

# 变频场中四能级原子系统的电磁诱导透明

蔡勋明

(贵州民族学院计算机与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要** 当两个光场和 N 型四能级原子相互作用时, 形成三个电偶极跃迁, 中间跃迁为探测跃迁, 两个光场可称为耦合场和探测场。分析了在耦合光场-原子频率失谐量随时间作正弦调制和脉冲调制两种典型情况下介质中的电磁诱导透明(EIT)现象, 正弦调制时, 电磁诱导透明不会发生频移, 但深度将会随时间作周期性振荡。振荡周期取决于耦合场频率失谐量调制周期, 振荡幅度则与失谐量调制频率幅度和频率均有关。脉冲调制时, 电磁诱导透明将发生频移, 给出了频移量计算的公式, 增加脉冲调制幅度时, EIT 随时间周期性改变的幅度也会增加。

**关键词** 量子光学; 电磁诱导透明; 量子相干; 能级衰减速率; 频率调谐

**中图分类号** O431.2      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/AOS201131.0127001

## Electromagnetically Induced Transparency of Four-Level Atomic System in a Field of Time-Varying Frequency

Cai Xunming

(College of Computer and Information Engineering, Guizhou University for Nationalities, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract** When two optical fields interact with a four-level N type atom, there are three transitions and the middle transition is used as a probe transition. The two field are called coupled fields and probe field. Two cases of electromagnetically induced transparency (EIT) are discussed. When the frequency changes with time in sinusoidal form, the frequency of electromagnetically induced transparency won't change but the degree of EIT will change with time periodically. When the frequency changes with time in rectangular form, the frequency will change, the frequency shift can be calculated by the formula proposed in the article. The amplitude of EIT changing with time periodically-energy increases when the modulation amplitude of these rectangular pulses is increased.

**Key words** quantum optics; electromagnetically induced transparency (EIT); quantum coherence; rate of level relaxation; frequency tuning

**OCIS codes** 270.1670; 020.1670; 270.5580

### 1 引 言

电磁诱导透明(EIT)是电磁场与多能级系统相互作用产生的量子干涉效应, 电磁诱导透明在光速控制<sup>[1,2]</sup>、非线性光学<sup>[3~6]</sup>和量子信息<sup>[7~12]</sup>领域有广泛的应用。典型的模型是  $\Lambda$  型三能级系统<sup>[13]</sup>。曾志强等<sup>[14]</sup>研究了真空场诱导相干对梯形四能级原子系统中单光子和双光子透明的影响, 刘正东等<sup>[15]</sup>研究了被三个耦合场驱动的四能级原子的电磁诱导透明。

在 N 型四能级原子系统中, 一个弱耦合场同时驱动简并的 1-2 跃迁和 3-4 跃迁, 2-3 跃迁利用一个更弱的场进行探测<sup>[16~19]</sup>。在以往的研究中, 一般认为光场具有确定的频率且不随时间变化, 或者考虑耦合场频率失谐时, 为静态失谐, 即不考虑失谐量随时间的变化, 所得 EIT 为静态情况, 不随时间变化。然而实际的光场其频率有一定分布, 随着激光理论与技术的发展, 已有较多方法实现输出光场频率的连续调谐, 如利用旋转波片、声光效应和旋转光栅等

收稿日期: 2010-04-07; 收到修改稿日期: 2010-05-24

作者简介: 蔡勋明(1978—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事量子光学方面的研究。E-mail: caixm1997@yahoo.com.cn

方法实现激光的固定频移;在光栅外腔半导体激光器中利用马达控制光栅的转动和使用压电陶瓷改变激光腔长可快速准确实现对输出激光频率的连续调谐;此外还可以通过改变注入电流来进行直接光频调制的方法,如激光二极管可实现直接光频调制,其电流频率调制系数可达 0.1~1 GHz/mA,可见以较小的注入电流(mA)变化,就可以引起近吉赫兹(GHz)的频移,同时由于电流变化很小,基本上可以保持光信号幅度不变。已有一些涉及光场频率随时间变化的光场与原子相互作用的研究表明,光场的频率调制的确会影响光场与原子的相互作用以及原子的动力学性质和量子效应<sup>[20,21]</sup>,文献[20]研究了一个二能级原子与时变频率场相互作用过程中原子能级布居数演化,分析了频率正弦调制和脉冲调制下,光场频率变化对原子布居数反转的影响。文献[21]研究了光场频率调制下双原子的纠缠演化。本文研究了时变频率场中的 EIT 现象。对于一个时变频率场和 N 型四能级原子系统相互作用的模型,主要讨论了两种典型情况:光场频率随时间以正弦形式和脉冲形式调制。分析了光场频率调制对 EIT 随时间变化和 EIT 发生时探测场频率失谐的影响。

## 2 模型与方程

考虑如图 1 所示均匀展宽的四能级原子系统,其中|1>和|3>是没有弛豫的简并基态能级,能级|2>和|4>是简并的激发态能级。

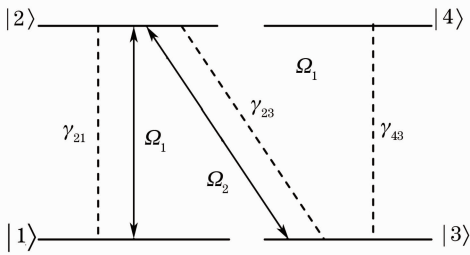


图 1 四能级 N 型原子系统的能级与跃迁  
Fig. 1 Energy level and transition of a four-level N-type atomic system

原子受到两个光场作用

$$E(r, t) = E_1 \exp(-i\omega_1 t) + E_2 \exp(-i\omega_2 t) + c. c. , \quad (1)$$

1-4 跃迁为偶极禁止。在(1)式中,假定第一项远大于第二项,则第一项作为耦合场驱动 1-2 和 3-4 两个跃迁;第二项作为探测场激发 2-3 跃迁。 $E_1, E_2$  和  $\omega_1, \omega_2$  分别是耦合场和探测场的振幅和频率。在实验中如文献[22,23]中给出,耦合场强度可选在几个毫瓦之间,由上述假定,相应探测场强度则应在数十个微瓦大小。在旋转框架和旋波近似下,系统哈密顿量为<sup>[18,22]</sup>

$$H = \hbar\Delta_1 \sigma_{22} + \hbar(\Delta_1 - \Delta_2)\sigma_{33} + \hbar(\Delta_1 - \Delta_2 + \Delta_3)\sigma_{44} - \hbar(\Omega_1 \sigma_{21} + \Omega_1^* \sigma_{12} + \Omega_1 \sigma_{43} + \Omega_1^* \sigma_{34} + \Omega_2 \sigma_{23} + \Omega_2^* \sigma_{32}), \quad (2)$$

式中  $\Delta_1 = \omega_{21} - \omega_1, \Delta_2 = \omega_{23} - \omega_2$  和  $\Delta_3 = \omega_{43} - \omega_1$  为原子-场耦合的失谐量,且  $\Delta_i = \Delta_3 \circ \sigma_{ij} = |i\rangle\langle j|$  为原子极化算符( $i \neq j$ )和布局算符( $i = j$ )。 $2\Omega_1$  和  $2\Omega_2$  分别为耦合场和探测场的拉比频率。系统的约化密度矩阵主方程<sup>[18]</sup>为

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] + \gamma_{21}\ell_{12}^{21}\rho + \gamma_{23}\ell_{32}^{23}\rho + \gamma_{43}\ell_{34}^{43}\rho + \gamma_0\ell_{12}^{43}\rho, \quad (3)$$

(3)式所对应环境为 N 型四能级原子与探测与耦合光场相互作用,考虑了能态间的自发衰减与非相干转移,实验中可选为<sup>85</sup>Rb 原子中  $5S_{1/2} (F=3) \rightarrow 5P_{3/2} (F=4)$  跃迁<sup>[22]</sup>,其中

$$\ell_{ij}^i \rho = \frac{1}{2}(2\sigma_{ij}\rho\sigma_{ji} - \sigma_{ji}\sigma_{ij}\rho - \rho\sigma_{ji}\sigma_{ij}), \quad i = 1, 3, j = 2, 4 \quad (4)$$

表示原子布居的转移,

$$\ell_{12}^{43} \rho = \sigma_{12}\rho\sigma_{43}, \quad (5)$$

描述原子相干的转移。 $\gamma_{21}$  和  $\gamma_{23}$  分别是激发态|2>自发衰减到基态|1>和|3>的速率, $\gamma_{43}$  是激发态|4>自发衰减到基态|3>的速率, $\gamma_0$  是激发态相干转移到基态相干的非相干转移速率,取  $\gamma_0 = 0$ ,即不考虑激发态相干到基态相干的非相干转移影响,对耦合场频率进行调制,即  $\Delta_1 = \Delta_3 = f(t), f(t)$  为调制函数,得到系统的约化密度矩阵元方程为

$$\dot{\rho}_{11} = \gamma_{21}\rho_{22} + i\Omega_1^* \rho_{21} - i\Omega_1 \rho_{12}, \quad (6)$$

$$\dot{\rho}_{22} = -(\gamma_{21} + \gamma_{23})\rho_{22} - i\Omega_1^* \rho_{21} + i\Omega_1 \rho_{12} + i\Omega_2 \rho_{32} - i\Omega_2^* \rho_{23}, \quad (7)$$

$$\dot{\rho}_{33} = \gamma_{23}\rho_{22} + \gamma_{43}\rho_{44} + i\Omega_1^* \rho_{43} - i\Omega_1 \rho_{34} - i\Omega_2 \rho_{32} + i\Omega_2^* \rho_{23}, \quad (8)$$

$$\dot{\rho}_{44} = -\gamma_{43}\rho_{44} - i\Omega_1^* \rho_{43} + i\Omega_1 \rho_{34}, \quad (9)$$

$$\dot{\rho}_{12} = i\Omega_1^* (\rho_{22} - \rho_{11}) - i\Omega_2^* \rho_{13} - \left[ \frac{1}{2}(\gamma_{21} + \gamma_{23}) - i\Delta_1 \right] \rho_{12}, \quad (10)$$

$$\dot{\rho}_{34} = \left( i\Delta_3 - \frac{\gamma_{34}}{2} \right) \rho_{34} + i\Omega_1^* (\rho_{44} - \rho_{33}) + i\Omega_2^* \rho_{24}, \quad (11)$$

$$\dot{\rho}_{13} = i(\Delta_1 - \Delta_2) \rho_{13} + i\Omega_1^* \rho_{23} - i\Omega_2 \rho_{12} - i\Omega_1 \rho_{14}, \quad (12)$$

$$\dot{\rho}_{14} = - \left[ \frac{\gamma_{43}}{2} - i(\Delta_1 - \Delta_2 + \Delta_3) \right] \rho_{14} + i\Omega_1^* \rho_{24} - i\Omega_1^* \rho_{13}, \quad (13)$$

$$\dot{\rho}_{23} = - \left[ \frac{1}{2}(\gamma_{21} + \gamma_{23}) + i\Delta_2 \right] \rho_{23} + i\Omega_1 \rho_{13} + i\Omega_2 \rho_{33} - i\Omega_2 \rho_{22} - i\Omega_1 \rho_{24}, \quad (14)$$

$$\dot{\rho}_{24} = - \left[ \frac{1}{2}(\gamma_{21} + \gamma_{23} + \gamma_{43}) + i(\Delta_2 - \Delta_3) \right] \rho_{24} + i\Omega_1 \rho_{14} + i\Omega_2 \rho_{34} - i\Omega_1^* \rho_{23}, \quad (15)$$

为数值求解以上方程组,做如下代换:

$$\rho_{11} = \bar{\rho}_{11}, \quad \rho_{22} = \exp[-(\gamma_{21} + \gamma_{23})t] \bar{\rho}_{22}, \quad \rho_{33} = \bar{\rho}_{33}, \quad \rho_{44} = \exp(-\gamma_{43}t) \bar{\rho}_{44},$$

$$\rho_{12} = \exp\left\{-\left[\frac{1}{2}(\gamma_{21} + \gamma_{23})t - i\int_0^t f(t)dt\right]\right\} \bar{\rho}_{12}, \quad \rho_{34} = \exp\left[i\int_0^t f(t)dt - \frac{\gamma_{43}}{2}t\right] \bar{\rho}_{34},$$

$$\rho_{13} = \exp\left[-i\Delta_2 t + i\int_0^t f(t)dt\right] \bar{\rho}_{13}, \quad \rho_{14} = \exp\left\{-\left[\frac{1}{2}\gamma_{43}t + i\Delta_2 t - i2\int_0^t f(t)dt\right]\right\} \bar{\rho}_{14},$$

$$\rho_{23} = \exp\left[-\frac{1}{2}(\gamma_{21} + \gamma_{23})t - i\Delta_2 t\right] \bar{\rho}_{23}, \quad \rho_{24} = \exp\left[-\frac{1}{2}(\gamma_{21} + \gamma_{23} + \gamma_{43})t + i\int_0^t f(t)dt - i\Delta_2 t\right] \bar{\rho}_{24}$$

代入(6)~(15)式得到变换后方程组,其中

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\rho}}_{23} = & i\Omega_1 \exp\left[\frac{1}{2}(\gamma_{21} + \gamma_{23})t + i\int_0^t f(t)dt\right] \bar{\rho}_{13} + i\Omega_2 \exp\left[\frac{1}{2}(\gamma_{21} + \gamma_{23})t + i\Delta_2 t\right] \bar{\rho}_{33} - \\ & i\Omega_2 \exp\left[-\frac{1}{2}(\gamma_{21} + \gamma_{23})t + i\Delta_2 t\right] \bar{\rho}_{22} - i\Omega_1 \exp\left[-\frac{1}{2}\gamma_{43}t + i\int_0^t f(t)dt\right] \bar{\rho}_{24}, \end{aligned} \quad (16)$$

设定原子初始处于能态 $|1\rangle$ ,数值求解变换后方程组,可得到经变换后原子约化密度矩阵元随时间演化,密度矩阵方程中的非对角密度矩阵元 $\rho_{23}$ 的虚部正比于探测场的吸收系数,由

$$\rho_{23} = \exp\left[-\frac{1}{2}(\gamma_{21} + \gamma_{23})t - i\Delta_2 t\right] \bar{\rho}_{23}, \quad (17)$$

得 $\text{Im}(\rho_{23})$ 随时间和探测场失谐量的变化,即探测吸收谱的变化规律。

## 3 结果及讨论

### 3.1 无场频率调制情况

首先不考虑耦合场频率调制的情况,即 $\Delta_1 = \Delta_3 = 0$ ,以能级衰减速率 $\gamma_{43} = 1$ ,其他参量以其为单位取相对值。N型能级系统可分为简并和非简并两类,本文取简并N型四能级系统,能级衰减速率依据所选系统不同,实验中可为兆赫兹量级<sup>[22,23]</sup>。

图2显示了介质对探测光吸收量随时间的演化,其中时间 $t'$ 为约化时间,即 $t' = \gamma_{43}t$ ,探测光频率失谐量 $\Delta_2 = 0$ ;图3显示吸收随失谐量变化的曲

线,图中 $\delta$ 表示耦合场失谐量 $\Delta_2$ 。图2,3中参数 $\Delta_1 = \Delta_3 = 0, \Delta_2 = 0, \gamma_{21} = \gamma_{23} = 0.5, \gamma_{43} = 1.0, \Omega_1 = \Omega_3 = 0.1, \Omega_2 = 0.01$ 。图形中纵轴都表示对探测光吸收量。

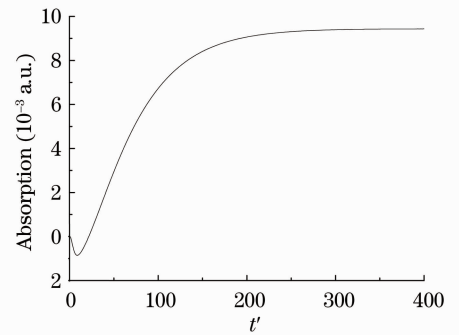


图2 介质对探测光吸收量随时间变化曲线

Fig. 2 Absorption of probe field versus  $t'$

从图2可知初始时刻由于原子处于基态 $|1\rangle$ ,原子向能级 $|2\rangle$ 跃迁后,再跃迁至能级 $|3\rangle$ ,使探测场增强,表现为吸收为负,随时间演化,原子处于能级 $|3\rangle$ 的概率增大,对探测场吸收逐渐趋稳,形成EIT。

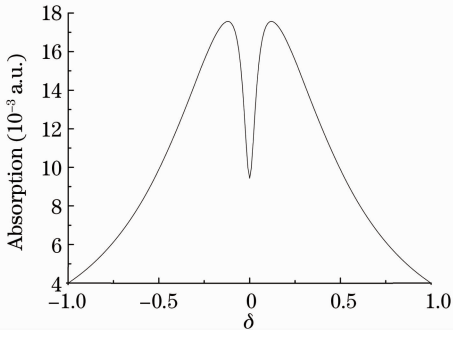


图 3 介质对探测光吸收量随失谐量变化曲线

Fig. 3 Absorption of probe field versus  $\delta$

### 3.2 场频率随时间作正弦调制

取  $f(t) = \alpha \sin(\beta t)$  即耦合场频率失谐量随时间作正弦调制,  $\alpha$  为正弦变化的幅度,  $\beta$  为正弦变化的频率, 即调制频率。如  $\gamma_{43}$  取兆赫兹量级, 可知  $\alpha$  与  $\beta$  量级均为兆赫兹。图 4 展示了探测光吸收量随时间变化, 参数取值为  $\Delta_1 = \Delta_3 = f(t)$ ,  $\Delta_2 = 0$ ,  $\gamma_{21} = \gamma_{23} = 0.5$ ,  $\gamma_{43} = 1.0$ ,  $\Omega_1 = \Omega_3 = 0.1$ ,  $\Omega_2 = 0.01$ 。其

中  $\alpha$  与  $\beta$  取值如图中所示, 纵轴为探测光吸收量。

当耦合场频率作正弦调制时, EIT 发生时没有频移, 从图 4 中可以得出介质对探测场吸收量受到了耦合场频率调制幅度和调制频率双重影响, 调制频率加快时探测场吸收量振荡也随之加快, 吸收量振荡幅度与调制幅度和调制频率相关, 在调制幅度一定时, 调制频率超过一定值之后探测场吸收量振荡趋于零, 如图 4(b), (c) 所示。而图 4(b), (c), (e), (f) 则表明一定调制频率下介质对探测场吸收量振荡趋零后加大调制幅度则吸收量振荡会再现。图 4 中数值计算表明, 对于 EIT 随时间改变的周期, 则只取决于耦合场频率调制的周期。而分析图 4 可知原子系统对探测场吸收量振荡开始就出现了, 本文认为频率调制使原子在  $|2\rangle$ ,  $|3\rangle$  能态上的布居数值随时间振荡, 使得对探测场的吸收也随时间出现振荡。反过来如果均匀介质中探测场谐振时, 观测到 EIT 随时间周期改变的情况, 也可由上述分析来推测耦合场频率变化的情况。

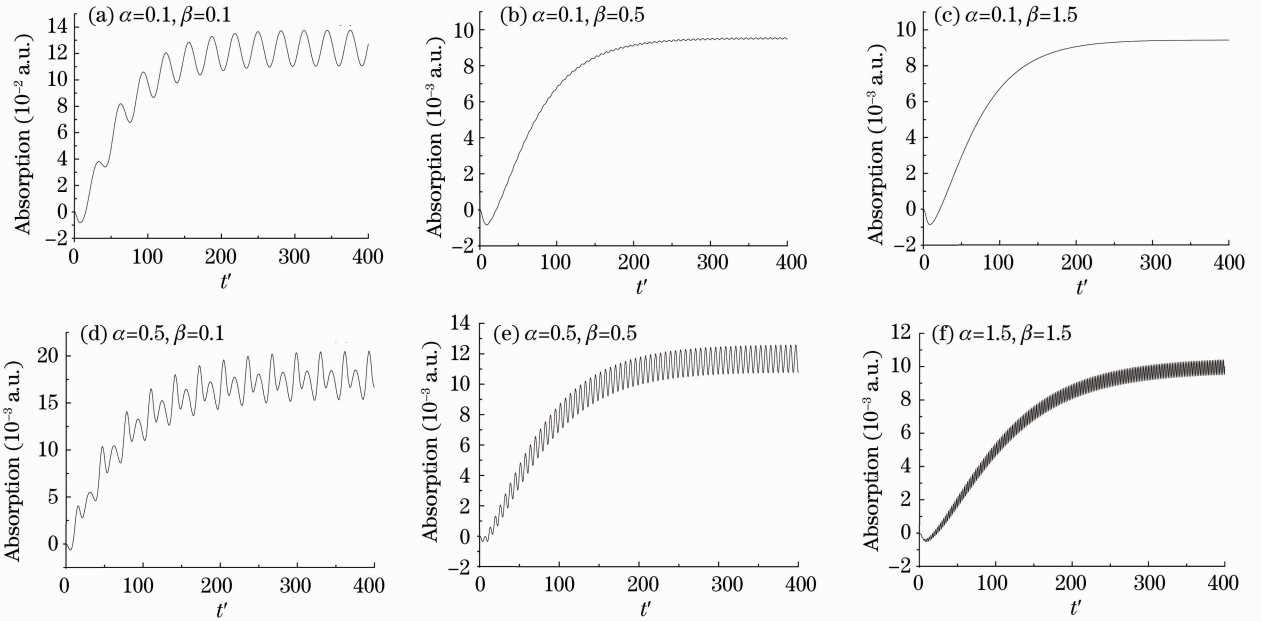


图 4 探测场吸收量随时间的变化情况

Fig. 4 Absorption of probe field versus  $t'$

以下图 5~7 中参数均为  $\Delta_1 = \Delta_3 = f(t)$ ,  $\gamma_{21} = \gamma_{23} = 0.5$ ,  $\gamma_{43} = 1.0$ ,  $\Omega_1 = \Omega_3 = 0.1$ ,  $\Omega_2 = 0.01$ 。 $\alpha$  与  $\beta$  取值如图中所示。

图 5 显示原子系统达到稳态后对探测场吸收量随时间和失谐量的演化。图 5(a), (d) 的表明耦合场调制频率较低时, 由于耦合场频率失谐, 原子相干性破坏较大, 原子跃迁激发过程不能形成稳定的相

消干涉, 原子系统没有表现出电磁诱导透明的特点, 当探测场失谐量为零时介质对探测场吸收在最大值附近振荡。当耦合场频率失谐量调制频率超过一定值(与调制幅度相关)后, EIT 逐渐变得明显, 如图 5(b), (c), (e), (f) 所示, 结合前面图 4(b), (c), (e), (f) 可知, EIT 的深度会随时间变化, 这表明在耦合场失谐量频率调制下, 原子相干性也受到



调制,进而 EIT 的深度随时间周期性改变,表现出随时间振荡的特点。图 4,图 5 的计算表明 EIT 深度随时间的演化可以通过耦合场频率失谐量的调制

幅度和调制频率来调节,这样通过对原子相干周期性调控实现了对 EIT 深度周期性调控。

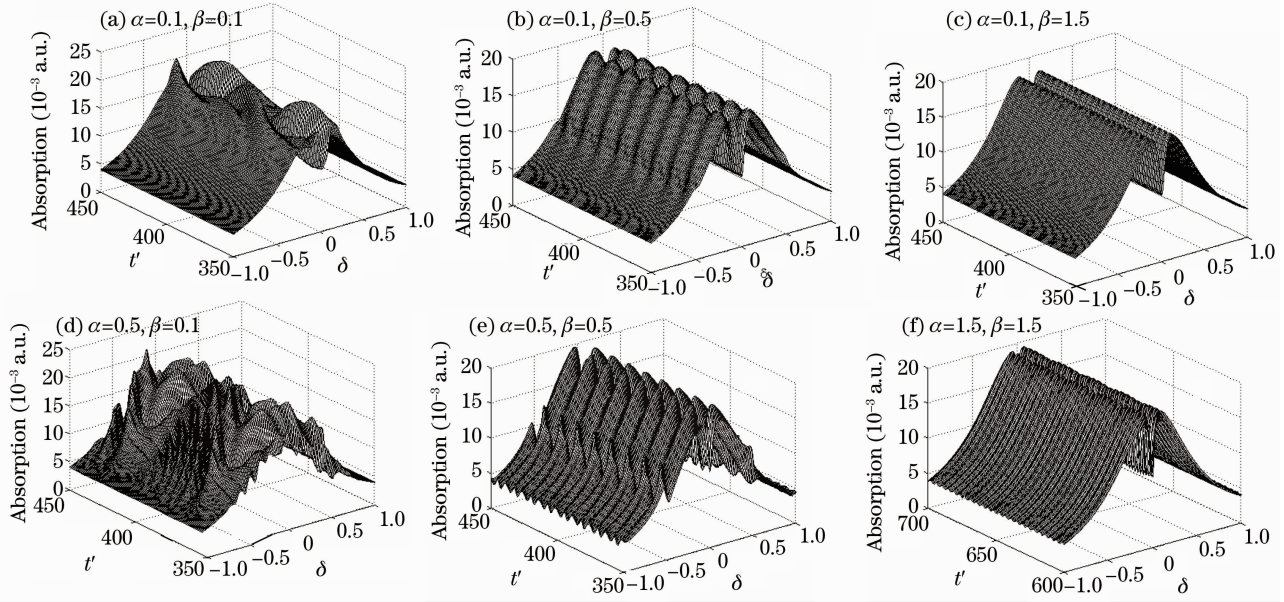


图 5 探测场吸收量随时间和探测场失谐量的演化

Fig. 5 Absorption of probe field versus  $t'$  and detuning

### 3.3 场频率随时间作脉冲调制

考虑光场频率调制为脉冲形式,则频率调制时间函数  $f(t')$  具有如下形式:

$$f(t') = \begin{cases} \alpha, & t' \in [mT + t_0, mT + \tau + t_0], m = 0, 1, 2, \dots \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

式中  $T, \tau, \alpha, t_0$  分别是脉冲频率调制的周期,脉冲的时间宽度,脉冲强度和第一个脉冲出现的时刻。令  $t_0 = 0, \tau = 2, T = 5$ , 依据所选用 N 型能级系统的情况,实验中,脉冲宽度可选在微秒量级范围内。图 6 为原子系统达到稳态后的 EIT 曲线。

从图 6 可以看出,在耦合场频率作脉冲调制的情况下,EIT 也出现频移,即 EIT 发生时对应探测场频率与原子频率  $\omega_2$  谐振,从图 6 可知,发生 EIT 时探测场频率失谐量与频率调制幅度相关,同时也与频率脉冲调制的占空比相关,可由式子  $\Delta_2 = \left[ \int_0^T f(t) dt \right] / T$  来计算,  $T$  为频率调制的周期。对频移量公式可作如下分析,由于耦合场频率随时间周期性改变,由(16)式可知,这将对  $\dot{\rho}_{23}$  引起附加的相位改变  $\int_0^{t'} f(t') dt'$ ,首先考虑  $t'$  为周期  $T$  的整数倍的情况,由(17)式可知,当满足  $\int_0^{t'} f(t') dt' - \Delta_2 t = 0$  时,耦

合场随时间而变引起的附加相位被消除,如同耦合场与探测场同原子谐振的情况,出现 EIT 现象,且频移量  $\Delta_2 = \left[ \int_0^T f(t) dt \right] / T$ 。而  $t'$  为周期  $T$  的非整数倍

且频移量满足  $\Delta_2 = \left[ \int_0^T f(t) dt \right] / T$  时,附加相位差随时间改变,引起介质对探测场吸收量随时间周期性改变。在频率脉冲调制的情况下 EIT 频移量等于调制幅度与占空比的乘积,EIT 发生原因被解释为不同跃迁过程的相消干涉,此处耦合场频率脉冲调制下,形成相消干涉时探测场频率出现失谐,这样我们就可以通过调节调制幅度与占空比的乘积使不同的探测场频率下出现 EIT,实现 EIT 的可调谐。

图 7 为耦合场频率脉冲调制下原子系统达到稳态后对探测场吸收量随时间和失谐量的演化情况。

从图 7 可知在前面所设耦合场频率脉冲调制下,EIT 不仅发生了频移,其深度也随时间作周期性改变,即介质对探测场吸收量随时间做周期性改变,在调制幅度增加的情况下吸收量随时间周期性

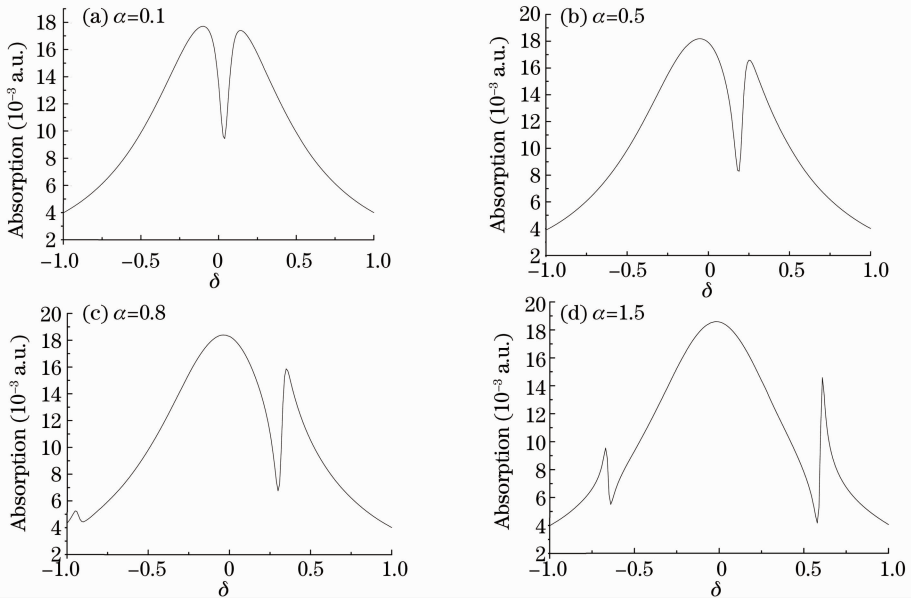


图 6 介质对探测场吸收量随探测场失谐量的变化情况  
Fig. 6 Absorption of probe field versus detuning

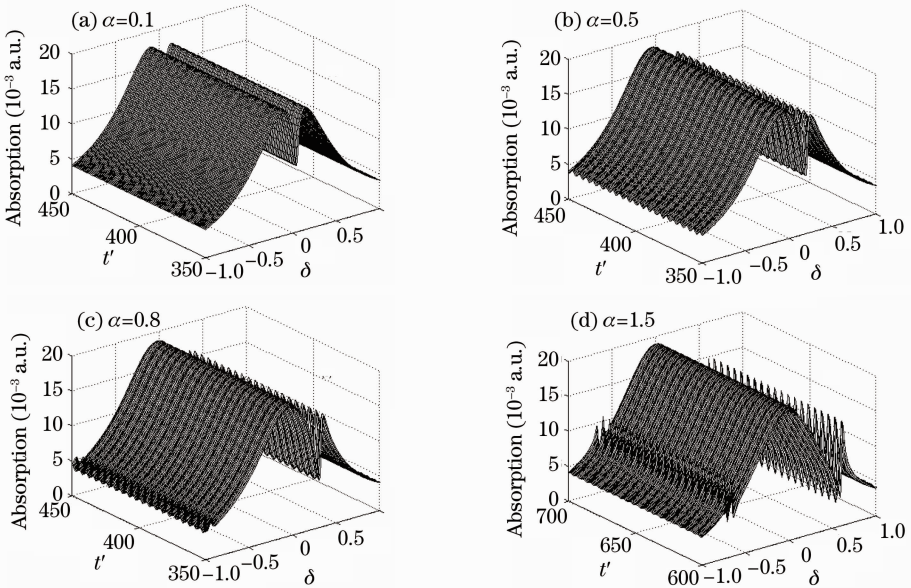


图 7 探测场吸收量随时间和探测场失谐量的演化  
Fig. 7 Absorption of probe field versus  $t'$  and detuning

改变的幅度也会增加,如图 7 所示。此处 EIT 随时间演变的原因也在于耦合场频率的脉冲调制对原子相干起到了周期性的调制作用。

## 4 结 论

以三个电偶极跃迁构成的 N 型四能级系统为例,分析了耦合场频率随时间作正弦调制和脉冲调制两种情况对 EIT 的影响,耦合场频率失谐量作正弦调制时,EIT 不会发生频移,但 EIT 深度将会随

时间作周期性振荡,振荡幅度和周期与耦合场频率调制的幅度和周期相关联,表明对耦合场频率的调控实现了对原子相干性的调控,进而实现对 EIT 的周期性调控。耦合场频率失谐量作正负不等幅值脉冲调制时,EIT 将发生频移,频移量为  $\left[ \int_0^T f(t) dt \right] / T$ ,  $f(t)$  为耦合场频率调制函数,增加调制幅度时 EIT 随时间周期性改变的幅度也会增加。这样可以通过对耦合场频率的调制来实现 EIT 频率调谐。

## 参 考 文 献

- 1 L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton *et al.*. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas[J]. *Nature*, 1999, **397**(6720): 594~598
- 2 Liang Qingchang, Wang Haihua, Jiang Zhankui. Investigation on electromagnetically induced transparency and slowing-down of group velocity in  $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 946~950  
梁卿昌, 王海华, 蒋占魁.  $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  晶体中电磁感应透明及群速度减慢研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 946~950
- 3 M. M. Kash, V. A. Sautenkov, A. S. Zibrov *et al.*. Ultraslow group velocity and enhanced nonlinear optical effects in a coherently driven hot atomic gas[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(26): 5229~5232
- 4 D. A. Braje, V. Bali, S. Goda *et al.*. Frequency mixing using electromagnetically induced transparency in cold atoms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(18): 183601-1~4
- 5 V. Bali, D. A. Braje, P. Kolchin *et al.*. Generation of paired photons with controllable waveforms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(18): 183601-1~4
- 6 Y. Zhang, B. Anderson, M. Xiao. Efficient energy transfer between four-wave-mixing and six-wave-mixing processes via atomic coherence[J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **77**(6): 061801-1~4
- 7 M. Fleischhauer, M. D. Lukin. Dark-state polaritons in electromagnetically induced transparency[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(22): 5094~5097
- 8 M. Fleischhauer, M. D. Lukin. Fidelity of a  $t$ -error-correcting quantum code with more than  $t$  errors[J]. *Phys. Rev. A*, 2001, **64**(2): 022314-1~5
- 9 K. Bergman, H. Theuer, B. W. Shore. Coherent population transfer among quantum states of atoms and molecules[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1998, **70**(3): 1003~1025
- 10 L. M. Duan, M. D. Lukin, J. I. Cirac *et al.*. Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics [J]. *Nature*, 2001, **414**(6862): 413~418
- 11 M. D. Eisaman, A. Andr<sup>'</sup>e, F. Massou *et al.*. Electromagnetically induced transparency with tunable single-photon pulses[J]. *Nature*, 2005, **438**(7069): 837~841
- 12 T. Chanelière, D. N. Matsukevich, S. D. Jenkins *et al.*. Storage and retrieval of single photons transmitted between remote quantum memories[J]. *Nature*, 2005, **438**(7069): 833~836
- 13 Y. Wu, X. Yang. Electromagnetically induced transparency in  $V_-, \Lambda_-$ , and cascade-type schemes beyond steady-state analysis [J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **71**(5): 053806-1~7
- 14 Zeng Zhiqiang, Hou Bangpin. Effects of vacuum-induced coherence on the single and two-photon transparency in a four-level ladder atomic system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 251~256  
曾志强, 侯邦品. 真空场诱导相干对梯形四能级原子系统中单光子和双光子透明的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 251~256
- 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  
刘正东, 武强. 被三个耦合场驱动的四能级原子的电磁感应透明[J]. *物理学报*, 2004, **53**(9): 2970~2973
- 16 A. M. Akulshin, S. Barreiro, A. Lezama. Electromagnetically induced absorption and transparency due to resonant two-field excitation of quasidegenerate levels in Rb vapor [J]. *Phys. Rev. A*, 1998, **57**(4): 2996~3002
- 17 C. Goren, A. D. Wilson-Gordon, M. Rosenbluh *et al.*. Electromagnetically induced absorption due to transfer of coherence and to transfer of population[J]. *Phys. Rev. A*, 2003, **67**(3): 033807-1~8
- 18 Wang Li, Hu Xiangming. Constructive interference: electromagnetically induced absorption[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(8): 2544~2550  
王丽, 胡响明. 相长干涉: 电磁诱导吸收[J]. *物理学报*, 2004, **53**(8): 2544~2550
- 19 Du Yingjie, Ge Guoku. The atomic absorption in N-type four-level system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 375~380  
杜英杰, 葛国库. N型四能级系统的原子吸收[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 375~380
- 20 Y. P. Yang, J. P. Xu, G. X. Li *et al.*. Interactions of a two-level atom and a field with a time-varying frequency[J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **69**(5): 053406-1~6
- 21 Cai Xunming, Fan Menghui. The entanglement of two atoms in a coherent field of time-varying frequency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2570~2576  
蔡勋明, 范梦慧. 频率变化的相干态光场中两原子纠缠演化[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2570~2576
- 22 A. Lezama, S. Barreiro, A. M. Akulshin. Electromagnetically induced absorption[J]. *Phys. Rev. A*, 1999, **59**(6): 4732~4735
- 23 Y. Dong, J. Zhang, H. Wang *et al.*. Quantum interference effects in a multi-driven transition[J]. *Chin. Phys. B*, 2006, **15**(6): 1262~1267