

调制激光场中 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 Rydberg atoms in modulated laser fields

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 103201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.103201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.103201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I10>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氢负离子在少周期激光场中解离时的干涉效应

[Interference effect in the photodetachment from H ion in a few-cycle laser pulse](#)

物理学报.2016, 65(8): 083202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.083202>

激光驱动晶体发射高次谐波的特性研究

[Study of high-order harmonic generation in crystals exposed to laser fields](#)

物理学报.2016, 65(6): 063201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.063201>

势函数对强激光辐照下原子高次谐波辐射的影响

[Influence of atomic potential on the generation of high harmonic generation from the atoms irradiated by mid-infrared laser pulses](#)

物理学报.2016, 65(3): 033201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.033201>

空间非均匀啁啾双色场驱动下氦离子的高次谐波以及孤立阿秒脉冲的产生

[High-order harmonics and attosecond pulse generation of a He<sup>+</sup> ion by a chirped two-color inhomogeneous laser field](#)

物理学报.2015, 64(19): 193201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.193201>

不同波长下氩原子高阶阈上电离的类共振增强结构

[Resonance-like enhancement in high-order above-threshold ionization of argon at different wavelengths](#)

物理学报.2015, 64(14): 143201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.143201>

# 调制激光场中 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

(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)

(2016年1月14日收到; 2016年2月23日收到修改稿)

本文主要研究了调制探测激光场中铯 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 态形成阶梯型三能级系统, 探测光作用于  $6S_{1/2} (F = 4) \rightarrow 6P_{3/2} (F' = 5)$  的跃迁, 耦合光在 Rydberg 跃迁线  $6P_{3/2} \rightarrow 49S_{1/2}$  附近扫描, 形成 Rydberg 原子 EIT. 当对探测光频率施加一个几 kHz 的调制时, 调制解调后的 EIT 信号分裂为两个峰, 双峰间距与调制频率无关, 而与调制幅度导致的失谐量大小 (频率调制幅度) 成正比, 双峰间隔的一半等于探测光频率调制幅度的  $\lambda_p/\lambda_c = 1.67$  倍. 实验结果与理论计算相一致. 本文的研究结果可应用于激光线型和频率抖动的实时监测.

**关键词:** 电磁感应透明, 调制光谱, Rydberg 原子

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

**DOI:** 10.7498/aps.65.103201

## 1 引言

电磁感应透明 (electromagnetically induced transparency, EIT) 是一种量子相干效应<sup>[1]</sup>, 在光速减慢<sup>[2]</sup>, 光存储<sup>[3]</sup>, 灵敏磁力测定等<sup>[4]</sup> 研究领域具有重要的应用前景. 近年来, 由于 Rydberg 原子 (主量子数  $n \gg 1$ ) 具有很多独特的性质, 如原子半径大 ( $\sim n^2$ )、相互作用强 ( $\sim n^{11}$ ) 和极化率大 ( $\sim n^7$ ) 等, 以及 Rydberg 原子的相互作用引起的激发阻塞效应, 使 Rydberg 原子成为量子信息处理、纠缠态<sup>[5]</sup> 和量子逻辑门等<sup>[6]</sup> 研究领域的候选介质. 在超冷原子系统中, 人们结合激发阻塞效应<sup>[7,8]</sup> 和 Rydberg 原子的 EIT 实现了单光子源的制备, 为进一步研究基于 Rydberg 原子的量子多体系统, 强耦合原子光子纠缠等新奇量子效应奠定了基础.

Rydberg 原子 EIT 首次在铷原子室温蒸气池中实现<sup>[9]</sup>, 应用 EIT 效应实现了 Rydberg 原子的非破坏性探测. 之后, 人们应用 Rydberg 原子 EIT 观察到巨大的光电效应<sup>[10]</sup>, 其机理是利用基态和高激发的 Rydberg 态形成暗态. Dudin 和

Kuzmich<sup>[11]</sup> 以及 Peyronel 等<sup>[12]</sup> 分别在超冷原子系统中研究了 Rydberg 原子强相互作用下的非线性效应, 并且通过 Rydberg 原子 EIT 实现了低速单光子源. Sedlacek 等<sup>[13]</sup> 和 Holloway 等<sup>[14]</sup> 利用 Rydberg 原子 EIT 实现了射频场的精密测量和外场感知, 包括射频场、微波和 THz 波. 我们利用射频场耦合相邻的 Rydberg 能级, 获得了 Rydberg 原子的射频双光子光谱<sup>[15]</sup>.

本文以  $6S_{1/2}$ - $6P_{3/2}$ - $49S_{1/2}$  形成 Rydberg 原子阶梯型三能级系统, 在铯原子蒸气池中获得 Rydberg 原子 EIT 的基础上, 使用几 kHz 的调制信号调制探测激光的频率, 调制解调的 EIT 信号表现为双峰结构. 实验测量的双峰间隔与调制频率无关, 与调制幅度导致的频率失谐量 (频率调制幅度) 成正比. 实验结果与理论模拟相一致.

## 2 实验装置

实验装置示意图如图 1 (a) 所示, 我们用直径为 27 mm、长度为 50 mm 的玻璃泡提供铯原子样品. 波长为 852 nm 的激光作为探测光, 利用饱和吸

\* 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

收光谱稳频的方法将探测激光的频率锁定在  $6S_{1/2}$  ( $F = 4$ )  $\rightarrow$   $6P_{3/2}$  ( $F' = 5$ ) 的跃迁线上. 波长为 510 nm 的激光作为耦合光, 在 Rydberg 跃迁线  $6P_{3/2} \rightarrow 49S_{1/2}$  附近扫描. 探测光与耦合光经透镜后反向传播, 仔细调节使之在铯原子样品中重叠. 在光与原子作用区域, 探测光的拉比频率和  $1/e^2$  束腰分别为 4.6 MHz 和 100  $\mu\text{m}$ , 对应的耦合光拉比频率和  $1/e^2$  束腰分别约为 12 MHz 和 50  $\mu\text{m}$ . 探测光经二向色性镜片 DM 后入射到光电探测器, 用于记录 EIT 信号. 实验中, 我们对探测光的频率施加了一个几 kHz 的调制, 实现 Rydberg 原子 EIT 信号的调制. 调制信号来源于信号发生器, 信号发生器输出的正弦信号  $V = V_0 \sin(2\pi ft + \varphi)$  施加到激光器的电流调制端, 使激光频率产生相应的调制, 其中,  $V_0$  表示调制幅值,  $f$  表示调制频率,  $\varphi$  表示初

始相位, 为方便起见令  $\varphi = 0$ . 电流调制导致激光频率相对于中心频率的失谐表示为  $\Delta$ , 失谐量的最大值  $\Delta_0$ , 即频率调制幅度, 取决于所施加调制信号的幅值. 我们通过改变调制信号的幅值改变激光的频率调制幅度. 利用锁相放大器 (SR830) 对调制的 EIT 信号进行解调, 实现 Rydberg 原子 EIT 信号的高灵敏探测.

实验所用的相关能级如图 1(b) 所示, 铯原子  $6S_{1/2}$  ( $F = 4$ )- $6P_{3/2}$  ( $F' = 5$ )- $nS_{1/2}$  构成阶梯型三能级系统. 利用波长计监测耦合光的波长, 调节耦合光的频率形成不同 Rydberg 态三能级系统, 这里我们选择  $49S_{1/2}$  进行研究. 所用探测光的调制频率为 1—5 kHz, 对应锁相放大器的解调时间为 0.2—10 ms 之间.

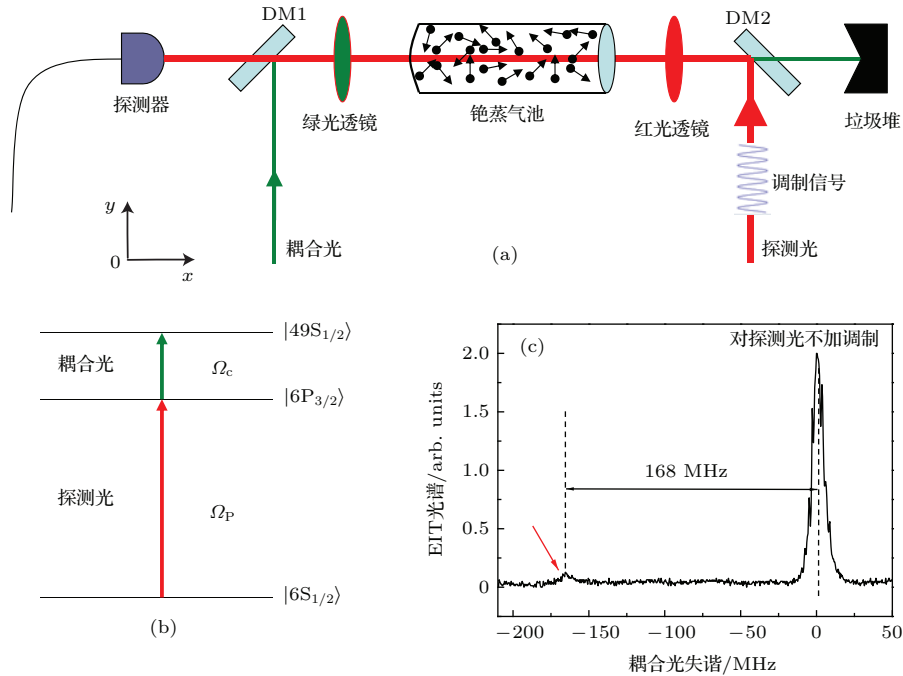


图 1 (网刊彩色) (a) 实验装置示意图, 耦合光 (510 nm 激光) 和探测光 (852 nm 激光) 经透镜后反向传播通过 50 mm 长的铯蒸气池, 在其中产生 EIT 效应. 其中对探测激光的频率施加一个几 kHz 的调制. DM: 二向色镜; (b) 铯 Rydberg 原子阶梯型三能级示意图; (c) 测量的无调制时的 EIT 信号, 0 失谐处的主峰表示  $6S_{1/2}$  ( $F = 4$ )- $6P_{3/2}$  ( $F' = 5$ )- $49S_{1/2}$  的 EIT 信号, 红色箭头所指的小峰表示由中间态  $6P_{3/2}$  的精细结构  $6S_{1/2}$  ( $F = 4$ )- $6P_{3/2}$  ( $F' = 4$ )- $49S_{1/2}$  形成的 EIT 信号  
Fig. 1. (color online) (a) Schematic of the experimental setup. The coupling laser (510 nm) and the probe laser (852 nm) counterpropagate through a 50 mm-long cesium vapor cell, which leads to EIT. The probe laser is modulated with frequency of a few kHz; (b) Energy level diagram; (c) EIT signal without modulation, the peak at 0 detuning shows EIT signal for  $6S_{1/2}$  ( $F = 4$ )- $6P_{3/2}$  ( $F' = 5$ )- $49S_{1/2}$  and the small peak at -168 MHz, denoted as a red arrow, represents the EIT signal for the fine structure of  $6S_{1/2}$  ( $F = 4$ )- $6P_{3/2}$  ( $F' = 4$ )- $49S_{1/2}$ .

### 3 实验结果与分析

为了给实验测量定标, 我们另外建立一个无调制时的 EIT 装置(这里没有给出), 测量的无调制 Rydberg 原子 EIT 如图 1(c) 所示, 其中主峰为

$6S_{1/2}$  ( $F = 4$ )- $6P_{3/2}$  ( $F' = 5$ )- $49S_{1/2}$  形成的 EIT, 红色箭头所示的小峰为中间态的精细结构  $6P_{3/2}$  ( $F' = 4$ ) 所形成的 EIT 信号, 考虑 Doppler 效应, 两峰之间的间隔为 168 MHz. 下面的测量结果将以此为标准获得.

实验中, 我们将探测光作用于  $6S_{1/2} (F = 4) \rightarrow 6P_{3/2} (F' = 5)$  的跃迁线上, 耦合光在 Rydberg 跃迁  $6P_{3/2} \rightarrow 49S_{1/2}$  附近扫描. 当探测光不加调制时, 我们可以获得光滑的 EIT 信号, 如图 2 中的黑色虚线(下)所示, 测量的 EIT 线宽约为 27.6 MHz (后面将对 EIT 线宽进行分析). 而当我们对探测光增加一个频率为  $f = 3$  kHz、频率调制幅度为 12 MHz 的调制信号时, 测量的 EIT 信号被调制且 EIT 线形发生变化, 如图 2 中的红色实线所示(中). 调制的 EIT 信号经锁相放大器 SR830 解调之后得到图 2 中蓝色线(上)所示的 EIT 信号. 很明显, EIT 信号从无调制时的一个峰分裂为两个峰, 形成双峰结构, 对应的双峰间隔为 40 MHz, 双峰间隔的一半约为频率调制幅度的  $\lambda_p/\lambda_c = 1.67$  倍. 产生系数 1.67 的主要原因是原子样品处于室温, 耦合光和探测光相对于相同速度的原子对应的多普勒频移不同而产生.

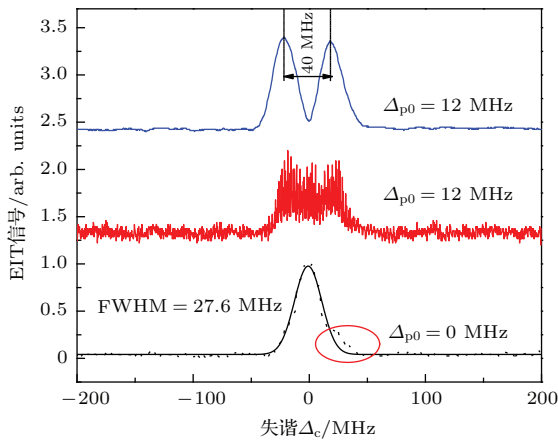


图 2 (网刊彩色) 黑色虚线(下)表示探测光没有施加调制时的 EIT 信号, 实线表示高斯拟合结果; 红色线(中)表示频率调制幅度为 12 MHz, 频率为 3 kHz 时得到的 EIT 信号; 蓝色线(上)表示锁相放大器调制解调的一次谐波, EIT 信号分裂为双峰结构, 对应的双峰距离为 40 MHz

Fig. 2. (color online) Bottom curve: EIT signal without modulation to the probe laser. Middle curve: EIT signal in modulated probe laser for modulation amplitude  $\Delta_{p0} = 12$  MHz and frequency  $f = 3$  kHz. Top curve: EIT signal is demodulated by SR830, the measured distance of peak-to-peak is 40 MHz.

下面做简单的计算. 定义探测光束的方向为  $x$  轴, 速率分量为  $v_x$  的原子与探测光和耦合光对应的多普勒偏移量分别为  $\Delta_p$  和  $\Delta_c$ , 满足:

$$v_x = \lambda_p \Delta_p = -\lambda_c \Delta_c, \quad (1)$$

$$\Delta_c = -\frac{\lambda_p}{\lambda_c} \Delta_p = -\frac{852}{510} \Delta_p \approx -1.67 \Delta_p, \quad (2)$$

这里  $\Delta_p$  表示由于探测光频率的调制导致的探测光与  $6S_{1/2} (F = 4) \rightarrow 6P_{3/2} (F' = 5)$  共振跃迁频率的偏移量, 而  $\Delta_c$  则表示对应的耦合光与  $6P_{3/2} \rightarrow 49S_{1/2}$  跃迁的偏移量.

实验中将信号发生器的输出信号施加到探测激光的电流输入端, 对应的探测光的频率相对于  $6S_{1/2} (F = 4) \rightarrow 6P_{3/2} (F' = 5)$  跃迁线的频率调制幅度为  $\Delta_{p0}$ . 图 2 所示为探测光的频率调制幅度为  $\Delta_{p0} = 12$  MHz 时的 EIT 信号. 对应的耦合光的偏移量的幅值  $\Delta_{c0} = \Delta_{p0} \times (\lambda_p/\lambda_c) = 20$  MHz, 即实验测量 EIT 双峰间隔 40 MHz 的一半.

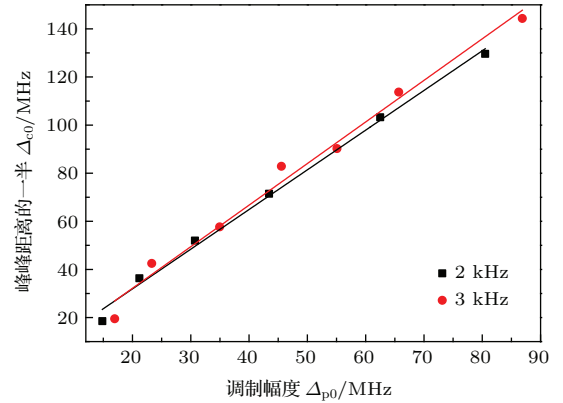


图 3 (网刊彩色) EIT 信号的双峰间距的一半与探测光频率调制幅度的依赖关系, 调制频率分别为 2 kHz (黑色正方形) 和 3 kHz (红色圆点). 线性拟合结果分别为  $1.65 \pm 0.05$  (2 kHz) 和  $1.73 \pm 0.08$  (3 kHz), 平均值为  $1.69 \pm 0.06$ , 在误差范围内和计算结果 1.67 一致

Fig. 3. (color online) Half of the distance between the EIT signal splittig to form peak-to-peak as a function of the modulation amplitude for modulation frequency 2 kHz (black squares) and 3 kHz (red circles). The linear fitted slopes are  $1.65 \pm 0.05$  and  $1.73 \pm 0.08$  for 2 kHz and 3 kHz, respectively. The averaged result to be  $1.69 \pm 0.06$ , which is consistent with the calculation 1.67.

为了进一步证实上面的分析, 我们改变探测光的调制幅度和调制频率, 测量了不同条件下的 EIT 信号. 图 3 所示为调制频率分别为 3 kHz (红色圆点) 和 2 kHz (黑色正方形) 时测量的调制解调的 EIT 双峰间隔的一半与频率调制幅度  $\Delta_{p0}$  的依赖关系, 实线表示对实验结果的线性拟合, 拟合的斜率分别为  $1.73 \pm 0.08$  (3 kHz) 和  $1.65 \pm 0.05$  (2 kHz), 平均值为  $1.69 \pm 0.06$ , 在实验误差范围内与理论计算相一致. 我们也测量了其他调制频率下 EIT 双峰间隔与频率调制幅度之间的依赖关系, 测量的斜率接近 1.67. 实验表明探测光的调制导致的 EIT 的双峰间隔与探测光的调制频率无关, 而与频率调制幅度成正比, 其比例系数与所用探测光与耦合光的

激光波长有关, 对于本文所用的铯原子和相应的能级, 该比例系数为  $\lambda_p/\lambda_c = 1.67$ .

上面测量了调制解调的一次谐波信号, 为进一步比较, 我们调节锁相放大器的谐波输出获得二次谐波信号. 图 4 表示频率调制幅度分别为 12 和 18 MHz 时 Rydberg 原子 EIT 信号的二次谐波信号, 对应的双峰间隔分别为 41 和 60 MHz, 同样满足方程 (2) 所示的结果.

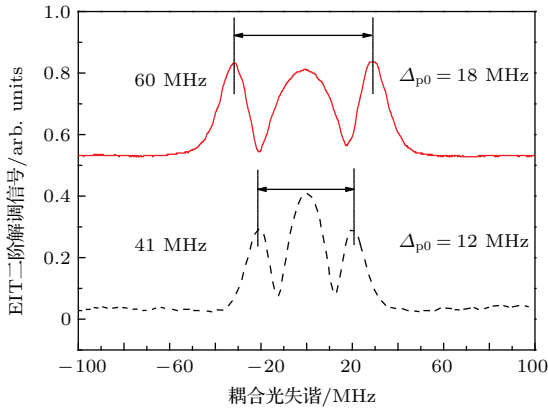


图 4 (网刊彩色) EIT 的二次谐波信号, 对应的频率调制幅度分别为 12 MHz (黑色虚线) 和 18 MHz (红色实线)  
Fig. 4. (color online) EIT second-order demodulation signal for modulation amplitude to be 12 MHz (black dashed line) and 18 MHz (red solid line).

需要注意的是, 图 1 中无调制时的 EIT 线宽约为 27.6 MHz. 这是由耦合光拉比频率较大, 且实验中对应的耦合光束腰小于探测光束腰所致. 一般地,  $6P_{3/2} \rightarrow nS_{1/2}$  Rydberg 跃迁对应的跃迁矩阵元比探测光  $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$  的跃迁矩阵元小很多, 为了满足 EIT 条件  $\Omega_c \geq \Omega_p$ , 增加耦合光的拉比频率  $\Omega_c$ , 实验中我们增加耦合光的功率, 同时减小耦合光的束腰半径, 使探测光束腰大于耦合光. 如上所述, 图 5(a) 所示为实验中铯原子样品中心处耦合光和探测光高斯光束截面的光强分布, 耦合光的束腰约为探测光束腰的一半. 对于高斯光束, 光束中心的光强最大, 对应的拉比频率最大(矩形黑色阴影区), 光束的边缘对应的拉比频率则较小. 由于实验中探测光的束腰大, 由耦合光的中心部分(矩形黑色阴影区)产生的 EIT 信号线宽较宽, 对应 EIT 信号展宽的部分, 产生一个加宽的尾翼, 如图 2 中的红色圆圈所示; 而耦合光的边缘部分(蓝色实线矩形区)则会产生线宽较窄的 EIT, 对应于 EIT 信号的中心部分. 由于 EIT 线宽取决于  $\gamma = \Omega_c^2/\Gamma$  ( $\Gamma = 5.2$  MHz 为中间态的自发辐射衰减率), 实验中耦合光的  $\Omega_c = 12$  MHz 时, 对应的 EIT 线宽为 27 MHz, 与实验相符合. 据此我们减小耦

合光的拉比频率以及探测光束腰, 优化实验参数, 得到窄线宽的 EIT 信号如图 5(b) 所示.

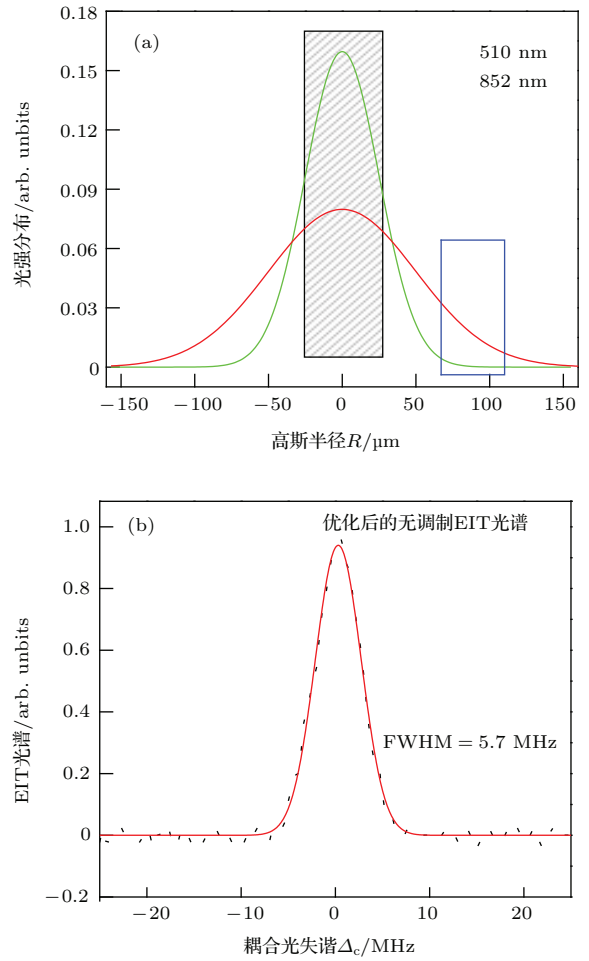


图 5 (网刊彩色) (a) 铯泡中心处探测光(红色线)和耦合光(绿色线)束腰处的高斯分布示意图; (b) 优化后的窄线宽 EIT 信号

Fig. 5. (color online) (a) The Gauss distribution of the probe (red line) and coupling (green line) lasers in the cesium cell; (b) the optimized EIT signal with linewidth of 5.7 MHz.

## 4 结 论

我们在铯原子室温蒸气池中获得了 Rydberg 原子阶梯型三能级系统的 EIT. 当探测光施加一个几 kHz 的调制时, 由锁相放大器调制解调获得的一阶和二阶解调的 EIT 信号具有双峰结构, 双峰间隔与探测光的频率调制幅度成正比, 而与调制频率无关. 双峰间隔的一半等于探测光调制幅度的  $\lambda_p/\lambda_c = 1.67$  倍, 与理论分析相一致. 我们的研究结果提供了一种独立的实时监测激光线型变化和频率抖动的方式.

在进一步的研究中, 我们将选择具有较大跃迁偶极矩的铯  $nD_{5/2}$  Rydberg 态原子, 降低耦合光和

探测光功率, 优化实验条件, 压窄EIT线宽, 进行外场中Rydberg原子EIT等量子效应的研究和在微波场精密测量方面的应用研究.

### 参考文献

- [1] Harris S E 1997 *Phys. Today* **50** 36
- [2] Hau L V, Harris S E, Dutton Z, Behroozi C H 1999 *Nature* **397** 594
- [3] Phillips D F, Fleischhauer A, Mair A, Walsworth R L, Lukin M D 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 783
- [4] Lee H, Fleischhauer M, Scully M O 1998 *Phys. Rev. A* **58** 2587
- [5] Wilk T, Gäetan A, Evellin C, Wolters J, Miroschnychenko Y, Grangier P, Browaeys A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 010502
- [6] 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
- [7] Tong D, Farooqi S M, Stanojevic J, Krishnan S, Zhang Y P, Côté R, Eyler E E, Gould P L 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 063001
- [8] Cubel Liebisch T, Reinhard A, Berman P R, Raithel G 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 253002
- [9] Mohapatra A K, Jackson T R, Adams C S 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 113003
- [10] Mohapatra A K, Bason M G, Butscher B, Weatherill K J, Adams C S 2008 *Nat. Phys.* **4** 890
- [11] Dudin Y O, Kuzmich A 2012 *Science* **336** 887889
- [12] Peyronel T, Fishtenberg O, Liang Q Y, Hofferberth S, Gorshkov A V, Pohl T, Lukin M D, Vuletić V 2012 *Nature* **488** 11361
- [13] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kibler H, Shaffer J P 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 063001
- [14] Holloway C L, Gordon J A, Schwarzkopf A, Anderson D A, Miller S A, Thaicharoen N, Raithel G 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 244102
- [15] 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]

# Electromagnetically induced transparency of Rydberg atoms in modulated laser fields\*

Yang Zhi-Wei Jiao Yue-Chun Han Xiao-Xuan Zhao Jian-Ming<sup>†</sup> Jia Suo-Tang

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

( Received 14 January 2016; revised manuscript received 23 February 2016 )

## Abstract

Rydberg atoms, with large principal quantum number  $n$ , have been widely investigated in recent years due to their peculiar properties, such as big sizes, long lifetimes and strong interactions with fields and other Rydberg atoms. Rydberg atoms are very sensitive to external fields due to their large polarizabilities scaling as  $n^7$ . These make Rydberg atoms an ideal candidate for the quantum information, the many-body interaction, etc.

In this work, we investigate the Rydberg atoms using electromagnetically induced transparency (EIT) in a ladder three-level system. The EIT is a quantum interference effect between two excitation path-ways driven by two laser fields. The main idea is performed in a room temperature cesium vapor cell, where the probe laser frequency is modulated. The ground state ( $6S_{1/2}$ ), excited state ( $6P_{3/2}$ ), and Rydberg state ( $nS_{1/2}$ ) constitute a Rydberg three-level system, in which the probe laser is fixed to the  $6S_{1/2}$  ( $F = 4$ )  $\rightarrow$   $6P_{3/2}$  ( $F' = 5$ ) transition by saturated absorption spectrum technique, whereas the coupling laser is scanned across the  $6P_{3/2} \rightarrow 49S_{1/2}$  transition. We detect the demodulated EIT signal with the lock-in amplifier (SR830). The demodulated EIT signal shows a two-peak structure. The measured spacing between two peaks increases with the frequency detuning, caused by the modulation amplitude, and half the spacing between the peak-to-peak is nearly 1.67 times the modulation amplitude of the probe laser; the measured results show that the splitting is independent of the modulation frequency. The experimental results are in agreement with the theoretical calculations. The results in our work can be used for real-time monitoring of the laser-line profiles and the fluctuation of laser frequency.

**Keywords:** electromagnetically induced transparency, modulation spectrum, Rydberg atoms

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

**DOI:** 10.7498/aps.65.103201

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2012CB921603), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11274209, 61475090, 61378013, 61378039), and the Shanxi Provincial Foundation for Studying Abroad, China (Grant No. 2014-009).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zhaojm@sxu.edu.cn](mailto:zhaojm@sxu.edu.cn)