

文章编号: 1007-6654(2009)03-0211-04

激光线宽对原子相干效应的影响

王文琦, 李中华, 周海涛, 李媛, 郜江瑞, 张俊香

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西太原 030006)

摘要: 该文在 λ 型三能级原子系统中分别讨论了耦合场和探针场线宽对电磁诱导透明 (EIT) 的影响, 通过实验观测探针光和耦合光线宽变化时 EIT 的透明窗口的变化, 得出耦合光对 EIT 的影响大于探针光线宽的影响, 这一结果将为原子存储时间的提高具有一定意义。

关键词: 电磁诱导透明; 激光线宽; 白噪声

中图分类号: O431 文献标识码: A

0 引言

光与原子相互作用产生的原子相干效应如相干布局俘获 (CPT)^[1-4], 电磁诱导透明 (EIT)^[5-8] 等是量子光学领域里研究的重要内容之一, 有关这一领域的研究目前依然非常活跃。其中 EIT 效应可导致原子介质对光场的色散增强而吸收减弱, 从而引起光场在原子介质中传播速度的减慢, 因此可以实现光信息在介质中的存储。与此同时, EIT 现象也可应用于无反转激光 (LWI)^[9] 的产生以及提高光学非线性效应^[10-12]。在量子信息处理中, 光与原子的相互作用也具有重要的地位, 利用 EIT 介质可以实现光信息在光场与原子之间的转换, 存储和释放。在利用 EIT 进行信息处理的一系列应用实验中, EIT 窗口的大小是一重要物理指标, 例如, 它直接影响到光减速的程度以及光存储的时间大小等。因此各种参数对 EIT 窗口的影响的讨论也有着重要意义。通过计算可知, 激光器线宽的增加会抑制 EIT 的发生^[13, 7]。而且, 实验上已经在铷原子系统中证实了耦合光线宽对 EIT 的影响^[14]。在下面的实验中, 我们在铯原子系统中对耦合光和探针光线宽对 EIT 现象的影响进行了比较, 得出的结果是,

耦合光相比探针光而言, 其线宽对 EIT 效应的影响大于探针光, 这一现象说明, 在进行光减速与光存储实验中耦合光的选取更值得引起注意。

1 理论处理

下面对激光线宽引起 EIT 效应的变化进行简单的理论介绍。对于一个 λ 型三能级系统, 若耦合光和探针光有几乎相同的波长以及以相同的传播方向通过原子气室时。对于速度为 v 的原子系统而言, 探针光和耦合光的一阶多普勒效应相互抵消。假设强的耦合光几乎将全部的原子从一个低能级 (对应于泵浦光) 泵浦到另一个低能级 (对应于探针光), 且原子速度分布服从麦克斯维分布, 那么系统密度矩阵的稳态解可以很容易得到。对于弱的探针光, 原子的极化率可表示为^[7, 8]:

$$\chi = \frac{4iEg_{12}^2 N_0 \sqrt{\pi}}{\epsilon_0 u \omega_p} e^{z^2} [1 - \text{erf}(z)]$$

式中

$$z = \frac{c}{u \omega_p} \left[\gamma - i\Delta_1 + \frac{\Omega_c^2 / 4}{\Gamma_{31} - i(\Delta_1 - \Delta_2)} \right]$$

其中 $\text{erf}(z)$ 是关于复数 z 的误差函数, Δ_1 和 Δ_2 分

*收稿日期: 2009-01-11

基金项目: 国家自然科学基金 (10434080)

作者简介: 王文琦 (1982-), 女, 山西大同人, 山西大学光学专业在读硕士研究生, 山西大同大学教师。

别是探针场和耦合场相对于原子跃迁频率的失谐, $u/\sqrt{2}$ 是原子的均方根速率, $2hg_{12}$ 是探针光跃迁的偶极矩阵元, Ω_c 是耦合场的拉比频率. $\gamma \equiv \frac{1}{2}[\Gamma_{21} + \Gamma_{23} + \Gamma_{31}]$, Γ_{31} 是两个低能级之间的衰减率, Γ_{21} 和 Γ_{23} 是高能级向低能级的衰减率. N_0 是单位体积内原子的个数. ω_p 是探针光的角频率. 极化率的实部和虚部分别表示介质的色散和吸收特性, 吸收系数由下式给出: $\alpha = \omega_p n_0 \chi'' / c n_0$ 是远离共振处介质对探针光的折射率. 在吸收曲线的中心, 也就是零失谐处 ($\Delta_1 = \Delta_2 = 0$), 吸收系数 α 将会减小

$$\frac{\alpha(\Omega_c)}{\alpha(0)} = \left[\frac{1}{\sqrt{\pi} z_0 e^{z_0^2} (1 - \text{erf} z_0)} \right] \frac{1}{1 + \Omega_c^2 / 4\gamma\Gamma_{31}}$$

这里 $z_0 = c\gamma / u\omega_p = 2\sqrt{2}(\gamma / \Delta\omega_p)$, $\Delta\omega_p$ 是原子样品的多普勒宽度. 以上结论是理想的 EIT 条件下才成立, 也就是 $\Omega_c^2 / 4\gamma\Gamma_{31} \gg 1$, 如果不满足该条件时, 需要通过极化率来进行计算, 得出吸收系数.

如果我们考虑到激光器的线宽, 那么上述结果需要进行修正, 衰减率可作以下变换

$$\gamma \rightarrow \gamma + \gamma_p, \quad \Gamma_{31} \rightarrow \Gamma_{31} + \gamma_p + \gamma_c$$

假设激光器的线型是洛仑兹型. $2\gamma_p$ 和 $2\gamma_c$ 是探针光和耦合光的线宽(半高宽). 代换后吸收减小发生的条件为:

$$\frac{\Omega_c^2}{4(\gamma + \gamma_p)(\Gamma_{31} + \gamma_p + \gamma_c)} \gg 1$$

从以上各式可以看到. 激光器的线宽对吸收率有一定的影响. 在下面的实验中, 我们分别改变探针光和耦合光的线宽, 来观测 EIT 的变化情况.

2 实验装置及结果

实验装置如图 1 所示, 我们采用德国 toptica 公司的半导体激光器 DL100 作为实验用光源, 输出波长 894.5 nm 的激光, 对应于铯原子的 D_1 线. 激光器线宽大约是 1M 左右, 实验中, 我们采用铯原子的超精细能级 $6^2P_{1/2} (F=4)$ 作为 EIT 的上能级, $6^2S_{1/2} (F'=3, F'=4)$ 作为 EIT 的下能级, 分别对应耦合光和探针光. 将耦合光锁定在 $F'=3 \rightarrow F=4$ 上, 探针光在 $F'=4 \rightarrow F=4$ 附近扫描. 对探针光进行探测, 观察探针光经过铯泡

后的吸收情况.

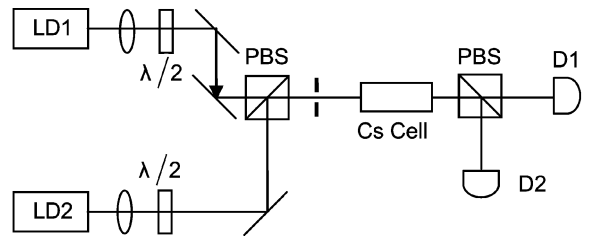


图 1 LD1, LD2 半导体激光器; PBS 偏振分束棱镜; $\lambda/2$: 半波片; D1, D2 光电探测器.

Fig 1 LD1, LD2 laser diodes; PBS polarizing cubic beam splitter $\lambda/2$ halfwave plate, D1, D2: silicon diode detector

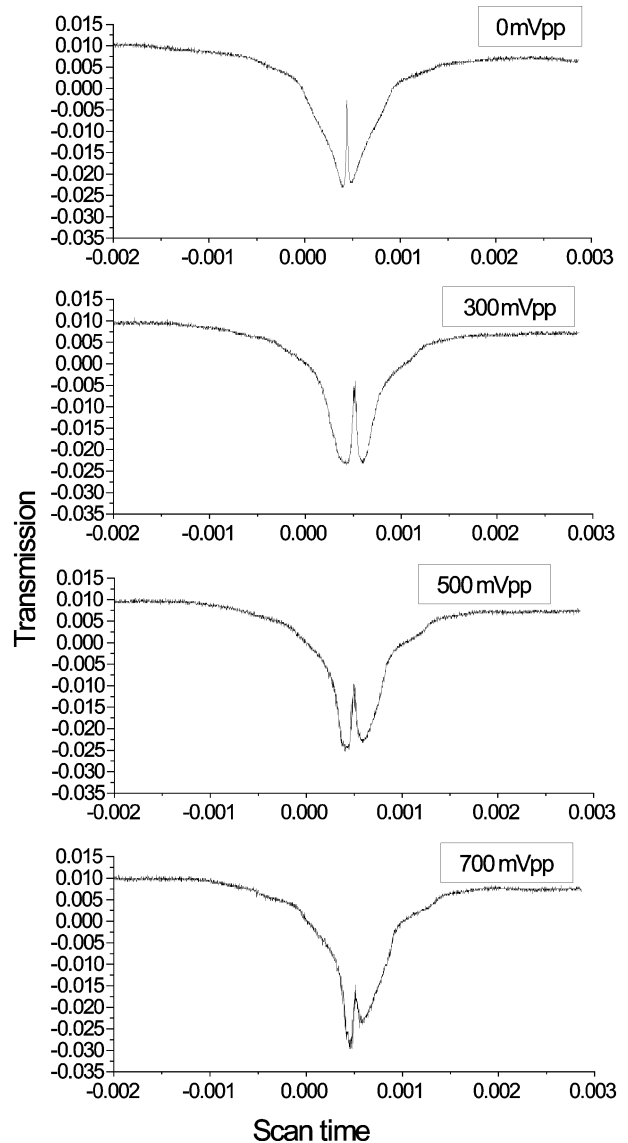


图 2 探针光加噪声时的透射曲线

Fig 2 Transmission of probe beam with different noise for probe beam

分别改变探针光和耦合光的线宽, 观察 EIT 峰的变化情况。利用信号发生器产生的白噪声调制激光器的驱动电流使激光器输出激光的线宽发生改变。在实验中, 我们使用 RIGOL 的 DG1011 信号源输出一个白噪声, 通过改变输入噪声的幅值, 来改变激光器输出激光的线宽。

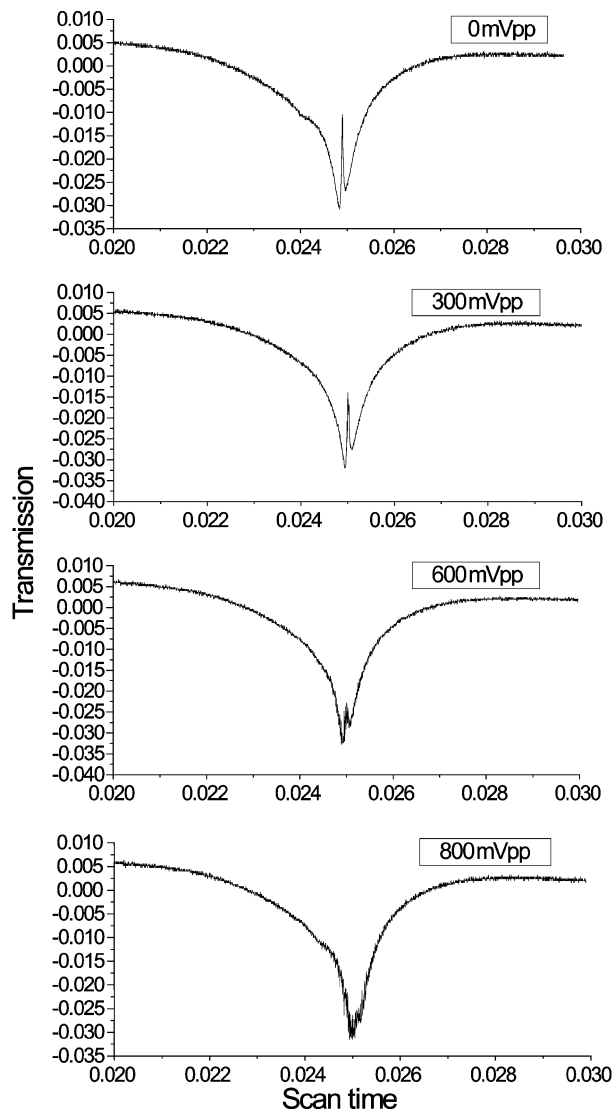


图 3 泵浦光加噪声时的透射曲线
Fig 3 Transmission of probe beam with different noise of coupling

图 2 所示为探针光加噪声时, EIT 峰随噪声幅值的变化情况, 耦合光功率为 3 mW, 探针光功率为 150 μW, 从上到下分别表示, 噪声为 0 mVpp 300 mVpp 500 mVpp 700 mVpp 时的 EIT 窗口的变化。图 3 所示为耦合光加噪声时, EIT 峰随噪声幅值的变化情况, 耦合光功率为 3mW, 探针光功率为 150 μW, 从上到下分别表示, 噪声

为 0 mVpp 300 mVpp 600 mVpp 800 mVpp 时的 EIT 窗口变化。从图中可以看出, 当我们增加噪声幅值时, 介质对探针光的吸收都有减小。对于探针光, 电磁感应透明效应降低, 是由于探针场只有与探测跃迁相共振的部分才能通过介质, 而与探测跃迁不共振的部分就会被介质吸收, 随着所加噪声幅值的增大, 探针光的线宽也增大, 相对的, 共振频率处的光功率减小, 透过的光也随之减少。而当泵浦光的线宽增大时, 由于系统的 dephasing 增加, 从而电磁感应透明效应降低。

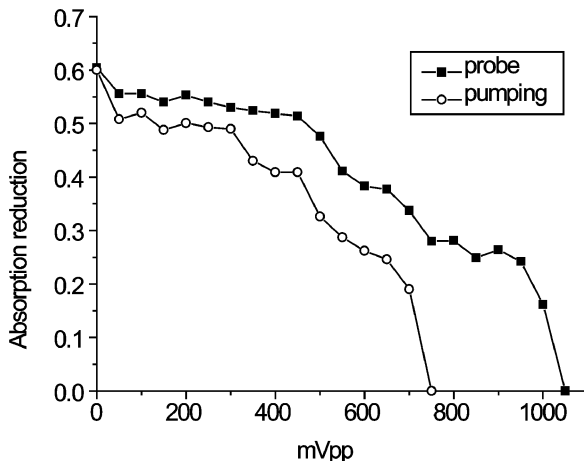


图 4 吸收减小随噪声幅值的变化
Fig 4 Absorption reduction vs the noise amplitude

图 4 是探针光和泵浦光分别加噪声时, 对 EIT 窗口的变化情况的比较。从图中很明显可以看出, 随着所加噪声幅值的增加, EIT 是逐渐减小的, 最后都趋近于零。同时可以看出, 耦合光的线宽对 EIT 的影响明显大于探针光线宽的影响。

3 结论

本文对耦合光与探针光线宽对 EIT 的影响进行了定量比较, 结果表明, 耦合光线宽的影响相比探针光更加明显, 这一现象为我们下一步利用 EIT 进行量子信息存储实验提供了物理参数选择的参考。因此在进行量子存储实验中, 选择线宽较小的耦合光也是获得高保真度, 长时间存储的重要因素之一。

参考文献:

- [1] AKULSH N A M, CELIKOV A A, VELICH ANSKY V L. Sub-natural Absorption Resonances on the D1 Line of Rubidium Induced by Coherent Population Trapping [J]. *Opt Commun*, 1991, **84**(3- 4): 139-143
- [2] DALTON B J KNIGHT P L. Population Trapping and Ultranarrow Raman Lineshapes Induced by Phase-fluctuating Fields [J]. *Opt Commun*, 1982, **42**(6): 411- 416.
- [3] OSMAN K I. Population Trapping in a Four-level System in the Presence of Non-lorentzian Fluctuating Laser Fields [J]. *Opt Commun*, 1992, **88**(4-6): 364-370
- [4] GAUTAM VEMURI DONALD Wood M. Lasing Without Inversion with a Fluctuating Pump Gain Dependence on Pump Noise and Frequency [J]. *Phys Rev A*, 1994, **50**(1): 747-753
- [5] BOLLER K-J MAMOGLU A, HARRIS S E. Observation of Electromagnetically Induced Transparency [J]. *Phys Rev Lett* 1991, **66**(20): 2593-2596
- [6] FIELD J E, HAHN K H, HARRIS S E, *ibid.* Observation of Electromagnetically Induced Transparency in Collisionally Broadened Lead Vapor [J]. *Phys Rev Lett* 1991, **67**(22): 3062-3065.
- [7] GEA-BANACLOCHE J LIYong-qing JN Shao-zheng, *et al* Electromagnetically Induced Transparency in Ladder-type Inhomogeneously Broadened Media Theory and Experiment [J]. *Phys Rev A*, 1995, **51**(1): 576-584
- [8] LIYong-qing XIAO M in Electromagnetically Induced Transparency in a Three-level Λ -type System in Rubidium Atoms [J]. *Phys Rev A*, 1995, **51**(4): R2703-R2706
- [9] ZIBROV A S, LUKN M D, N KONOVD E, *et al* Experimental Demonstration of Laser Oscillation without Population Inversion via Quantum Interference in Rb [J]. *Phys Rev Lett* 1995, **75**(8): 1499-1502.
- [10] HAKUTA K, MARMET L, STOICHEFF B P. Electric-field-induced Second-harmonic Generation with Reduced Absorption in Atomic Hydrogen [J]. *Phys Rev Lett* 1991, **66**(5): 596-599.
- [11] ZHANG G Z HAKUTA K, STOICHEFF B P, *ibid.* Nonlinear Optical Generation Using Electromagnetically Induced Transparency in Atomic Hydrogen [J]. *Phys Rev Lett* **71**(19): 3099-3102
- [12] LIYong-qing XIAO M in Enhancement of Nondegenerate Four-wave Mixing Based on Electromagnetically Induced Transparency in Rubidium Atoms [J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(14): 1064-1066
- [13] 王丽, 杨兴强, 肖绍武. 激光场线宽对电磁诱导吸收效应的影响 [J]. 量子光学学报, 2008, **14**(3): 267-272
- [14] LU Bao-long, BURKETT W H, XIAO M in Electromagnetically Induced Transparency with Variable Coupling-laser Linewidth [J]. *Phys Rev A*, 1997, **56**(1): 976-979.

An Influence of Laser Linewidth on Atomic Coherent Effect

WANG Wen-qiang LI Zhong-hua, ZHOU Hai-tao

LI Yuan, GAO Jiang-ni, ZHANG Jun-xiang

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices and Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract The effect induced by the width of coupling light and probe light on EIT in three-level Λ -type atomic system is discussed. By observing the variation of the transparent window of EIT, we find that linewidth of coupling light on EIT has more effect than linewidth of probe light. The result may be useful to enhance the storage time of quantum memory.

Key words electromagnetically induced transparency; laser linewidth; white noise