

文章编号: 0258-7025(2004)07-0811-04

# 不同能量抽运场作用下瞬态电磁感应 透明特性研究

杨希华<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 华东师范大学物理系, 上海 200062; <sup>2</sup> 东华大学应用物理系, 上海 200051)

**摘要** 通过求解含时密度矩阵方程研究了不同能量抽运场作用下  $\Lambda$  型三能级系统的瞬态电磁感应透明特性, 分析了不同能量抽运场作用下弱探测场的吸收、各能级的布居及相干项  $\rho_{23}$  随时间的演变关系。结果表明, 当抽运场能量较高时, 系统可实现瞬态无反转放大; 随着抽运场能量的减小, 电磁感应透明将减弱, 瞬态无反转放大将消失。由于探测场的吸收取决于抽运场的拉比频率与相干项  $\rho_{23}$  的乘积, 在强抽运场作用下, 非零瞬态振荡相干项  $\rho_{23}$  导致探测场的瞬态吸收和无反转放大, 抽运场能量的减小将引起总的相干效应减弱, 从而导致探测场的负吸收消失以及正吸收增强。

**关键词** 激光物理; 瞬态电磁感应透明; 瞬态无反转放大; 量子相干

**中图分类号** O 431 **文献标识码** A

## Investigation of Transient Properties of Electromagnetically Induced Transparency with Different Pump Laser Energy

YANG Xi-hua

(<sup>1</sup> Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062, China)  
(<sup>2</sup> Department of Applied Physics, Donghua University, Shanghai 200051, China)

**Abstract** The transient properties of electromagnetically induced transparency (EIT) with different pump laser energies in a  $\Lambda$ -type three-level system are studied by solving the time-dependent matrix equation. The time evolution of the probe laser absorption, the population of the three levels and the coherent term  $\rho_{23}$  are analyzed. It is shown that transient amplification without inversion can be realized with high pump laser energy and that transient EIT would reduce and transient amplification without inversion would disappear with the decrease of the pump laser energy. Since the probe absorption depends on the product of Rabi frequency of the pump laser and the coherent term  $\rho_{23}$ , the nonzero damping coherent term  $\rho_{23}$  results in the transient absorption and amplification without inversion at high pump laser energy, and the decrease of the coherence with the decrease of the pump laser energy leads to the disappearance of the amplification and enhancement of absorption.

**Key words** laser physics; transient electromagnetically induced transparency; transient amplification without inversion; quantum coherence

## 1 引 言

电磁感应透明是近年来量子干涉效应研究的热点之一。电磁感应透明是指介质在强抽运场作用下将减弱对探测场的吸收, 本质上它是强抽运场作用

下原子多能级系统相干作用的结果。对于瞬态和稳态电磁感应透明特性的研究已进行了大量的理论和实验工作<sup>[1~5]</sup>。最近, 作者在考虑了探测场所有高阶项的情况下, 研究了不同能量探测场作用下梯形三能级系统的瞬态电磁感应透明特性<sup>[6,7]</sup>。

收稿日期: 2003-02-27; 收到修改稿日期: 2003-06-16

作者简介: 杨希华(1972—), 男, 江苏泰州市人, 东华大学应用物理系工作, 主要从事非线性光学和量子光学方面的研究。

E-mail: yangxih@yahoo.com.cn

本文通过求解含时密度矩阵方程,研究了不同能量抽运场作用下  $\Lambda$  型三能级系统的瞬态电磁感应透明特性,分析了不同能量抽运场作用下弱探测场的吸收、各能级的布居及相干项  $\rho_{23}$  随时间的演变关系,同时阐明了系统产生瞬态无反转放大的物理机制。这对进一步从实验上研究瞬态无反转放大提供了重要的依据和线索。

## 2 $\Lambda$ 型三能级模型

原子  $\Lambda$  型三能级系统如图 1 所示,其中能级 2, 3 和 1 分别对应于钠原子 3S 的两超精细结构和能级  $3P_{1/2}$  或  $3P_{3/2}$ 。振幅为  $E_c$ , 频率为  $\omega_c$  的抽运场以拉比频率  $\Omega_1 = \mu_{13} E_c / \hbar$  耦合能级 1 和 3。振幅为  $E_p$ , 频率为  $\omega_p$  的探测场以拉比频率  $\Omega_2 = \mu_{12} E_p / \hbar$  耦合能级 1 和 2, 其中  $\mu_{12}$  和  $\mu_{13}$  分别为能级 1-2 和 1-3 间的跃迁偶极矩。 $\Delta_2 = \omega_p - \omega_{12}$  和  $\Delta_1 = \omega_c - \omega_{13}$  分别为探测场和抽运场相对于原子 1-2 和 1-3 共振跃迁频率  $\omega_{12}$  和  $\omega_{13}$  的失谐量。

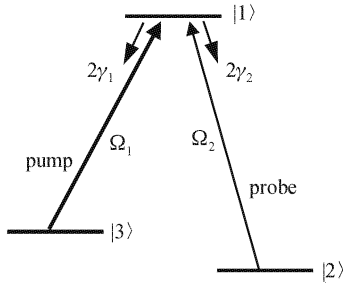


图 1 原子  $\Lambda$  型三能级系统

Fig. 1 Atomic  $\Lambda$ -type three-level system

在慢变振幅近似和旋转波近似下,系统密度矩阵运动方程如下

$$\dot{\rho}_{11} = -2(\gamma_1 + \gamma_2)\rho_{11} + i\Omega_1(\rho_{31} - \rho_{13}) + i\Omega_2(\rho_{21} - \rho_{12}) \quad (1)$$

$$\dot{\rho}_{33} = 2\gamma_1\rho_{11} + i\Omega_1(\rho_{13} - \rho_{31}) \quad (2)$$

$$\dot{\rho}_{12} = -(\gamma_{12} - i\Delta_2)\rho_{12} + i\Omega_1\rho_{32} + i\Omega_2(\rho_{22} - \rho_{11}) \quad (3)$$

$$\dot{\rho}_{13} = -(\gamma_{13} - i\Delta_1)\rho_{13} + i\Omega_2\rho_{23} + i\Omega_1(\rho_{33} - \rho_{11}) \quad (4)$$

$$\dot{\rho}_{23} = -[\gamma_{23} + i(\Delta_2 - \Delta_1)]\rho_{23} - i\Omega_1\rho_{21} + i\Omega_2\rho_{13} \quad (5)$$

$$\rho_{ij} = \rho_{ji}^* \quad (6)$$

其中  $\gamma_{ij} = (\gamma_i + \gamma_j)/2$ ,  $2\gamma_2$  和  $2\gamma_1$  为能级 1-2 和 1-3 的布居弛豫速率。设能级 2 和 3 为原子基态,则可不

考虑其布居弛豫速率。在封闭系统中,有  $\rho_{11} + \rho_{22} + \rho_{33} = 1$ 。上述方程及其共轭方程共有 8 个线性非相关方程,可写成如下简化形式<sup>[8]</sup>

$$\frac{d\boldsymbol{\varphi}}{dt} = \mathbf{L}\boldsymbol{\varphi} + \mathbf{I} \quad (7)$$

其中  $\boldsymbol{\varphi}$  为一列向量,其元素分别为  $\varphi_1 = \rho_{11}$ ,  $\varphi_2 = \rho_{12}$ ,  $\varphi_3 = \rho_{13}$ ,  $\varphi_4 = \rho_{21}$ ,  $\varphi_5 = \rho_{23}$ ,  $\varphi_6 = \rho_{31}$ ,  $\varphi_7 = \rho_{32}$ ,  $\varphi_8 = \rho_{33}$ 。 $\mathbf{L}$  为一个  $8 \times 8$  的矩阵,其元素由密度矩阵方程的系数所组成。 $\mathbf{I}$  为一非均匀列向量,其元素由归一化条件消去  $\rho_{22}$  后的系数所组成。方程(7)具有如下解

$$\varphi(t) = \exp[\mathbf{L}(t - t_0)]\varphi(t_0) + \int_0^t dx \exp[\mathbf{L}(t - x)]\mathbf{I} \quad (8)$$

其中  $\varphi(t_0)$  为密度矩阵元初始值。设能级 2, 3 起始粒子数布居相等,即  $\rho_{22} = \rho_{33} = 0.5$ 。对于瞬态电磁感应透明,设  $t_0 = 0$ ,  $t$  为瞬态作用时间。矩阵元  $\rho_{ii}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 正比于能级  $i$  的粒子数布居。探测场的吸收系数正比于  $\text{Im}(\rho_{12}/\Omega_2)$ 。运用公式(8)可以对任意强度的探测场和抽运场的吸收进行数值计算。本文各参数的相对大小都以  $5\gamma_1$  为单位。

## 3 结果与讨论

图 2 给出了不同能量抽运场作用下弱探测场的吸收随时间的演变关系。由图 2 可以看出,在强抽运场作用下,探测场的吸收随时间在零吸收附近作类似于阻尼减幅振荡。系统达到稳态后,探测场吸

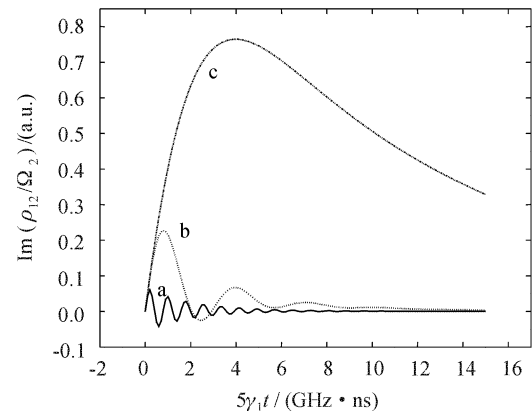


图 2 不同能量抽运场作用下,探测场的吸收随时间的演变曲线

Fig. 2 Time evolution of the probe absorption with different pump pulse energies

( $\Omega_2 = 0.04$  GHz,  $\Delta_1 = \Delta_2 = 0$ ,  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.2$ )  
curve a:  $\Omega_1 = 4$  GHz; curve b:  $\Omega_1 = 1$  GHz;  
curve c:  $\Omega_1 = 0.2$  GHz

收接近于零,系统具有较高的感应透明。随着抽运场拉比频率的减小,探测场的吸收振荡次数减少,负吸收(放大)峰值减小,正吸收峰值增大。但当抽运场拉比频率足够小时(如  $\Omega_1 = 0.2$  GHz),探测场将不再出现负吸收,在某一时刻吸收达到最大值后单调地减小,最后达到稳态,且探测场具有一定的吸收。这表明:当抽运场能量较高时,系统可实现瞬态放大,当达到稳态时,探测场几乎无吸收(全透明);随着抽运场能量的减小,瞬态放大将消失,电磁感应透明将减弱。

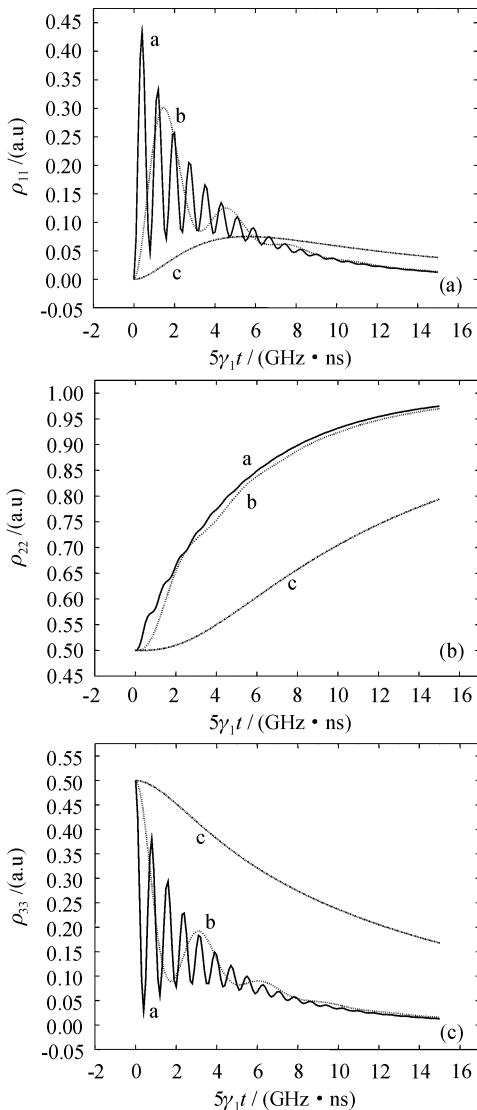


图 3 不同能量抽运场作用下,能级 1(a),能级 2(b)和能级 3(c)的布居随时间的演变曲线

Fig. 3 Time evolution of the level 1 (a), level 2 (b) and level 3 (c) population with different pump pulse energies

$$(\Omega_2 = 0.04 \text{ GHz}, \Delta_1 = \Delta_2 = 0, \gamma_1 = \gamma_2 = 0.2)$$

curve a:  $\Omega_1 = 4$  GHz; curve b:  $\Omega_1 = 1$  GHz;

curve c:  $\Omega_1 = 0.2$  GHz

图 3(a)~(c)为各能级的布居随时间的演变关系。由这三个图可以看出,当抽运场拉比频率较大时,能级 1 和能级 3 的布居随时间作类似于阻尼减幅振荡,达到稳态时能级 1 和能级 3 的布居基本上接近于零,而能级 2 的布居随时间逐渐增大,稳态时接近于 1(这表明粒子被捕获在能级 2 上)。随着抽运场拉比频率的减小,能级 1 和能级 3 的布居振荡次数减少。当抽运场拉比频率足够小时(如  $\Omega_1 = 0.2$  GHz),能级 1 的布居在某一时刻达到最大值后单调减小,能级 3 的布居也单调地减小。系统达到稳态时能级 1 和能级 3 都有一定的布居,而能级 2 的布居将增加到某一值。但是,在整个过程中,能级 1 和能级 3 的粒子数布居都小于能级 2 的粒子数布居,从而系统可实现瞬态无反转放大。

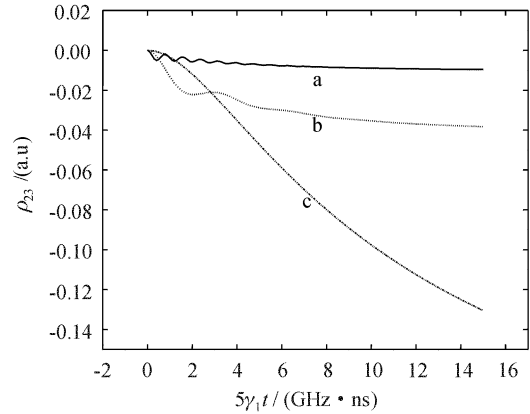


图 4 不同抽运光能量作用下,相干项  $\rho_{23}$  随时间的演变曲线

Fig. 4 Time evolution of the coherent term  $\rho_{23}$  with different pump pulse energies

$$(\Omega_2 = 0.04 \text{ GHz}, \Delta_1 = \Delta_2 = 0, \gamma_1 = \gamma_2 = 0.2)$$

curve a:  $\Omega_1 = 4$  GHz; curve b:  $\Omega_1 = 1$  GHz;

curve c:  $\Omega_1 = 0.2$  GHz

系统的瞬态无反转放大可由公式(3)看出:探测场的吸收由两部分组成,一部分正比于能级 2 和 1 的粒子数布居之差,另一部分正比于相干项  $\rho_{23}$ 。由于  $\rho_{11} \ll \rho_{22}$ ,第一项总是对应于探测场的吸收,探测场的瞬时放大只能来源于相干项  $\rho_{23}$ 。图 4 给出了在不同能量抽运场作用下,相干项  $\rho_{23}$  随时间的变化关系。由图 4 可以看出,相干项  $\rho_{23}$  总是小于零,其对探测场的透明总具有增强作用。在强抽运场作用下,相干项  $\rho_{23}$  随时间同样作类似于阻尼减幅振荡,此瞬态振荡相干项  $\rho_{23}$  导致探测场的瞬态吸收和放大。随着抽运场拉比频率的减小,相干项  $\rho_{23}$  振荡次数减少。当抽运场拉比频率足够小时(如  $\Omega_1 = 0.2$  GHz),相

干项  $\rho_{23}$  单调地减小,最后达到某一稳定值。此时,虽然相干项的绝对值随着抽运场能量的减小而增大(对探测场的透明具有增强作用),但由于探测场的吸收正比于抽运场的拉比频率与相干项  $\rho_{23}$  的乘积,结果抽运场能量的减小将引起总的相干效应减弱,从而导致图 2 中随着抽运场能量的减小探测场的负吸收消失以及正吸收增强。由此可见,在强抽运场的作用下,原子在能级 1 和 3 间作相干振荡,从而产生了随时间变化的相干项  $\rho_{23}$ ,正是由于此相干项的作用而产生探测场的瞬态无反转放大。

值得一提的是,在基于稳态电磁感应透明而产生的无反转放大(激光)中,必须有一非相干抽运场使上能级获得一定的布居才能实现放大。但在基于瞬态电磁感应透明而产生的无反转放大(激光)中,不需要任何非相干抽运场作用即可实现放大<sup>[7]</sup>,这对于获得更短波长的激光将具有重要意义。

#### 4 结 论

研究了不同能量抽运场作用下  $\Lambda$  型三能级系统的瞬态电磁感应透明特性。结果表明,抽运场能量较高时系统可实现瞬态无反转放大,此瞬态无反转放大来源于非零相干项  $\rho_{23}$ ;随着抽运场能量的减小,瞬态无反转放大将消失,电磁感应透明将减弱。

#### 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 J. Gea-Banacloche, Y. Q. Li, S. Z. Jin *et al.*. Electromagnetically induced transparency in ladder-type inhomogeneously broadened media: theory and experiment [J]. *Phys. Rev. A*, 1995, **51**(1):576~584
- 3 M. Xiao, Y. Q. Li, S. Z. Jin *et al.*. Measurement of dispersive properties of electromagnetically induced transparency in Rubidium atoms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(5):666~669
- 4 Y. Q. Li, M. Xiao. Transient properties of electromagnetically induced transparency in three-level atoms [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(13):1489~1491
- 5 S. Wielandy, A. L. Gaeta. Investigation of electromagnetically induced transparency in strong probe regime [J]. *Phys. Rev. A*, 1998, **58**(3):2500~2505
- 6 Yang Xihua, Sun Zhenrong, Li Hua *et al.*. Investigation of transient properties of electromagnetically induced transparency with a strong probe laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **B10**(2): 123~126
- 7 Yang Xihua, Sun Zhenrong, Ding Liangen *et al.*. Effects of some factors on transient properties of electromagnetically induced transparency [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2001, **7**(3):124~128  
杨希华,孙真荣,丁良恩等.若干参数对瞬态电磁感应透明的影响[J].量子光学学报,2001,7(3):124~128
- 8 L. M. Narducci, M. O. Scully, G. L. Oppo *et al.*. Spontaneous emission and absorption properties of a driven three-level system [J]. *Phys. Rev. A*, 1990, **42**(3):1630~1649