发光功率超过  $40 \mu\text{W}$  时, 随着激发光光强的变大  $47D$  里德堡态原子数目的增加偏离理论预计, 出现了激发阻塞现象。

**关键词:** 俘获损耗光谱; 超冷原子; 里德堡态; 激发阻塞

中图分类号: O431

文献标识码: A

文章编号: 1007-6654(2018)02-0178-06

### 0 引言

里德堡原子(主量子数  $n \gg 1$ )与低能态原子相比有较长的寿命和较大的偶极矩, 对外场变化特别敏感<sup>[1]</sup>。里德堡原子间较强的长程相互作用会导致有趣的物理现象, 例如超辐射<sup>[2-4]</sup>和偶极阻塞效应<sup>[5-8]</sup>。里德堡原子也被作为实现单光子源<sup>[9]</sup>和量子逻辑门<sup>[10-12]</sup>的备选系统。超冷原子系综可以避免热原子系综的多普勒效应以及里德堡原子间的碰撞所导致的退相干效应, 有利于实现高分辨光谱测量, 从而获得更准确的里德堡原子性质。目前常用的超冷里德堡原子测量的光谱技术主要包括: 场电离光谱技术和电磁诱导透明光谱技术。场电离光谱技术作为一种直接对里德堡原子进行离子数(或者电子数)测量的手段具有很高的探测灵敏度, 近年来利用场电离光谱技术分别进行了里德堡态跃迁偶极矩测量, 如铷

原子精细结构  $nP_{3/2}; nP_{1/2}$  的跃迁强度测量<sup>[13]</sup>、铯原子  $nD_{5/2}/nD_{3/2}$  和  $(n+2)S_{1/2}/nD_{3/2}$  的跃迁强度比<sup>[14]</sup>以及量子亏损测量<sup>[15]</sup>、里德堡原子寿命测量<sup>[16-17]</sup>、碰撞截面测量<sup>[18]</sup>等方面的工作。而电磁诱导透明光谱技术作为一种无损测量的光谱技术, 在里德堡相互作用研究<sup>[19]</sup>、里德堡原子与外场相互作用<sup>[20-21]</sup>以及里德堡激发光稳频<sup>[22]</sup>等方面具有广泛应用。俘获损耗光谱(Trap loss spectroscopy)技术是超冷分子光谱研究领域常用的一种测量手段, 特别是在通过光缔合效应产生超冷分子的过程中, 已经实现超冷分子振转能级光谱的高分辨测量、铯原子-分子超精细跃迁的二极管激光器绝对频率的稳定<sup>[23]</sup>、分子转动系数测量<sup>[24]</sup>。

在本文中我们首次将俘获损耗光谱(Trap loss spectroscopy)技术用于里德堡原子光谱的研

② 收稿日期: 2017-02-09; 接受日期: 2018-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 61505099; 61475090; 61378013; 11274209); 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(批准号: 91536110)

作者简介: 王丽(1991-)女, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事里德堡原子研究, E-mail: 584057131@qq.com

<sup>†</sup>通信作者: 张好, E-mail: haozhang@sxu.edu.cn

究中,在超冷铯原子系综引入里德堡激发光,通过两步激发( $6S_{1/2} - 6P_{3/2} - 47D$ )制备得到里德堡原子,扫描里德堡激发光的频率观察到了超冷铯原子里德堡态  $47D_{5/2}$  和  $47D_{3/2}$  的俘获损耗光谱。通过改变里德堡激发光的功率,研究了激发光功率与里德堡态激发概率的关系,利用阶梯型三能级系统 Bloch 方程对荧光光谱峰值的比值随激发光功率的变化进行了计算,理论和实验结果吻合得很好。此外我们观察到随着里德堡激光功率增强所导致的激发阻塞现象。俘获损耗光谱提供了超冷里德堡原子物理研究的一种新工具。

## 1 实验装置

实验装置示意图如图 1(a) 所示,采用激光冷却技术实现超冷原子制备并实现原子荧光收集。其中激光冷却的俘获光由一台商用的外腔半导体激光器(DL pro, Toptica)提供,其束腰半径为  $\omega_p$

$= 3 \text{ mm}$ ,每束光的平均功率为  $1.8 \text{ mW}$ 。激光器利用饱和吸收光谱技术实现频率锁定,并用声光调制器(AOM)移频到铯原子  $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$  共振失谐  $15 \text{ MHz}$  位置。再泵浦激光由一台自制的分布反馈式半导体激光器提供,频率采用偏振光谱技术将其锁定到铯原子  $6S_{1/2}(F=3) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=4)$  共振位置。实验获得的超冷原子样品温度约为  $200 \text{ } \mu\text{K}$ ,原子数约为  $10^6$ ,原子云高斯半径约  $150 \text{ } \mu\text{m}$ ,平均密度约为  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  的超冷铯原子样品。里德堡激发光由倍频半导体激光器(TA-SHG pro, Toptica)提供,并作为耦合光,耦合光束腰半径为  $\omega_c = 200 \text{ } \mu\text{m}$ ,被聚焦到超冷原子云处,通过调谐频率实现  $6P_{3/2}(F'=5) \rightarrow 47D$  态里德堡原子的制备,相关能级图如图 1(b) 所示。实验中里德堡激发光的光功率由声光调制器实现稳定,功率抖动小于  $1\%$ 。

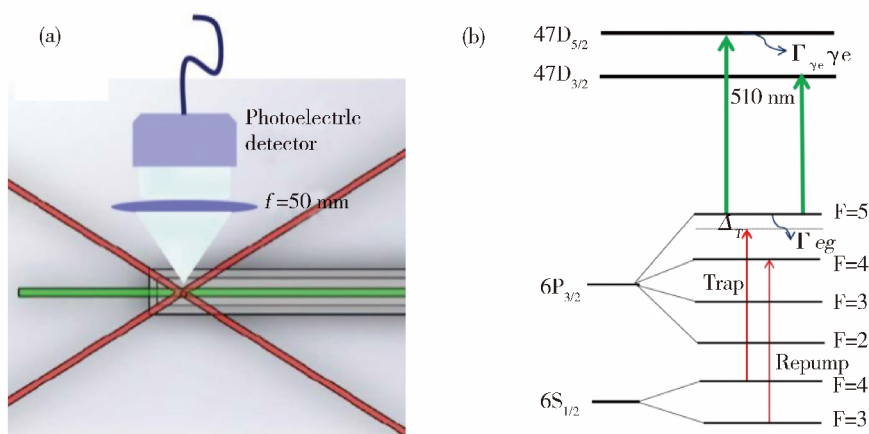


Fig. 1 (a) Sketch of the experimental setup, the 510 nm coupling beam has the  $200 \text{ } \mu\text{m}$  beam waist in the ultracold atoms. The frequency of coupling laser is scanned. The traploss spectrum is detected by a fast photodetector. (b) Energy levels of the ladder system,  $\Delta_T$  is detuning of trap laser.

图 1 (a) 实验装置图。实验中我们利用六束  $852 \text{ nm}$  激光俘获原子,利用  $f=50 \text{ mm}$  双胶合透镜收集荧光,利用探测器进行探测,在铯泡的短轴方向将  $510 \text{ nm}$  光作用到原子上。(b) 阶梯型能级结构图。

$6S_{1/2}$  是铯原子的基态, $6P_{3/2}$  是原子的第一激发态, $47D_{5/2}$   $47D_{3/2}$  是里德堡态,

利用  $510 \text{ nm}$  的光将原子从第一激发态跃迁到里德堡态。 $\Delta_T$  是 Trap 光的失谐,约为  $15 \text{ MHz}$

实验过程中采用双胶合透镜( $f=50 \text{ mm}$ )收集荧光信号,收集效率约为  $4\%$ ,由探测器(PDA36A-EC)获得荧光信号。扫描里德堡激发

光频率可以获得  $47D_{3/2}$  和  $47D_{5/2}$  态俘获损耗光谱,如图 2 所示,里德堡激光的功率为  $37 \text{ } \mu\text{W}$ ,拉比频率约为  $2\pi \times 0.16 \text{ MHz}$ 。图 2 中黑线是实验

数据,蓝色实线是洛伦兹函数拟合的结果,我们通过拟合结果获得  $47D_{3/2}$  和  $47D_{5/2}$  态光谱峰值等特征参数。图中光谱峰值表现出不对称,是由于发生俘获损失后,冷原子再次装载的过程造成了右侧峰值的缓慢上升。

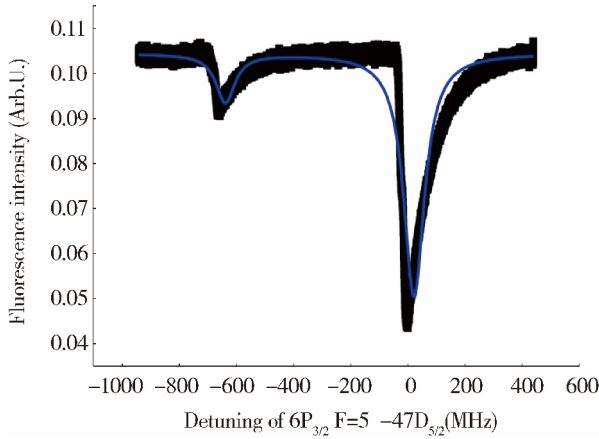


Fig. 2 Dependence of transition strengths of  $47D_{5/2}$  and  $47D_{3/2}$  with  $\Omega_p = 2\pi \times 0.16$  MHz

图2  $47D_{5/2}$  和  $47D_{3/2}$  峰高度  
510 nm 耦合光功率为  $37 \mu\text{W}$ ,  
拉比频率为  $2\pi \times 0.16$  MHz

## 2 实验结果与讨论

考虑到超冷原子俘获光和里德堡激发光光场构成的阶梯型三能级体系,此体系的密度矩阵可以表示为:

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \rho_{23} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & \rho_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$|1\rangle, |2\rangle, |3\rangle$  分别表示  $6S_{1/2}, 6P_{3/2}$  以及里德堡态  $47D$ 。

在不考虑里德堡原子间相互作用情况下,该体系的哈密顿量可以写成:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{AL} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{H}_0$  是无外场时里德堡原子的哈密顿量,  $\mathbf{H}_{AL}$  是光与原子的相互作用。

考虑到旋波近似,里德堡态的阶梯型系统哈密顿量可以写成如下的矩阵形式:

$$\mathbf{H} = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & \Omega_p & 0 \\ \Omega_p & -2\Delta_p & \Omega_R \\ 0 & \Omega_R & -2(\Delta_p + \Delta_R) \end{pmatrix} \quad (3)$$

这里  $\Omega_R$  和  $\Omega_p$  分别是里德堡激发光和超冷原子俘获光的拉比频率,  $\Delta_R$  和  $\Delta_p$  分别表示里德堡激发光和超冷原子俘获光的频率失谐。里德堡激发光的拉比频率  $\Omega_R$  可以表示为如下计算公式<sup>[25]</sup>:

$$\Omega_R = \frac{\mu_{23}}{\hbar} \sqrt{\frac{2P}{\pi\omega^2 c \epsilon_0}} \quad (4)$$

这里的  $\mu_{23}$  是  $|2\rangle$  到  $|3\rangle$  态跃迁的偶极跃迁矩阵元,  $P$  和  $\omega$  分别是里德堡态激发光的功率和腰斑半径,  $c$  是光速,  $\epsilon_0$  是真空中介电常数。

里德堡原子系统密度矩阵随时间的演化  $\dot{\rho}$  的描述形式如下:

$$\dot{\rho} = \frac{i}{\hbar} [\mathbf{H}, \rho] + \mathbf{\Gamma} \quad (5)$$

$\mathbf{\Gamma}$  可表示里德堡原子系统中的衰减和退相干,其矩阵形式为:

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{pmatrix} \Gamma_{e\gamma}\rho_{22} & -\frac{1}{2}\gamma_2\rho_{12} & -\frac{1}{2}\gamma_3\rho_{13} \\ -\frac{1}{2}\gamma_2\rho_{21} & \Gamma_{e\gamma}\rho_{22} + \Gamma_{re}\rho_{33} & -\frac{1}{2}(\gamma_2 + \gamma_3)\rho_{23} \\ -\frac{1}{2}\gamma_3\rho_{31} & -\frac{1}{2}(\gamma_2 + \gamma_3)\rho_{32} & -\Gamma_{re}\rho_{33} \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中,  $\gamma_2$  和  $\gamma_3$  分别表示的是原子能级的中间态  $|2\rangle$  ( $|6P_{3/2}\rangle$ ) 以及里德堡态能级  $|3\rangle$  ( $47D_{5/2}$  和  $47D_{3/2}$ ) 的衰减率。  $\gamma_2 = \gamma_e + \Gamma_{eg}$ ,  $\Gamma_{eg} = 2\pi \times 5.23$  MHz<sup>[26]</sup>, 表示  $|6P_{3/2}\rangle$  态的自发辐射率,  $\gamma_2$  表示低能态原子之间的相互作用,与自发辐射率相比非常小,可以忽略不计。  $\gamma_3 = \gamma_r + \Gamma_{re}$ ,  $\Gamma_{re}$  为里德堡能级的线宽,  $\gamma_r$  为里德堡态原子间相互作用导致的量子态衰减。

通过解主方程可以得到密度矩阵中  $\rho_{22}$  表达式:

$$\rho_{22} = -\frac{\gamma_2 \Omega_c^2 \Omega_p^2}{(\gamma_2 + 2\Omega_p^2) [\gamma_2 (\gamma_2 \gamma_3 + \Omega_c^2) + 2\gamma_3 \Omega_p^2]} \quad (7)$$

其中  $\Omega_c$  是耦合光的拉比频率,也就是里德堡态激发光的拉比频率,  $\Omega_p$  表示从  $6S_{1/2}$  ( $F=4$ )  $\rightarrow$

6P<sub>3/2</sub>(F'=5)的拉比频率。该表达式表示 6P<sub>3/2</sub>态的原子布居数,俘获损耗光谱的强度正比于 ρ<sub>22</sub>。因此我们可以通过公式(7)计算 47D<sub>5/2</sub>和 47D<sub>3/2</sub> 峰值高度的比值:

$$\eta = \frac{S_{5/2}}{S_{3/2}} = \frac{\gamma_2 \gamma_3^2 \mu_{3/2}^2 \Omega_{C5/2}^2 + \mu_{3/2}^2 \Omega_{C5/2}^2}{\mu_{3/2}^2 (\gamma_2 \gamma_{5/2} + \Omega_{C5/2}^2)} \quad (8)$$

其中 Ω<sub>C3/2</sub> 与 Ω<sub>C5/2</sub> 分别表示 6P<sub>3/2</sub>(F'=5)到 47D<sub>3/2</sub>和 47D<sub>5/2</sub>的拉比频率,对应于公式(7)中的 Ω<sub>c</sub>,这里代入 Ω<sub>3/2</sub> =  $\frac{\mu_{3/2}}{\mu_{5/2}} \Omega_{5/2}$ , μ<sub>5/2</sub> 和 μ<sub>3/2</sub> 分别是 6P<sub>3/2</sub>(F'=5)到 47D<sub>5/2</sub>和 47D<sub>3/2</sub>的跃迁矩阵元,分别为 μ<sub>5/2</sub> = 0.0187ea<sub>0</sub> 和 μ<sub>3/2</sub> = 0.0025ea<sub>0</sub>, γ<sub>2</sub>和 γ<sub>3</sub> 分别为 2π×5.23 MHz, 2π×3.9 kHz.

图 3 是 47D<sub>3/2</sub>和 47D<sub>5/2</sub>态俘获损耗光谱峰值幅度的比值随里德堡激发光拉比频率变化的关系。当实验中采用的里德堡激发光的拉比频率较小(<2π×1 MHz)时,可以忽略里德堡原子间的相互作用,此时利用公式(8)和实验中的拉比频率的取值范围进行计算,发现理论和实验结果吻合得较好。

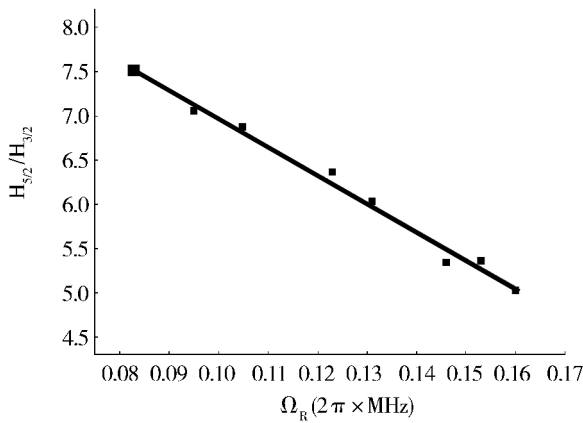


Fig. 3 Dependence of transition strengths ratio η between 47D<sub>5/2</sub> and 47D<sub>3/2</sub>

图 3 47D<sub>5/2</sub>和 47D<sub>3/2</sub> 峰值高度比值与里德堡激发光拉比频率关系

黑色实线是理论计算的结果,黑色方点是实验测得值

图 4 所示为 47D<sub>3/2</sub>和 47D<sub>5/2</sub>态光谱的峰值随里德堡激发光光强的变化曲线。我们注意到当里德堡态激发的光强大于 40 μW 时,47D<sub>3/2</sub>和

47D<sub>5/2</sub>态光谱的峰值出现了明显的饱和现象。图中实线是不考虑相互作用情况下进行的理论计算曲线。计算结果表明在里德堡激发光功率较大时,上述理论与实验结果偏差较大。证明在里德堡激发光功率较大时,里德堡原子间的强相互作用导致产生了激发阻塞现象<sup>[27]</sup>。由于 47D<sub>5/2</sub>的激发概率比 47D<sub>3/2</sub>的更大,所以 47D<sub>5/2</sub>态的原子密度更高从而导致更强的相互作用,因此激发阻塞现象更为明显。

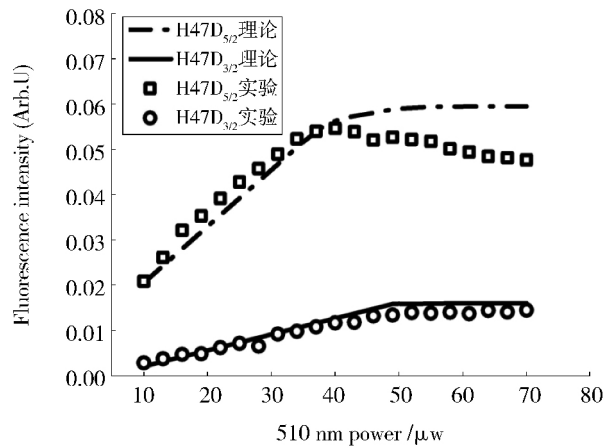


Fig. 4 Dependence of transition strengths of 47D<sub>5/2</sub> and 47D<sub>3/2</sub> on power of 510 nm. Scatters are measured data and dot-lines for the simulations

图 4 47D<sub>5/2</sub>和 47D<sub>3/2</sub> 峰高度与不同 510 nm 耦合光功率的关系。

点画线是理论计算结果,

方形和圆形分别是 47D<sub>5/2</sub>和 47D<sub>3/2</sub> 峰高的实验值。

### 3 结论

本文利用磁光阱俘获超冷铯原子,通过里德堡激发光将<sup>133</sup>Cs冷原子从第一激发态激发到里德堡态,观察到了冷原子荧光的损失,改变里德堡激发光的频率获得了 47D<sub>5/2</sub>和 47D<sub>3/2</sub>态俘获损耗光谱技术,研究了光谱峰高度比与耦合光功率之间的关系。利用三能级主方程的解从理论上对实验结果进行了拟合,在弱激发光的情况下,理论与实验结果符合得很好。此外我们通过增强里德堡激发光观察了里德堡原子激发阻塞的现象。

## 参考文献:

- [1] Gallagher T F. Rydberg Atoms[M]. Cambridge University Press, 1994; 1.
- [2] Gross M, Haroche S. Superradiance: An Essay on the Theory of Collective Spontaneous Emission[J]. *Phys Rep*, 1982, **93**(5): 301-396. DOI: 10. 1016/0370-1573(82)90102-8.
- [3] Rehler N E, Eberly J H. Superradiance[J]. *Phys Rev A*, 1971, **3**(5): 1735. DOI: 10. 1103/PhysRevA. 3. 1735.
- [4] Wang T, Yelin S F, Côté R, *et al.* Superradiance in Ultracold Rydberg Gases[J]. *Phys Rev A*, 2007, **75**(3): 33802-33806. DOI: 10. 1103/PHYSREVA. 75. 033802.
- [5] Singer K, Reetz-Lamour M, Amthor T, *et al.* Suppression of Excitation and Spectral Broadening Induced by Interactions in a Cold Gas of Rydberg Atoms[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, **93**(6): 163001. DOI: 10. 1103/PhysRevLett. 93. 163001.
- [6] Tong D, Farooqi S M, Stanojevic J, *et al.* Local Blockade of Rydberg Excitation in an Ultracold Gas[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, **93**(6): 063001. DOI: 10. 1103/PhysRevLett. 93. 063001.
- [7] Cubel Liebisch T, Reinhard A, Berman P R, *et al.* Atom Counting Statistics in Ensembles of Interacting Rydberg Atoms[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, **95**(16): 253002. DOI: 10. 1103/PhysRevLett. 95. 253002.
- [8] Heidemann R, Raitzsch U, Bendkowsky V, *et al.* Evidence for Coherent Collective Rydberg Excitation in the Strong Blockade Regime[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, **99**(16): 163601. DOI: 10. 1103/PhysRevLett. 99. 163601.
- [9] Saffman M, Walker T G. Creating Single-atom and Single-photon Sources from Entangled Atomic Ensembles[J]. *Phys Rev A*, 2002, **66**(6): 065403-065403. DOI: 10. 1103/PhysRevA. 66. 065403.
- [10] Jaksch D, Cirac J I, Zoller P, *et al.* Fast Quantum Gates for Neutral Atoms[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **85**(10): 2208-2211. DOI: 10. 1103/PhysRevLett. 85. 2208.
- [11] Lukin M D, Fleischhauer M, Côté R, *et al.* Dipole Blockade and Quantum Information Processing in Mesoscopic Atomic Ensembles[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **87**(3): 037901. DOI: 10. 1103/PhysRevLett. 87. 037901.
- [12] Saffman M, Walker T G. Entangling Single- and N-atom Qubits for Fast Quantum State Detection and Transmission[J]. *Phys Rev A*, 2005, **72**(4): 042302. DOI: 10. 1103/PhysRevA. 72. 042302.
- [13] Tong D, Farooqi S M, Van Kempen E GM, *et al.* Observation of Electric Quadrupole Transitions to Rydberg  $nd$  States of Ultracold Rubidium Atoms[J]. *Phys Rev A*, 2009, **79**: 052509. DOI: 10. 1103/PhysRevA. 79. 052509.
- [14] Wang L M, Liu X M, Zhang H, *et al.* Measurement of Relative Transition Strengths of  $^{133}\text{Cs}$  Rydberg  $D$  States Using Electromagnetically Induced Transparency[J]. *J Phys Soc Jpn*, 2012, **81**: 104301. DOI: 10. 1143/JPSJ. 81. 104302.
- [15] Jeffrey J Kay, Stephen L Coy, Bryan M Wong, *et al.* A Quantum Defect Model for the  $s, p, d$  and  $f$  Rydberg Series of CaF[J]. *J Chem Phys*, 2011, **134**: 114313. DOI: 10. 1063/1. 3565967.
- [16] Feng Zhigang, Zhang Linjie, Zhao Jianming, *et al.* Lifetime Measurement of Ultracold Caesium Rydberg States[J]. *J Phys B*, 2009, **42**: 145303. DOI: 10. 1088/0953-4075/42/14/145303.
- [17] 冯志刚, 张好, 张临杰, 等. 超冷铯 Rydberg 原子寿命的测量[J]. *物理学报*, 2011, **60**: 073202. DOI: 10. 7498/aps. 60. 073202.
- [18] Feng Zhigang, Zhang Linjie, Zhang Hao, *et al.* Collisional Cross-sections Measurement of Ultracold Caesium Rydberg States[J]. *Europhysics Letters*, 2010, **92**: 13002. DOI: 10. 1209/0295-5075/92/13002.
- [19] Weatherill K J, Pritchard J D, Abel R P, *et al.* Electromagnetically Induced Transparency of an Interacting Cold Rydberg Ensemble[J]. *J Phys B*, 2008, **41**: 201002. DOI: 10. 1088/0953-4075/41/20/201002.
- [20] Jonathon A Sedlacek, Arne Schwettmann, Harald Kübler, *et al.* Microwave Electrometry with Rydberg Atoms in a Vapour Cell Using Bright Atomic Resonances [J]. *Nature Physics*, 2012, **8**(11): 819-824. DOI: 10. 1038/nphys2423.
- [21] Bejan D. Effects of Electric Field and Structure on the Electromagnetically Induced Transparency in Double Quantum Dot[J]. *Optical Materials*, 2017, **67**: 145-154. DOI: 10. 1016/j. optmat. 2017. 03. 031.
- [22] Bao Shanxia, Zhang Hao, Zhou Jian, *et al.* Tunable Frequency Stabilization to Zeeman Sublevel Transitions Between an

- Intermediate State and Rydberg States[J]. *Laser Physics*, 2016, **27**(1): 015701. DOI: 10. 1088/1555-6611/27/1/015701.
- [23] Ma Jie, Wang Lirong, Zhao Yanting, *et al.* Absolute Frequency Stabilization of a Diode Laser to Cesium Atom-molecular Hyperfine Transitions Via Modulating Molecules[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(3): 161101. DOI: 10. 1063/1. 2799250.
- [24] Ma Jie, Wu Jizhou, Zhao Yanting, *et al.* Determination of the Rotational Constant of the  $Cs_2 O_g(6s+6p_{3/2})$  State by Trap Loss Spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(22): 23016-23023. DOI: 10. 1364/OE. 18. 017089.
- [25] Zhang H, Zhang L J, Wang L M, *et al.* 2014 Autler-Townes Spectroscopy with Interaction-induced Dephasing[J]. *Phys Rev A*, 2014, **90**(4): 043849. DOI: 10. 1103/PhysRevA. 90. 043849.
- [26] Young L, Hill III W T, Sibner S J, *et al.* Precision Lifetime Measurements of Cs  $6p^2 P_{1/2}$  and  $6p^2 P_{3/2}$  Levels by Single-photon Counting[J]. *Phys Rev A*, 1994, **50**(3): 2174. DOI: 10. 1103/PhysRevA. 50. 2174.
- [27] Urban E, Johnson T A, Henage T, *et al.* Observation of Rydberg Blockade Between Two Atoms[J]. *Nature Physics*, 2009, **5**: 110-114. DOI: 10. 1038/NPHYS1178.

## Trap Loss Spectroscopy of Ultracold Cesium Rydberg Atoms

WANG Li, ZHANG Hao<sup>†</sup>, ZHANG Lin-jie

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

**Abstract:** Trap loss spectroscopy of ultracold cesium atoms excited to  $47D_{5/2}$  and  $47D_{3/2}$  Rydberg states are demonstrated. The amplitudes of trap loss spectroscopy of  $47D_{5/2}$  and  $47D_{3/2}$  are measured by varying Rabi frequency of Rydberg excitation laser. The Bloch equations of ladder-type system are introduced to describe the amplitude ratio of Rydberg states without taking count of the interaction of Rydberg atoms. Moreover, the excitation suppression of Rydberg atoms observed with the continued rising of the power of the Rydberg laser. Trap loss spectroscopy provides a new tool for the research of ultracold Rydberg atom.

**Key words:** trap loss spectroscopy; ultracold atoms; Rydberg state; excitation suppression