

耦合场失谐对闭合 Λ 型四能级系统中电磁诱导透明和电磁诱导吸收的影响

李晓莉 刘红娜 杨悦

(河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002)

摘要 电磁诱导透明(EIT)和电磁诱导吸收(EIA)是光与物质相互作用中表现出来的奇特的非线性效应,对其形成机理及非线性特性的研究具有重要的理论意义和巨大的潜在应用价值。构建一个闭合 Λ 型四能级系统包括两个基态精细结构能级和两个激发态精细结构能级,除耦合场和探测场外,还附加了两个射频场分别作用于激发态精细结构能级和基态精细结构能级之间。为了讨论耦合场失谐对系统的影响规律,采用的两个射频场分别与对应能级共振。通过求解系统的密度矩阵方程组,发现该系统中同时出现了 EIT 和 EIA,而且调谐耦合场的频率失谐量可以控制 EIT 或 EIA 的频率位置和非线性特性。

关键词 电磁诱导透明;电磁诱导吸收;耦合场;射频场

中图分类号 O562.3⁺2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0102001

Influence of Off-Resonant Coupling Field on Electromagnetically Induced Transparency and Electromagnetically Induced Absorption in A Closed Λ -Shaped Four-Level System

Li Xiaoli Liu Hongna Yang Yue

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

Abstract Electromagnetically induced transparency (EIT) and electromagnetically induced absorption (EIA) are intriguing nonlinear phenomena of light-atom interaction. The study on their nonlinear behaviors has theoretical significance and potential applications. A closed-lambda four-level system consisting of hyperfine levels of excited state and those of ground state is proposed. In addition to a coupling field and a probing field, there are two radio-frequency fields which interact with hyperfine levels of excited state and those of ground state, respectively. In order to focus on detuning effect of the coupling field on the system, two resonant radio-frequency fields are used. By solving the equations of density matrix motion, both EIT and EIA are obtained in the system, and the frequency and feature of EIT or EIA are controlled by tuning the detuning of coupling field.

Key words electromagnetically induced transparency(EIT); electromagnetically induced absorption(EIA); coupling field; radio-frequency field

OCIS codes 020.0020; 140.0140; 190.0190; 270.0270

1 引言

电磁诱导透明(EIT)和电磁诱导吸收(EIA)是光与物质相互作用中表现出来的一对性质相对立的相干现象,它们分别基于原子相干对吸收的相消干涉和相长干涉,使介质的吸收和色散特性发生完全

不同的变化。利用 EIT 和 EIA 可以在不同介质中实现“超快”光和“慢”光^[1~4]效应,并且在光信息存储^[5,6]和光计算^[7,8]等领域具有巨大的潜在应用价值。近年来,国内外针对电磁场对 EIT 和 EIA 的影响规律^[9~14]已经进行了大量研究,但这些研究成果

收稿日期: 2010-04-22; 收到修改稿日期: 2010-09-15

基金项目: 河北省自然科学基金(A2009000140)和河北大学自然科学研究计划(2008Q14)资助课题。

作者简介: 李晓莉(1982—),女,讲师,主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: xiaolixiaoli001@yahoo.com.cn

绝大多数是把 EIT 或 EIA 各自作为独立的现象进行研究得到的。其实, EIT 和 EIA 可以在一些原子系统中同时出现, 甚至可以相互转化, 但国内外对于这方面的研究成果非常少^[15~18]。本文对可以同时出现 EIT 和 EIA 的闭合 Λ 型四能级系统进行研究, 探讨耦合场失谐对系统的影响规律, 并通过调谐耦合场的频率失谐量来实现 EIT 和 EIA 的相互转化。

闭合 Λ 型四能级系统包括两个基态精细结构能级和两个激发态精细结构能级, 除耦合场和探测场分别与一对光学跃迁发生作用外, 还附加了两个射频场分别作用于激发态精细结构能级和基态精细结构能级之间。改变耦合场的频率失谐量可以使系统的探测吸收谱呈现 EIT 和 EIA 两种完全相反的特性。由于基态精细结构能级之间的相干失相速率

很小, EIT 和 EIA 均具有极窄的光谱线宽, 比光学跃迁的自然线宽小几个数量级。研究表明, 通过调谐耦合场的频率失谐量可以控制 EIT 或 EIA 的频率位置和非线性特性, 同时给出了相应的缀饰态解释^[19]。

2 系统的密度矩阵方程

耦合场、射频场和探测场共同作用下的闭合 Λ 型四能级系统模型如图 1(a) 所示。其中, $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 能级属基态精细结构能级, $|3\rangle$ 和 $|4\rangle$ 能级属激发态精细结构能级。频率为 ω_c 的耦合场激励 $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ 跃迁, 频率为 ω_{rf1} 的射频场激励 $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 跃迁, 频率为 ω_{rf2} 的射频场激励 $|3\rangle \leftrightarrow |4\rangle$ 跃迁, 而频率为 ω_p 的探测场通过扫描 $|1\rangle \leftrightarrow |4\rangle$ 跃迁获得探测吸收谱。四个场的拉比频率分别为 $\Omega_c, \Omega_{rf1}, \Omega_{rf2}$ 和 Ω_p 。

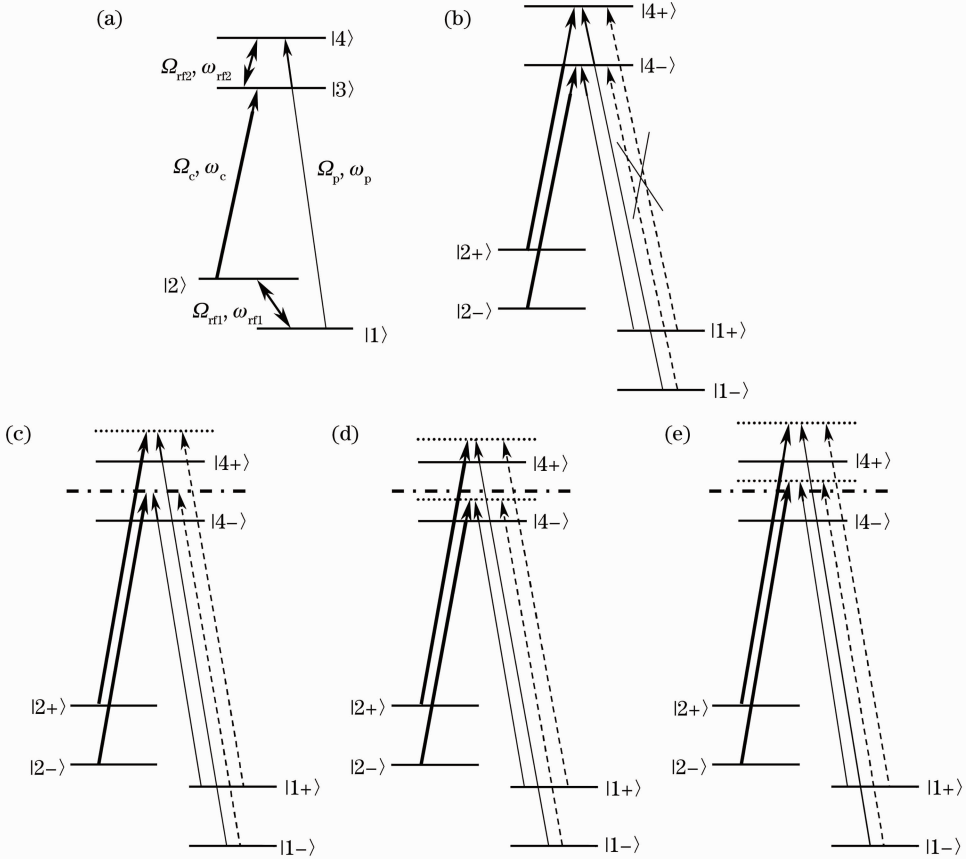


图 1 耦合场、射频场和探测场共同作用下的闭合 Λ 型四能级系统。(a) 为裸态能级图, (b), (c), (d), (e) 为两个射频场均共振 ($\Omega_{rf1} = \Omega_{rf2} = 2$), 而耦合场的频率失谐量分别取 $\delta_c = 0, 1.0, 0.5$ 和 1.5 时的缀饰态能级图

Fig. 1 A closed-lambda four-level system with coupling field, rf fields and probe field. (a) bare state levels, (b), (c), (d), (e) dressed state levels with two rf fields resonant ($\Omega_{rf1} = \Omega_{rf2} = 2$) and the detunings of coupling field equal to 0, 1.0, 0.5 and 1.5, respectively

闭合 Λ 型四能级系统的密度矩阵方程可表示为

$$\begin{cases}
 \dot{\rho}_{11} = i\chi_p [\rho_{41} \exp(i\delta t) - \rho_{14} \exp(-i\delta t)] + i\chi_{rf2} [\rho_{21} - \rho_{12}] + \frac{\gamma}{2} (\rho_{44} + \rho_{33}) + \Gamma(\rho_{22} - \rho_{11}) \\
 \dot{\rho}_{22} = i\chi_c (\rho_{32} - \rho_{23}) + i\chi_{rf2} (\rho_{12} - \rho_{21}) + \frac{\gamma}{2} (\rho_{44} + \rho_{33}) + \Gamma(\rho_{11} - \rho_{22}) \\
 \dot{\rho}_{33} = i\chi_{rf1} (\rho_{43} - \rho_{34}) + i\chi_c (\rho_{23} - \rho_{32}) - \gamma\rho_{33} \\
 \dot{\rho}_{44} = i\chi_{rf1} (\rho_{34} - \rho_{43}) + i\chi_p [\rho_{14} \exp(-i\delta t) - \rho_{41} \exp(i\delta t)] - \gamma\rho_{44} \\
 \dot{\rho}_{43} = i\chi_{rf1} (\rho_{33} - \rho_{44}) - i\chi_c \rho_{42} + i\chi_p \rho_{13} \exp(-i\delta t) + d_{43} \rho_{43} \\
 \dot{\rho}_{42} = i\chi_{rf1} \rho_{32} - i\chi_{rf2} \rho_{41} - i\chi_c \rho_{43} + i\chi_p \rho_{12} \exp(-i\delta t) + d_{42} \rho_{42} \\
 \dot{\rho}_{41} = i\chi_{rf1} \rho_{31} - i\chi_{rf2} \rho_{42} + i\chi_p (\rho_{11} - \rho_{44}) \exp(-i\delta t) + d_{41} \rho_{41} \\
 \dot{\rho}_{32} = i\chi_{rf1} \rho_{42} - i\chi_{rf2} \rho_{31} + i\chi_c (\rho_{22} - \rho_{33}) + d_{32} \rho_{32} \\
 \dot{\rho}_{31} = i\chi_{rf1} \rho_{41} - i\chi_{rf2} \rho_{32} + i\chi_c \rho_{21} - i\chi_p \rho_{34} \exp(-i\delta t) + d_{31} \rho_{31} \\
 \dot{\rho}_{21} = i\chi_c \rho_{31} - i\chi_p \rho_{24} \exp(-i\delta t) + i\chi_{rf2} (\rho_{11} - \rho_{22}) + d_{21} \rho_{21}
 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $\chi_c = \Omega_c/2$, $\chi_{rf1} = \Omega_{rf1}/2$, $\chi_{rf2} = \Omega_{rf2}/2$, $\chi_p = \Omega_p/2$, $d_{ij} = i\delta_{ij} - \gamma_{ij}$ 为复失谐量, 其中 δ_{ij} 分别代表 $\delta_{32} = \omega_c - \omega_{32}$, $\delta_{21} = \omega_{rf1} - \omega_{21}$, $\delta_{43} = \omega_{rf2} - \omega_{43}$, $\delta_{41} = \omega_p - \omega_{41}$, γ_{ij} 是能级 $|i\rangle$ 和 $|j\rangle$ 之间的相干失相速率. 激发态能级 $|3\rangle$ 和 $|4\rangle$ 自发衰减到基态能级 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 的粒子数衰减速率均为 γ , 而 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 之间的粒子数弛豫速率均为 Γ . 为简单起见, 设 $\gamma = 1$, 其他参量均以其为单位取相对值.

密度矩阵方程中的非对角密度矩阵元 ρ_{41} 的虚部正比于探测场的吸收系数, 实部则反映探测场的色散特性. 本工作重在研究耦合场失谐对系统的影响, 故将探测场视为弱场. 通过对探测场进行微扰处理, 求解 ρ_{41} 的一级微扰解, 得到 $\text{Im} \rho_{41}^{(1)}$ 随探测场失谐量 $\delta_{41} = \omega_p - \omega_{41}$ 的变化曲线, 即探测吸收谱的变化规律. ρ_{41} 的一级微扰解表达式为

$$\rho_{41}^{(1)} = E_{41} \rho_{11}^{(1)} + F_{41} \rho_{22}^{(1)} + G_{41} \rho_{33}^{(1)} + K_{41}, \quad (2)$$

式中 $\rho_{11}^{(1)}$, $\rho_{22}^{(1)}$ 和 $\rho_{33}^{(1)}$ 为一阶粒子数, E_{41} , F_{41} , G_{41} 和 K_{41} 是与零级解 $\rho_{11}^{(0)}$, $\rho_{22}^{(0)}$, $\rho_{33}^{(0)}$, $\rho_{14}^{(0)}$, $\rho_{24}^{(0)}$, $\rho_{34}^{(0)}$, $\rho_{23}^{(0)}$, $\rho_{12}^{(0)}$ 和 $\rho_{13}^{(0)}$ 有关的参量.

3 结果和讨论

3.1 探测吸收曲线随耦合场频率失谐量的变化

文献[20]已经对闭合 Λ 型四能级系统中耦合场和射频场均共振时探测吸收曲线的变化规律进行了分析和讨论, 因此本文将重点考虑射频场共振而耦合场失谐对系统的影响规律, 而且为了简化物理图像, 只讨论两个射频场的拉比频率相同的情况.

图 2 给出了闭合 Λ 型四能级系统中, 两个射频场分别与 $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 和 $|3\rangle \leftrightarrow |4\rangle$ 跃迁共振时, 探测吸收曲线随耦合场频率失谐量增大的变化规律, 其中 $\Omega_c = 0.1$, $\Omega_{rf1} = \Omega_{rf2} = 3$. 图 2(a) 为耦合场频率失谐

量为零的情况(即耦合场与 $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ 跃迁共振), 此时探测吸收曲线在探测场的频率失谐量为 $\delta_{41} = \pm 3$ 处出现了线宽极窄的 EIT, 同时出现了三个强吸收峰, 其中一个位于中心频率处, 另外两个分别出现在 $\delta_{41} = \pm 3$ 处, 与 EIT 叠加在一起. 图 2(b) 和 (c) 分别表示耦合场频率失谐量为 $\delta_c = 0.5$ 和 1.0 的情况, 探测吸收曲线中两个 EIT 的频率位置分别比耦合场共振时右移了 0.5 和 1.0 , 但是三个强吸收峰的频率位置保持不变. 图 2(d) 为耦合场频率失谐量为 $\delta_c = 1.5$ 的情况, 此时的探测吸收曲线上出现了三个 EIT, 其中有两个是原来的 EIT, 只是频率位置比耦合场共振时右移了 1.5 , 还有一个是新出现的, 位于 $\delta_{41} = 1.5$ 处; 三个强吸收峰的频率位置依然保持不变, 但是随着耦合场频率失谐量增大, 最右侧吸收峰的吸收强度逐渐减小, 而最左侧吸收峰的吸收强度逐渐增大.

通过图 2 的四条曲线得出如下结论, 探测吸收曲线中 EIT 的频率位置与两个射频场的拉比频率和耦合场的频率失谐量有关, 当射频场的拉比频率保持不变, EIT 的频率位置则随着耦合场的频率失谐量增大而逐渐右移, 同时它的非线性特性也逐渐发生变化. 图 2(a) 中, 在探测场频率失谐量的绝对值等于射频场的拉比频率处出现了两个 EIT; 图 2(b) 和 (c) 中, 随着 EIT 的频率位置右移, 左侧 EIT 逐渐向探测频率中心移动, 其吸收特性也逐渐变化为介于 EIT 和 EIA 之间的一种非线性现象, 右侧 EIT 逐渐向外侧移动, 其吸收特性仍为 EIT; 图 2(d) 中, 最左侧 EIT 更加移近探测频率中心位置, 其吸收特性也逐渐变化为 EIA, 最右侧 EIT 更加移向外侧, 其吸收特性仍为 EIT, 同时在 $\delta_{41} = 1.5$ 处新出现了一个吸收特性介于 EIT 和 EIA 之间的

非线性信号。这表明,耦合场共振时系统中只能出现 EIT,但随着耦合场的频率失谐量增大,出现了从 EIT 向 EIA 的过渡,同时还会促使生成新的 EIT 或 EIA。因此,在闭合 Λ 型四能级系统中,耦合场失谐

会使系统的非线性特性发生改变,使系统呈现 EIT 或 EIA 这样一对性质相对立的相干现象,并能通过改变耦合场的频率失谐量控制 EIT 或 EIA 的频率位置。

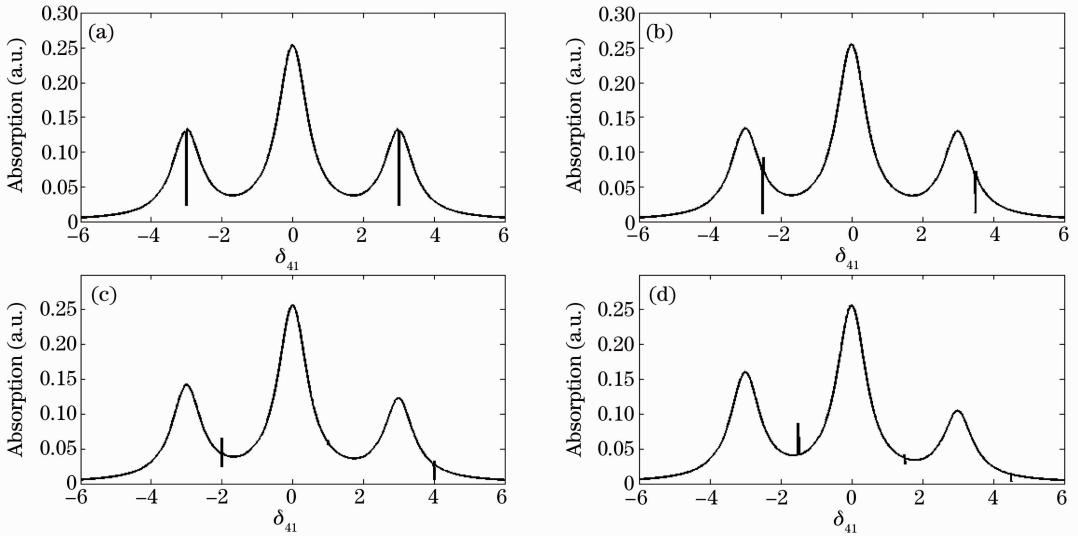


图 2 闭合 Λ 型四能级系统在两个射频场均共振 ($\Omega_{r1} = \Omega_{r2} = 3$), 且耦合场的频率失谐量分别取 (a) $\delta_c = 0$, (b) $\delta_c = 0.5$, (c) $\delta_c = 1.0$ 和 (d) $\delta_c = 1.5$ 时的探测吸收曲线

Fig. 2 Closed-lambda four-level system with two rf fields resonant ($\Omega_{r1} = \Omega_{r2} = 3$) and the detunings of coupling field equal to (a) $\delta_c = 0$, (b) $\delta_c = 0.5$, (c) $\delta_c = 1.0$ and (d) $\delta_c = 1.5$ respectively

3.2 比较射频场的拉比频率取不同值时耦合场失谐对系统的影响规律

在闭合 Λ 型四能级系统中,两个共振射频场的拉比频率取不同数值也会对系统的非线性特性产生很大影响。图 2 得出的结论是在两个射频场的拉比频率取 $\Omega_{r1} = \Omega_{r2} = 3$ 时得到的。为了更全面地了解耦合场失谐对系统的影响,将讨论射频场的拉比频率取不同值时,探测吸收曲线随耦合场频率失谐量的变化规律。

图 3 给出了两个射频场的拉比频率 $\Omega_{r1} = \Omega_{r2} = 2$ 时,探测吸收曲线随耦合场频率失谐量增大的变化规律。图 3(a) 为耦合场频率失谐量为零的情况,与图 2(a) 非常相似,只是在 $\delta_{41} = \pm 2$ 处出现了 EIT,并与三个强吸收峰中的外侧两个边峰叠加在一起,而三个强吸收峰的频率位置依然关于探测中心频率对称。图 3(b), (c) 和 (d) 分别表示耦合场频率失谐量为 $\delta_c = 0.5, 1.0$ 和 1.5 的情况,系统中原来就有的两个 EIT 的频率位置分别比耦合场共振时右移了 $0.5, 1.0$ 和 1.5 ,而且在图 3(c) 和 (d) 中都出现了新的 EIT,分别位于 $\delta_{41} = 1.0$ 和 1.5 处;三个强吸收峰的频率位置依然保持不变,只是外侧两个边峰的吸收强度发生了变化。

图 3(a) 中出现了两个 EIT;图 3(b) 中,左侧 EIT 的吸收特性变化为介于 EIT 和 EIA 之间的一种非线性现象,而右侧 EIT 的吸收特性仍为 EIT;图 3(c) 中,最左侧 EIT 的吸收特性变化为 EIA,最右侧 EIT 的吸收特性仍为 EIT,同时在 $\delta_{41} = 1.0$ 处新出现了一个吸收特性介于 EIT 和 EIA 之间的非线性信号;图 3(d) 中,最左侧 EIT 的吸收特性又变化为介于 EIT 和 EIA 之间的一种非线性现象,而最右侧 EIT 的吸收特性仍为 EIT,同时在图 3(c) 中新出现的非线性信号移动至 $\delta_{41} = 1.5$ 处。比较图 2, 3 可以发现,当射频场的拉比频率比较小时,随着耦合场的频率失谐量增大,系统出现了从 EIT 向 EIA 最后又向 EIT 的过渡,同时也更容易促使生成新的 EIT 或 EIA。

图 4 给出了两个射频场的拉比频率为 $\Omega_{r1} = \Omega_{r2} = 4$ 时,探测吸收曲线随耦合场频率失谐量增大的变化规律。图 4(a) 为耦合场频率失谐量为零的情况,在 $\delta_{41} = \pm 4$ 处出现了 EIT,并与三个强吸收峰中的外侧两个边峰叠加在一起。图 4(b), (c) 和 (d) 分别表示耦合场频率失谐量为 $\delta_c = 0.5, 1.0$ 和 1.5 的情况,两个 EIT 的频率位置分别比耦合场共振时右移了 $0.5, 1.0$ 和 1.5 ,而且所有曲线上都没有出现新的 EIT。

再来看一下四条曲线中非线性特性的变化,

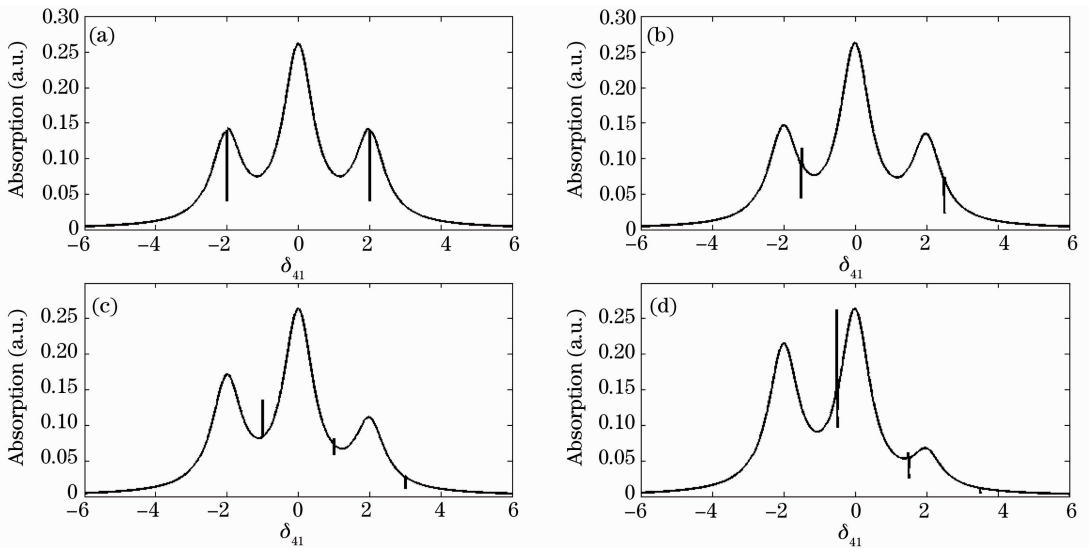


图 3 闭合 Λ 型四能级系统在两个射频场均共振 ($\Omega_{rf1} = \Omega_{rf2} = 2$), 且耦合场的频率失谐量分别取 (a) $\delta_c = 0$, (b) $\delta_c = 0.5$, (c) $\delta_c = 1.0$ 和 (d) $\delta_c = 1.5$ 时的探测吸收曲线

Fig. 3 A closed-lambda four-level system with two rf fields resonant ($\Omega_{rf1} = \Omega_{rf2} = 2$) and the detunings of coupling field equal to (a) $\delta_c = 0$, (b) $\delta_c = 0.5$, (c) $\delta_c = 1.0$ and (d) $\delta_c = 1.5$ respectively

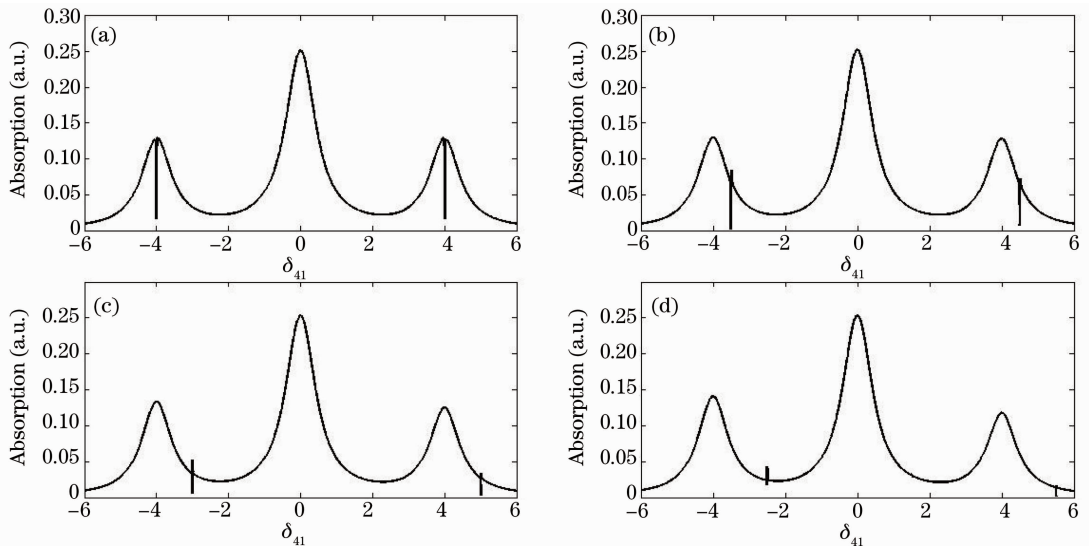


图 4 闭合 Λ 型四能级系统在两个射频场均共振 ($\Omega_{rf1} = \Omega_{rf2} = 4$), 且耦合场的频率失谐量分别取 (a) $\delta_c = 0$, (b) $\delta_c = 0.5$, (c) $\delta_c = 1.0$ 和 (d) $\delta_c = 1.5$ 时的探测吸收曲线

Fig. 4 A closed-lambda four-level system with two rf fields resonant ($\Omega_{rf1} = \Omega_{rf2} = 4$) and the detunings of coupling field equal to (a) $\delta_c = 0$, (b) $\delta_c = 0.5$, (c) $\delta_c = 1.0$ and (d) $\delta_c = 1.5$ respectively

分析四条曲线中非线性特性的变化, 图 4(a) 中出现了两个 EIT; 图 4(b), (c) 和 (d) 中, 左侧 EIT 的吸收特性变化为介于 EIT 和 EIA 之间的一种非线性现象, 右侧 EIT 的吸收特性仍为 EIT, 而且曲线中没有再出现新的关于 EIT 或 EIA 的非线性信号。比较图 2 和 4 可以发现, 当射频场的拉比频率比较大时, 随着耦合场的频率失谐量增大, 系统出现了从 EIT 向 EIA 的过渡, 但是很难再生成新的 EIT 或 EIA。

通过分析射频场的拉比频率取不同值时耦合场失谐对系统的影响规律, 可以得到如下结论: 探测吸收曲线中 EIT 的频率位置和非线性特性与射频场的拉比频率和耦合场的频率失谐量均相关。在讨论耦合场失谐对系统的影响规律时, 必须考虑射频场拉比频率的取值大小。当耦合场的频率失谐量为零时, 系统中只能出现两个 EIT, 它们的频率位置与射频场拉比频率的取值相对应; 当射频场的拉比频率保持不变时, 原来出现的两个 EIT 的频率位置随着

耦合场的频率失谐量增大逐渐右移,同时其非线性特性也逐渐发生变化,而且系统中还有可能出现新的 EIT 或 EIA;而当耦合场的频率失谐量取值一定时,射频场的拉比频率取值不同,系统呈现不同的非线性特性,射频场的拉比频率越小,系统越容易出现新的而且更复杂的 EIT 或 EIA 特性。关于这点,将通过后面的缀饰态理论给出解释。

3.3 缀饰态解释

在系统中,相对于 $|1\rangle\leftrightarrow|2\rangle$ 和 $|3\rangle\leftrightarrow|4\rangle$ 能级之间的跃迁线宽而言,两个射频场均可视为强场,它们产生的动态 Stark 劈裂效应使对应的原子能级各自劈裂为两条缀饰态能级。两个射频场均共振, $|1+\rangle$ 和 $|1-\rangle$ 、 $|2+\rangle$ 和 $|2-\rangle$ 分别关于原子能级 $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ 对称分布,其缀饰态能级间距等于 Ω_{r1} , $|3+\rangle$ 和 $|3-\rangle$ 、 $|4+\rangle$ 和 $|4-\rangle$ 分别关于原子能级 $|3\rangle$ 、 $|4\rangle$ 对称分布,其缀饰态能级间距等于 Ω_{r2} ,且 $\Omega_{r1}=\Omega_{r2}$ 。通过扫描 $|1\rangle\leftrightarrow|4\rangle$ 跃迁获得探测吸收谱,故 $|4+\rangle$ 、 $|4-\rangle$ 与 $|1+\rangle$ 、 $|1-\rangle$ 之间的跃迁使探测吸收曲线上出现了三个线宽接近于自然线宽的强吸收峰,分别位于探测场的频率失谐量 $\delta_{41}=\pm\Omega_{r1}=\pm\Omega_{r2}$ 和 $\delta_{41}=0$ 处。

耦合场失谐对闭合 Λ 型四能级系统中 EIA 和 EIT 的形成及转化过程的影响规律也可以通过缀饰态理论给出解释。在图 3 中,两个射频场的拉比频率为 $\Omega_{r1}=\Omega_{r2}=2$,此时耦合场失谐对系统产生了最明显而且最复杂的影响,因此在下面的缀饰态理论分析中,重点对图 3 中 EIA 和 EIT 的变化规律进行解释。

先来看一下耦合场共振时的缀饰态跃迁情况,如图 1(b)所示。图 3(a)中曲线显示耦合场共振时只出现了两个 EIT,而且它们的频率位置与射频场拉比频率的取值相对应。这是因为 $\Omega_{r1}=\Omega_{r2}=2$, $|4+\rangle$ 和 $|4-\rangle$ 、 $|1+\rangle$ 和 $|1-\rangle$ 、 $|2+\rangle$ 和 $|2-\rangle$ 之间能级间距均等于 2。耦合场与 $|2\rangle\leftrightarrow|3\rangle$ 能级共振,两个射频场也均共振,原子在这三个激光场的作用下形成了两条跃迁路径,一条是从 $|2+\rangle$ 到 $|4+\rangle$ 再到 $|1-\rangle$,另一条是从 $|2-\rangle$ 到 $|4-\rangle$ 再到 $|1+\rangle$,这两条跃迁路径互不相干,分别构成 Λ 型三能级系统,在 $\delta_{41}=\pm 2$ 处形成 EIT。从原理上看,似乎还存在另两条跃迁路径,即从 $|2+\rangle$ 到 $|4+\rangle$ 再到 $|1+\rangle$ 和从 $|2-\rangle$ 到 $|4-\rangle$ 再到 $|1-\rangle$,但由于耦合场和两个射频场均共振时,缀饰态上粒子分布具有高度对称性,导致后两条跃迁路径被禁止。

耦合场频率失谐量为 $\delta_c=1.0$ 时的缀饰态跃迁

情况如图 1(c)所示。图 3(c)中曲线显示左侧 EIT 的频率位置右移了 1.0,其吸收特性变化为 EIA,而右侧 EIT 也右移了 1.0,其吸收特性仍为 EIT。此时,耦合场与 $|2\rangle\leftrightarrow|3\rangle$ 能级不共振,图 1(c)中的两条跃迁路径相比图 1(b)发生了一些偏移,分别是 $|2+\rangle$ 到上虚能级再到 $|1-\rangle$ 和从 $|2-\rangle$ 到下虚能级再到 $|1+\rangle$ 。由于耦合场的激发频率比 $|2\rangle\leftrightarrow|3\rangle$ 之间的跃迁频率大 1.0,而 $|4+\rangle$ 和 $|4-\rangle$ 之间的能级间距等于 2,因此下虚能级正好就是 $|4+\rangle$ 和 $|4-\rangle$ 之间的中间能级。根据准 Λ 型四能级系统中得出的结论^[17],在这样的跃迁路径中包含着 $|4+\rangle$ 和 $|4-\rangle$ 对虚能级的影响,相当于两个 Λ 型三能级系统的合成。下虚能级正好是 $|4+\rangle$ 和 $|4-\rangle$ 之间的中间能级,在从 $|2-\rangle$ 到下虚能级再到 $|1+\rangle$ 的原子跃迁中,被合成的两个 Λ 型三能级系统相对于激光场具有大小相同的调谐频率而符号相反,它们之间形成量子相干,在 $\delta_{41}=-1$ 处感应形成 EIA。而上虚能级由于距离 $|4+\rangle$ 较近和距离 $|4-\rangle$ 非常远,它基本上只受到 $|4+\rangle$ 的影响,所以从 $|2+\rangle$ 到上虚能级再到 $|1-\rangle$ 的原子跃迁在 $\delta_{41}=3$ 处仍然形成 EIT。同时,由于缀饰态上粒子分布的对称性被破坏,另两条跃迁路径,即从 $|2+\rangle$ 到上虚能级再到 $|1+\rangle$ 和从 $|2-\rangle$ 到下虚能级再到 $|1-\rangle$ 不再被禁止,在 $|4+\rangle$ 和 $|4-\rangle$ 的不对称影响下, $\delta_{41}=1$ 处形成吸收特性介于 EIT 和 EIA 之间的非线性现象。

耦合场频率失谐量 $\delta_c=0.5$ 时的缀饰态跃迁情况如图 1(d)所示。图 3(b)中曲线显示左侧 EIT 的频率位置右移了 0.5,其吸收特性变化为介于 EIT 和 EIA 之间的一种非线性现象,而右侧 EIT 也右移了 0.5,其吸收特性仍为 EIT。这是由于耦合场的激发频率比 $|2\rangle\leftrightarrow|3\rangle$ 之间的跃迁频率大 0.5,而 $|4+\rangle$ 和 $|4-\rangle$ 之间的能级间距等于 2,因此下虚能级比 $|4+\rangle$ 和 $|4-\rangle$ 之间的中间能级低,它距离 $|4+\rangle$ 较远而距离 $|4-\rangle$ 较近, $|4+\rangle$ 和 $|4-\rangle$ 的不对称影响使从 $|2-\rangle$ 到下虚能级再到 $|1+\rangle$ 的原子跃迁在 $\delta_{41}=-1.5$ 处形成吸收特性介于 EIT 和 EIA 之间的非线性现象;而上虚能级基本上只受到 $|4+\rangle$ 的影响,所以从 $|2+\rangle$ 到上虚能级再到 $|1-\rangle$ 的原子跃迁在 $\delta_{41}=2.5$ 处仍然形成 EIT。同时,从 $|2+\rangle$ 到上虚能级再到 $|1+\rangle$ 和从 $|2-\rangle$ 到下虚能级再到 $|1-\rangle$ 的原子跃迁不再被禁止,但由于缀饰态上粒子数分布较耦合场共振时变化不大,使应该在 $\delta_{41}=0.5$ 处出现的吸收特性介于 EIT 和 EIA 之间的非线性现象很难被发现。

耦合场频率失谐量 $\delta_c = 1.5$ 时的缀饰态跃迁情况如图 1(e) 所示。图 3(d) 中曲线显示左侧 EIT 的频率位置右移了 1.5, 其吸收特性变化为介于 EIT 和 EIA 之间的一种非线性现象, 而右侧 EIT 也右移了 1.5, 其吸收特性仍为 EIT。这是由于耦合场的激发频率比 $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ 之间的跃迁频率大 1.5, 下虚能级比 $|4+\rangle$ 和 $|4-\rangle$ 之间的中间能级高, 它距离 $|4+\rangle$ 较近而距离 $|4-\rangle$ 较远, $|4+\rangle$ 和 $|4-\rangle$ 的不对称影响使从 $|2-\rangle$ 到下虚能级再到 $|1+\rangle$ 的原子跃迁在 $\delta_{41} = -0.5$ 处形成吸收特性介于 EIT 和 EIA 之间的非线性现象; 而上虚能级基本上只受到 $|4+\rangle$ 的影响, 所以从 $|2+\rangle$ 到上虚能级再到 $|1-\rangle$ 的原子跃迁在 $\delta_{41} = 3.5$ 处仍然形成 EIT。同时, 从 $|2+\rangle$ 到上虚能级再到 $|1+\rangle$ 和从 $|2-\rangle$ 到下虚能级再到 $|1-\rangle$ 的原子跃迁不再被禁止, 在 $\delta_{41} = 1.5$ 处出现吸收特性介于 EIT 和 EIA 之间的非线性现象。

综上所述, 在闭合 Λ 型四能级系统中, 探测吸收曲线中 EIT 的频率位置和非线性特性与射频场的拉比频率和耦合场的频率失谐量均相关。当耦合场的频率失谐量为零时, 系统中只能出现两个 EIT, 它们的频率位置与射频场拉比频率的取值相对应。当射频场的拉比频率保持不变时, 如果耦合场的频率失谐量正好等于射频场拉比频率的一半, 则一个变为 EIA, 另一个仍为 EIT, 而且系统中还会出现新的吸收特性介于 EIT 和 EIA 之间的非线性现象; 如果耦合场的频率失谐量大于或小于射频场拉比频率的一半, 则一个变为吸收特性介于 EIT 和 EIA 之间的非线性现象, 另一个仍为 EIT。

4 结 论

对耦合场失谐对闭合 Λ 型四能级系统的影响规律进行了理论研究, 分析了 EIA 和 EIT 的产生条件以及相互转化过程, 并利用缀饰态理论给出了合理解释。研究表明, 通过改变耦合场的频率失谐量可以使系统 EIT 或 EIA 的非线性特性发生改变, 同时还可以控制它们的频率位置。该研究结果对 EIA 和 EIT 在量子计算和光信息存储等领域的应用研究具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 J. Ghosh, R. Ghosh, F. Goldfarb *et al.*. Analysis of electromagnetically induced transparency and slow light in a hot vapor of atoms undergoing collisions[J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **80**(2): 023817
- 2 V. Yannopoulos, E. Paspalakis, N. V. Vitanov. Electromagnetically induced transparency and slow light in an array of metallic

- nanoparticles[J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **80**(3): 035104
- 3 W. Tang, B. Luo, Y. Liu *et al.*. A study of pulse shape in electromagnetically induced transparency based slow light[J]. *Phys. Lett. A*, 2010, **374**(21): 2183~2187
- 4 A. Martinez, J. G. Provost, G. Aubin *et al.*. Slow and fast light in quantum dot based semiconductor optical amplifiers[J]. *C. R. Physique*, 2009, **10**(10): 1000~1007
- 5 U. Schnorrberger, J. D. Thompson, S. Trotzky *et al.*. Electromagnetically induced transparency and light storage in an atomic mott insulator[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103**(3): 033003
- 6 M. A. Antón, F. Carreño. Optical light storage in an ensemble of V-type atoms mediated by vacuum induced coherence[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(19): 3964~3976
- 7 D. Woods, T. J. Naughton. Optical computing[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2009, **215**(4): 1417~1430
- 8 M. A. Nielsen. Cluster-state quantum computation[J]. *Repts. on Math. Phys.*, 2006, **57**(1): 147~161
- 9 E. A. Wilson, N. B. Manson, C. Wei. Perturbing an electromagnetically induced transparency in a Λ system using a low-frequency driving field. II. Four-level system[J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **72**(6): 063814
- 10 E. A. Wilson, N. B. Manson, C. Wei *et al.*. Perturbing an electromagnetically induced transparency in a Λ system using a low-frequency driving field. I. Three-level system[J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **72**(6): 063813
- 11 L. Yang, L. Zhang, X. Li *et al.*. Autler-townes effect in a strongly driven electromagnetically induced transparency resonance[J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **72**(5): 053801
- 12 Gao Feng, Ye Chenguang, Wang Pengjun *et al.*. Experimental investigation of electromagnetically-induced-transparency-like effect in optical coupled-resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2565~2569
- 高峰, 叶晨光, 王鹏军等. 光学耦合腔中类电磁感应透明现象的实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2565~2569
- 13 H. Li, V. A. Sautenkov, Y. V. Rostovtsev *et al.*. Electromagnetically induced transparency controlled by a microwave field[J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **80**(2): 023820
- 14 A. A. Zhukov, S. A. Zibrov, G. V. Romanov *et al.*. Electromagnetically induced absorption in a bichromatic laser field[J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **80**(3): 033830
- 15 J. Zhang, J. Xu, G. Hernandez *et al.*. Polychromatic-field-induced transparency and absorption in a three-level Λ system[J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(4): 043810
- 16 G. Fu, X. Li, Z. Zhuang *et al.*. Electromagnetically induced absorption and transparency in an optical-rf two-photon coupling configuration[J]. *Phys. Lett. A*, 2008, **372**(2): 176~180
- 17 Zhang Lianshui, Li Xiaoli, Wang Jian *et al.*. Electromagnetically induced absorption and electromagnetically induced transparency in an optical-radio two-photon coupling configuration[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(8): 4921~4926
- 张连水, 李晓莉, 王健等. 光学-射频双光子耦合作用下的电磁诱导透明和电磁诱导吸收[J]. *物理学报*, 2008, **57**(8): 4921~4926
- 18 X. Yang, S. Zhu. Collision-assisted electromagnetically induced control of coherent population transfer[J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **78**(2): 023818
- 19 J. Park, T. Yoon. Dressed states for a two-level atom driven by a trichromatic field[J]. *Phys. Lett. A*, 2002, **305**(6): 329~336
- 20 Li Xiaoli, Zhang Lianshui, Yang Baozhu *et al.*. Electromagnetically induced absorption and transparency in a closed lambda-shaped four-level system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(10): 7008~7014
- 李晓莉, 张连水, 杨宝柱等. 闭合 Λ 型 4 能级系统中的电磁诱导透明和电磁诱导吸收[J]. *物理学报*, 2010, **59**(10): 7008~7014