

Rydberg原子 $nS_{1/2} \rightarrow (n+1)S_{1/2}$ 双光子激发EIT-AT光谱

薛咏梅 郝丽萍 樊佳蓓 焦月春 赵建明

$nS_{1/2} \rightarrow (n+1)S_{1/2}$ two-photon excitation EIT-AT spectrum of Rydberg atom

Xue Yong-Mei Hao Li-Ping Fan Jia-Bei Jiao Yue-Chun Zhao Jian-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 043202 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211458

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211458>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Rydberg原子的微波电磁感应透明-Autler-Townes光谱

Microwave electromagnetically induced transparency and Autler-Townes spectrum of cesium Rydberg atom

物理学报. 2018, 67(9): 093201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172645>

超冷铯($60D_{5/2}$)₂ Rydberg分子的双色光缔合光谱

Two-color photoassociation spectra of ultra-cold Cs ($60D_{5/2}$)₂ Rydberg molecule

物理学报. 2018, 67(23): 233201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181743>

基于Rydberg原子的高灵敏微波探测与通信

High-sensitive microwave sensor and communication based on Rydberg atoms

物理学报. 2021, 70(6): 063201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201401>

基于Rydberg原子的超宽频带射频传感器

Broadband Rydberg atom-based radio-frequency field sensor

物理学报. 2018, 67(7): 073201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172636>

铯原子 $nP_{3/2}$ ($n = 70-94$)里德伯态的紫外单光子激发及量子亏损测量

Measurement of quantum defect of cesium $nP_{3/2}$ ($n = 70-94$) Rydberg states by using ultraviolet single-photon Rydberg excitation

物理学报. 2019, 68(7): 073201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182283>

Rydberg原子的电磁诱导透明光谱的噪声转移特性

Noise transfer characteristics of Rydberg electromagnetically induced transparency

物理学报. 2018, 67(21): 213201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181168>

Rydberg 原子 $nS_{1/2} \rightarrow (n+1)S_{1/2}$ 双光子 激发 EIT-AT 光谱*

薛咏梅¹⁾ 郝丽萍¹⁾ 樊佳蓓¹⁾ 焦月春¹⁾²⁾ 赵建明^{1)2)†}

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) (山西大学极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2021 年 8 月 8 日收到; 2021 年 9 月 27 日收到修改稿)

主要研究了热原子蒸气池中铯 Rydberg 原子 $nS_{1/2} \rightarrow (n+1)S_{1/2}$ 微波耦合的双光子光谱. 铯原子基态 ($6S_{1/2}$)、第一激发态 ($6P_{3/2}$)、Rydberg 态 ($69S_{1/2}$) 形成阶梯型三能级系统, 弱探测光作用于基态到激发态 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ 的跃迁, 强耦合光则作用于 $6P_{3/2} \rightarrow 69S_{1/2}$ 的 Rydberg 跃迁形成电磁感应透明 (EIT) 效应, 实现对 Rydberg 原子的光学探测. 频率 $f_{\text{MW}} = 11.735$ GHz 的微波场耦合 $69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ 的 Rydberg 跃迁, 形成微波双光子光谱. 利用 EIT-AT 分裂光谱研究微波电场强度对双光子光谱的影响. 研究表明: 在强微波场作用时, EIT-AT 分裂与微波场功率成正比, 而弱微波场时的 EIT-AT 分裂与微波场功率成非线性依赖关系, 理论计算与实验测量结果相一致. 本文的研究对微波电场的精密测量具有一定的指导意义.

关键词: Rydberg 原子, 微波场, EIT-AT, 双光子光谱

PACS: 32.80.Ee, 32.30.Bv, 42.50.Gy

DOI: 10.7498/aps.71.20211458

1 引言

高激发态 Rydberg 原子具有很多独特的特性, 近年来受到广泛关注. Rydberg 原子与辐射场之间相互作用的研究具有悠久的历史, 并持续为新的物理学提供沃土. Rydberg 原子具有极大的极化率, 与 n^7 成正比 (n 为主量子数), 微波跃迁偶极矩与 n^2 成正比^[1], 因此 Rydberg 原子对外场极其敏感^[2], 在微波电场的精密测量等领域具有重要的应用前景. 最近的研究表明: 通过 Rydberg 阶梯型三能级系统的电磁感应透明 (EIT)^[3] 和微波耦合 Rydberg 能级的 Autler-Townes (AT)^[4] 分裂可以实现辐射场的宽带测量^[5]、微波场极化方向的测量^[6]、微波电场的测量^[7–9]、毫米波检测^[10]、亚波长成像^[11,12]

等. Rydberg 原子还被用作射频接收器, 用于检测调制的基带信号, 实现基于 Rydberg 原子的传感器和无线通信^[13–15], 并研究了通过连续可调的射频载波扩展数字通信的可行性. 另外, Rydberg 原子与外场的相互作用和 Rydberg 原子间的相互作用在量子光学和量子多体物理以及量子模拟等领域也具有广阔的研究前景, 包括 Rydberg 原子的 EIT 和非线性光学^[16]、量子纠缠、量子信息和量子逻辑门^[17–20] 等. 利用 Rydberg 原子相互作用导致的激发阻塞效应实现基于 Rydberg 原子的单光子源和单光子晶体管^[21–22], 以及利用微波^[23] 操纵 Rydberg 原子的极化^[24] 等.

相比于微波单光子激发, Rydberg 原子的双光子激发具有复杂的光谱特征, 包括 AT 分裂、能级的频移以及能级的避免交叉等. 微波双光子光谱不

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0304203)、国家自然科学基金 (批准号: 62175136, 11804202, 61835007, 12120101004)、长江学者和创新团队发展计划 (批准号: RTIRT_17R70) 和山西省“1331 工程”重点学科建设计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaojm@sxu.edu.cn

仅提供了丰富的信息,而且能级的避免交叉可用于微波电场的精确标定.本文在铯原子蒸气池中构建 Rydberg 原子的阶梯型四能级系统,由铯原子能级 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2} \rightarrow 69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ 组成,获得了 Rydberg EIT-AT 的微波双光子激发光谱.在实验上,利用波长为 852 和 510 nm 的激光产生的 Rydberg EIT 效应探测频率 $f_{MW} = 11.735$ GHz 的微波场耦合 Rydberg 态 $69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ 跃迁形成的 AT 分裂.此双光子跃迁过程涉及近共振的中间态 $69P_{3/2}$,因而形成较为复杂的光谱结构.实验结果表明,对于本文研究的 $69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ 跃迁,当微波信号源的功率 $P_{MW} < 2.0$ mW 时, Rydberg EIT-AT 的分裂间隔与微波功率表现为非线性依赖关系;当 $P_{MW} > 2.0$ mW, Rydberg EIT-AT 分裂间隔与微波场功率 P_{MW} 成正比^[25].

2 实验装置

Rydberg 原子 $69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ 双光子激发 EIT-AT 光谱的实验装置如图 1(a) 所示.波长为 852 nm 的探测光和 510 nm 的耦合光相互重叠且相向作用于长度 $L = 50$ mm, 直径 $\Phi = 25$ mm 的圆柱形石英玻璃铯原子样品中.探测光和耦合光在铯泡中心的腰斑分别为 $\omega_p = 90$ μ m 和 $\omega_c = 135$ μ m, 对应的激光功率分别为 4.3 μ W 和 98 mW.实验采用阶梯型四能级 Rydberg-EIT-AT 方案,相关能级如图 1(b) 所示.探测光由半导体激光器 (852 nm, DLpro, 线宽 100 kHz) 提供,激光频率利用偏振光谱稳频^[26]技术锁定在 $6S_{1/2} (F = 4) \rightarrow 6P_{3/2} (F' = 5)$

的共振跃迁线上,耦合光则由环形倍频激光器 (510 nm, Toptica SHG110) 提供,耦合光的频率在 $6P_{3/2} (F' = 5) \rightarrow 69S_{1/2}$ 的 Rydberg 跃迁频率附近扫描,形成 Rydberg EIT 光谱,实现 Rydberg 能级的光学探测.在距离铯蒸气池 94 cm 的位置处放置一个极化方向与探测光和耦合光的偏振方向平行的微波喇叭天线,调谐微波信号源频率到 $f_{MW} = 11.735$ GHz,该微波频率可以实现共振双光子耦合 $69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ Rydberg 态跃迁,产生微波双光子 EIT-AT 光谱.

3 实验结果与分析

实验中将探测光的频率锁定在 $6S_{1/2} (F = 4) \rightarrow 6P_{3/2} (F' = 5)$ 的共振跃迁,耦合光的频率在 $6P_{3/2} (F' = 5) \rightarrow 69S_{1/2}$ 跃迁附近扫描,其扫描范围约为 1 GHz.无微波场作用时的 Rydberg EIT 光谱信号如图 2(a) 所示,0 失谐处的主峰为铯原子能级 $6S_{1/2} (F = 4) \rightarrow 6P_{3/2} (F' = 5) \rightarrow 69S_{1/2}$ 形成 Rydberg EIT 信号.在负失谐 168 MHz 处的小峰是由中间态能级的超精细能级 $6S_{1/2} (F = 4) \rightarrow 6P_{3/2} (F' = 4) \rightarrow 69S_{1/2}$ 形成的 Rydberg EIT 信号.中间态的超精细结构 $6P_{3/2} (F' = 4)$ 和 $(F' = 5)$ 的能级间隔为 251 MHz,考虑多普勒匹配因子,图 2(a) 中的 $6P_{3/2} (F' = 4)$ 能级形成的 Rydberg EIT 与主峰间隔为 168 MHz,如图中垂直点划线所示.实验中利用两峰之间的距离为标准实现 EIT-AT 光谱的频率校准和定标.

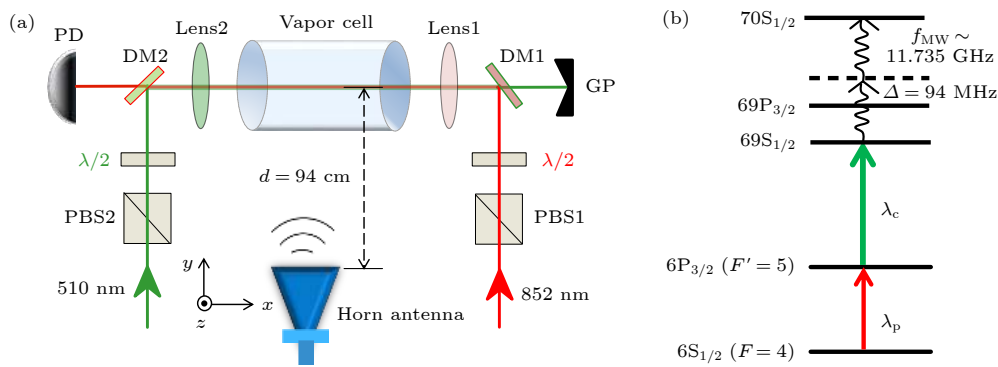


图 1 (a) 实验装置示意图, 其中 DM 为二向色镜, GP 为垃圾池, Lens 1 为 852 nm 透镜, Lens 2 为 510 nm 透镜, PBS 为偏振分光棱镜, PD 为光电探测器; (b) 铯原子阶梯型四能级示意图

Fig. 1. (a) Sketch of the experimental setup, where DM is dichroic mirror, Lens 1(2) is lens of 852 nm (510 nm) laser, GP is garbage pool for green laser, PBS is polarizing beam splitter, PD is photodiode detector; (b) energy-level diagram for the four-level cascade configuration.

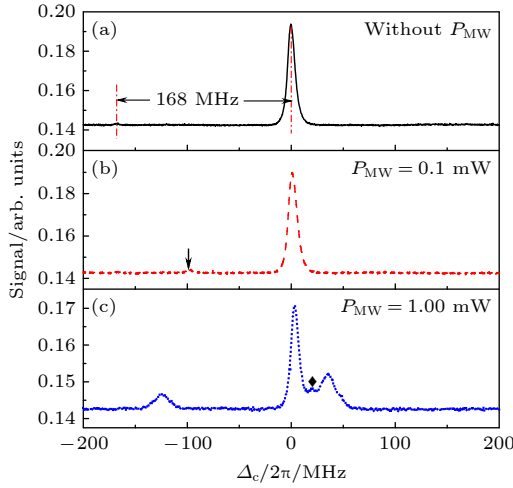


图 2 (a) 无微波场时耦合光在 $6P_{3/2} (F'=5) \rightarrow 69S_{1/2}$ 的 Rydberg 跃迁附近扫描时的 EIT 光谱 (黑色实线); (b) (c) 微波场功率分别为 $P_{MW} = 0.1$ mW (红色虚线) 和 1.0 mW (蓝色点线) 时的 Rydberg EIT-AT 双光子激发光谱

Fig. 2. (a) Rydberg EIT spectroscopy without microwave field (black solid line); (b) (Red dashed line) and (c) (blue dotted line) Rydberg-EIT-AT two-photon excitation spectrum with the microwave field power $P_{MW} = 0.1$ mW and 1.0 mW, respectively.

当频率为 $f_{MW} = 11.735$ GHz 的微波场耦合 $69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ Rydberg 跃迁时 EIT 光谱发生频移, 如图 2(b) 所示, 随着微波场功率的增大, Rydberg EIT 谱线发生进一步的频移和分裂, 如图 2(c) 所示. 与单光子微波 EIT-AT 分裂不同的是在弱微波场作用时的 EIT-AT 光谱中, 除了 EIT 峰的分裂外, 在负失谐约为 100 MHz 附近的位置处出现一个小峰, 如图 2(b) 中的黑色箭头所示. 这是由于 $69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ 双光子跃迁的偶极跃迁中间态 $69P_{3/2}$ 形成的. 具体的, Rydberg 偶极跃迁 $69S_{1/2} \rightarrow 69P_{3/2}$ 的能级间隔为 11.641 GHz, 而 $69P_{3/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ 的能级间隔为 11.829 GHz, 因此微波双光子激发能级的失谐量可以表示为 $\Delta = (11829 - 11641 \text{ MHz})/2 = 94$ MHz. Rydberg EIT-AT 峰的频移和分裂间隔随着微波功率 P_{MW} 的增大而增大, 如图 2(c) 和图 3 所示. 同时还可以看到实验中由于铯泡的表面反射的微波场形成的 EIT-AT 分裂的弱信号如图 2(c) 中黑色菱形所标注的小峰.

微波场作用于 Rydberg 能级对应的单光子激发 Rabi 频率 Ω_{MW} 表示为

$$\Omega_{MW} = \mu |E|/\hbar, \quad (1)$$

其中, μ 表示微波场耦合的 Rydberg 原子间的跃迁矩阵元, $|E|$ 为微波电场幅值, \hbar 为约化普朗克常数.

对于双光子跃迁, Rabi 频率 Ω_{2MW} 则可以表示为^[27]

$$\Omega_{2MW} = \frac{\Omega_{MW}\Omega'_{MW}}{2\Delta}, \quad (2)$$

式中, Δ 表示双光子失谐. 对于本文研究的 $69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ 双光子跃迁, 对应的 $\Delta = 94$ MHz. 由于微波场耦合的拉比频率与 AT 分裂成正比, 即:

$$\Delta f \propto \Omega_{MW}, \quad (3)$$

其中, Δf 为测量的 EIT-AT 分裂的大小. 从而双光子激发有效拉比频率与 EIT 分裂间隔的关系可表示为

$$\Delta f = a_0 \times \Omega_{2MW} = a_0 \times \frac{\Omega_{MW}\Omega'_{MW}}{\Delta}, \quad (4)$$

其中 a_0 表示微波电场强度的校对因子.

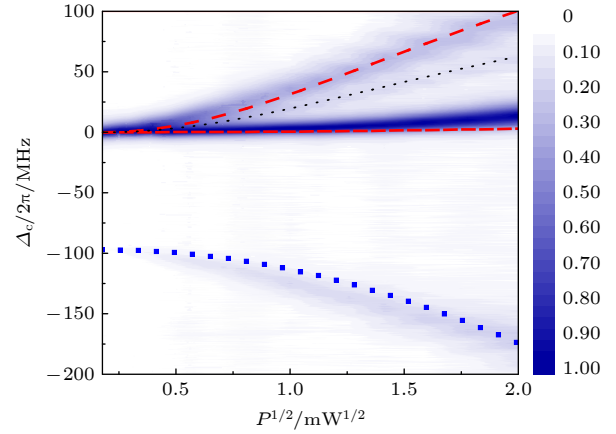


图 3 不同微波信号源的输出功率时的 Rydberg EIT-AT 分裂光谱的三维图 (蓝色), 红色虚线和黑色点线是理论计算微波耦合 $69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ 时 EIT-AT 光谱, 蓝色方块表示中间态形成的 EIT 谱的频移

Fig. 3. Three-dimensional color map (blue) of the Rydberg EIT-AT spectra with different output power, the red dashed and black dotted lines are the theoretical calculations of the frequency shift and EIT-AT splitting of $69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$. The blue squares are the calculated shift of EIT spectra due to the intermediate state.

为了进一步考察 $69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ 跃迁的微波双光子光谱随微波功率的变化, 研究微波功率 P_{MW} 从 0.1 — 4.0 mW, 测量的双光子激发 EIT-AT 光谱如图 3 中的蓝色三维图所示. 由于 Rydberg 态 $69S_{1/2}$ 到 $70S_{1/2}$ 中间态 $69P_{3/2}$ 的存在, 且 $69S_{1/2} \rightarrow 69P_{3/2}$ 和 $69P_{3/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ 的跃迁具有较大的跃迁偶极矩, 使双光子激发光谱发生频移和分裂. 在 -94 MHz 的位置处形成弱 EIT 光谱. 双光子 AT 分裂的间隔随微波场功率的增大而增大, $69P_{3/2}$ 中间态使微波场双光子 Rydberg EIT-AT 分裂光谱不再具有

对称的 AT 分裂谱, 如图 2(c) 和图 3 所示, 这与扫描探测光结果一致^[25].

为解释图 2 和 3 中的实验测量结果, 理论计算了 Rydberg 能级的 Stark 频移和方程 (4) 所示的微波双光子 EIT-AT 分裂. 图 3 中红色虚线是利用 (4) 式理论计算的微波耦合 $69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ 跃迁时 EIT-AT 光谱随微波场强度的变化. 蓝色方块为理论计算的中间态能级在 $\Delta = -94$ MHz 处形成 EIT 谱的频移. 本文测量中微波场功率的校对因子 $a_0 = 0.35$, 实验测量与理论计算相符. 仔细观察图 3 的微波双光子耦合 EIT-AT 光谱, 发现除了主要的 AT 分裂谱外, 还观察到一对信号比较弱的 EIT-AT 分裂谱, 如图 2(c) 中的 AT 分裂中间的小峰 (黑色菱形所指) 和图 3 中的弱信号所示. 利用 (4) 式对图 3 中的弱信号进行拟合, 黑色点线所示, 计算的分裂间隔的值约为红色虚线对应的 EIT-AT 分裂谱中分裂间隔的 60%, 表明该微弱谱线信号是由实验中所用铯泡的表面反射的微波场形成的 EIT-AT 分裂信号.

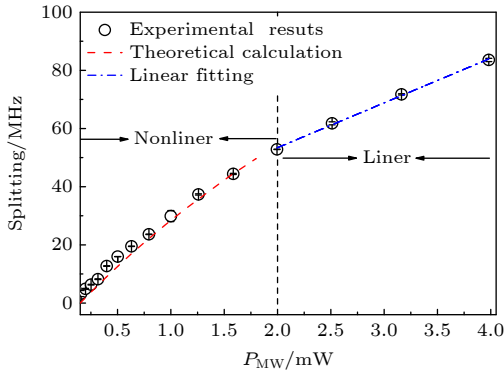


图 4 微波耦合 Rydberg 原子 $69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ 双光子 EIT-AT 分裂间隔与微波场功率 P_{MW} 的依赖关系

Fig. 4. Dependence of the EIT-AT splitting of the Rydberg atom $69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ transition on the microwave power P_{MW} .

为了定量研究微波双光子 EIT-AT 分裂间隔与微波功率的关系, 拟合图 3 中的双光子 EIT-AT 分裂光谱并获得 AT 分裂值. 图 4 所示为测量的 AT 分裂与微波功率的依赖关系, 黑色空心圆圈代表两次实验测量的平均结果. 由图 4 可知, 当微波信号源的功率大于 2.0 mW 时, 双光子 EIT-AT 分裂随微波场功率的增大而线性增大, 蓝色点划线表示强场时线性拟合的结果, 与方程 (4) 所述相一致, 也与笔者前期工作^[25]相一致. 在强微波场作用时, 可以利用微波双光子 EIT-AT 分裂实现微波电场的

自校准测量. 当微波信号源的功率小于 2.0 mW 时, 弱的微波场强度导致的 EIT-AT 分裂不再是线性关系. 图 4 中的红色虚线表示理论计算弱场作用时的 EIT-AT 分裂结果, 实验测量值与理论计算相一致. 从图 4 可以看到, 在微波信号源的功率 $P_{MW} < 2.0$ mW 时, EIT-AT 分裂间隔与 P_{MW} 成非线性关系, 这种非线性效应是由电磁场与原子的相互作用产生的. 实验测量时, 由于 EIT 光谱具有一定的线宽, 当弱微波场产生的 AT 分裂接近于 EIT 线宽时, 测量的 EIT-AT 分裂成非线性依赖关系, 方程 (4) 不再成立. 弱场时的微波耦合 EIT-AT 分裂可通过求解密度矩阵方程获得^[28,29].

微波耦合 $nS \rightarrow (n+1)S$ 的双光子光谱中, 由于中间偶极跃迁态 nP 态的失谐较小, 且具有较大的偶极跃迁矩阵元, 所以微波耦合 $nS \rightarrow (n+1)S$ 的双光子光谱不仅具有 EIT-AT 分裂, 还有中间态 nP 态耦合形成的光谱, 导致了如图 3 所示的复杂的 EIT-AT 光谱结构. 对于微波耦合的 $nD \rightarrow (n+1)D$ 跃迁, 双光子光谱将呈现更加复杂的光谱结构.

4 结 论

本工作在室温铯原子蒸气池中构建了由基态 $6S_{1/2}$ 、第一激发态 $6P_{3/2}$ 和 Rydberg 态 $69S_{1/2}$ 形成的阶梯型三能级系统, 实现了 Rydberg 能级的 EIT 光学探测. 利用频率为 $f_{MW} = 11.735$ GHz 的微波电场耦合 $69S_{1/2} \rightarrow 70S_{1/2}$ 的跃迁, 形成了微波双光子 EIT-AT 光谱. 研究了微波场功率较小时 Rydberg 态双光子光谱频移、分裂与微波场强度的依赖关系: 弱微波场耦合形成的双光子激发光谱中产生的 AT 分裂与微波场功率成非线性关系; 强微波场时形成的 EIT-AT 分裂与微波场功率成正比. 下一步将研究微波耦合 $nD \rightarrow (n+1)D$ 的双光子光谱, 同时提高微波场的功率, 研究强场作用时微波双光子 EIT-AT 光谱的能级频移和 AT 分裂以及铯原子高角动量形成的复杂的避免交叉等光谱特性, 该方法可用于基于 Rydberg 原子的大功率辐射场的精确测量.

参考文献

- [1] Gallagher T F 1994 *Rydberg Atoms* (New York: Cambridge University Press) p38

- [2] Comparat D, Pillet P 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** A208
- [3] Mohapatra A K, Jackson T R, Adams C S 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 113003
- [4] Autler S H, Townes C H 1955 *Phys. Rev.* **100** 703
- [5] Holloway C L, Gordon J A, Jefferts S, Schwarzkopf A, Anderson D A, Miller S A, Thaicharoen N, Raithel G 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 6169
- [6] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, Shaffer J P 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 063001
- [7] Jing M Y, Hu Y, Ma J, Zhang H, Zhang L J, Xiao L T, Jia S T 2020 *Nat. Phys.* **16** 911
- [8] Fan J B, Jiao Y C, Hao L P, Xue Y M, Zhao J M, Jia S T 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 093201 (in Chinese) [樊佳蓓, 焦月春, 郝丽萍, 薛咏梅, 赵建明, 贾锁堂 2018 物理学报 **67** 093201]
- [9] Hao L P, Xue Y M, Fan J B, Bai J X, Jiao Y C, Zhao J M, Jia S T 2020 *Chin. Phys. B* **29** 033201
- [10] Gordon J A, Holloway C L, Schwarzkopf A, Anderson D A, Miller S, Thaicharoen N, Raithel G 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 024104
- [11] Fan H Q, Kumar S, Daschner R, Kübler H, Shaffer J P 2014 *Opt. Lett.* **39** 3030
- [12] Holloway C L, Gordon J A, Schwarzkopf A, Anderson D A, Miller S A, Thaicharoen N, Raithel G 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 244102
- [13] Cox K C, Meyer D H, Fatemi F K, Kunz P D 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 110502
- [14] Jiao Y C, Han X X, Fan J B, Raithel G, Zhao J M, Jia S T 2019 *Appl. Phys. Exp.* **12** 126002
- [15] Song Z F, Liu H P, Liu X C, Zhang W F, Zou H Y, Zhang J, Qu J F 2019 *Opt. Exp.* **27** 8848
- [16] Boyd R W 2008 *Nonlinear Optics* (Beijing: Academic Press) p55
- [17] Jaksch D, Cirac J I, Zoller P, Rolston S L, Côte R, Lukin M D 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2208
- [18] Lukin M D, Fleischhauer M, Cote R, Duan L M, Jaksch D, Cirac J I, Zoller P 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 037901
- [19] Galindo A, Martín-Delgado M A 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 347
- [20] 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
- [21] Dudin Y O, Kuzmich A 2012 *Science* **336** 887
- [22] Peyronel T, Firstenberg O, Liang Q Y, Hofferberth S, Gorshkov A V, Pohl T, Lukin M D, Vuletić V 2012 *Nature* **488** 57
- [23] Maxwell D, Szwer 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
- [24] Lukin M D 2003 *Rev. Mod. Phys.* **75** 457
- [25] 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]
- [26] Pearman C P, Adams C S, Cox S G, Griffin P F, Smith D A, Hughes I G 2002 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **35** 5141
- [27] Gentile T R, Hughey B J, Kleppner D, Ducas T W 1989 *Phys. Rev. A* **40** 5103
- [28] Hao L P, Jiao Y C, Xue Y M, Han X X, Bai S Y, Zhao J M, Raithel G 2018 *New J. Phys.* **20** 073024
- [29] Holloway C L, Simons M T, Gordon J A, Dienstfrey A, Anderson D A, Raithel G 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 233106

$nS_{1/2} \rightarrow (n+1)S_{1/2}$ two-photon excitation EIT-AT spectrum of Rydberg atom*

Xue Yong-Mei¹⁾ Hao Li-Ping¹⁾ Fan Jia-Bei¹⁾Jiao Yue-Chun¹⁾²⁾ Zhao Jian-Ming^{1)2)†}¹⁾ (*Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)²⁾ (*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 8 August 2021; revised manuscript received 27 September 2021)

Abstract

In this work, we present an $nS_{1/2} \rightarrow (n+1)S_{1/2}$ two-photon excitation EIT-AT spectrum of Rydberg atom in the vapor cell. A ground state ($6S_{1/2}$), a first excited state ($6P_{3/2}$) and Rydberg state ($69S_{1/2}$) of cesium atoms constitute a three-level system. A weak probe laser locking to the transition of $6S_{1/2}$ ($F=4$) \rightarrow $6P_{3/2}$ ($F'=5$) couples the ground-state transition, and the strong coupling laser drives the Rydberg transition of $6P_{3/2} \rightarrow 69S_{1/2}$ to yield electromagnetically induced transparency (EIT) effect, which realizes the optical detection of Rydberg atoms. Two Rydberg $69S_{1/2}$ and $70S_{1/2}$ levels are coupled with the microwave field at a frequency of $f_{\text{MW}} = 11.735$ GHz, forming a microwave two-photon spectrum. To observe the influence of microwave electric field power on two-photon spectrum, we investigate the microwave coupled Rydberg EIT-AT spectra at different microwave fields. The measurements show that the EIT-AT splitting interval is proportional to the square of the microwave electric field at strong microwave field, and indicates a nonlinear dependence at weak microwave electric field. The theoretical calculation accords with the experimental measurement. The work here is of significance in precisely measuring the microwave electric field.

Keywords: Rydberg atom, microwave field, EIT-AT, two-photon spectroscopy**PACS:** 32.80.Ee, 32.30.Bv, 42.50.Gy**DOI:** 10.7498/aps.71.20211458

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFA0304203), the National Nature Science Foundation of China (Grant Nos. 62175136, 11804202, 61835007, 12120101004), the Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (Grant No. RTIRT_17R70) and 1331 project of Shanxi province, China.

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