

弱控制场作用下腔内电磁诱导透明及其线宽研究

吴嘉宝, 张示城, 胡依奇, 林功伟, 钮月萍, 龚尚庆

华东理工大学理学院, 上海 200237

摘要 基于腔内极化子的量子理论, 实验研究了腔内电磁诱导透明(EIT)现象。通过升高铷气室温度, 使铷原子数目大量增加。当系统满足集体强耦合条件时, 利用弱控制场可实现 EIT 以及线宽的显著压窄。随着温度的继续升高, 耦合效应增强, 腔线宽被进一步压窄。

关键词 量子光学; 腔内电磁诱导透明; 腔内极化子; 腔线宽压窄; 集体强耦合

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0727002

Intracavity Electromagnetically Induced Transparency and Its Linewidth Under a Weak Control Field

Wu Jiabao, Zhang Shicheng, Hu Yiqi, Lin Gongwei, Niu Yueping, Gong Shangqing

School of Science, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

Abstract Based on the quantum theory of the intracavity polaritons, the electromagnetically induced transparency phenomenon (EIT) in a cavity is investigated experimentally. By increasing the temperature of the rubidium vapor cell, a substantial increase of the number of rubidium atoms is achieved. When the collective strong coupling condition is satisfied, a weak control field is sufficient for the realization of EIT and significant narrow linewidth. With the further increase of the temperature, the collective coupling effect is enhanced and the cavity linewidth is further narrowed.

Key words quantum optics; intracavity electromagnetically induced transparency; cavity polariton; cavity linewidth narrowing; collective strong coupling

OCIS codes 270.1670; 300.3700; 020.1670

1 引 言

电磁诱导透明(EIT)^[1-4]效应作为原子相干特性最重要的物理体现之一, 自该效应发现以来都是学者们研究的热点之一。自 Boller 等^[5]于 1991 年首先在铯原子蒸气实验中观测到 EIT 现象以来, 学者们进行了大量的理论与实验研究, 如光学非线性增强^[6-8]、光速减慢^[9]、量子信息处理^[10-11]、光存储^[12-14]等。其中, EIT 与腔量子电动力学的结合将介质特性和光场操控的研究向单原子、单光子方向推进^[15-18]。

Lukin 等^[19]在 1998 年首次提出将 EIT 介质放入到光学谐振腔中以形成腔内 EIT。他们利用 Λ

型三能级模型, 采用半经典理论得到系统的极化率, 在理论上证明了由于 EIT 效应的存在, 腔透射谱的线宽可以被压窄。在该半经典理论中, 腔线宽强烈依赖于原子对光的吸收。要想实现窄的线宽, 吸收必须非常小, 因此需要强的控制场来抑制吸收。Wang 等^[20]和 Hernandez 等^[21]分别在热原子和冷原子中观测到了上述半经典理论预测的现象, 随后学者们利用腔内 EIT 在白光腔^[22-23]、慢光传输^[24]、光开关^[25-26]、腔衰荡光谱^[27]等方面开展了一系列相关研究。近年来, 许多关于腔线宽压窄的实验及理论研究被报道, 如通过两个暗共振的相互作用得到可调谐的超窄腔透射谱^[28-29], 在 V 型三能级系统中通过引入光泵效应得到更窄的腔线宽^[30], 利用磁场

收稿日期: 2018-02-05; 收到修改稿日期: 2018-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(11474092, 11774089, 11674094)

作者简介: 吴嘉宝(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事电磁诱导透明方面的研究。E-mail: 1017188980@qq.com

导师简介: 钮月萍(1977—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事量子相干调控方面的研究。

E-mail: niuypp@ecust.edu.cn (通信联系人)

引起的塞曼分裂实现腔线宽的压窄^[31],通过自发相干效应得到可控的腔线宽压窄^[32]等。

前期的理论研究发现:在全量子框架下,光子是以腔极化子(亮态偶极子、暗态偶极子)的形式存在于腔 EIT 系统中^[33]。亮态偶极子与激发态的强耦合效应引起了真空拉比分裂,而与激发态不耦合的暗态偶极子则引起了腔透射谱的压窄。当腔和原子处于集体强耦合时,一个弱的控制场就能实现腔内 EIT 效应,并有效压窄腔线宽;且随着耦合的增强,压窄程度进一步增大。本文利用热的铷原子系统,通过实验对上述现象进行了研究。通过加热铷气室,铷原子的数目增加,实现了集体强耦合。在弱控制场条件下,观测到了腔内 EIT 效应,腔内 EIT 的线宽随着温度的升高进一步被压窄。

2 实验装置和步骤

实验选用铷 87 原子的 D₁ 线(795 nm)来构建 Λ 型三能级系统。如图 1 所示,控制场耦合为 $5^2S_{1/2}, |F=2\rangle \rightarrow 5^2P_{1/2}, |F'=2\rangle$, 探测场耦合为 $5^2S_{1/2}, |F=1\rangle \rightarrow 5^2P_{1/2}, |F'=2\rangle$, 其中 S 表示原子处于基态, P 表示原子处于激发态, F 为基态总量子数, F' 为激发态总量子数, Δ_c 为控制场频率失谐量, Δ_p 为探测场频率失谐量, g 为耦合强度, Ω 为控制场的拉比频率。

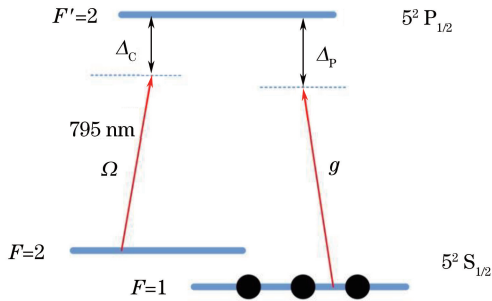


图 1 Λ 型三能级系统简图

Fig. 1 Schematic of Λ -type three-level system

图 2 所示为环形腔系统装置示意图,进入腔内的控制场与探测场的强度均通过半波片(HWP)和偏振分光棱镜(PBS)调节,其中 M1、M2、M3 为腔镜;PZT 为压电陶瓷;SAS 为饱和吸收锁频光路。控制场和探测场激光器均采用德国 Toptica 公司生产的 DL-PRO100 型可调谐单模外腔半导体激光器,在恒温、稳流状态下线宽约为 500 kHz。

腔镜 M1 和 M3 是两块焦距为 275 mm 的凹面镜,镜面镀有反射率约为 98.5% 的低损耗高反射薄膜,腔镜 M2 是反射率为 99.9% 的平面反射镜,整个

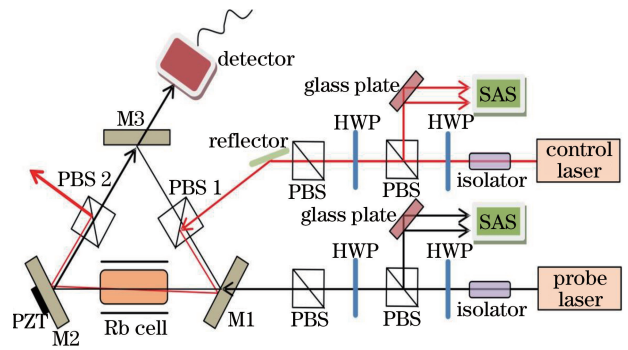


图 2 环形腔系统实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of ring cavity system

环形腔的腔长约为 600 mm。探测光经过腔镜 M1 耦合进入环形腔内,穿越铷气室后,经腔镜 M3 出射的光被探测器接收。控制光经过第一块偏振分光棱镜(PBS 1)进入腔内,与探测光在铷气室中相交,最后经过第二块偏振分光棱镜(PBS 2)离开腔,并未在腔中循环。由于 PBS 不能实现对控制光的完全反射,故在控制光经过铷气室时,让控制光与探测光呈小角度交叉,这样可避免少量残余控制光在腔中的循环对测量结果的影响。腔镜 M2 与一块环形 PZT 相连,对 PZT 接入一个调节范围为 0~60 V 的直流稳压电源,可实现对腔长的微调。经实验测得,所搭建环形腔空腔的精细度约为 300,当加入两个 PBS 及铷气室后,精细度降至 51。

关于原子集体强耦合效应下腔线宽的压窄研究,通常可以通过改变原子数密度 N 或腔模与单个原子相应跃迁能级间的耦合强度 g 来实现对耦合强度的调控。在具体实验过程中,通过改变铷气室的温度来改变 N 。在铷气室的外围制作了一个由电阻丝缠绕的加热铜管,并用铝箔包裹该铜管,使其受热均匀。先分别测量了 20 °C 和 45 °C 条件下有无控制场时的腔内 EIT 情况;然后以 5 °C 为间隔逐渐升高温度,在控制场和探测场强度一定且腔模与原子能级共振的条件下,测量了不同温度下的腔透射谱线宽的压窄情况。

3 实验结果与讨论

对于 Λ 型三能级系统,暗态偶极子 $m_D = (\cos \theta)a - (\sin \theta)C_S$, 其中 m_D 用来表征暗态偶极子, $\cos \theta = \Omega / \sqrt{Ng^2 + \Omega^2}$, $\sin \theta = \sqrt{N}g / \sqrt{Ng^2 + \Omega^2}$, θ 为混合角度, a 为腔模的湮灭算符, C_S 为原子的集体算符, Ω 为控制场的拉比频率^[34-35]。根据参考文献^[33]可知,腔透射谱线宽 $\nu = \cos^2 \theta \nu_0$, 其中 ν_0 为空腔线宽。当系统处于集体强耦合时,即 $\sqrt{N}g \gg$

$\kappa\gamma_e$ (κ 为腔泄漏速率, γ_e 为原子激发态衰减), 即使 Ω 很小, 也能出现 EIT 效应。且由腔线宽公式 $\nu = \cos^2\theta\nu_0 = \nu_0\Omega^2/(Ng^2 + \Omega^2)$ 可知, 在集体强耦合条件下, N 越大, 线宽将越窄。

实验分别测量了室温(20 °C)和加热到 45 °C 条件下有无控制场时的腔内 EIT 情况, 其中控制光功率均为 0.2 mW, 得到的腔透射谱如图 3 所示。

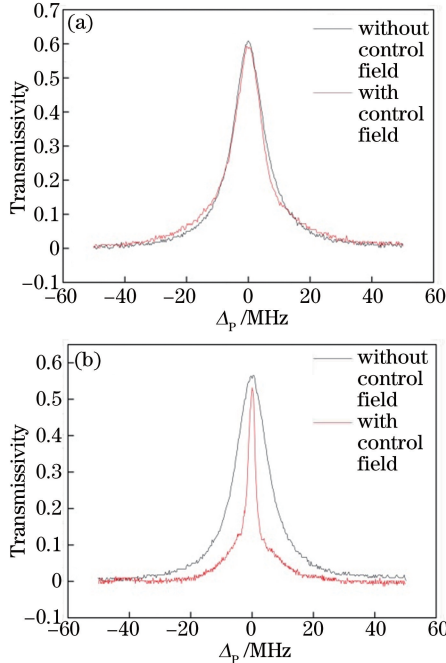


图 3 不同温度下腔透射谱随探测场频率失谐量的变化。(a) 20 °C; (b) 45 °C

Fig. 3 Cavity transmission spectrum versus frequency detuning amount of probe field under different temperatures. (a) 20 °C; (b) 45 °C

实验中, 控制光的频率与铷 87 原子的 $5^2S_{1/2}$, $|F=2\rangle \rightarrow 5^2P_{1/2}$, $|F'=2\rangle$ 能级跃迁严格共振, 探测光的频率在 $5^2S_{1/2}$, $|F=1\rangle \rightarrow 5^2P_{1/2}$, $|F'=2\rangle$ 的跃迁频率附近作周期性来回扫描, 通过调节 PZT 的电压使腔模与原子能级共振。图 3(a) 所示黑色谱线的半峰全宽约为 11.82 MHz, 红色谱线的半峰全宽约为 11.78 MHz。在 20 °C 温度下, 铷原子数目比较少, 不满足集体强耦合条件, 故加上弱控制场并不能实现腔内 EIT, 表现在腔透射谱上, 就是线宽几乎没有被压窄。图 3(b) 所示黑、红两条谱线的半峰全宽分别为 12.46 MHz 和 2.98 MHz。由图 3 可知, 当温度升至 45 °C 时, 原子数目增多, 此时引入一个弱控制场, 就可以引起腔内 EIT, 从而显著压窄腔透射谱的线宽。

在集体强耦合条件下, 原子数密度 N 越大, 线

宽越窄, 实验中通过升高铷气室的温度来增加原子数目。在上述实验条件的基础上, 以 5 °C 为间隔逐渐升高铷气室的温度, 并分别测量各个温度条件下腔透射谱的情况, 得到的结果如图 4 所示。

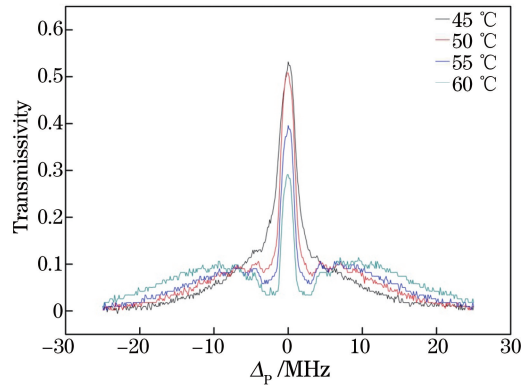


图 4 不同温度下的腔透射谱

Fig. 4 Cavity transmission spectra under different temperatures

分析实验数据可知, 45, 50, 55, 60 °C 下的腔透射谱半峰全宽分别为 2.98, 2.60, 2.05, 1.84 MHz。在同样强度的弱控制场作用下, 随着温度的升高, 气室中的铷原子数目急剧增加, $\sqrt{N}g$ 的值也增大, 这使得处于共振位置处的腔透射谱的线宽被不断压窄。

4 结 论

基于腔内极化子的量子理论, 通过实验研究了弱控制场诱导腔内 EIT 以及腔线宽的变化。实验结果表明: 当腔原子系统不满足集体强耦合条件时, 仅加入一个弱控制场并不能实现腔内 EIT; 而当系统处于集体强耦合效应时, 利用弱控制场便能实现腔内 EIT, 并能显著压窄透射谱的线宽。随着温度的升高, 原子数目会明显增加, 即耦合效应会增强, 腔透射谱的线宽可被进一步压窄。该研究为低能耗下高精度光谱学测量、频率稳定、光信息处理等提供了参考。

参 考 文 献

[1] Harris S E, Field J E, Imamoglu A. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency [J]. Physical Review Letters, 1990, 64(10): 1107-1110.
 [2] Harris S E. Electromagnetically induced transparency [J]. Physics Today, 1997, 50(7): 36-42.
 [3] Fleischhauer M, Imamoglu A, Marangos J P. Electromagnetically induced transparency: Optics in

- coherent media[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2005, 77(2): 633-673.
- [4] Wang Y B, Cong D L, Xu P, *et al.* Observation of atomic coherence in intercombination transition line of strontium atom[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0427001.
王叶兵, 丛东亮, 许朋, 等. 锶原子互组跃迁中原子相干光谱的实验观测[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0427001.
- [5] Boller K-J, Imamoglu A, Harris S E. Observation of electromagnetically induced transparency[J]. *Physical Review Letters*, 1991, 66(20): 2593-2596.
- [6] Hakuta K, Marmet L, Stoicheff B P. Electric-field-induced second-harmonic generation with reduced absorption in atomic hydrogen[J]. *Physical Review Letters*, 1991, 66(5): 596-599.
- [7] Zhang G Z, Hakuta K, Stoicheff B P. Nonlinear optical generation using electromagnetically induced transparency in atomic hydrogen[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(19): 3099-3102.
- [8] Liu Y T, Niu Y P, Lin G W, *et al.* Enhancement of fifth-order nonlinearity induced by atomic coherence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0719002.
刘羽桐, 钮月萍, 林功伟, 等. 原子相干引起的五阶非线性增强[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0719002.
- [9] Hau L V, Harris S E, Dutton Z, *et al.* Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas[J]. *Nature*, 1999, 397(6720): 594-598.
- [10] Lukin M D, Imamoglu A. Nonlinear optics and quantum entanglement of ultra-slow single photons [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(7): 1419-1422.
- [11] Yang X H, Zhou Y Y, Xiao M. Entangler via electromagnetically induced transparency with an atomic ensemble[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(3): 3479.
- [12] Phillips D F, Fleischhauer A, Mair A, *et al.* Storage of light in atomic vapor[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(5): 783-786.
- [13] Zhu S G, Zhang Y, Chen X Z, *et al.* Storage of an optical packet in the EIT medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(s1): 769-770.
- [14] Heinze G, Hubrich C, Halfmann T. Stopped light and image storage by electromagnetically induced transparency up to the regime of one minute[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(3): 033601.
- [15] Mücke M, Figueroa E, Bochmann J, *et al.* Electromagnetically induced transparency with single atoms in a cavity [J]. *Nature*, 2010, 465(7299): 755-758.
- [16] Tanji-Suzuki H, Chen W L, Landig R, *et al.* Vacuum-induced transparency[J]. *Science*, 2011, 333(6047): 1266-1269.
- [17] Ritter S, Nölleke C, Hahn C, *et al.* An elementary quantum network of single atoms in optical cavities [J]. *Nature*, 2012, 484(7393): 195-200.
- [18] Kampschulte T, Alt W, Manz S, *et al.* Electromagnetically-induced-transparency control of single-atom motion in an optical cavity[J]. *Physical Review A*, 2014, 89(3): 033404.
- [19] Lukin M D, Fleischhauer M, Scully M O, *et al.* Intracavity electromagnetically induced transparency [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(4): 295-297.
- [20] Wang H, Goorskey D J, Burkett W H, *et al.* Cavity-linewidth narrowing by means of electromagnetically induced transparency[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(23): 1732-1734.
- [21] Hernandez G, Zhang J P, Zhu Y F. Vacuum Rabi splitting and intracavity dark state in a cavity-atoms system[J]. *Physical Review A*, 2007, 76(5): 053814.
- [22] Wu H B, Xiao M. White-light cavity with competing linear and nonlinear dispersions[J]. *Physical Review A*, 2008, 77(3): 031801.
- [23] Ying K, Niu Y P, Chen D J, *et al.* White light cavity via modification of linear and nonlinear dispersion in an N-type atomic system[J]. *Optics Communications*, 2015, 342: 189-192.
- [24] Zhang J P, Hernandez G, Zhu Y F. Slow light with cavity electromagnetically induced transparency [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(1): 46-48.
- [25] Wei X G, Zhang J P, Zhu Y F. All-optical switching in a coupled cavity-atom system[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033808.
- [26] Zou B C, Tan Z, Musa M, *et al.* Interaction-free all-optical switching at low light intensities in a multi-atom cavity-QED system[J]. *Physical Review A*, 2014, 89(2): 023806.
- [27] Ji M Y, Duan Y F, Niu Y P, *et al.* Cavity ringdown spectroscopy based on V-type electromagnetically induced transparency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1127001.
吉慕尧, 段亚凡, 钮月萍, 等. 基于 V 型电磁诱导透明效应的腔衰荡光谱研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1127001.
- [28] Peng Y D, Jin L L, Niu Y P, *et al.* Tunable ultranarrow linewidth of a cavity induced by interacting dark resonances[J]. *Journal of Modern Optics*, 2010, 57(8): 641-645.
- [29] Ying K, Niu Y P, Chen D J, *et al.* Realization of cavity linewidth narrowing via interacting dark resonances in a tripod-type electromagnetically

- induced transparency system[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2014, 31(1): 144-148.
- [30] Ying K, Niu Y P, Chen D J, *et al.* Cavity linewidth narrowing by optical pumping-assisted electromagnetically induced transparency in V-type rubidium at room temperature[J]. Journal of Modern Optics, 2014, 61(4): 322-327.
- [31] Chen H N, Ying K, Duan Y F, *et al.* Cavity linewidth narrowing by means of electromagnetically induced transparency in Rb with a longitudinal magnetic field [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(9): 092701.
- [32] Tian S C, Wan R G, Shan X N, *et al.* Controllable cavity linewidth narrowing via spontaneously generated coherence in a four level atomic system[J]. Optics Communications, 2015, 356: 155-160.
- [33] Lin G W, Yang J, Niu Y P, *et al.* Cavity linewidth narrowing with dark-state polaritons[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(1): 014201.
- [34] Fleischhauer M, Lukin M D. Dark-state polaritons in electromagnetically induced transparency[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(22): 5094-5097.
- [35] Dong C H, Fiore V, Kuzyk M C, *et al.* Optomechanical dark mode[J]. Science, 2012, 338(6114): 1609-1613.