

弱射频场中 Rydberg 原子的电磁感应透明

杨智伟 焦月春 韩小萱 赵建明 贾锁堂

Electromagnetically induced transparency of a cesium Rydberg atom in weak radio-frequency field

Yang Zhi-Wei Jiao Yue-Chun Han Xiao-Xuan Zhao Jian-Ming Jia Suo-Tang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 093202 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.093202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.093202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

量子统计权重对原子场电离效率的影响

Influence of quantum statistical weight on efficiency of electric field ionization of atom

物理学报.2017, 66(7): 073201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.073201>

利用“类维格纳分布函数”方法研究阈上电离

Study of above-threshold ionization by Wigner-distribution-like function method

物理学报.2016, 65(22): 223203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.223203>

超快强场下低能光电子的研究进展——解析 R 矩阵半经典轨迹理论

Progress in study of low-energy photoelectron in ultra-fast strong fields-analytical R-matrix theory based semiclassical trajectory method

物理学报.2016, 65(22): 223204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.223204>

中红外激光驱动激发态 Na 原子产生单个短脉冲

A single short pulse produced by the excited state of Na atom exposed to an infrared laser

物理学报.2016, 65(22): 223205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.223205>

双色场控制与测量原子分子超快电子动力学过程的研究进展

Research progress of the control and measurement of the atomic and molecular ultrafast electron dynamics using two-color field

物理学报.2016, 65(22): 223206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.223206>

弱射频场中 Rydberg 原子的电磁感应透明*

杨智伟 焦月春 韩小萱 赵建明† 贾锁堂

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

(2016年12月14日收到; 2017年2月4日收到修改稿)

在铯原子室温蒸气池中研究了弱射频场中 Rydberg 原子阶梯型三能级系统的电磁感应透明 (EIT) 效应. 铯原子基态 $6S_{1/2}$ 、第一激发态 $6P_{3/2}$ 和 Rydberg $48D_{5/2}$ 态形成阶梯型三能级系统, 探测光共振作用于 $6S_{1/2} (F = 4) \rightarrow 6P_{3/2} (F' = 5)$ 的跃迁, 耦合光在 Rydberg 跃迁线 $6P_{3/2} (F' = 5) \rightarrow 48D_{5/2}$ 附近扫描, 形成 Rydberg 原子 EIT. 当对铯原子施加一个 80 MHz 的弱射频电场时, $48D_{5/2}$ Rydberg 原子的 EIT 光谱发生 Stark 频移和分裂, 同时产生由射频场调制 Rydberg 能级的偶数级边带, 测量结果与 Floquet 理论模拟的结果相符合. 同时, 改变弱射频电场的频率研究了铯 Rydberg 能级的自电离效应对 Rydberg 原子 Stark 谱的影响, 据此, 我们提出将电极板置于铯原子蒸气池内的方案以减少自电离效应的影响. 在弱射频 Stark 谱中, $m_j = 5/2$ 的 Stark 谱与 $m_j = 1/2, 3/2$ 的二级边带形成多个能级交叉, 这些能级交叉点提供了一种基于原子的精确校准射频电场的新方法.

关键词: Rydberg 原子, 电磁感应透明, 射频 Stark 光谱

PACS: 32.80.Rm, 42.50.Gy, 71.70.-d

DOI: 10.7498/aps.66.093202

1 引言

基于原子和电磁场的相互作用, 人们提出了基于原子的测量空间电场^[1]、磁场^[2,3]和微波场^[4]的方法和技术, 并做了大量的研究工作, 这些研究极大地提高了电磁场的测量精度和分辨率, 具有重要的意义和应用前景. Rydberg 原子是主量子数 n 很大的原子, 它的最外层电子处于逸出功很小的高激发态, 其极化率与 n^7 成正比, 相邻 Rydberg 原子的能级间隔处于射频波段, 对应的跃迁偶极矩与 n^4 成正比^[5], 这些特性导致了 Rydberg 原子对直流 (dc) 和交流电场极其敏感, 可用于实现基于原子的外场监控和测量.

结合 Rydberg 原子极化率大的特点和光与原子相互作用产生的电磁感应透明 (EIT) 效应, Rydberg 原子 EIT 受到广泛的关注. 人们利用 Rydberg

原子 EIT^[6] 研究了电场导致的电光效应并获得了巨大的克尔系数^[7], 在很大的动力学范围内实现了电磁辐射中电场的测量^[8]. 射频电场作用下的 Rydberg EIT 有许多应用, 例如对微波场电矢量的振动方向^[9-11]、毫米波^[12]和静电场^[13]的测量, 并可实现量子亏损^[14]的测量.

本文在室温铯原子蒸气池中构建了 Rydberg 原子阶梯型三能级系统, $6S_{1/2}$ - $6P_{3/2}$ - $48D_{5/2}$, 获得了 Rydberg 原子的 EIT. 在获得 EIT 的基础上, 在位于铯蒸气池两侧的平行极板上施加射频电场, 实现对 Rydberg 能级的调制, 研究了铯 Rydberg 能级的自电离对外电场的屏蔽效应. 获得了 80 MHz 弱射频场作用下 Rydberg 原子 EIT 光谱的 Stark 分裂和射频边带光谱. 实验结果表明, EIT 光谱的 Stark 分裂随射频电场的幅度增大而增大, 实验结果与理论计算的 Stark 谱以及 Floquet 理论模拟的射频边带结果相符合.

* 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) 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

2 实验装置

实验所用的相关能级如图 1 (a) 所示, 铯原子 $6S_{1/2}(F = 4)$ - $6P_{3/2}(F' = 5)$ - $48D_{5/2}$ 构成阶梯型三能级系统. 强耦合光扫过 $6P_{3/2}(F' = 5) \rightarrow 48D_{5/2}$ 的 Rydberg 跃迁, 弱探测光利用饱和和吸收光谱校准共振作用于 $6S_{1/2}(F = 4) \rightarrow 6P_{3/2}(F' = 5)$ 的跃迁, 形成 Rydberg 原子 EIT 光谱. 弱射频电场对 Rydberg 能级 $48D_{5/2}$ 进行调制, 从而产生能级的 Stark 频移和分裂以及射频边带. 在探测光和耦合光作用的区域, 外场与 Rydberg 原子产生相互作用, 使 Rydberg 原子阶梯型三能级系统 EIT 光谱发生频移和分裂, 形成 EIT 透射峰的 Stark 分裂光谱以及射频边带光谱.

实验装置如图 1 (b) 所示, 我们用直径为 27 mm, 长度 50 mm 的玻璃铯泡提供铯原子样品. 探测光由外腔半导体激光器 ($\lambda_p = 852$ nm,

其输出激光频率调谐到 $6S_{1/2}(F = 4) \rightarrow 6P_{3/2}(F' = 5)$ 的跃迁. 耦合光由连续可调谐半导体倍频激光器 ($\lambda_c = 510$ nm, TA-SHG110) 提供, 作用于 $6P_{3/2}(F' = 5) \rightarrow 48D_{5/2}$ 的跃迁. 探测光的腰斑半径为 $75 \mu\text{m}$, 功率为 $1.5 \mu\text{W}$, 耦合光的腰斑半径为 $95 \mu\text{m}$, 功率为 50 mW . 耦合光 (z -轴) 和探测光沿相反方向传播作用于铯原子样品, 如图 1 (b) 所示, 耦合光和探测光都为线偏振光, 其偏振方向为 y -轴. 实验中, 信号发生器 (Agilent, 33250A) 提供频率为 $10\text{--}80$ MHz 的射频电场施加在位于样品池两侧的平行电极板上, 幅度在 $0\text{--}1.2$ V/cm 范围内变化, 其偏振方向为 x -轴.

实验中, 探测光共振作用于 $6S_{1/2}(F = 4) \rightarrow 6P_{3/2}(F' = 5)$ 的跃迁, 耦合光在 $6P_{3/2}(F' = 5) \rightarrow 48D_{5/2}$ 的跃迁附近扫描, 这种方法可以获得无多普勒背景的 EIT 光谱. 当探测光和耦合光满足双光子共振条件时, 获得 EIT 光谱.

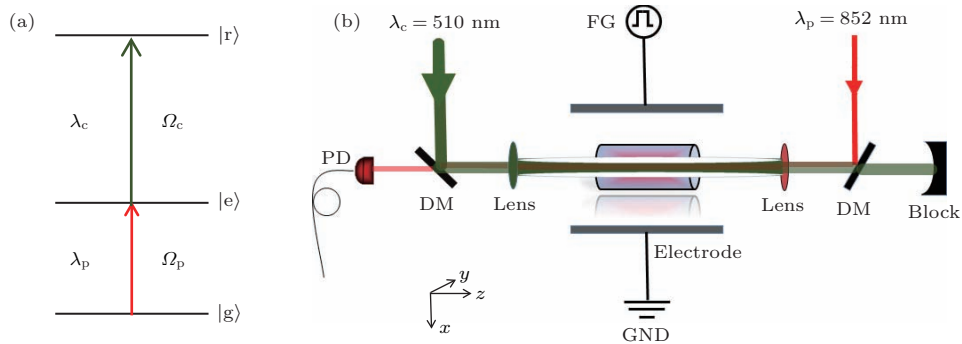


图 1 (网刊彩色) (a) 铯 Rydberg 原子阶梯型三能级示意图; (b) 实验装置示意图, 耦合光 (510 nm 激光, 沿 z -轴方向, 偏振方向平行于 y -轴) 和探测光 (852 nm 激光, 偏振方向平行于 y -轴) 反向传播通过 50 mm 长的室温铯蒸气池, 产生 EIT 效应, 铯泡两侧有两个平行电极板, 可在两极板上施加外场 (PD, 光电探测器; DM, 二向色镜; FG, 信号发生器)

Fig. 1. (color online) (a) Energy level diagram for a cesium Rydberg atom; (b) schematic of the experimental setup. The coupling (510 nm, propagating in the z -axis direction and polarized in the y -axis direction) and the probe laser (852 nm, polarized in the y -axis direction) counterpropagate through a 50 mm-long cesium vapor cell at room-temperature, yielding EIT spectra. A pair of electrode plates are located on both sides of the cesium cell, where an external electric field can be applied. PD, photon detector; DM, dichroic mirror; FG, function generator.

3 实验结果与分析

图 2 所示为耦合光在 $6P_{3/2}(F' = 5) \rightarrow 48D_{5/2}$ 跃迁附近扫描时获得的 EIT 光谱. Rydberg 能级不加外场时, 获得了光滑的 EIT 信号, 如图 2 中下面的黑色曲线所示, 0 失谐处的主峰表示 $6S_{1/2}(F = 4)$ - $6P_{3/2}(F' = 5)$ - $48D_{5/2}$ 形成的 EIT, 箭头所示的小峰表示中间态的精细结构 $6P_{3/2}(F' = 4)$ 形成的 EIT 信号, 由于原子对探测光和耦合光的

Doppler 频移不同, 两峰之间的间隔为 168 MHz. 本文的所有测量结果都以此为标准标定. 当在平行电极板上施加频率为 80 MHz 的弱射频场时, $48D_{5/2}$ Rydberg 能级产生 Stark 分裂, 同时形成射频边带. 图 2 上面的三条曲线分别表示射频电场幅度为 0.3 V/cm (红色), 0.5 V/cm (蓝色) 和 0.7 V/cm (粉色) 时获得的 EIT 光谱. 由图 2 可知: 随着射频电场幅度的增大, EIT 透射主峰分裂为三个峰, 分别表示 $48D_{5/2}$ Rydberg 态 $m_j = 1/2$,

$m_j = 3/2$, $m_j = 5/2$ 的 Stark 能级, 且分裂间隔随着射频电场幅度的增加而增大, 如图 2 中外场幅度为 0.3 V/cm 的红色曲线所示. 当射频电场幅度进一步增加, 除了三个 Stark 分裂外, 在距离 $m_j = 1/2$, $m_j = 3/2$ 透射峰两边 160 MHz 的地方出现两对 2 级边带信号, 如图 2 中红色圆圈中的小峰所示. 由于 $m_j = 5/2$ 的 Stark 能级极化率较小, 我们没有观察到 $m_j = 5/2$ 的边带.

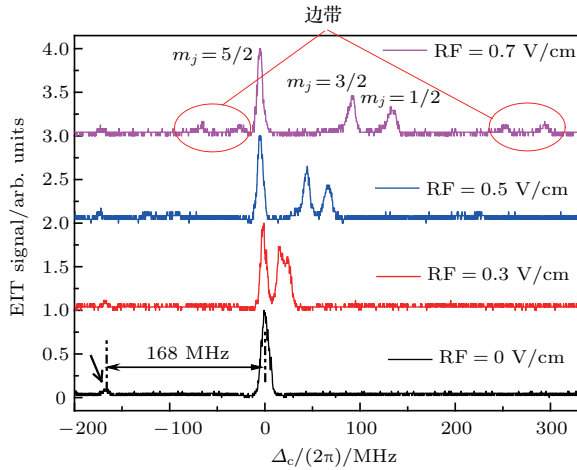


图 2 (网刊彩色) 实验测量的不同电场幅度下的 EIT 光谱, 弱射频场频率为 80 MHz, 其中下面的黑色谱线表示没有射频电场时的 EIT 信号, 0 失谐处的主峰表示由 $6S_{1/2}(F=4)-6P_{3/2}(F'=5)-48D_{5/2}$ 三能级原子形成的 EIT 信号, -168 MHz 处的黑色箭头所示的小峰为 $6S_{1/2}(F=4)-6P_{3/2}(F'=4)-48D_{5/2}$ 形成的 EIT 信号; 上面的三条谱线分别表示射频电场 RF = 0.3 V/cm (红色), 0.5 V/cm (蓝色) 和 0.7 V/cm (粉色) 时的 EIT 光谱; 红色椭圆所示为 80 MHz 射频场产生的 2 级边带

Fig. 2. (color online) Measured EIT spectra with the radio frequency (RF) (80 MHz) fields of 0 (bottom black line), 0.3 V/cm (red line), 0.5 V/cm (blue line), 0.7 V/cm (pink line), respectively. The main peak at 0-detuned is produced from the three-level $6S_{1/2}(F=4)-6P_{3/2}(F'=5)-48D_{5/2}$ atom, whereas the smaller peak at -168 MHz, marked with a black arrow, comes from the $6S_{1/2}(F=4)-6P_{3/2}(F'=4)-48D_{5/2}$ three-level EIT. The peaks marked with red circles are the second sidebands induced by the 80 MHz RF field.

为了进一步研究射频电场作用下 Rydberg 能级的分裂特性, 我们进行了一系列的测量, 图 3 中色图所示为射频电场幅度从 0 变化到 1.2 V/cm 时的 EIT 分裂光谱. 由图 3 可以清晰地看到, $48D_{5/2}$ Rydberg 能级 EIT 光谱的变化, $m_j = 1/2$, $3/2$ 的 Stark 能级的频移和分裂随着射频电场幅度的增加而增大, 而 $m_j = 5/2$ 的 Stark 能级由于极化率很小, 导致能级频移很小. 测量的 Stark 能

谱与红色虚线所示的由微扰理论计算的铯原子 Rydberg 态的 Stark 谱相一致 (Stark 谱的计算详见文献 [15, 16]), 如图 3(a) 所示. 当电场增加到 0.6 V/cm 时 $m_j = 1/2$, $3/2$ 的 Stark 能级开始出现 $N = \pm 2$ 的边带, 且边带谱的强度随射频电场的幅度增加而增大, 当电场增加到 1.1 V/cm 时可以清晰地观察到 $N = -4$ 的边带.

为了更好地分析实验结果和射频场产生的边带, 我们利用 Floquet 理论计算了 Rydberg 原子在 80 MHz 射频场中的 EIT 光谱. 根据 Floquet 理论, 设产生 EIT 共振的耦合光圆频率为 $\omega_{\nu, N}$, 对应的激发概率 $S_{\nu, N}$ 可表示为 [1, 17]

$$\hbar\omega_{\nu, N} = \omega_{\nu} + N\hbar\omega_m, \quad (1)$$

$$S_{\nu, N} = \left(\frac{eF_L}{\hbar}\right)^2 \left| \sum_k C_{\nu, k, N} \hat{\epsilon} \cdot \langle k | \hat{r} | 6P_{3/2}, m_j \rangle \right|^2, \quad (2)$$

其中, F_L 是耦合光电场幅度, $\hat{\epsilon}$ 是极化矢量, e 为电子电荷, N 表示射频光子数, $\langle k | \hat{r} | 6P_{3/2}, m_j \rangle$ 是 Rydberg 态基矢 $|k\rangle = |n, l, j, m_j\rangle$ 和 $|6P_{3/2}, m_j\rangle$ 的电偶极矩阵元. 系数 $C_{\nu, k, N}$ 由时间有关的 Floquet 波函数

$$|\Phi_{\nu}(t)\rangle = e^{-iW_{\nu}t/\hbar} \sum_k \sum_{N=-\infty}^{\infty} C_{\nu, k, N} e^{-iN\omega_m t} |k\rangle \quad (3)$$

获得, W_{ν} 是 Floquet 能量.

我们数值计算了 80 MHz 射频场作用下 Rydberg 原子的 EIT 光谱和对应的激发概率, 如图 3(b) 中的圆点表示, 其中圆点的面积正比于 EIT 光谱的跃迁概率, 即正比于 EIT 信号的强度. 图 3 中的实验结果和 Floquet 理论计算的 Stark 能谱和射频边带符合得非常好.

值得注意的是, 图 3(b) 中的 $m_j = 5/2$ 的 Stark 谱与 $m_j = 1/2$, $3/2$ 的射频边带形成能级的交叉点, 如图 3(b) 中的红色椭圆所示, 在外场为 0.75 和 0.91 V/cm 处与 $N = -2$ 的边带, 在 1.10 V/cm 处与 $N = -4$ 的边带形成能级交叉. 文献 [17] 在铯原子中进行了类似的研究, 但铯原子的射频 EIT 光谱不存在能级交叉的现象. 射频 EIT 光谱的能级交叉是铯原子具有的特性, 可用于实现射频场强度的精确校准. 所以铯原子的射频 EIT 光谱提供了一种基于 Rydberg 原子的精确校准射频电场的新方法.

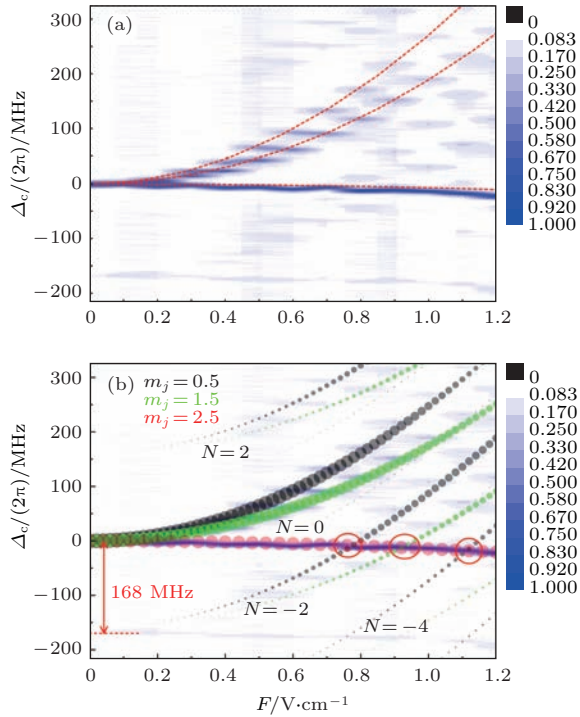


图3 (网刊彩色) 色图所示为实验测量的射频 EIT 光谱, 其中弱射频场频率为 80 MHz (a) 中红色虚线表示微扰理论计算的铯原子 Rydberg 态的 Stark 谱; (b) 中圆点表示由 Floquet 理论计算的 80 MHz 射频场作用下 EIT 光谱, 其中圆点的面积正比于 EIT 光谱的跃迁概率, 即正比于 EIT 信号的强度, 图中红色椭圆标注的地方表示 $m_j = 5/2$ 的 Stark 谱与 $m_j = 1/2, 3/2$ 的射频边带形成的能级交叉点

Fig. 3. (color online) Measurements of EIT spectra with the RF electric field (80 MHz) amplitude of 0–1.2 V/cm: (a) Red dashed lines represent the calculated Stark spectra; (b) calculations of EIT spectra with Floquet theory for 80 MHz RF frequency, the area of circles are proportional to the transition probability of EIT spectra. Red ovals marked show the level intersections between the $m_j = 5/2$ Stark line and $m_j = 1/2, 3/2$ sidebands.

由于 Rydberg 原子的外层电子的束缚能小, 铯蒸气池中的 Rydberg 原子与周围原子或样品池壁的碰撞作用可使 Rydberg 原子电离而产生自电离效应, 从而形成铯离子和自由电子. 电离后的离子和电子在样品池壁聚集而形成附加电场, 屏蔽了全部或部分外电场, 使光与原子相互作用区域的电场减小. 为了研究 Rydberg 原子的自电离引起的外场的屏蔽效应, 我们保持弱射频电场的幅度不变, 改变射频电场的频率进行类似的测量.

图 4 所示为射频场幅度保持为 0.7 V/cm 不变时测量的 Rydberg EIT 光谱随射频场频率的变化. 由图 4 可知, 外场产生的 Stark 分裂随着射频场频率的减小而减小, 说明原子感受的场强减小, 这是

由于 Rydberg 原子的自电离效应产生的离子和电子屏蔽了部分电场, 导致了铯蒸气池中光与原子作用区域电场的减小. 当射频场频率小于 5 MHz 时, 我们观察不到任何 Stark 频移和分裂, 表明 Rydberg 原子的自电离完全屏蔽了外场的作用. 所以这种自电离现象影响了对外场的精确测量. 为了准确的测量射频电场的幅度, 提高外场的测量精度, 我们提出将电极放置在样品池中, 这样可以阻止电离后的离子和电子在池壁的聚集进而减小附加电场对外场的影响, 实现 dc 和射频电场的精确测量, 提高测量精度.

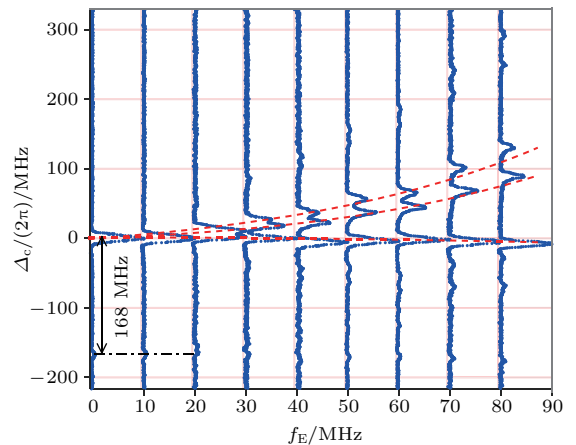


图4 (网刊彩色) 射频电场幅度为 0.7 V/cm 时测量的 Rydberg EIT 光谱随射频场频率 f_E 的变化, 虚线表示拟合的 EIT 峰随射频场频率的依赖关系

Fig. 4. (color online) Measurements of Rydberg EIT spectra as a function of RF frequency f_E , dashed lines show the dependence of the fitted EIT peaks on the RF frequency.

4 结 论

我们在铯原子室温蒸气池中实现了 $48D_{5/2}$ Rydberg 原子阶梯型三能级系统的 EIT, 并在此基础上研究了 80 MHz 弱射频场作用下 Rydberg 原子 EIT 的 Stark 光谱和射频边带光谱, 实验测量结果与微扰理论计算的 Stark 能谱以及 Floquet 理论模拟的射频边带光谱符合得很好. 在弱射频场的 Stark 谱中, 铯原子 $nD_{5/2}$ Rydberg 态的 $m_j = 5/2$ 的 Stark 光谱与 $m_j = 1/2, 3/2$ 的 Stark 光谱的偶数级边带形成多个能级交叉, 这里能级的交叉是铯原子所特有的现象, 这些能级交叉点提供了一种基于原子的射频场幅度精确校准的新方法.

我们还研究了 $48D_{5/2}$ Rydberg 原子的自电离效应对射频 EIT 光谱的影响, 由于 Rydberg 原子的

自电离效应屏蔽了部分外场的作用, 影响了对外场的精确测量. 对于 $48D_{5/2}$ 态, 当射频场频率小于 5 MHz 时观察不到任何 Stark 分裂, 说明此时 Rydberg 原子的自电离完全屏蔽了外场的作用, 而当射频场频率达到 80 MHz 或更大时可以忽略 Rydberg 原子的自电离效应. 在此, 我们提出一种改进方式, 即将电极置于样品池中以避免 Rydberg 原子的自电离效应产生的离子对外加电场的屏蔽效应, 从而实现外场的精确测量.

参考文献

- [1] Jiao Y C, Han X X, Yang Z W, Li J K, Raithel G, Zhao J M, Jia S T 2016 *Phys. Rev. A* **94** 023832
- [2] Savukov I M, Seltzer S J, Romalis M V, Sauer K L 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 063004
- [3] Patton B, Versolato O O, Hovde D C, Corsini E, Higbie J M, Budker D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 083502
- [4] Li J K, Yang W G, Song Z F, Zhang H, Zhang L J, Zhao J M, Jia S T 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 163201 (in Chinese) [李敬奎, 杨文广, 宋振飞, 张好, 张临杰, 赵建明, 贾锁堂 2015 物理学报 **64** 163201]
- [5] Gallagher T F 1994 *Rydberg Atoms* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [6] Mohapatra A K, Jackson T R, Adams C S 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 113003
- [7] Mohapatra A K, Bason M G, Butscher B, Weatherill K J, Adams C S 2008 *Nat. Phys.* **4** 890
- [8] Holloway C, Gordon J, Jefferts S, Schwarzkopf A, Anderson D, Miller S, Thaicharoen N, Raithel G 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 6169
- [9] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, Löw R, Pfau T, Shaffer J P 2012 *Nat. Phys.* **8** 819
- [10] Fan H, Kumar S, Sedlacek J, Kübler H, Karimkashi S, Shaffer J P 2015 *J. Phys. B* **48** 202001
- [11] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, Shaffer J P 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 063001
- [12] Gordon J A, Holloway C L, Schwarzkopf A, Anderson D A, Miller S, Thaicharoen N, Raithel G 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 024104
- [13] Barredo D, Kübler H, Daschner R, Löw R, Pfau T 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 123002
- [14] Grimm J, Mack M, Karlewski F, Jessen F, Rein-schmidt M, Sándor N, Fortágh J 2015 *New J. Phys.* **17** 053005
- [15] Zimmerman M L, Littman M G, Kash M M, Kleppner D 1979 *Phys. Rev. A* **20** 2251
- [16] Zhu X B, Zhang H, Feng Z G, Zhang L J, Li C Y, Zhao J M, Jia S T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2401 (in Chinese) [朱兴波, 张好, 冯志刚, 张临杰, 李昌勇, 赵建明, 贾锁堂 2010 物理学报 **59** 2401]
- [17] Miller S A, Anderson D A, Raithel G 2016 *New J. Phys.* **18** 053017

Electromagnetically induced transparency of a cesium Rydberg atom in weak radio-frequency field*

Yang Zhi-Wei Jiao Yue-Chun Han Xiao-Xuan Zhao Jian-Ming[†] Jia Suo-Tang

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

(Received 14 December 2016; revised manuscript received 4 February 2017)

Abstract

Rydberg atoms are highly excited atoms with large principal quantum number n , big sizes ($\sim n^2$) and long lifetimes ($\sim n^3$). Rydberg atoms are very sensitive to an external field due to the large polarizabilities of Rydberg atoms ($\sim n^7$). Electromagnetically induced transparency (EIT) of Rydberg atom provides an ideal method to detect Rydberg atoms without destroying atoms, and can be used to measure the external direct current and radio frequency (RF) field.

In this paper, we study the EIT effect of a cesium ladder-type three-level atom involving Rydberg state exposed to a weak RF field. The ground state ($6S_{1/2}$), the excited state ($6P_{3/2}$) and Rydberg state ($48D_{5/2}$) constitute the Rydberg three-level system, in which the probe laser couples $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$ transition, whereas the coupling laser scans across the $6P_{3/2} \rightarrow 48D_{5/2}$ Rydberg transition. The coupling laser (510 nm laser, propagating in the z -axis direction and linear polarization in the y -axis direction) and the probe laser (852 nm laser, linear polarization in the y -axis direction) counter-propagate through a 50-mm-long cesium vapor cell at room temperature, yielding Rydberg EIT spectra. Rydberg EIT signal is detected as a function of the detuning of the coupling laser. When a weak RF (80 MHz) electric field polarized in the x -axis direction is applied to a pair of electrode plates located on both sides of the cesium cell, the EIT spectrum of Rydberg $48D_{5/2}$ shows the Stark splitting and the even order harmonic sidebands. The experimental results are analyzed by using the Floquet theory. The simulation results accord well with the experimentally measured results. Furthermore, we also investigate the influence of the self-ionization effect of Rydberg atom on the Stark spectrum by changing the RF frequency. We put forward a proposal to avoid the effect of ionization by placing electrode plates in the cesium cell. In the weak RF-field domain, $m_j = 5/2$ Stark line crosses $m_j = 1/2, 3/2$ sidebands, these cross points provide an antenna-free method of accurately calibrating the RF electric field based on Rydberg atoms.

Keywords: Rydberg atoms, electromagnetically induced transparency, radio frequency Stark spectra

PACS: 32.80.Rm, 42.50.Gy, 71.70.-d

DOI: 10.7498/aps.66.093202

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

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