

文章编号: 0253-2239(2007)07-1305-4

# 利用微波场抑制电磁感应透明的功率展宽\*

张连水 杨丽君\*\* 李晓莉 韩 理 李晓菁 郭庆林 傅广生

(河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

**摘要:** 电磁感应透明的重要参量之一是透明窗口的光谱线宽。在  $\Lambda$ -型三能级原子系统中, 电磁感应透明的光谱线宽由两低能级间的相干失相速率决定, 若两低能级同属于原子基态的精细结构, 则电磁感应透明窗口的极限线宽很窄。但较强的耦合场作用往往会导致电磁感应透明窗口的功率展宽, 而减弱耦合场又会影响电磁感应透明的对比度和深度。为此, 通过引入微波控制场共振作用于基态精细能级间构成三场作用下的准  $\Lambda$ -型四能级系统, 利用微波控制场来抑制耦合场所引起的电磁感应透明窗口的功率展宽。结果表明, 引入微波控制场不仅得到了双窗口电磁感应透明, 而且在保持较好对比度的条件下, 使得电磁感应透明的光谱线宽明显小于不加微波场的情况。

**关键词:** 量子光学; 电磁感应透明; 功率展宽; 四能级系统

中图分类号: O431.2; O437 文献标识码: A

## Suppressing Power Broadening of Electromagnetically Induced Transparency by Utilizing Microwave Field

Zhang Lianshui Yang Lijun Li Xiaoli Han Li Li Xiaowei Guo Qinglin Fu Guangsheng

(College of Physical Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002)

**Abstract:** One of the most interesting properties of the EIT is that its linewidth can be extremely narrow in a  $\Lambda$ -type configuration where two lower levels are hyperfine ones within a ground state. In such a configuration, the EIT linewidth is mainly governed by the coherence relaxation rate between hyperfine levels which can be of several orders of magnitude smaller than that of the optical transition. However, As intensity of coupling field increases, the EIT linewidth can be broadened. In order to control power broadening of EIT, we present a quasi- $\Lambda$  four-level system, and introduce an microwave field to drive a hyperfine transition. It is shown that the microwave field not only splits an EIT window into a doublet but also narrows the EIT window. Power broadening of EIT window can be suppressed by utilizing a microwave field.

**Key words:** quantum optics; electromagnetically induced transparency; power broadening; four-level configuration

### 1 引 言

电磁感应透明 (Electromagnetically induced transparency, EIT) 效应是近年来非线性光学及量子光学领域倍受关注的研究课题, 其本质就是电磁场与原子系统相互作用形成的量子相干效应<sup>[1]</sup>。电磁感应透明的一个重要特性就是具有极窄的透明窗口, 尤其是在  $\Lambda$ -型三能级系统中, 电磁感应透明窗口的最小线宽取决于两低能级间的相干失相速率。当两低能级同属于原子基态的精细结构能级时, 两能级间的弛豫速率比偶极光学跃迁的弛豫速率小几

个数量级, 从而可以得到很窄的透明窗口, 这对电磁感应透明的应用具有重要意义。

在实际的原子系统中, 影响电磁感应透明光谱线宽的因素很多, 如原子系统能级间的弛豫速率、气体介质的多普勒展宽、碰撞展宽以及固体介质中的晶格振动谱线展宽等。人们已对不同原子、分子系统中的电磁感应透明线宽随各系统参量的变化进行了很多的实验和理论研究<sup>[2~7]</sup>。除此之外, 相干电磁场的作用强度也会导致电磁感应透明的功率展宽<sup>[8~11]</sup>。尤其是耦合场作用强度增大导致的电磁

\* 河北省自然科学基金项目 (A2005000091) 和河北省教育厅项目 (2004103) 资助课题。

作者简介: 张连水 (1956—), 男, 河北人, 教授、博士生导师, 主要从事激光物理和量子光学方面的研究。

\*\* 通信联系人。E-mail: ylijun2002@yahoo.com.cn

收稿日期: 2006-10-12; 收到修改稿日期: 2006-12-09

感应透明的功率展宽,往往是难以避免的。因为减小耦合场的作用强度,虽然理论上可以使透明窗口变窄,但同时电磁感应透明的光谱深度和对比度也随之减小,影响电磁感应透明效应的实验观测。因此,在只有耦合场和探测场作用下的  $\Lambda$ -型三能级系统中,很难获得对比度接近 1 而线宽较窄的电磁感应透明窗口。为了解决这一矛盾,本文在  $\Lambda$ -型三能级系统的基础上,引入共振微波场作用于与耦合场相关联的下能级和另外的基态精细结构能级之间,形成三场作用下的准  $\Lambda$ -型四能级系统,利用微波控制场来抑制电磁感应透明的功率展宽。研究表明,通过加入微波控制场可以有效地抑制电磁感应透明窗口的功率展宽。

近年来,对多场作用下的  $\Lambda$ -型能级系统的电磁感应透明特性的研究很多<sup>[12~18]</sup>,而本文利用附加微波控制场来减小电磁感应透明线宽,因为与光波场相比,微波场在实际应用中更便于控制,因此,利用微波场激发精细结构能级间的跃迁来抑制电磁感应透明的功率展宽具有重要的实用价值。

## 2 系统的密度矩阵方程

三场作用下的准  $\Lambda$ -型四能级原子系统模型如图 1 所示。其中,  $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$  和  $|3\rangle$  同属于基态的精细

结构能级,能级  $|4\rangle$  为激发态能级。频率为  $\omega_c$  的耦合场作用于  $|3\rangle - |4\rangle$  跃迁,频率为  $\omega_p$  的探测场的吸收谱通过扫描  $|1\rangle - |4\rangle$  跃迁获得。耦合场和探测场与原子系统相互作用的拉比频率分别为  $\Omega_c = \mu_{43} E_c / \hbar$  和  $\Omega_p = \mu_{41} E_p / \hbar$ 。频率为  $\omega_d$  的微波控制场作用于能级  $|2\rangle$  和  $|3\rangle$  之间,拉比频率为  $\Omega_d = \mu_{32} E_d / \hbar$ 。

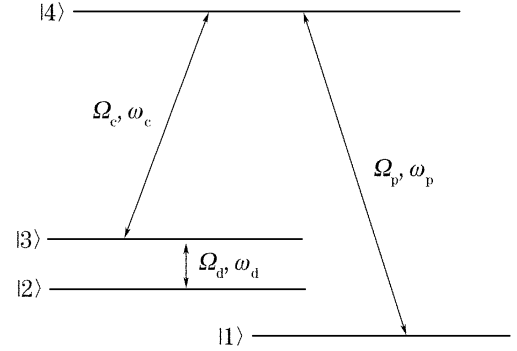


图 1 能级图

Fig. 1 Energy level scheme

该系统的总哈密顿量为

$$H = H_0 + V(t), \quad (1)$$

其中  $H_0$  是系统未受扰动时的哈密顿量,  $V(t)$  是外场与能级系统相互作用的哈密顿量。在旋转波近似条件下,考虑到系统内各能级间的自发辐射衰减,该系统的密度矩阵方程表示为

$$\dot{\rho}_{11} = i\chi_p(\rho_{41} - \rho_{14}) + W_{41}\rho_{44} + \Gamma(\rho_{22} - \rho_{11}) + \Gamma(\rho_{33} - \rho_{11}), \quad (2a)$$

$$\dot{\rho}_{22} = i\chi_d(\rho_{32} - \rho_{23}) + W_{42}\rho_{44} - \Gamma(\rho_{22} - \rho_{11}) + \Gamma(\rho_{33} - \rho_{22}), \quad (2b)$$

$$\dot{\rho}_{33} = -i\chi_d(\rho_{32} - \rho_{23}) + i\chi_c(\rho_{43} - \rho_{34}) + W_{43}\rho_{44} - \Gamma(\rho_{33} - \rho_{22}) - \Gamma(\rho_{33} - \rho_{11}), \quad (2c)$$

$$\dot{\rho}_{44} = -i\chi_p(\rho_{41} - \rho_{14}) - i\chi_c(\rho_{43} - \rho_{34}) - W_{44}\rho_{44}, \quad (2d)$$

$$\dot{\rho}_{21} = d_{21}\rho_{21} + i\chi_d\rho_{31} - i\chi_p\rho_{24}, \quad (2e)$$

$$\dot{\rho}_{31} = d_{31}\rho_{31} + i\chi_c\rho_{41} + i\chi_d\rho_{21} - i\chi_p\rho_{34}, \quad (2f)$$

$$\dot{\rho}_{32} = d_{32}\rho_{32} + i\chi_c\rho_{42} - i\chi_d(\rho_{33} - \rho_{22}), \quad (2g)$$

$$\dot{\rho}_{41} = d_{41}\rho_{41} - i\chi_p(\rho_{44} - \rho_{11}) + i\chi_c\rho_{31}, \quad (2h)$$

$$\dot{\rho}_{42} = d_{42}\rho_{42} + i\chi_p\rho_{12} + i\chi_c\rho_{32} - i\chi_d\rho_{43}, \quad (2i)$$

$$\dot{\rho}_{43} = d_{43}\rho_{43} + i\chi_p\rho_{13} - i\chi_d\rho_{42} - i\chi_c(\rho_{44} - \rho_{33}), \quad (2j)$$

其中  $\chi_c = \Omega_c/2$ ,  $\chi_p = \Omega_p/2$ ,  $\chi_d = \Omega_d/2$ ,  $d_{ij} = i\delta_{ij} - \gamma_{ij}$  为复失谐量,  $\delta_{ij}$  分别为:  $\delta_{41} = \omega_p - \omega_{41}$ ,  $\delta_{43} = \omega_c - \omega_{43}$ ,  $\delta_{32} = \omega_d - \omega_{32}$ ,  $\delta_{31} = \delta_{41} - \delta_{43}$ ,  $\delta_{42} = \delta_{43} + \delta_{32}$ ,  $\delta_{21} = \delta_{41} - \delta_{32} - \delta_{43}$ ,  $\gamma_{ij}$  是能级  $|i\rangle$  和  $|j\rangle$  间的相干失相速率。  $W_4 = W_{41} + W_{42} + W_{43}$  为能级  $|4\rangle$  的粒子数衰减速率。  $W_{4i}$  为由  $|4\rangle$  能级到基态精细结构能级  $|i\rangle$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 的粒子数衰减速率。对于本文所讨论的准  $\Lambda$ -型四能级原子系统,可以近似认为各基态

精细能级间的粒子数衰减速率相等,用  $\Gamma$  表示。

本文的目的是研究耦合场和微波控制场对电磁感应透明特性的影响,因此,将探测场取作弱场,采用微扰法求解方程组(2),得到的一级稳态解  $\rho_{41}$ <sup>[18]</sup>。探测场的吸收正比于密度矩阵方程的非对角密度矩阵元  $\rho_{41}$  的虚部,由此得出该系统的探测吸收谱,以及电磁感应透明的非线性特性随微波控制场的变化规律。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 准 $\Lambda$ -型四能级原子系统的探测吸收谱

求解系统的密度矩阵方程(2),得到准  $\Lambda$ -型四能级原子系统的探测吸收谱,如图2所示。为计算方便起见,设  $W_4 = 1$ ,其他的系统参量以及作用场

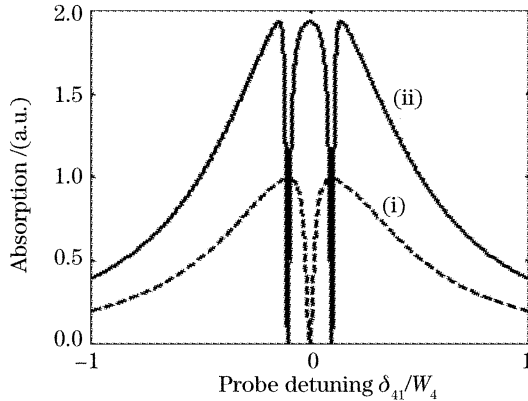


图2 准  $\Lambda$ -型四能级原子系统的探测吸收谱。虚线(i)对应  $\Omega_c = 0.2, \Omega_d = 0$ ,实线(ii)为  $\Omega_c = \Omega_d = 0.2$  的情况。各参量均以  $W_4$  为单位取相对值

Fig. 2 Spectra absorption of the probe laser in quasi  $\Lambda$ -type four-level atomic system. Curve (i) gives the EIT resonance when microwave field is absent ( $\Omega_c = 0.2, \Omega_d = 0$ ), curve (ii) shows the splitting of EIT resonance when microwave field is applied ( $\Omega_c = \Omega_d = 0.2$ ). All parameters is normalized to  $W_4$

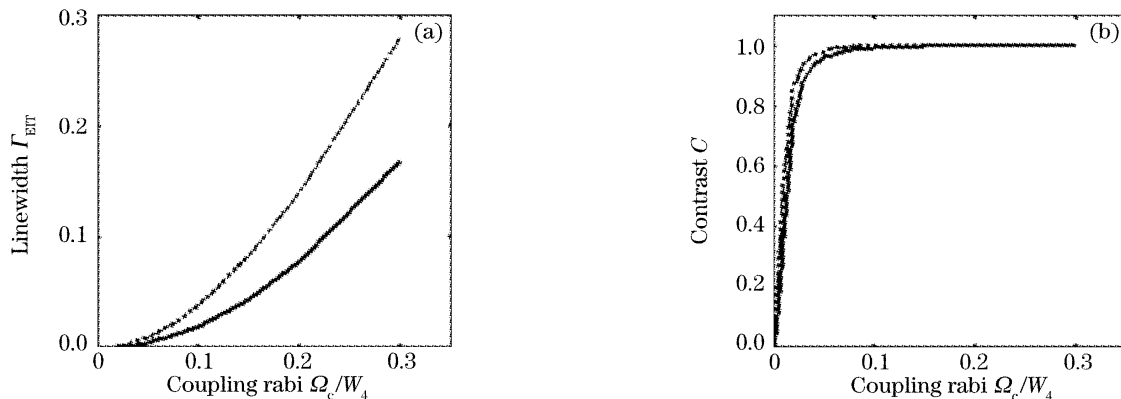


图3 电磁感应透明的线宽(a),对比度(b)随耦合场拉比频率的变化。虚线对应于微波场等于0的情况,实线为加入微波场( $\Omega_d = \Omega_c$ )的情况。耦合场的拉比频率及电磁感应透明的线宽均以  $W_4$  为单位取相对值

Fig. 3 The dependence of EIT linewidth (a) and contrast (b) on Rabi frequency of coupling field. The dotted lines are for case that microwave field is absent, the solid lines are the results when microwave field is applied. The coupling Rabi frequency and EIT linewidth are normalized to  $W_4$

图3中的虚线给出了准  $\Lambda$ -型四能级原子系统在不加微波控制场情况下,电磁感应透明的光谱线宽[图3(a)中的虚线]和对比度[图3(b)中的虚线]随耦合场作用拉比频率的变化规律。由图中可以看出,当耦合场很弱( $\Omega_c < 0.005$ )时,电磁感应透明的窗口由两低能级间的相干失相速率决定,电磁感应透明线宽很窄,且基本不随耦合场作用强度的增大而增大。

的拉比频率和失谐量均取相对值。在本原子系统中,取  $\Gamma = 10^{-4}$ 。

图2中曲线(i)对应于微波控制场的强度为零的情况。此时的探测吸收谱与双场作用下的  $\Lambda$ -型三能级原子系统相同,在探测场的共振频率处出现了凹陷,即电磁感应透明。在此基础上,加入一定强度的微波控制场共振作用于  $|2\rangle - |3\rangle$  跃迁,得到三场作用下的准  $\Lambda$ -型四能级原子系统的探测吸收曲线(ii)。结果表明,微波控制场的加入使电磁感应透明窗口由原来的一个劈裂为两个,且两电磁感应透明窗口分列于探测场的共振频率两侧,频率间隔正好等于微波控制场的拉比频率  $\Omega_d$ 。而且两个电磁感应透明窗口的线宽均小于原来单窗口电磁感应透明线宽。

#### 3.2 电磁感应透明的功率展宽及微波控制场的抑制作用

为了更好地研究微波控制场对电磁感应透明线宽的影响,首先给出不加微波场条件下电磁感应透明线宽和对比度随耦合场作用强度的变化规律。然后,在与耦合场相关联的下能级与另外的精细结构能级间加入共振微波场,得到双窗口电磁感应透明,研究每个电磁感应透明窗口的线宽和对比度随耦合场作用强度的变化规律,从而分析微波控制场的加入对电磁感应透明功率展宽的影响。结果如图3所示。

但此时电磁感应透明的对比度很小( $< 10\%$ ),无实际应用价值。并且极弱的耦合场作用强度在实验和实际应用中都较难实现和控制。随着耦合场作用拉比频率的增大,电磁感应透明线宽迅速增大。当耦合场较强( $\Omega_c > 0.05$ )时,电磁感应透明的对比度大于  $90\%$ ,但此时电磁感应透明窗口的功率展宽也十分明显。因此,在双场作用下的  $\Lambda$ -型三能级原子系

统中,为了得到较好的电磁感应透明对比度,强耦合场导致的电磁感应透明功率展宽是不可避免的。

为了抑制电磁感应透明的功率展宽,在准  $\Lambda$ -型四能级原子系统的  $|2\rangle - |3\rangle$  跃迁之间加入频率为  $\omega_d$  的共振微波控制场,当微波控制场作用拉比频率接近耦合场作用拉比频率(这里不妨取  $\Omega_d = \Omega_c$ )时,可以得到频率间隔等于微波控制场作用拉比频率  $\Omega_d$  的双窗口电磁感应透明,每个电磁感应透明窗口的线宽和对比度随耦合场作用强度的变化如图 3 中的实线所示。将加入微波场后的电磁感应透明的线宽[图 3(a)实线]和对比度[图 3(b)实线]与没有引入微波控制场的电磁感应透明线宽[图 3(a)虚线]和对比度[图 3(b)虚线]进行比较,可以发现,在能够引起明显的电磁感应透明效应的耦合场作用强度范围内,微波场的加入对电磁感应透明对比度的影响不大,但却使电磁感应透明的线宽发生明显的变化。对给定的耦合场作用拉比频率,加入微波控制场后的电磁感应透明线宽明显小于不加微波控制场情况下的电磁感应透明线宽。因此,微波控制场的引入,可以有效地抑制耦合场加强导致的电磁感应透明窗口的功率展宽。

## 4 结 论

本文对准  $\Lambda$ -型四能级系统在双场和三场(加入微波控制场)作用下的探测吸收特性进行了理论研究。给出了电磁感应透明的线宽和对比度随耦合场作用拉比频率的变化规律,并对有、无微波控制场作用的两种情况进行了比较。研究表明,在双场作用下,为了得到较好的对比度,耦合场作用强度的增强不可避免地会导致电磁感应透明的功率展宽。通过在准  $\Lambda$ -型四能级系统的两个低能级之间加入微波控制场,不仅原来的单个电磁感应透明窗口劈裂成两个电磁感应透明窗口,且在保持较好的电磁感应透明窗口对比度的情况下,使得电磁感应透明的线宽明显小于不加微波场情况下的电磁感应透明线宽。即微波控制场的引入有效地抑制了电磁感应透明的功率展宽。准  $\Lambda$ -型四能级系统存在于很多实际的原子系统中,该研究结果对电磁感应透明在量子计算以及光信息存贮等方面的应用具有重要意义。

## 参 考 文 献

1 K. J. Boller, A. Imamoglu, S. E. Harris. Observation of electromagnetically induced transparency[J]. *Phys. Rev. Lett.*,

- 1991, **66**(20): 2593~2596
- 2 A. Javan, O. Kocharivskaya, H. Lee *et al.*. Narrowing of electromagnetically induced transparency resonance in a Doppler-broadened medium[J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **66**(1): 013805-1~013805-4
- 3 C. Y. Ye, A. S. Zibrov. Width of the electromagnetically induced transparency resonance in atomic vapor[J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **65**(2): 023806-1~023806-5
- 4 M. D. Lukin, M. Fleischhauer, A. S. Zibrov *et al.*. Spectroscopy in dense coherent media: line narrowing and interference effects [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79** (16): 2959~2962
- 5 E. Arimondo. Relaxation processes in coherent-population trapping[J]. *Phys. Rev. A*, 1996, **54**(3): 2216~2223
- 6 F. Renzoni, E. Arimondo. Population-loss-induced narrowing of dark resonances[J]. *Phys. Rev. A*, 1998, **58**(6): 4717~4722
- 7 E. Kuznetsova, O. Kocharovskaya, P. Hemmer *et al.*. Atomic interference phenomena in solids with a long-lived spin coherence [J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **66**(6): 063802-1~063802-13
- 8 M. Erhard, S. Nubmann, H. Helm. Power broadening and Doppler effects of coherent dark resonance in Rb[J]. *Phys. Rev. A*, 2000, **62**(6): 061802-1~061802-4
- 9 S. Wielandy, A. L. Gaeta. Investigation of electromagnetically induced transparency in the strong probe regime[J]. *Phys. Rev. A*, 1998, **58**(3): 2500~2505
- 10 Yang Lijun, Zhang Lianshui, Li Xiaoli *et al.*. Power broadening of electromagnetically induced transparency resonance[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5631**: 196~199
- 11 Lijun Yang, Lianshui Zhang, Qinglin Guo *et al.*. The linewidth and contrast of electromagnetically induced transparency in a homogeneously broadened system[J]. *J. Luminescence*, 2007, **122~123**: 552~554
- 12 C. Wei, N. B. Manson. Observation of the dynamic Stark effect on electromagnetically induced transparency[J]. *Phys. Rev. A*, 1999, **60**(3): 2540~2546
- 13 E. A. Wilson, N. B. Manson, C. Wei. Perturbing an electromagnetically induced transparency within an inhomogeneously broadened transition[J]. *Phys. Rev. A*, 2003, **67**(2): 023812-1~023812-10
- 14 C. Goren, A. D. Wilson-Gordon, M. Rosenbluh *et al.*. Sub-Doppler and subnatural narrowing of an absorption line induced by interacting dark resonances in a tripod system[J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **69**(6): 063802-1~063802-5
- 15 Liu Zhengdong, Wu Qiang. Electromagnetically induced transparency in a four level atomic system driven by three coupled fields[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(9): 2970~2973 (in Chinese)
- 刘正东, 武 强. 被三个耦合场驱动的四能级原子系统的电磁感应透明[J]. *物理学报*, 2004, **53**(9): 2970~2973
- 16 S. F. Yelin, V. A. Sautenkov, M. M. Kash *et al.*. Nonlinear optics via double dark resonances [J]. *Phys. Rev. A*, 2003, **68**(6): 063801-1~063801-7
- 17 Zhang Liying, Liu Zhengdong, Chen Jun. Electromagnetically induced transparency of quasi- $\Lambda$ -type four-level atom system at low-light levels[J]. *Acta Optical Sinica*, 2006, **26**(9): 1419~1423 (in Chinese)
- 张丽英, 刘正东, 陈 峻. 准  $\Lambda$  型四能级原子系统在弱场中的增益及电磁感应透明[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1419~1423
- 18 Lijun Yang, Lianshui Zhang, Xiaoli Li *et al.*. Autler-Townes effect in a strongly driven electromagnetically induced transparency resonance [J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **72** (5): 053801-1~053801-8