

准 Λ 型四能级原子系统中的烧孔和光学双稳现象*

陈 峻^{1)†} 刘正东^{1)‡} 尤素萍^{1)‡}

1) 南昌大学近代物理研究所, 南昌 330047)

2) 杭州电子科技大学物理系, 杭州 310018)

3) 南昌大学纳米技术工程研究中心, 南昌 330047)

(2006 年 1 月 20 日收到, 2006 年 4 月 10 日收到修改稿)

研究了准 Λ 型四能级原子与两光场相互作用系统中的量子干涉效应. 发现在弱探测场下系统驱动场拉比频率改变时, 其色散曲线会呈现出烧孔现象, 吸收增益曲线会出现全增益区以及宽而平坦的电磁感应透明窗口. 另外, 色散曲线随探测场拉比频率相位的演化会呈现出光学双稳态效应.

关键词: 烧孔, 光学双稳态, 电磁感应透明, 量子干涉

PACC: 4250, 4265

1. 引 言

在多能级原子多模场的相互作用系统中, 量子干涉效应会导致很多有趣的物理现象, 如超光速现象^[1,2]、电磁感应透明(EIT)^[3-6]、相干俘获(CPT)^[7]、无反转激光^[8,9]、共振增强的非线性效应等. 其中四能级原子系统中物理参量的增多会导致丰富的物理现象, 如李福利等^[10]研究了准 Λ 型四能级系统在相干场驱动下的共振荧光的稳态压缩; Din 等^[11]对 N 型四能级系统的研究发现, 当外加场和原子能级发生共振时将导致超光速现象; 张丽英等^[6]对 Y 型四能级系统的研究表明, 在改变外场拉比频率相位时系统的吸收和色散性质会发生显著的改变; 刘正东等^[11]研究了被三个耦合场驱动的四能级原子系统在某些特定参数下具有 EIT 的特性.

本文研究一种准 Λ 型四能级原子与两光场相互作用的非共振系统. 稳态下的数值模拟结果显示, 在弱探测场下, 随着驱动场的改变该系统呈现了光学双稳、烧孔、宽而平坦的 EIT 窗口等有趣的物理现象.

2. 物理模型

图 1 所示的是准 Λ 型四能级原子与两光场 ω_{01}

为耦合驱动场, 光场 ω_{02} 为探测场)相互作用系统的模型^[12]. 上能级 $|3\rangle, |4\rangle$ 的能量分别为 $\hbar\omega_3, \hbar\omega_4$, 两个基态近简并能级 $|2\rangle, |1\rangle$ 的能量分别为 $\hbar\omega_2, \hbar\omega_1$, 从能级 $|3\rangle$ 向能级 $|4\rangle, |2\rangle$ 及 $|1\rangle$ 的跃迁分别由相干场 ω_{02} 和 ω_{01} 驱动. 能级 $|4\rangle$ 到 $|2\rangle, |1\rangle$ 的跃迁是偶极禁戒的, 并且仅考虑了能级 $|3\rangle$ 到 $|2\rangle, |1\rangle$ 及 $|4\rangle$ 的自发衰变.

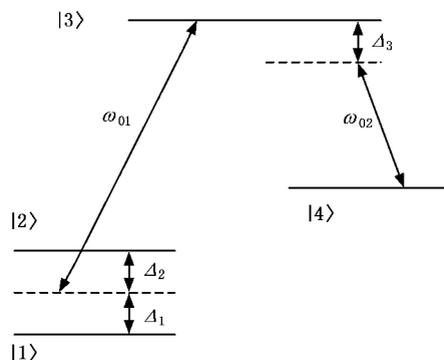


图 1 两光场驱动的准 Λ 型四能级原子模型. 耦合驱动场 ω_{01} 作用于能级 $|3\rangle$ 到 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 上, 探测场 ω_{02} 作用于能级 $|3\rangle \leftrightarrow |4\rangle$ 上.

文献^[12]将拉比频率处理为实数并成功地研究了该系统的 ac-Stark 分裂现象. 文献^[13]提出闭合系统中原子的动力学行为和稳态性质与跃迁相关相位有关, 如在非闭合系统中无论激光的相位和强度

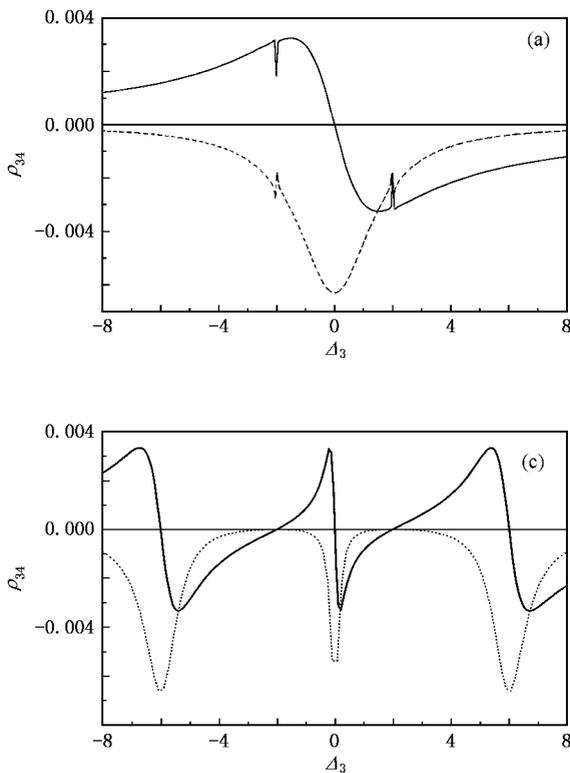
* 国家自然科学基金(批准号: 60278016, 10464002)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: lzdgroup@ncu.edu.cn

如何,只要满足多光子共振条件则暗态就会存在,但在闭合系统中若相位取值不适当,即使多光子共振条件满足暗态也不会存在^[13].

本文在考虑系统拉比频率的相位后得到复数形式的密度矩阵元运动方程如下:

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{11} &= \gamma_1 \rho_{33} + (-i\Omega_1^* \rho_{33} + \text{H.C.}), \\ \dot{\rho}_{12} &= \{ (\Delta_1 - \Delta_2) \rho_{12} + \Omega_2 \rho_{13} - \Omega_1^* \rho_{32} \}, \\ \dot{\rho}_{13} &= -\frac{1}{2}(\gamma_3 + \gamma_1 + \gamma_2) \rho_{13} + i\Omega_1^* (\rho_{11} - \rho_{33}) \\ &\quad + \{ \Omega_2^* \rho_{12} + \Delta_1 \rho_{13} + \Omega_3^* \rho_{14} \}, \\ \dot{\rho}_{14} &= \{ (\Delta_1 - \Delta_3) \rho_{14} + \Omega_3 \rho_{13} - \Omega_1^* \rho_{34} \}, \\ \dot{\rho}_{22} &= \gamma_2 \rho_{33} + (-i\Omega_2^* \rho_{32} + \text{H.C.}), \\ \dot{\rho}_{23} &= -\frac{1}{2}(\gamma_3 + \gamma_1 + \gamma_2) \rho_{23} + i\Omega_2^* (\rho_{22} - \rho_{33}) \\ &\quad + \{ \Omega_1 \rho_{21} + \Delta_2 \rho_{23} + \Omega_3^* \rho_{24} \}, \\ \dot{\rho}_{24} &= \{ (\Delta_2 - \Delta_3) \rho_{24} + \Omega_3 \rho_{23} - \Omega_2^* \rho_{34} \}, \\ \dot{\rho}_{33} &= -(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3) \rho_{33} \\ &\quad + (i\Omega_1^* \rho_{31} + i\Omega_2^* \rho_{32} + i\Omega_3^* \rho_{34} + \text{H.C.}), \\ \dot{\rho}_{34} &= -\frac{1}{2}(\gamma_3 + \gamma_1 + \gamma_2) \rho_{34} - i\Omega_3 (\rho_{44} - \rho_{33}) \\ &\quad - \{ \Omega_1 \rho_{14} + \Omega_2 \rho_{24} \} - i\Delta_3 \rho_{34}. \end{aligned}$$



上述方程组满足归一化条件 $\sum_{i=1}^4 \rho_{ii} = 1$. 相应能级与外加场频率的失谐量为

$$\Delta_{12} = \omega_3 - \omega_{12} - \omega_{01},$$

$$\Delta_3 = \omega_3 - \omega_4 - \omega_{02}.$$

$\Omega_i (i=1,2,3)$ 是相干场驱动能级 $|3\rangle$ 向能级 $|1\rangle$, $|2\rangle$ 及 $|4\rangle$ 跃迁的拉比频率, 定义为

$$\Omega_i = \hbar^{-1} E_1 \boldsymbol{\mu}_{3i} \cdot \mathbf{e}_1,$$

$$\Omega_3 = \hbar^{-1} E_2 \boldsymbol{\mu}_{34} \cdot \mathbf{e}_2.$$

这里,

$$\boldsymbol{\mu}_{3i} = \langle 3 | -e\mathbf{r} | i \rangle \quad (i=1,2),$$

$$\boldsymbol{\mu}_{34} = \langle 3 | -e\mathbf{r} | 4 \rangle$$

分别为能级 $|3\rangle$ 向能级 $|1\rangle$, $|2\rangle$ 及 $|4\rangle$ 跃迁的电偶极矩矩阵元; $E_{1,2}$ 和 $\mathbf{e}_{1,2}$ 分别是两个驱动场的复振幅和偏振方向矢量; $\gamma_j (j=1,2,3)$ 为 $|3\rangle$ 向能级 $|1\rangle$, $|2\rangle$ 及 $|4\rangle$ 跃迁的自发辐射速率. 在稳态条件下求得密度矩阵元运动方程的数值解, 并得到 ρ_{34} 随各物理量演化的曲线图.

3. 数值计算与分析

图 2 显示了在探测场很弱的情况下 ($\Omega_3 =$

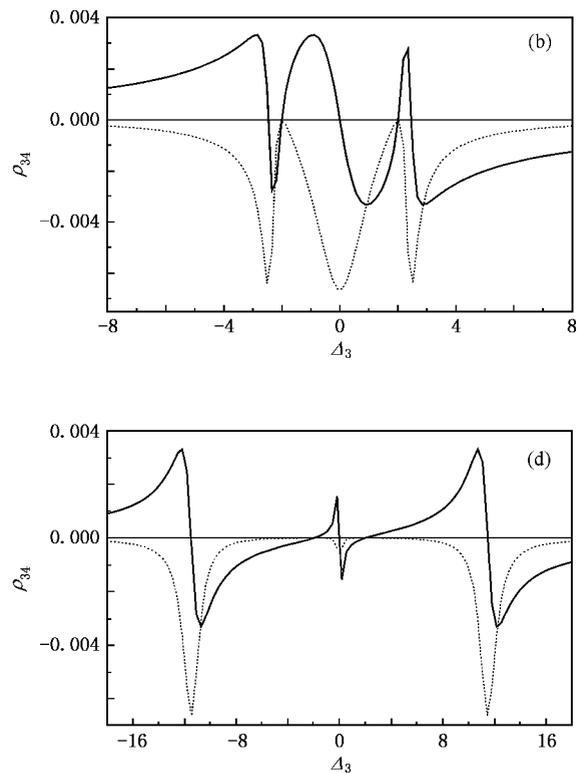


图 2 ρ_{34} 实部(实线)和虚部(虚线)随探测场失谐量 Δ_3 变化的曲线. 各物理量取值为 $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 1$, $\Delta_1 = 2$, $\Delta_2 = -2$, $\Omega_3 = 0.001$. (a) $\Omega_1 = \Omega_2 = 0.1$ (b) $\Omega_1 = \Omega_2 = 1$ (c) $\Omega_1 = \Omega_2 = 4$ (d) $\Omega_1 = \Omega_2 = 8$

0.001) ρ_{34} 的实部和虚部随驱动场的改变而变化的曲线,其物理量以自发辐射为量纲,虚部曲线(虚线)表征了介质对探测光的吸收或增益性质,实部曲线(实线)表征了介质对探测光的色散性质.结果显示:当驱动场的拉比频率较弱时 $\Omega_1 = \Omega_2 = 0.1$ (见图 2(a)),在探测场失谐量 $\Delta_3 = \pm 2$ 处,实部曲线和虚部曲线均呈现出有趣的烧孔现象,而在反常色散区($\Delta_3 = -1.5 \sim 1.5$),则出现了一个较大的增益峰.随着驱动场拉比频率的增强 $\Omega_1 = \Omega_2 = 1$ (见图 2(b)),针尖型烧孔曲线演化成了尖锐的峰,反常色散区由一个演化成三个,而相应的增益峰也由一个演变成三个.此外,系统在 $\Delta_3 = \pm 2$ 处对光场的吸收为零,呈现出 EIT 现象.随着驱动场拉比频率的进一步增强 $\Omega_1 = \Omega_2 = 4$ (见图 2(c)),色散曲线中正常色散部分的斜率变缓、范围增大,在失谐量 $\Delta_3 = -6 \sim 6$ 区域的三个增益峰之间出现了两个宽而平坦的 EIT 窗口,且中间的增益峰变得比前尖锐得多.当驱动场拉比频率继续增强到 $\Omega_1 = \Omega_2 = 8$ 时,从图 2(d) 可以看到, $\Delta_3 = 0$ 处的增益峰强度出现了明显的减弱,其附近的反常色散曲线斜率却异常陡直,两个宽而平坦的 EIT 窗口有融合的趋势.

图 3 是在保证探测场比较弱的前提下,系统色散曲线随探测场拉比频率相位 ϕ_3 的演化.从图 3 可以看出,系统色散曲线随 ϕ_3 的演化呈现出类似正(余)弦的函数关系,即当 ϕ_3 变化 $|\pi|$ 时,色散曲线会发生反转,系统呈现出光学双稳态效应.从图 3 还可以看出:当 $\Delta_3 = 0$ 时,在 $\phi_3 = 1.55 \sim 4.69$ 的区域系统呈现出反常色散,而在 $\phi_3 = 4.69 \sim 7.83$ 区域则为正常色散;当 $\Delta_3 = 1$ 时,色散曲线仍然维持类似正(余)弦的函数关系并呈现出光学双稳态效应,只是其相位和 $\Delta_3 = 0$ 时相比出现了超前现象,而当 $\Delta_3 = -1$ 时色散曲线的相位则发生滞后现象.

图 4 是当所有外加场拉比频率相位 ϕ_i ($i = 1, 2, 3$) 的取值相差 π 时,系统色散关系随探测场失谐量 Δ_3 的变化曲线.从图 4 可以明显地看到,当 ϕ_i 取 $\pi/2$ 时,曲线在零值水平线上方波动,而当 ϕ_i 取 $3\pi/2$ 时,相应曲线则在零值水平线下方反向波动,两者成镜像对称图形,即当 ϕ_i 取值相差 π 时系统呈现出光学双稳现象.

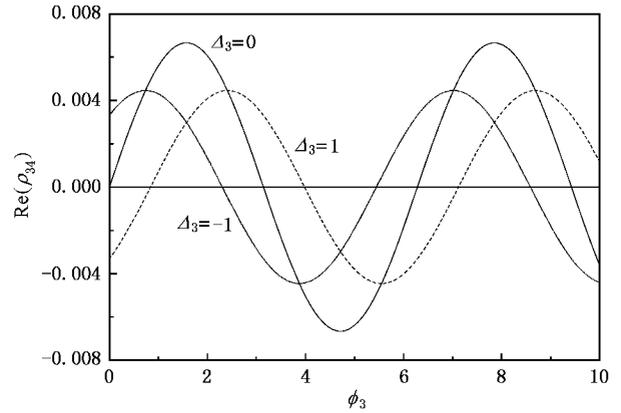


图 3 ρ_{34} 的实部随探测场拉比频率相位 ϕ_3 的演化曲线 $\Omega_i = |\Omega_i| e^{i\phi_i}$ ($i = 1, 2, 3$), $\phi_1 = \phi_2 = 0$, $|\Omega_1| = |\Omega_2| = 1$, $|\Omega_3| = 0.01$, $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 1$, $\Delta_1 = 2$, $\Delta_2 = -2$, $\Delta_3 = 0, -1, 1$

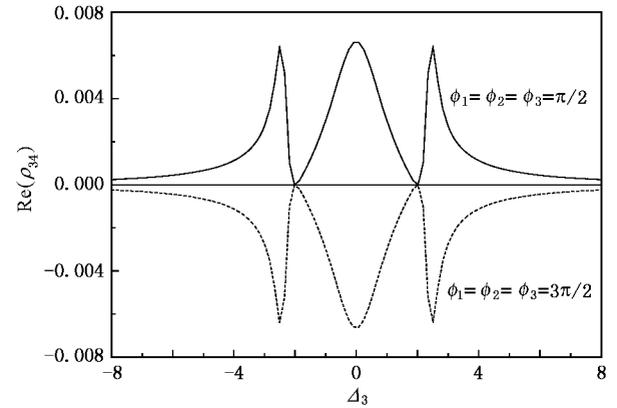


图 4 ρ_{34} 的实部随探测场失谐量 Δ_3 的演化曲线 $\Omega_i = |\Omega_i| e^{i\phi_i}$, $\phi_i = \pi/2, 3\pi/2$ ($i = 1, 2, 3$), $|\Omega_1| = |\Omega_2| = 1$, $|\Omega_3| = 0.01$, $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 1$, $\Delta_1 = 2$, $\Delta_2 = -2$

4. 结 论

本文研究了准 Λ 型四能级原子与两光场相互作用系统中介质对探测光的吸收增益及色散性质.发现在驱动场拉比频率较低时系统的色散曲线会呈现出有趣的烧孔现象.随着驱动场拉比频率的增强,系统出现了两个宽而平坦的 EIT 窗口.而当外场拉比频率相位相差 π 时,色散曲线会发生反转现象,系统呈现出光学双稳态效应.导致这些有趣现象的原因是系统中存在多通道量子干涉效应.由于对该系统复数形式的密度矩阵元运动方程的计算考虑了系统拉比频率的相位因素,从而获得了更加丰富有趣的由量子干涉效应所导致的物理现象.

- [1] Din G H , Hong G , Yan F B *et al* 2005 *Phys. Lett. A* **334** 243
- [2] Xu W H , Gao J Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 2496
- [3] Zhang L Y , Liu Z D 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3641 (in Chinese)
[张丽英、刘正东 2005 物理学报 **54** 3641]
- [4] Wu H B , Chang H , Ma J *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3632 (in Chinese) [武海斌、常 宏、马 杰等 2005 物理学报 **54** 3632]
- [5] Sun Q Q , Gu Y , Gong Q H 2004 *Chin. Phys.* **13** 121
- [6] Zhang L Y , Liu Z D , Chen J 2005 *Sci. China G* **48** 593
- [7] Han L B , Li G X 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 696 (in Chinese) [韩立波、李高翔 2000 物理学报 **49** 696]
- [8] Wang Z H , Hu X M 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2569 (in Chinese)
- [9] Bai Y F , Guo H , Sun H *et al* 2004 *Phys. Rev. A* **69** 043814
- [10] Li F L , Gao S Y , Zhu S Y 2003 *Phys. Rev. A* **67** 063818
- [11] Liu Z D , Wu Q 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2970 (in Chinese) [刘正东、武 强 2004 物理学报 **53** 2970]
- [12] Li Y F , Zhang X Y , Sun J F *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 782 (in Chinese) [李永放、张向阳、孙建峰等 2002 物理学报 **51** 782]
- [13] Korsunsky E A , Leinfellner N , Huss A *et al* 1999 *Phys. Rev. A* **59** 2302

The hole burning and optical bistability of quasi- Λ -type four-level atom system *

Chen Jun^{1,3)} Liu Zheng-Dong^{1,3)†} You Su-Ping^{1,2)}

¹ *Institute of Modern Physics , Nanchang University , Nanchang 330047 , China*

² *Department of Physics , Hangzhou Dianzi University , Hangzhou 310018 , China*

³ *Engineering Research Center for Nanotechnology , Nanchang University , Nanchang 330047 , China*

(Received 20 January 2006 ; revised manuscript received 10 April 2006)

Abstract

In this paper we study the quantum interference effects of a quasi- Λ -type four-level atom system interacting with two light fields. When the probe field is weak , our calculations show that along with the change of Rabi frequencies of the driving field , the system appears to be hole burning in the dispersion curve , and two big electromagnetic induced transparency windows with approximately the same width are demonstrated. In addition , the evolution of dispersion with the Rabi phase of probe field shows optical bistability.

Keywords : hole burning , optical bistability , electromagnetic induced transparency , quantum interference

PACC : 4250 , 4265

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60278016 , 10464002).

† Corresponding author. E-mail: zldgroup@ncu.edu.cn