

49S 里德堡态的射频双光子光谱

李敬奎 杨文广 宋振飞 张好 张临杰 赵建明 贾锁堂

Two-photon radio frequency spectroscopy of 49S Rydberg state

Li Jing-Kui Yang Wen-Guang Song Zhen-Fei Zhang Hao Zhang Lin-Jie Zhao Jian-Ming Jia Suo-Tang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 163201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.163201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.163201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金属目标原子晶格结构对其量子雷达散射截面的影响

[Impact of metal target's atom lattice structure on its quantum radar cross-section](#)

物理学报.2015, 64(15): 154203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154203>

相干布居数拍频信号与基态超精细子能级相干性关系的研究

[Study on the relationship between coherent population beating signal and the coherence of ground-state hyperfine sublevels](#)

物理学报.2015, 64(13): 134203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134203>

长程铯里德堡分子的势能曲线

[Potentials of long-range cesium Rydberg molecule](#)

物理学报.2015, 64(13): 133202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.133202>

高激发态原子间的范德瓦尔斯相互作用

[Van der Waals interaction between high excited states](#)

物理学报.2014, 63(13): 133201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.133201>

铯 Rydberg 原子 Stark 态的避免交叉

[Observation of the avoided crossing of Cs Rydberg Stark states](#)

物理学报.2013, 62(1): 013201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.013201>

49S 里德堡态的射频双光子光谱*

李敬奎¹⁾ 杨文广¹⁾ 宋振飞²⁾ 张好¹⁾ 张临杰¹⁾ 赵建明^{1)†} 贾锁堂¹⁾

1)(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, 太原 030006)

2)(中国计量科学研究院, 北京 100029)

(2015 年 2 月 10 日收到; 2015 年 4 月 22 日收到修改稿)

在室温铯原子蒸气池中, 由铯原子基态、激发态和里德堡态构建了阶梯型三能级系统, 研究了里德堡原子阶梯型三能级系统的电磁感应透明 (EIT). 在实现电磁感应透明的基础上, 利用 16.9 GHz 的射频电场耦合相邻的原子里德堡态, 实现 $49S_{1/2} \rightarrow 47D_{3/2}$ 的双光子跃迁, 测量了里德堡原子的射频双光子光谱, 观察到了电磁感应透明光谱的分裂, 进一步研究了电场强度对射频双光子光谱的影响. 利用里德堡原子的 EIT 效应可实现对射频电场幅值和极化的精密测量, 具有潜在的应用前景.

关键词: 里德堡态三能级系统, 射频电场双光子光谱, 电磁感应透明

PACS: 32.80.Ee, 42.50.Gy, 84.40.-x

DOI: 10.7498/aps.64.163201

1 引言

电磁感应透明 (electromagnetically induced transparency, EIT) 是光与物质相互作用中表现出来的一种奇特的非线性效应^[1]. 利用 EIT 效应可实现介质折射率的增强^[2]、光脉冲减慢^[3]等, 在量子信息存储、微波探测及高分辨激光光谱等领域具有巨大的应用前景^[4]. 人们已经在不同介质中实现了 EIT, 研究了 EIT 效应随相干电磁场及系统参数变化的规律, 揭示了量子相干效应的物理机理. 由双光子激发与里德堡原子形成阶梯型三能级系统, 实现里德堡原子三能级系统的 EIT 效应^[5], 是近年来原子分子物理研究的热点内容.

里德堡原子是指最外层电子被激发到主量子数 (n) 很高的激发态原子, 可以看作是原子实和一个外层电子构成的类氢原子. 里德堡原子轨道半径大 ($\sim n^2$, n^* 为有效主量子数), 寿命长 ($\sim n^3$), 因此由里德堡原子组成的量子体系具有较长的相干时间. 里德堡原子能级间隔小 ($\sim n^{-3}$), 其共振频率处于射频段, 因此可以由射频电磁场耦合里

德堡态, 实现射频电磁场对里德堡原子相互作用的调控^[6]. 需要说明的是, 本文所指射频为广义射频, 频率范围覆盖 1—500 GHz. 由基态、激发态和里德堡态形成的阶梯型三能级系统, 可以实现里德堡原子的 EIT. 英国 Adams 小组^[7,8]首次在实验上观察到里德堡原子的 EIT 效应, 之后 Mohapatra 等^[9]在里德堡气体中研究了 EIT 效应, 利用电场调控原子的能级, 实现了基于里德堡原子 EIT 的电光效应, 获得了很大的电光系数. 随后 Teo 等^[10,11]利用微波电场耦合相邻的里德堡能级, 研究了基于里德堡原子的量子相干效应——EIT-AT (Aulter-Townes) 分裂, 测量了微波电场对 EIT-AT 分裂的影响. Peyanel 等^[12]则展示了里德堡原子相互作用下的非线性特性, 并且通过里德堡 EIT 实现了低速单光子源. 在里德堡 EIT 机理下产生的暗态电磁光子^[13], 可以用来控制光子的量子态, 实现光子间相互作用的控制^[14,15]. 在 Rb 蒸气池中, 利用里德堡原子 EIT 效应实现了对射频电场的精密测量^[16,17].

本文在室温铯蒸气池中, 研究了铯里德堡原子阶梯型三能级系统的 EIT 效应及耦合光功率与

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB921603)、国家自然科学基金 (批准号: 11274209, 61475090, 61378013, 61378039) 和山西省留学基金 (批准号: 2014-009) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaojm@sxu.edu.cn

EIT 信号强度的关系. 在此基础上, 由射频电场耦合相邻的原子里德堡态, 获得了里德堡原子的射频双光子光谱. 研究了射频电场导致的 EIT 透明峰的分裂和射频电场强度对 EIT 分裂的影响, 里德堡原子的量子相干效应在射频电场精密测量方面具有很好的应用前景.

2 实验装置

实验装置如图 1(a) 所示, 我们用直径为 27 mm, 长度为 50 mm 的玻璃铯泡提供铯原子样品. 探测光 (852 nm 激光) 作用于 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$ 的跃迁, 耦合光 (510 nm 激光) 作

用于 $6P_{3/2}(F'=5) \rightarrow nS_{1/2}$ 的跃迁. 其中, 探测激光的腰斑半径为 100 μm , 功率为 2 μW . 耦合激光的腰斑半径为 150 μm , 功率最大为 78 mW. 耦合光与探测光沿相反方向同一路径传播作用于铯原子样品, 如图 1(a) 所示. 实验中, 射频信号源馈入一频率和幅度可调的功率信号至 Ku 波段 (12.4—18 GHz) 标准增益喇叭天线, 天线口面与激光束的距离为 16.5 mm, 且电场方向与激光束垂直. 为了保证实验结果不受来自周围电磁环境的影响, 在实验平台周围布置了射频吸波材料; 另一方面, 为减小光学平台本身对电磁场的扰动, 调整光路使得天线口面与铯泡之间无电磁反射物.

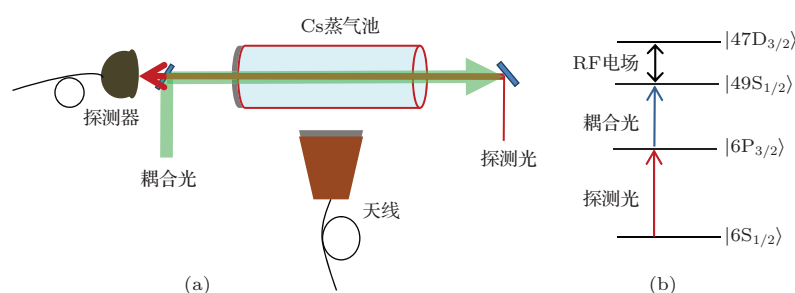


图 1 (网刊彩色) (a) 实验原理图, 探测光 852 nm 激光与耦合光 510 nm 激光反向传播, 在铯蒸气池中产生 EIT 现象; (b) 铯里德堡原子四能级系统

Fig. 1. (color online) The scheme of experimental setup (a) and energy level diagram (b). A probe laser (852 nm) counter-propagates with the coupling laser (510 nm), the EIT effect is observed in a cesium vapor cell at room temperature.

实验所用的相关能级如图 1(b) 所示, $6S_{1/2}$ — $6P_{3/2}$ — $nS_{1/2}$ 构成阶梯型三能级系统. 频率约为 16.9 GHz 的射频电场耦合 $49S_{1/2}$ — $47D_{3/2}$ 的跃迁, 在铯泡中探测光和耦合光作用的区域与里德堡原子产生相互作用, 使里德堡原子阶梯型三能级系统 EIT 信号发生分裂, 形成射频双光子光谱.

3 实验结果

调节耦合激光的输出频率以满足 $6P_{3/2}(F'=5) \rightarrow 49S_{1/2}$ 的跃迁, 探测光的频率在 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$ 的跃迁附近扫描, 构成阶梯型三能级系统. 图 2(a) 为测量的耦合光作用于 $49S_{1/2}$ 里德堡态时的 EIT 信号 (黑色实线) 以及没有耦合光作用时的多普勒背景信号 (红色虚线). 由于耦合光的作用, 探测光在共振位置出现吸收减弱的现象, 形成一个透射峰, 即产生电磁感应透明现象.

在此基础上, 我们改变耦合光的功率测量 EIT

信号强度的变化, 图 2(b) 所示为测量的 EIT 峰与耦合光功率的依赖关系. EIT 峰值是通过实验测量的 EIT 信号进行高斯拟合获得. 可以看出随着耦合光功率的增加, 探测光在共振位置处的吸收减小, EIT 信号增强.

为研究外加射频电场对里德堡态能级的作用, 在样品池附近放置辐射天线在空间产生特定频率和强度的射频电场, 如图 1(a) 所示. 射频电场频率调节约为 16.9 GHz, 是里德堡态 $49S_{1/2}$ — $47D_{3/2}$ 能级差的一半, 从而实现 $49S_{1/2}$ — $47D_{3/2}$ 态的双光子耦合. 调节辐射天线位置, 使射频电场极化方向与探测光的偏振方向相一致. 图 3 所示为实验测量的射频双光子 EIT 光谱, 对应的三条曲线分别为无射频电场时的 EIT 信号, 信号源输出功率分别为 19.0 dBm (蓝色虚线) 和 20.4 dBm (绿色点划线) 时的射频双光子光谱. 由图 3 可知, 由于射频电场的作用, 里德堡三能级系统的 EIT 信号发生分裂, 而且随着馈入天线功率的增加, 分裂的间隔增大.

这种现象是由于射频电场作用导致里德堡能级发生AT分裂,使得EIT信号产生分裂,称为EIT-AT效应.

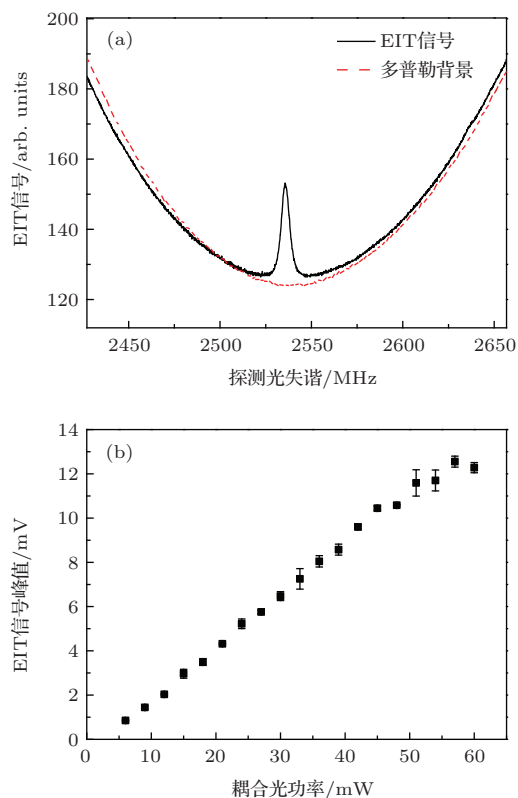


图2 (网刊彩色) (a) 耦合光作用于 $49S_{1/2}$ 态原子时测量的 EIT 信号 (黑色实线); 红色虚线为当只有探测光作用时的多普勒背景; (b) EIT 信号与耦合光功率的依赖关系
Fig. 2. (color online) (a) The measured EIT signals with (black solid line) and without (red dashed line) coupling laser, the coupling laser couples the transition of $6P_{3/2} \rightarrow 49S_{1/2}$; (b) measured EIT-signal strength as a function of the coupling laser power.

射频电场作用于里德堡能级对应的单光子 Rabi 频率 Ω_{RF} 表示为

$$\Omega_{\text{RF}} = \frac{\mu|\mathbf{E}|}{\hbar}, \quad (1)$$

其中, μ 表示射频电场耦合的里德堡态原子间的跃迁矩阵元, $|\mathbf{E}|$ 为射频电场幅值, $\hbar$ 为普朗克常数. 由 (1) 式我们可以根据测量的 EIT 分裂标定射频电场的强度, 里德堡原子阶梯型三能级系统为我们提供了一种测量射频电场强度的方法.

考虑多普勒效应, 射频电场幅值表示为

$$|\mathbf{E}| = \frac{\hbar}{\mu} \Omega_{\text{RF}} = 2\pi \frac{\hbar}{\mu} \frac{\lambda_p}{\lambda_c} \Delta f, \quad (2)$$

其中, Δf 为测量的 EIT 分裂的大小, λ_c 和 λ_p 分别为耦合光和探测光的波长. 从 (2) 式中我们看到射

频电场导致的 EIT 分裂大小 Δf 与射频电场振幅成正比.

对于双光子跃迁, 其双光子 Rabi 频率 $\Omega_{2\text{RF}}$ 表示为^[18]

$$\Omega_{2\text{RF}} = \frac{\Omega_{\text{RF}} \Omega_{\text{RF}}}{2\Delta}, \quad (3)$$

这里 Δ 表示双光子失谐, 这时射频电场导致的 EIT 分裂 Δf 与射频电场强度 (振幅平方 $|\mathbf{E}|^2$) 成正比.

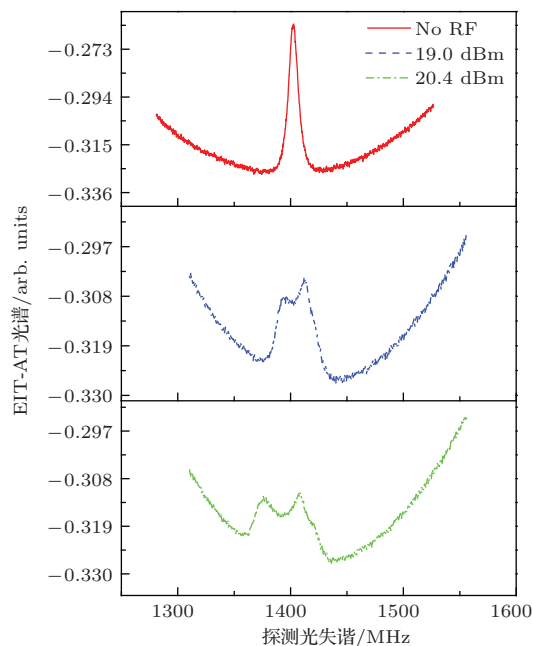


图3 (网刊彩色) 实验测量的不同射频电场强度下的 EIT 分裂谱, 其中红色实线为没有射频电场时的 EIT 信号; 蓝色虚线和绿色点划线分别为 $P_{\text{SG}} = 19.0$ dBm 和 $P_{\text{SG}} = 20.4$ dBm 时的 EIT 分裂光谱

Fig. 3. (color online) Measured EIT splitting spectroscopy without radio-frequency (red solid line), the signal source output power $P_{\text{SG}} = 19.0$ dBm (blue dashed line) and $P_{\text{SG}} = 20.4$ dBm (green dash-dotted line), respectively.

为了实验验证上述关系, 利用辐射天线在空间产生特定频率和强度的射频电场, 研究射频电场强度对 EIT 分裂的影响. 天线在自由空间产生的电场强度在远场条件下可表示为

$$|\mathbf{E}| = \sqrt{\frac{G \cdot P_{\text{net}} \cdot \eta}{4\pi R^2}}, \quad (4)$$

其中 G 为天线增益, P_{net} 为馈入天线净功率, $\eta = 120\pi$ 为自由空间波阻抗, R 为测试点和天线辐射中心的距离. 即在固定频点固定位置处, 电场强度 $|\mathbf{E}|$ 和馈入天线净功率的平方根 $\sqrt{P_{\text{net}}}$ 成正比. 在不考虑天线馈入端口和信号源失配修正的情况下, P_{net} 可以近似用信号源输出功率 P_{SG} 替代.

在不改变耦合光功率的条件下, 通过调谐射频信号源输出功率 P_{SG} 改变铯泡处空间射频电场强度, 测量 EIT 分裂的大小 Δf . 实验记录了无射频电场情况下的 EIT 信号, 以及信号源输出功率从 0 调谐至 21 dBm 时的 EIT-AT 信号, 图 3 给出了三种典型情况. 为了准确测量 EIT 分裂的大小 Δf , 我们同步记录探测光的饱和吸收光谱, 并以此为参考测量 EIT 分裂的大小 Δf . 图 4 描述了实测 EIT 分裂 Δf 与信号源输出功率 P_{GS} 的依赖关系 (实线表示实验数据的线性拟合结果), 结果表明射频双光子跃迁导致的 EIT 分裂 Δf 与空间射频电场功率密度 S (根据定义 $S = G \cdot P_{\text{net}} / (4\pi R^2)$) 或 $|E|^2$ 成正比. 与方程 (3) 所述相一致. 由于实验中所用的铯蒸气池较长, 导致射频电场在铯蒸气池中的分布不均匀, 是实验测量误差的主要来源. 由方程 (4) 可知, 射频天线所辐射的射频电场与测试点和天线辐射中心的距离 R 有关, 在距发射端口较远的区域形成较均匀的场, 但场强较小. 而在距离端口较近的区域场强较大但不均匀. 本实验中, 由于原子样品距天线端口为 16.5 mm, 导致场强不均匀而产生测量误差. 在进一步的测量中, 需要采用微小型样品池减小场强的不均匀产生的误差, 并使用微弱信号检测技术提高测量信号的灵敏度.

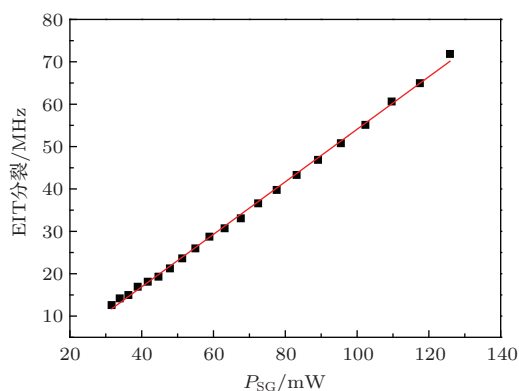


图4 (网刊彩色) EIT 分裂 Δf 与射频信号源输出功率 P_{SG} 的依赖关系, 红色实线为测量数据的线性拟合

Fig. 4. (color online) Measured EIT splitting Δf as a function of radio-frequency signal source power P_{SG} . Red line shows the linear fit for the data.

4 结 论

由基态、激发态和里德堡态构成阶梯型三能级系统, 在室温铯蒸气池中获得了里德堡原子的 EIT 信号. 射频电场耦合相邻的原子里德堡态, 在实验中观察到 EIT 信号的分裂, 研究了射频双光子光谱 (EIT) 分裂的大小与射频电场强度的依赖关系, 即

EIT 分裂与空间射频电场强度 $|E|^2$ 或功率密度成正比.

里德堡原子的量子相干效应提供了一种测量射频电场的新方法. 通过精确测定射频电场导致的 EIT-AT 分裂, 理论计算相应的跃迁矩阵元, 即可建立射频电场强度和普朗克常数之间的直接溯源关系, 是射频电场精密测量的一种革新方法, 有望突破传统电场测量手段无法在微小空间实现微弱信号的高分辨率、高准确度和高稳定度测量的技术瓶颈, 并在进一步研制可溯源至基本物理常数的自校准电场测量传感器, 发展相应的计量标准等方面具有非常重要的应用价值.

参考文献

- [1] Bollor K J, Imamoglu A, Harris S E 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 2593
- [2] Fleischhauer M, Keitel C H, Scully M O 1992 *Phys. Rev. A* **46** 1468
- [3] Phillips D F, Fleischhauer A, Mair A, Walsworth R L, Lukin M D 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 783
- [4] 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
- [5] Mohapatra A K, Jackson T R, Adams C S 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 113003
- [6] Gallagher T F 1994 *Rydberg Atoms* (Cambridge: Cambridge University Press) pp11–47
- [7] Weatherill K J, Pritchard J D, Abel R P, Bason M G, Mohapatra A K, Adams C S 2008 *J. Phys. B* **41** 201002
- [8] Bason M G, Mohapatra A K, Weatherill K J, Adams C S 2008 *Phys. Rev. A* **77** 032305
- [9] Mohapatra A K, Bason M G, Butscher B, Weatherill K J, Adams C S 2008 *Nature Phys.* **4** 890
- [10] Abi-Salloum T Y 2010 *Phys. Rev. A* **81** 053836
- [11] Teo B K, Feldbaum D, Cubel T, Guest J R, Berman P R, Raithel G 2003 *Phys. Rev. A* **68** 053407
- [12] Peyronel T, Firstenberg O, Liang Q Y, Hofferberth S, Gorshkov A V, Pohl T, Lukin M D, Vuletić V 2012 *Nature* **488** 57
- [13] Fleischhauer M, Lukin M D 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5094
- [14] Maxwell D, Szwed D J, Paredes-Barato D, Busche H, Pritchard J D, Gauguier A, Weatherill K J, Jones M P A, Adams C S 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 103001
- [15] Maxwell D, Szwed D J, Paredes-Barato D, Busche H, Pritchard J D, Gauguier A, Jones M P A, Adams C S 2014 *Phys. Rev. A* **89** 043827
- [16] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, Shaffer J P 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 063001
- [17] Holloway C L, Gordon J A, Schwarzkopf A, Anderson D A, Miller S A, Thaicharoen N, Raithel G 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 244102
- [18] Gentile T R, Hughey B J, Kleppner D 1989 *Phys. Rev. A* **40** 5103

Two-photon radio frequency spectroscopy of 49S Rydberg state*

Li Jing-Kui¹⁾ Yang Wen-Guang¹⁾ Song Zhen-Fei²⁾ Zhang Hao¹⁾ Zhang Lin-Jie¹⁾
Zhao Jian-Ming^{1)†} Jia Suo-Tang¹⁾

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

2) (National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

(Received 10 February 2015; revised manuscript received 22 April 2015)

Abstract

Rydberg atoms, with large principal quantum number, exhibit certain properties, such as long lifetimes and strong interactions with fields and other atoms, which have been extensively investigated recently. One of the properties is the electromagnetically induced transparency (EIT) of Rydberg ladder system, which can be used to measure the radio frequency (RF) field with high sensitivity.

In this paper, we investigate the quantum coherent effect of cesium Rydberg atom in a three-level ladder system involving the ground state ($6S_{1/2}$), the excited state ($6P_{3/2}$) and $49S_{1/2}$ Rydberg state in room temperature vapor cell. The probe laser (852 nm) drives the transition of $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$, while the coupling laser (510 nm) couples the Rydberg transition of $6P_{3/2}(F'=5) \rightarrow nS_{1/2}$. A typical electromagnetically induced transparency spectrum is obtained when the weak probe laser is scanned through the transition of $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$ and the coupling laser tuning to Rydberg transition. The two-photon RF spectra are observed when the RF field with a frequency of ~ 16.9 GHz couples the Rydberg transition of $49S_{1/2} \rightarrow 47D_{3/2}$, where the EIT signal is split into two EIT peaks due to the interaction between the RF field and Rydberg atoms. The dependences of EIT splitting on the power of RF field are investigated. The results show that the EIT splitting increases with the power of RF field, which can inversely be used to measure the RF field with a higher spatial resolution in the future.

Keywords: Rydberg three-level system, two-photon spectra of RF field, electromagnetically induced transparency

PACS: 32.80.Ee, 42.50.Gy, 84.40.-x

DOI: 10.7498/aps.64.163201

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB921603), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11274209, 61475090, 61378013, 61378039), and the Project of Shanxi Scholarship Council of China (Grant No. 2014-009).

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