

Y 型四能级原子系统对探测场的吸收和色散^{*}

张丽英 刘正东[†]

(南昌大学近代物理研究所, 南昌 330047)

(2004 年 11 月 30 日收到 2005 年 2 月 28 日收到修改稿)

运用数值模拟的方法计算了 Y 型四能级原子系统在弱场条件下对探测场的吸收和色散. 结果发现, 通过调制能级间附加的外场强度, 该系统呈现出电磁感应透明特性, 出现增益区并伴有较大负折射率的色散效应. 同时还发现, 当外加场的拉比频率相位发生改变时, 系统对探测光场的吸收和色散将随之变化.

关键词: 电磁感应透明, 自发辐射, 量子干涉

PACC: 4250, 4265

1. 引言

在多能级原子中, 如果存在多通道的量子干涉效应和原子相干效应, 会导致许多有趣的物理现象, 如电磁感应透明(EIT)^[1]、相干俘获(CPT)^[2]、无反转激光^[3]、原子自发辐射光谱的新形式^[4]等. 最近还发现, 用冷原子结合使用 EIT 技术可以获得增强的非线性效应, 如 Schmidt 和 Imamoglu^[5]在 1996 年提出增强的 Kerr 非线性效应的方案. 哈佛大学的 Hau 研究小组在超冷原子团中利用 EIT 效应, 将光速降到 17 m/s^[6]. 随后, 他们通过控制耦合光的通断, 将光学信号储存在原子介质中达 0.5 ms, 演示了光学信号在原子介质中的可逆存储^[7]. 这些现象的发现, 推动了量子信息传输、激光微弱信号检测等技术和理论的发展, 受到了国内外学术界的广泛关注^[8,9].

目前有很多关于三能级原子系统^[10-12]和四能级原子系统^[13-18]对 EIT 和 CPT 的理论和实验研究. 一般而言, 要获得 EIT 现象, 当使用经典的方式处理耦合光和探测光时要求耦合光比探测光强得多, 而全量子化的处理则不受这一要求的限制, 并且可以得到比经典方式处理更丰富的结果. 本文用量子化方法研究了一种 Y 型四能级原子与三个场相互作用的系统^[19], 该系统在级联型三能级的基础上附加

一个能级, 外加场为一个控制场、一个探测场和一个抽运光场. 文献[20]主要讨论了单光子和双光子吸收机制, 本文则主要分析外场强度变化所带来的系统对探测光的吸收和色散变化问题. 研究发现, 在抽运光场和探测场都比较弱的情况下, 通过调制控制场的大小, 该系统呈现出 EIT 特性, 出现增益区并伴有较大负折射率的色散效应. 同时还发现, 在外加场所对应的拉比频率相位发生改变时, 系统对探测光场的吸收和色散将随之发生变化.

2. 模型与计算

取与 Rb 原子相关的模型, 如图 1 所示, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 分别代表自上能级到下能级的弛豫系数, 其中控制场作用于 $|2\rangle \leftrightarrow |4\rangle$ 上, 其拉比频率

$$\Omega_3 = d_{42} \cdot E_3 / \hbar;$$

探测场作用于 $|2\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ 上, 相应的拉比频率

$$\Omega_1 = d_{12} \cdot E_1 / \hbar;$$

抽运光作用于 $|3\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 上, 相应的拉比频率

$$\Omega_2 = d_{23} \cdot E_2 / \hbar.$$

这里,

$$\Delta = \omega_{12} - \omega_1,$$

$$\Delta_2 = \omega_{23} - \omega_2,$$

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

[†] 通讯联系人. E-mail: lzdgroup@ncu.edu.cn

$$\Delta_3 = \omega_{42} - \omega_3$$

为相应能级与外加场频率的失谐量.

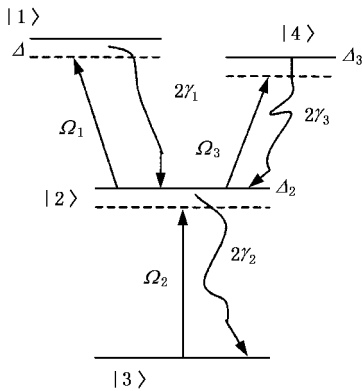


图1 与三个外场相互作用的Y型四能级原子模型 抽运场 Ω_2 作用于能级 $|3\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 上, 控制场 Ω_3 作用于能级 $|2\rangle \leftrightarrow |4\rangle$ 上, 探测场 Ω_1 作用于能级 $|2\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ 上

在 Canonical 变换下, 系统有效的哈密顿量为

$$H = \hbar\Delta_2|2\rangle\langle 2| + \hbar(\Delta + \Delta_2)|1\rangle\langle 1| + \hbar(\Delta_3 + \Delta_2)|4\rangle\langle 4| - \hbar(\Omega_3|2\rangle\langle 4| + \Omega_1|1\rangle\langle 2| + \Omega_2|2\rangle\langle 3| + \text{H.C.}) \quad (1)$$

考虑到原子间由于相互碰撞而引起自发辐射的弛豫过程, 系统的密度演化方程为

$$\begin{aligned} \dot{\rho} = & -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] - \gamma_1\{|1\rangle\langle 1|, \rho\} \\ & - \gamma_2\{|2\rangle\langle 2|, \rho\} - \gamma_3\{|4\rangle\langle 4|, \rho\} \\ & + 2\gamma_1\rho_{11}|2\rangle\langle 2| + 2\gamma_2\rho_{22}|3\rangle\langle 3| \\ & + 2\gamma_3\rho_{44}|2\rangle\langle 2|. \end{aligned} \quad (2)$$

从此运动方程出发得到密度非对角元的演化方程为

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{12} = & -(\gamma_1 + \gamma_2 + i\Delta)\rho_{12} - i\Omega_1^*\rho_{11} \\ & - i\Omega_2\rho_{13} - i\Omega_3^*\rho_{14} + i\Omega_1^*\rho_{22} - \eta\rho_{42}, \\ \dot{\rho}_{13} = & -(\gamma_1 + i\Delta + i\Delta_2)\rho_{13} - i\Omega_2^*\rho_{12} \\ & + i\Omega_1^*\rho_{23} - \eta\rho_{43}, \\ \dot{\rho}_{14} = & -(\gamma_1 + \gamma_3 + i\Delta - i\Delta_3)\rho_{14} + i\Omega_1^*\rho_{24} \\ & - i\Omega_3\rho_{12} - \eta(\rho_{44} + \rho_{11}), \\ \dot{\rho}_{23} = & -(\gamma_2 + i\Delta_2)\rho_{23} - i\Omega_2^*\rho_{22} + i\Omega_1\rho_{13} \\ & + i\Omega_2^*\rho_{33} + i\Omega_3\rho_{43}, \\ \dot{\rho}_{24} = & -(\gamma_3 + \gamma_2 - i\Delta_3)\rho_{24} + i\Omega_2^*\rho_{34} \\ & + i\Omega_1\rho_{14} - i\Omega_3\rho_{22} + i\Omega_3\rho_{44} - \eta\rho_{21}, \\ \dot{\rho}_{34} = & -(\gamma_3 - i\Delta_2 - i\Delta_3)\rho_{34} - i\Omega_3\rho_{32} \end{aligned} \quad (3)$$

$$+ i\Omega_2\rho_{24} - \eta\rho_{31},$$

式中, $\eta = p\sqrt{\gamma_1\gamma_3}$ 代表态 $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ 和 $|4\rangle \rightarrow |2\rangle$ 两个自发辐射通道之间的耦合, $p = d_{12} \cdot d_{42} / (|d_{12}| |d_{42}|) = \cos\varphi$, φ 是偶极矩阵元 d_{12} 和 d_{42} 之间的夹角. 本文用数值模拟方法计算了稳态下的 ρ_{12} , 作近似处理^[13] 取 $\rho_{11} = \rho_{33} = \rho_{44} = 0$, $\rho_{22} = 1$, 而对结果保留了探测场强度的所有量级, 亦即包含了所有阶的非线性效应项.

3. 结果与分析

图2是在探测场和抽运光场都比较弱的情况下, ρ_{12} 的实部和虚部随控制场的改变而变化的曲线 (本文中各物理量取与自发辐射相同的单位, 并且为简单起见, 令 $\varphi = 0$, $\Delta_2 = \Delta_3 = 0$, 即考虑抽运光场和控制光场与所对应能级间的跃迁是共振的情形). 研究拉比频率大小变化所带来的影响: 发现控制场的拉比频率 $\Omega_3 = 0$ 的时候, 虚部曲线均位于零值以上, 也就是介质对探测光全部表现为吸收, 这时候有两个吸收峰. 当控制场的拉比频率由 0.5 增大到 1 的时候吸收峰的强度增大了, 但是变化不太明显. 当控制场的拉比频率 $\Omega_3 = 5$ 的时候, 在 $\Delta = \pm 5$ 附近有吸收为零的现象, 这说明此时出现了 EIT 效应. 而且在 $\Delta = \pm 5$ 之间区域虚部全为负值, 表现为增益. 值得注意的是, 此时的增益区分布很大, 所对应的实部斜率亦为负值, 表现为反常色散. 同时, 我们也发现吸收峰的强度要比控制场较弱的时候增大了将近 5 倍.

图3是在保证探测场和控制场都比较弱的前提下改变抽运光场, 得到的 ρ_{12} 实部和虚部变化曲线. 图3中自上而下抽运场的拉比频率 Ω_2 的取值分别为 1.5, 1.0, 0.5. 发现当抽运场的拉比频率 $\Omega_2 = 1.5$ 的时候, 虚部全部表现为吸收. 当抽运场的 $\Omega_2 = 1$ 的时候, 在 $\Delta = -1.5$ 附近到 $\Delta = 1.5$ 附近之间, 虚部表现为增益, 注意此时有三个吸收为零的位置, 除 $\Delta = \pm 1.5$, 还有在中心处; 实部曲线在此区间的负斜率变大, 亦即介质的反常色散变大. 当抽运场的拉比频率 $\Omega_2 = 0.5$ 的时候, 吸收和增益区间没有变化, 但是其强度要比 $\Omega_2 = 1$ 的时候均增大了; 与此对应的实部曲线的负斜率比前变大. 注意到这样一个有趣的现象, 就是增益区间对应的都是反常色散, 且负折射率也较大.

三个场的相位影响也比较明显. 图 4 给出改变探测场拉比相位带来的影响. 这里取探测场拉比频率的大小为 0.5, 拉比相位 Φ 自上而下分别为 $0, \pi/4$ 和 $\pi/2$. 从图 4 可以发现, 由于拉比频率相位的变化, 导致 ρ_{12} 的实部和虚部有明显的变化. 当相位 Φ 为

$\pi/2$ 时, 图像已经不再像图 2、图 3 中的曲线那样是关于偏调的奇偶函数了. 但是在这三个相位取值时, 都可以发现当色散为负且折射率很大时, 对应的虚部均有增益现象.

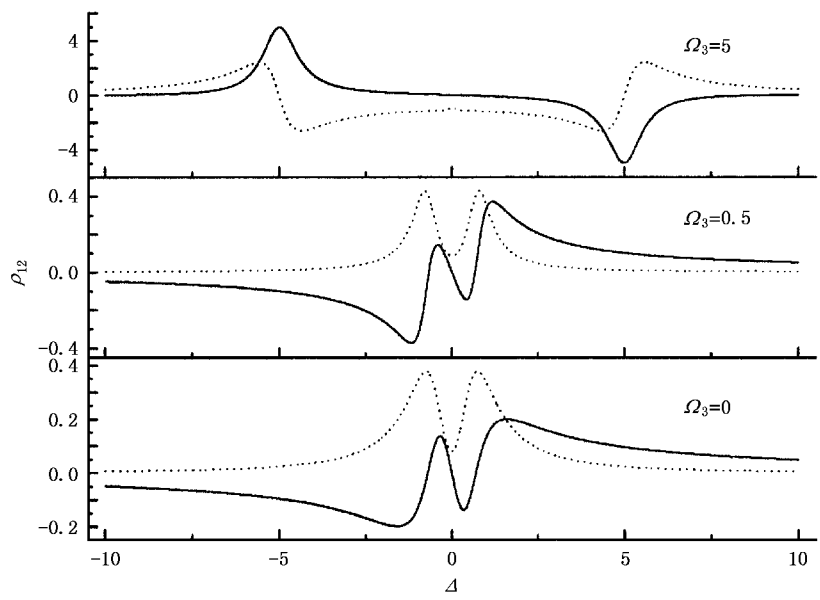


图 2 ρ_{12} 的实部和虚部随失谐量 Δ 变化的曲线 实线代表实部, 虚线代表虚部, 各物理量取值为 $\gamma_1 = 0.1, \gamma_2 = 0.3, \gamma_3 = 0.1, \Omega_1 = \Omega_2 = 0.5, \varphi = 0, \Delta_2 = \Delta_3 = 0$

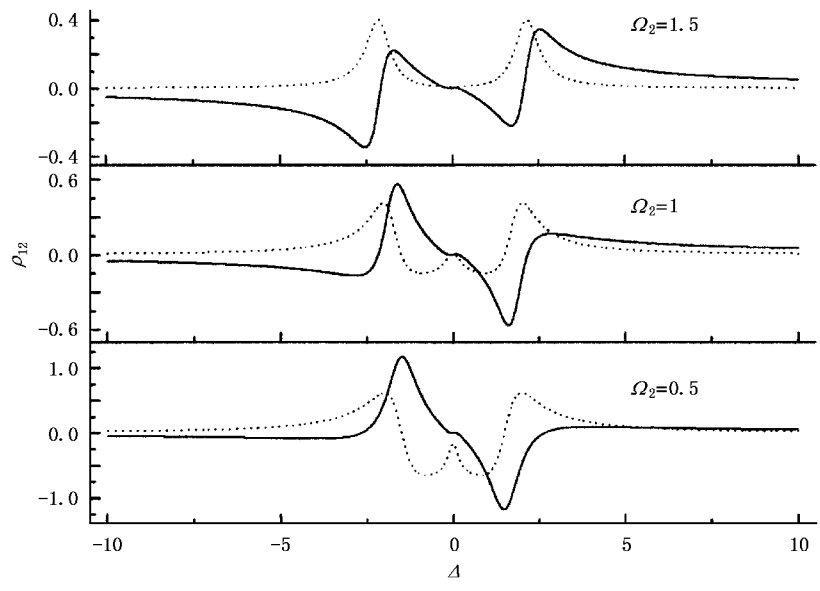


图 3 ρ_{12} 的实部和虚部随失谐量变化的曲线 实线代表实部, 虚线代表虚部. $\Omega_1 = \Omega_3 = 1.5, \gamma_1 = 0.1, \gamma_2 = 0.3, \gamma_3 = 0.1, \varphi = 0, \Delta_2 = \Delta_3 = 0$

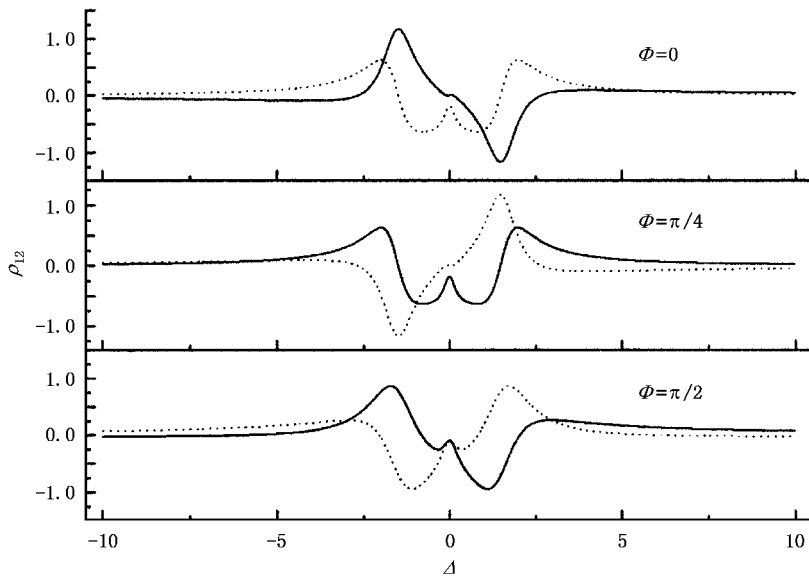


图4 ρ_{12} 的实部和虚部随探测场的拉比相位改变而变化的曲线 实线代表实部,虚线代表虚部. $\Omega_2 = 0.5, \Omega_3 = 1.5, \gamma_1 = 0.1, \gamma_2 = 0.3, \gamma_3 = 0.1, \varphi = 0$

4. 结 论

本文用数值模拟计算的方法研究了 Y 型四能级原子模型中的吸收和色散性质. 发现在外场强度不同的情况下, 系统呈现出不同的色散和增益(吸收)性质, 当外场的拉比频率相位发生改变时, 同样会导致系统的色散和增益(吸收)发生改变. 而且该

系统出现了 EIT 效应. 导致这些有趣现象的原因是系统形成了缀饰态, 并且存在多通道量子干涉效应^[20]. 值得注意的是, 本文所取耦合场的拉比频率与自发辐射系数的数量级相当, 当参量取某些值时系统出现了明显的非线性效应. 这与文献[21]的三能级原子系统要求在耦合场比探测场大很多的前提下得出介质有明显的 EIT 现象的结论的条件不同. 这一模型突破了该条件的限制.

- [1] Banacloche J G, Li Y, Jin S *et al* 1995 *Phys. Rev. A* **51** 576
- [2] Gray H R, Whitley R M, Stroud C R 1978 *Opt. Lett.* **3** 218
- [3] Vemuri G, Vasavada K V, Agarwal G S 1995 *Phys. Rev. A* **52** 3228
- [4] Zhu S Y, Scully M O 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 388
- [5] Schmidt H, Imamoglu A 1996 *Opt. Lett.* **21** 1936
- [6] Hau L V, Harris S E, Dutton Z *et al* 1999 *Nature* **397** 594
- [7] Liu C, Dutton Z, Behroozi C H *et al* 2001 *Nature* **409** 490
- [8] Han L B, Tian Y H, Li G X *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 696 (in Chinese) [韩立波、田永红、李高翔等 2000 物理学报 **49** 696]
- [9] Wu J H 2002 *Chin. Phys.* **11** 572
- [10] Bollr K J, Imamolu A, Harris S E 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 2593
- [11] Kash M M, Sautenkov V A, Zibrov A S *et al* 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 5229
- [12] Lukin M D, Yelin S F, Fleischhauer M *et al* 1999 *Phys. Rev. A* **60** 3225
- [13] Sandhya S N, Sharma K K 1997 *Phys. Rev. A* **55** 2155
- [14] Gu Y, Sun Q Q, Gong Q H 2004 *Phys. Rev. A* **69** 063805
- [15] 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]
- [16] Zhang Y P 2000 *Chin. Phys.* **9** 606
- [17] Li C F, Wang X Y, Zhang X R 2000 *Chin. Phys.* **9** 194
- [18] Zhang Y L, Jiang L, Sun Z R *et al* 2003 *Chin. Phys.* **12** 174
- [19] Agarwal G S, Harshawardhan W 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 1039
- [20] Hou B P, Wang S J, Yu W L *et al* 2004 *Phys. Rev. A* **69** 053805
- [21] Harris S E, Field J E, Imamoglu A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1107

Absorption and dispersion in probe laser in the four-level Y-type atom system^{*}

Zhang Li-Ying Liu Zheng-Dong[†]

(*Institute of Modern Physics, Nanchang University, Nanchang 330047, China*)

(Received 30 November 2004 ; revised manuscript received 28 February 2005)

Abstract

In this paper we have calculated the absorption and dispersion of the probe laser in the four-level Y-type atom system at low light levels and found that if the external light fields are changed, the system would exhibit an electromagnetically induced transparency effect. At the same time, we found that the system could also exhibit enhancement accompanied with a big negative refractive index, and if the light field phase is changed, the absorption and dispersion of the probe laser are also changed.

Keywords : electromagnetically induced transparency, spontaneous emission, quantum interference

PACC : 4250, 4265

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

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