

文章编号: 1007-6654(2004)01-0014-06 *

四能级系统中的原子相干效应

杜英杰, 张俊香, 郜江瑞

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电所, 山西太原, 030006)

摘要: 讨论了 N 型四能级原子系统中的原子相干效应, 与三能级原子系统相比, 其原子相干效应既可导致电磁感应透明(EIT, Electromagnetically Induced Transparency)的产生, 也可产生电磁感应吸收(EIA, Electromagnetically Induced Absorption)现象, 取决于控制光的强度和第四个能级的衰变率的大小。

关键词: EIT; EIA; Rabi 频率; 能级的衰变率

中图分类号: O431 文献标识码: A

光与原子相互作用有着丰富的物理内容。众所周知, 激光的实现就是光与物质在腔内相互作用的结果。原子相干效应是光与原子相互作用的一种重要物理现象, 近年来备受关注。它在原子冷却^[1]、测磁学^[2]、增强原子色散^[3]、原子量子态的相干布居传输^[4]、光速减慢及增强^[5,6]、原子纠缠态的产生以及量子开关^[7,8]等方面有重要的应用价值。近年来许多人在原子相干效应方面做了许多有价值的工作, 例如用两束强度相同的光与三能级原子耦合, 导致原子上能级变为暗态的现象, 即相干布居数俘获(Coherent Population Trapping)^[9]。一束弱光与另一束强光同时与三能级原子耦合引起光吸收减弱即电磁感应透明(EIT), 同时导致光群速度的减慢^[5]等现象以及简并二能级系统中简并态相干产生 EIA 效应^[10]。光与原子相干相互作用可以极大的改变介质的非线性系数, 从而影响光的群速度, 如超光速^[11]。

二十世纪九十年代初, S. E. Harris 等人首次实验了由原子的量子相干效应导致电磁感应透明

(EIT) 现象^[12]。自 EIT 效应发现以来, 人们在此基础上做了很多有意义的工作^[13,14]。1995 年, Xiao Min 等人利用 M-Z 干涉仪观察到了 EIT 增强介质的色散效应^[13], 这就是 EIT 导致介质的 Kerr 非线性系数很大增强, 从而导致介质折射率的极大改变, 因而在 EIT 介质里实现了光开关^[15]。1999 年, Hau 等人在超冷原子介质将光速减低至 17 m/s, 并控制耦合光通断实现了光脉冲的存储与释放^[16~18]。

随着对原子相干效应认识的不断深入, 探索更多更有应用前景的相干效应成为该领域研究的焦点。如研究多能级原子系统中的原子相干效应。从而发现在不同条件的简并二能级系统中, 可以产生 EIT 或 EIA。对四能级原子系统 EIT 的研究通过利用开启控制光产生 EIA 而实现了光开关的尝试^[8,19]。本文是在 N 型四能级原子系统上, 讨论了在利用 EIA 效应实现光开关时, 其控制光与能级衰变率对 EIA 效应的影响, 从而分析了实现光开关的有效性。

* 收稿日期: 2004-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 60278010)

作者简介: 杜英杰(1976-)男, 山西万荣人, 山西大学光电研究所硕士研究生, 从事量子光学、激光技术方面的研究。

1 理论模型

N 型四能级原子系统如图 1 所示,其中 $|a\rangle$, $|c\rangle$ 是低能态; $|b\rangle$, $|d\rangle$ 是高能态,设有三种频率分别为 ν_1, ν_2, ν_3 的线偏光,分别称为探针光、耦合光和控制光,分别与 N 型四能级原子系统的 $|a\rangle \leftrightarrow |b\rangle$, $|b\rangle \leftrightarrow |c\rangle$, $|c\rangle \leftrightarrow |d\rangle$ 能级耦合。从光强来看,探针光较弱,耦合光和控制光较强且相若。下面我们借助半经典理论对此模型进行分析。

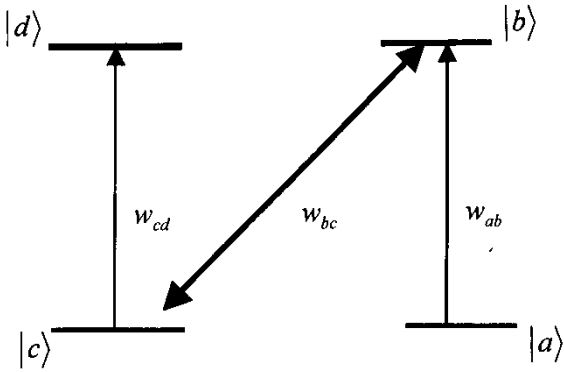


图 1 四能级原子结构

在半经典的理论近似下,与原子相互作用的三束光作为经典场处理。其分别表示为:

$$E(\mathbf{r}, t) = E_1 \exp[-i\nu_1 t + i(\mathbf{k}_1 * \mathbf{r})] + E_2 \exp[-i\nu_2 t + i(\mathbf{k}_2 * \mathbf{r})] + E_3 \exp[-i\nu_3 t + i(\mathbf{k}_3 * \mathbf{r})] + c.c \quad (1)$$

四能级原子与三模光场作用的总哈密顿算符如下:

$$H = H_0 + H_I \quad (2)$$

这里 H_0, H_I 分别代表无微扰的哈密顿算符和相互作用哈密顿算符,在旋波近似和偶极近似的条件下,同时遵照 N 型四能级原子系统跃迁规律,它们分别被表达如下:

$$H_0 = \hbar w_a |a\rangle \langle a| + \hbar w_b |b\rangle \langle b| + \hbar w_c |c\rangle \langle c| + \hbar w_d |d\rangle \langle d| \quad (3)$$

$$H_I = -exE(t) = -\frac{1}{2} [\hbar \Omega_{ab} e^{-i\Phi_1} e^{-i\nu_1 t} + \hbar \Omega_{bc} e^{-i\Phi_2} e^{-i\nu_2 t} + \hbar \Omega_{cd} e^{-i\Phi_3} e^{-i\nu_3 t}] + H.c \quad (4)$$

$\Omega_{ab}, \Omega_{bc}, \Omega_{cd}$ 分别为电子在能级 $|a\rangle \leftrightarrow |b\rangle, |b\rangle \leftrightarrow |c\rangle, |c\rangle \leftrightarrow |d\rangle$ 间跃迁的 Rabi 频率 ($\Omega_{ij} = e \langle i | x | j \rangle E \exp(-i\Phi)/\hbar, i, j = a, b, c, d$) 其中 $e \langle i | x | j \rangle$ 为偶极算符。显然 Rabi 频率与入射光强度成正比。在考虑电子在各能级间衰变率的情况下,原子的密度矩阵运动方程定义如下:

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar} [H, \rho] - \frac{1}{2} \{\Gamma, \rho\} \quad (5)$$

由此可得密度矩阵元方程,

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{ba} = & -(i w_{ba} + \gamma_{ba}) \rho_{ba} \\ & - \frac{i}{2} \Omega_{ba} \exp(-i\phi_1) \exp(-i\nu_1) (\rho_{bb} - \rho_{aa}) \\ & + \frac{i}{2} \Omega_{bc} \exp(-i\phi_2) \exp(-i\nu_2) \rho_{cd} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{ca} = & -(i w_{ca} + \gamma_{ca}) \rho_{ca} \\ & - \frac{i}{2} \Omega_{ba} \exp(-i\phi_1) \exp(-i\nu_1) \rho_{cb} \\ & + \frac{i}{2} \Omega_{bc}^* \exp(i\phi_2) \exp(i\nu_2) \rho_{ba} \\ & + \frac{i}{2} \Omega_{cd} \exp(-i\phi_3) \exp(-i\nu_3) \rho_{da} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{da} = & -(i w_{da} + \gamma_{da}) \rho_{da} \\ & - \frac{i}{2} \Omega_{ba} \exp(-i\phi_1) \exp(-i\nu_1) \rho_{db} \\ & + \frac{i}{2} \Omega_{cd}^* \exp(i\phi_3) \exp(i\nu_3) \rho_{ca} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{db} = & -(i w_{db} + \gamma_{db}) \rho_{db} \\ & - \frac{i}{2} \Omega_{ba}^* \exp(i\phi_1) \exp(i\nu_1) \rho_{da} \\ & + \frac{i}{2} \Omega_{cd}^* \exp(i\phi_3) \exp(i\nu_3) \rho_{cd} \\ & - \frac{i}{2} \Omega_{bc}^* \exp(i\phi_2) \exp(i\nu_2) \rho_{cb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{dc} = & -(i w_{dc} + \gamma_{dc}) \rho_{dc} \\ & - \frac{i}{2} \Omega_{cd}^* \exp(i\phi_3) \exp(i\nu_3) (\rho_{dd} - \rho_{cc}) \\ & - \frac{i}{2} \Omega_{bc} \exp(-i\phi_2) \exp(-i\nu_2) \rho_{db} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\gamma_{ij} = (\gamma_i + \gamma_j)/2, i, j = a, b, c, d$ 。假定原子初始处于基态 $|a\rangle$, 且探针光相比耦合光和控制光较弱, 则有 $\rho_{aa}^{(0)} = 1, \rho_{bb}^{(0)} = \rho_{cc}^{(0)} = \rho_{ca}^{(0)} = \rho_{dd}^{(0)} =$

0。同时在慢变近似下密度矩阵元简化为以下形式：

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\rho}}_{ba} &= -(i\Delta + \gamma_{ba})\tilde{\rho}_{ba} + \frac{i}{2}\Omega_{ba}\exp(-i\phi_1) \\ &\quad + \frac{i}{2}\Omega_{bc}\exp(-i\phi_2)\tilde{\rho}_{ca} \\ \dot{\tilde{\rho}}_{ca} &= -(i\Delta + \gamma_{ca})\tilde{\rho}_{ca} + \frac{i}{2}\Omega_{bc}^*\exp(i\phi_2)\tilde{\rho}_{ba} \\ &\quad + \frac{i}{2}\Omega_{cd}\exp(-i\phi_3)\tilde{\rho}_{da} \\ \dot{\tilde{\rho}}_{da} &= -(i\Delta + \gamma_{da})\tilde{\rho}_{da} - \frac{i}{2}\Omega_{ba}\exp(i\phi_1)\tilde{\rho}_{db} \\ &\quad + \frac{i}{2}\Omega_{cd}^*\exp(i\phi_3)\tilde{\rho}_{ca} \\ \dot{\tilde{\rho}}_{db} &= -(i\Delta + \gamma_{db})\tilde{\rho}_{db} - \frac{i}{2}\Omega_{ba}^*\exp(i\phi_1)\tilde{\rho}_{da} \\ &\quad - \frac{i}{2}\Omega_{bc}^*\exp(i\phi_2)\tilde{\rho}_{dc} \\ \dot{\tilde{\rho}}_{dc} &= -(i\Delta + \gamma_{dc})\tilde{\rho}_{dc} - \frac{i}{2}\Omega_{bc}\exp(-i\phi_2)\tilde{\rho}_{db} \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\Delta = \omega_{ab} - \nu_1$ 为探针光的频率失谐，因为耦合光锁定在能级 $|b\rangle \leftrightarrow |c\rangle$ 上，所以我们认为 $\omega_{bc} = \nu_2$ 。上述由五个一阶微分方程组成的一阶线性微分方程组可以写成微分方程的矩阵形式

$$\dot{R} = -MR + E \quad (8)$$

M, R, E 矩阵元分别如下：

$$M = \begin{bmatrix} I_1 & I_2 & 0 & 0 & 0 \\ J_1 & J_2 & J_3 & 0 & 0 \\ 0 & K_1 & K_2 & K_3 & 0 \\ 0 & 0 & L_1 & L_2 & L_2 \\ 0 & 0 & 0 & M_1 & M_2 \end{bmatrix},$$

$$R = [\tilde{\rho}_{ba} \quad \tilde{\rho}_{ca} \quad \tilde{\rho}_{da} \quad \tilde{\rho}_{db} \quad \tilde{\rho}_{dc}]^T,$$

$$E = \left[\frac{i}{2}\Omega_{ba}e^{-i\phi_1} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right]^T.$$

其中 $I_1 = \gamma_{ba} + i\Delta, \quad I_2 = -\frac{i}{2}\Omega_{bc}e^{-i\phi_2}$

$$J_1 = -\frac{i}{2}\Omega_{bc}^*e^{i\phi_2}, \quad J_2 = \gamma_{ca} + i\Delta,$$

$$J_3 = -\frac{i}{2}\Omega_{cd}e^{i\phi_3}$$

$$K_1 = -\frac{i}{2}\Omega_{cd}^*e^{i\phi_3}, \quad K_2 = \gamma_{da} + i\Delta,$$

$$K_3 = \frac{i}{2}\Omega_{ba}e^{-i\phi_1}$$

$$L_1 = \frac{i}{2}\Omega_{ba}^*e^{i\phi_1}, \quad L_2 = \gamma_{db} + i\Delta,$$

$$L_3 = \frac{i}{2}\Omega_{bc}^*e^{i\phi_2}$$

$$M_1 = \frac{i}{2}\Omega_{bc}e^{-i\phi_2}, \quad M_2 = \gamma_{dc} + i\Delta$$

对上述用矩阵表示的一阶微分方程求积^[20]，其稳态解表达如下 $R(t) = M^{-1}E$ (9)

由于 $\tilde{\rho}_{ba}$ 是与探针光耦合能级跃迁的密度矩阵元。其由于探针光产生的介质的复电极化率为 $\chi = 2N \langle \langle \rho_{ba} \rangle \rangle \exp(i\nu_1 + \phi_1) \mathcal{V}_{\epsilon_0} E_{ba}$ ， N 为原子数密度。 $\langle \langle \rho_{ba} \rangle \rangle = \langle a | \rho | b \rangle$ 为跃迁在 $|a\rangle, |b\rangle$ 之间电偶极子，最后得到关于复电极化率的表达式

$$\chi = \frac{N |\langle \rho_{ba} \rangle|^2}{\epsilon_0 \hbar} \cdot \frac{A + iB}{C + iD} \quad (10)$$

由于 $\chi = \chi' + i\chi''$ ， χ' ， χ'' 分别联系着介质的色散和介质对光的吸收。

$$\begin{aligned} \chi' &= \frac{N |\langle \rho_{ba} \rangle|^2}{\epsilon_0 \hbar} \cdot \frac{AC + BD}{C^2 + D^2} \\ \chi'' &= \frac{N |\langle \rho_{ba} \rangle|^2}{\epsilon_0 \hbar} \cdot \frac{BC - AD}{C^2 + D^2} \end{aligned} \quad (11)$$

这里 $A = -\Delta(\gamma_{ca} + \gamma_{da}) \mathfrak{X}(\gamma_{db}\gamma_{dc} - \Delta^2)$

$$- \Delta(\gamma_{db} + \gamma_{dc}) \mathfrak{X}(\gamma_{ca}\gamma_{da} - \Delta^2)$$

$$- \Delta(\gamma_{ca} + \gamma_{da}) \Omega_{bc}^2/4$$

$$- \Delta(\gamma_{ca} + \gamma_{dc}) |\Omega_{ba}|^2/4$$

$$- \Delta(\gamma_{db} + \gamma_{dc}) |\Omega_{cd}|^2/4$$

$$B = (\gamma_{db}\gamma_{dc} - \Delta^2) \mathfrak{X}(\gamma_{ca}\gamma_{da} - \Delta^2)$$

$$- \Delta^2(\gamma_{ca} + \gamma_{da}) \mathfrak{X}(\gamma_{db} + \gamma_{dc})$$

$$+ (\gamma_{ca}\gamma_{da} - \Delta^2) |\Omega_{bc}|^2/4$$

$$+ (\gamma_{ca}\gamma_{dc} - \Delta^2) |\Omega_{ba}|^2/4$$

$$+ (\gamma_{ca}\gamma_{dc} - \Delta^2) |\Omega_{cd}|^2/4$$

$$+ (|\Omega_{bc}|^2/4) \mathfrak{X}(|\Omega_{cd}|^2/4)$$

$$C = \gamma_{ba}[(\gamma_{db}\gamma_{dc} - \Delta^2) \mathfrak{X}(\gamma_{ca}\gamma_{da} - \Delta^2)$$

$$- \Delta^2(\gamma_{ca} + \gamma_{da}) \mathfrak{X}(\gamma_{db} + \gamma_{dc})]$$

$$- \Delta \mathfrak{X}(\gamma_{ca} + \gamma_{da}) \mathfrak{X}(\gamma_{db}\gamma_{dc} - \Delta^2)$$

$$\begin{aligned}
& + (\gamma_{ca}\gamma_{da} - \Delta^2 \chi (\gamma_{db} + \gamma_{dc}))\gamma_{dc}] \\
& + [(\gamma_{ba}\gamma_{ca} - \Delta^2)\gamma_{da} - \Delta^2(\gamma_{ba} + \gamma_{ca})] |\Omega_{bc}|^2/4 \\
& + [(\gamma_{ba}\gamma_{ca} - \Delta^2)\gamma_{dc} - \Delta^2(\gamma_{ba} + \gamma_{ca})] |\Omega_{ba}|^2/4 \\
& + [(\gamma_{ba}\gamma_{db} - \Delta^2)\gamma_{dc} - \Delta^2(\gamma_{ba} + \gamma_{db})] |\Omega_{cd}|^2/4 \\
& + [(\gamma_{da}\gamma_{db} - \Delta^2)\gamma_{dc} - \Delta^2(\gamma_{da} + \gamma_{db})] |\Omega_{bc}|^2/4 \\
& + (|\Omega_{bc}|^2/4 \chi |\Omega_{cd}|^2/4)\gamma_{ba} \\
& + (|\Omega_{bc}|^2/4 \chi |\Omega_{bc}|^2/4)\gamma_{da} \\
& + (|\Omega_{bc}|^2/4 \chi |\Omega_{ba}|^2/4)\gamma_{dc}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D = & \Delta[(\gamma_{db}\gamma_{dc} - \Delta^2 \chi (\gamma_{ca}\gamma_{da} - \Delta^2)) \\
& - \Delta^2(\gamma_{ca} + \gamma_{da}) \chi (\gamma_{db} + \gamma_{dc})] \\
& + \Delta\gamma_{ba}[(\gamma_{ca} + \gamma_{da}) \chi (\gamma_{db}\gamma_{dc} - \Delta^2) \\
& + (\gamma_{db}\gamma_{dc} - \Delta^2 \chi (\gamma_{ca} + \gamma_{da}))] \\
& + \Delta[(\gamma_{ba} + \gamma_{ca})\gamma_{da} + \gamma_{ba}\gamma_{ca} - \Delta^2 \chi |\Omega_{bc}|^2/4) \\
& + \Delta[(\gamma_{ba} + \gamma_{ca})\gamma_{dc} + \gamma_{ba}\gamma_{ca} - \Delta^2 \chi |\Omega_{ba}|^2/4) \\
& + \Delta[(\gamma_{ba} + \gamma_{db})\gamma_{dc} + \gamma_{ba}\gamma_{db} - \Delta^2 \chi |\Omega_{cd}|^2/4) \\
& + \Delta[(\gamma_{da} + \gamma_{db})\gamma_{dc} + \gamma_{da}\gamma_{db} - \Delta^2 \chi |\Omega_{bc}|^2/4) \\
& + (|\Omega_{bc}|^2/4 \chi |\Omega_{cd}|^2/4)\Delta \\
& + (|\Omega_{bc}|^2/4 \chi |\Omega_{bc}|^2/4)\Delta \\
& + (|\Omega_{bc}|^2/4 \chi |\Omega_{ba}|^2/4)\Delta
\end{aligned}$$

2 数值分析

通过理论推导我们得到介质对探针光的色散和介质对探针光的吸收的数学表达式(11),对介质的吸收和色散产生影响的因素有探针光与能级 $|a\rangle \leftrightarrow |b\rangle$ 的失谐量,各能级的衰变率 $\gamma_{ba}, \gamma_{ca}, \gamma_{da}, \gamma_{db}, \gamma_{dc}$ 和发生跃迁能级间电子振荡的 Rabi 频率 $\Omega_{ba}, \Omega_{bc}, \Omega_{cd}$ 。上述各个参量如何影响以及在多大程度上影响介质的吸收,可借助数值模拟得以分析。首先令 γ_{ba} 为一个基础单元,根据实际原子系统的参量近似,能级 $|b\rangle \leftrightarrow |c\rangle$ 与抽运光耦合,由于电子的 Rabi 频率与耦合光的强度成正比关系^[20],在此我们设定 $\Omega_{bc} = 2\gamma_{ba}$ 。通常探针光的强度相对耦合光很弱,一般为光强度的 1/50,所以我们设定 $\Omega_{ba} = 0.04\gamma_{ba}$ 。是电子在能级 $|a\rangle$ 和 $|c\rangle$ 上

的的衰减率之和,由于 $|a\rangle$ 和 $|c\rangle$ 都是基态,处于基态的电子衰变率相比很小,所以我们假定 $\gamma_{ca} = 0$ 。图 2 为在如下的参数情况下

$$\begin{aligned}
\gamma_{ba} = 1, \gamma_{ca} = 0, \gamma_{da} = \gamma_{dc}, \gamma_{db} = \gamma_{ba} + \gamma_{da}, \\
\Omega_{bc} = 2\gamma_{ba}, \Omega_{ba} = 0.04\gamma_{ba},
\end{aligned}$$

原子的吸收随探针光失谐及衰变率 γ_{cd} 的三维变化曲线。图 2(a),(b),(c),(d)分别对应于 $\Omega_{cd} = 0$, $\Omega_{cd} = \gamma_{ba}$, $\Omega_{cd} = 2\gamma_{ba}$, $\Omega_{cd} = 3\gamma_{ba}$ 。

图 2(a)为 Rabi 频率 $\Omega_{cd} = 0$,表明控制光光强为零,亦即控制光不存在,这时 N 型四能级原子退化为 Λ 型三能级原子系统,因此无论 γ_{cd} 怎么变化它都是一个三能级的 EIT。(b)为电子跃迁在能级 $|a\rangle \leftrightarrow |b\rangle$ 间的 Rabi 频率在为 γ_{ba} 大小的时候,这时由于有控制光的存在但不够强,它的吸收还不小,但毕竟四能级系统已建立起来,但 EIT 的产生与 γ_{ba} 的大小密切相关。在 γ_{ba} 较大时出现如三能级的 EIT,但在 γ_{ba} 较小时在 EIT 的中心又出现吸收增强效应,即 EIA。(c)(d)分别为控制光 Rabi 频率逐渐增大时($2\gamma_{ba}$ 和 $3\gamma_{ba}$)时的吸收情况,显然控制光的增强导致 EIT 中心的再次出现吸收的效应得到增强。所以我们可以看出随着 Rabi 频率的增大四能级系统 EIT 在探针光失谐为 0 的地方吸收越来越强烈。

光开关就是基于 EIT 中 EIA 的现象,如图 2 中(a)所示,在探针光失谐为 0 的地方,三能级系统出现 EIT 现象,但介质的色散增强导致探针光在介质中光速减慢。因而实现光在介质中的存储。当打开控制光时,N 型四能级 EIT 系统中吸收又得到恢复。减慢的光速又开始增强。因而使在介质中的存储光得以释放。这样我们开关控制光就实现了四能级之间 EIT 与 EIA 的转换,转换的结果就是光开关。

图 3 为在 $\Omega_{cd} = 2\gamma_{ba}$ 介质对探针光吸收随变量 γ_{ba} 和探针光 Δ 变化的等高线图。通过等高线我们发现,在 γ_{cd} 介于 0 与 $0.5\gamma_{ba}$ 之间都会有四能级 EIA 出现,在 γ_{cd} 为 0 的地方最为强烈,理想情况取 $\gamma_{cd} = 0$,但实际的原子能态总是有衰变的。我们可以选取衰变较小的能态来满足光开关效应。综上所述,

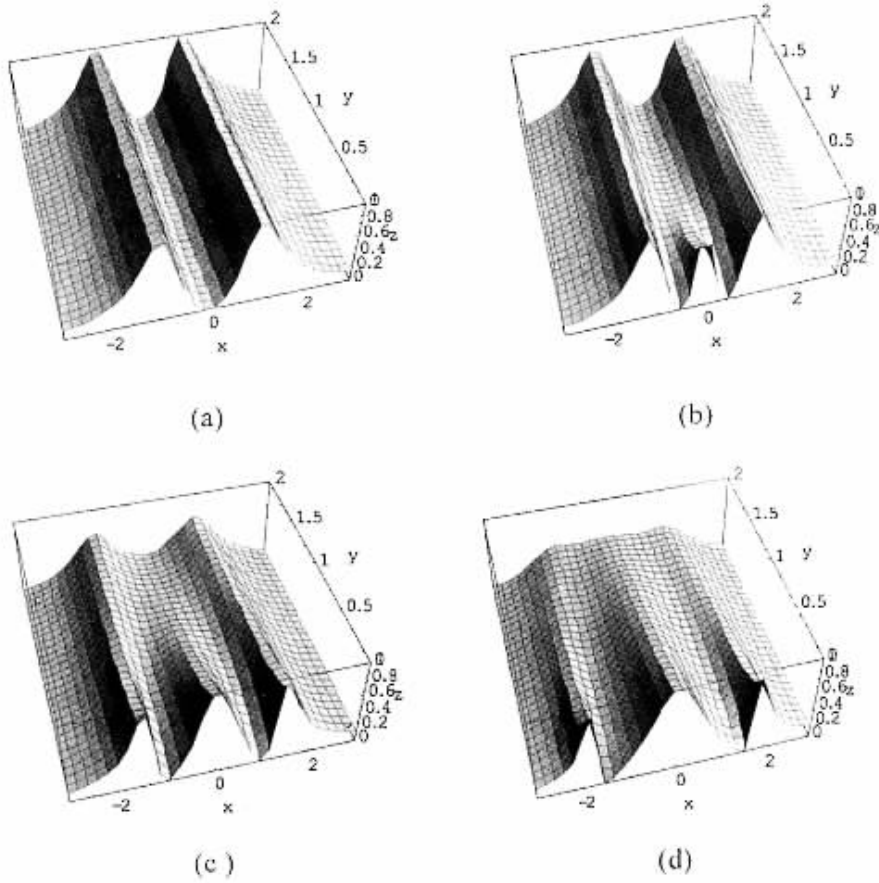


图 2 原子吸收随探针光失谐和衰变率 γ_{cd} 的变化((a)~(d))

在四能级原子系统中,利用控制光实现光开关时,其控制光的强度以及较小的高能级衰变率对开关效应非常重要。

3 结论

本文用数值模拟对四能级系统中原子相干效应产生 EIT 和 EIA 现象进行了分析,当我们把探针光、耦合光和控制光锁定在 N 型四能级原子系统上时,N 型四能级系统中的控制光的开启实现光开关。证明了控制光的强度以及高能级衰变率对光开关的影响。

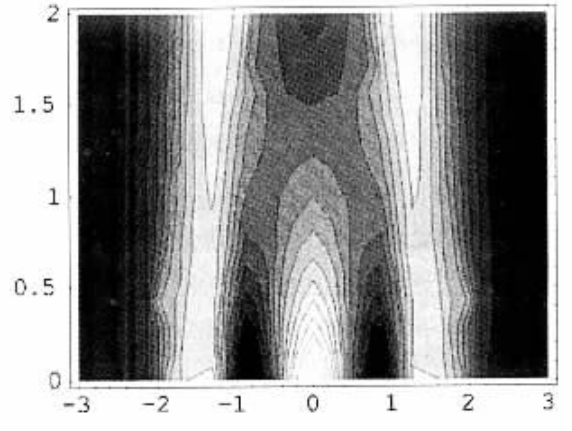


图 3 探针光吸收的等高线图

参考文献:

[1] ASPECT A, ARIMONDO E, KAISER R, *et al.* Laser Cooling below the One-Photon Recoil Energy by Velocity-Selective Coherent Population Trapping[J]. *Phys Rev Lett*, 1988, **61**:826.

[2] NAGEL LI, NAGEL A, GRAF LI, NAUMOV A, *et al.* Experimental realization of coherent dark-state magnetometers [J]. *Europhys Lett*, 1998, **44**:31.

[3] HARRIS S E, FIELD J E, KASAPI A. Dispersive properties of electromagnetically induced transparency [J]. *Phys Rev A*,

- 1992, **46** : R29.
- [4] BERGMANN K , THEUR H , SHORE B W. Coherent population transfer among quantum states of atoms and molecules[J]. *Rev Mod Phys* , 1998 , **70** : 1003.
- [5] HAU L V , HARRIS S E , DUTTON Z , *et al.* Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas[J]. *Nature(London)* , 1999 , **397** : 594.
- [6] 郭瑞民 , 肖峰 , 刘成 , 等. Dependence of electromagnetically induced transparency on laser linewidth[J]. *中国物理快报* , 2003 , **20(8)** : 1507.
- [7] HALD J , SORENSEN J L , SCHORI C , *et al.* Spin squeezed atoms : a macroscopic entangled ensemble created by light[J]. *Phys Rev Lett* , 1999 , **83** : 1319.
- [8] BRAJE DANIELLE A , VLATKO BALIC , YIN G Y , *et al.* Low - light - level nonlinear optics with slow light[J]. *Quant - ph* , 2003.
- [9] WHITLEY R M , STROUD R , JR. Double optical resonance[J]. *Phys Rev A* , 1976 , **14** : 1498.
- [10] VALENTE P , FAILACHE H , LEZAMA A. Temporal buildup of electromagnetically induced transparency and absorption resonances in degenerate two - level transitions[J]. *Phys Rev A* , 2003 **67** : 013806.
- [11] WANG L J , KUZMICH A , DOGARIU A. German librarians cautious of brave new digital world[J]. *Nature(London)* , 2000 , **406** : 277.
- [12] HARRIS S E , FIELD J E , IMAMOGLU A. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency[J]. *Phys Rev Lett* , 1990 **64** : 1107.
- [13] XU Xinye , WANG Yuzhu , WONHO JHE. theory of atom guidance in a hollow laser beam : dressed - atom approach[J]. *J Opt Soc Am* , 2000 , **B17** : 1039.
- [14] 扬苏辉 , 国秀珍 , 王冬 , 等. 电磁感应双光子光透明及共振吸收增强[J]. *光学学报* , 2000 **20(3)** : 309.
- [15] XIAO M , LI Y , JIN S , *et al.* Measurement of dispersive properties of Electromagnetically induced transparency in rubidium atoms[J]. *Phys Rev Lett* , 1995 , **74** : 666.
- [16] XIAO Min , WANG Hai , David Goorskey. Light Controlling Light[M]. September 2002 Optics & Photonics News.
- [17] LIU C , DUTTON Z , BEHROOZJ C H , *et al.* Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses[J]. *Nature(London)* , 2001 **409** : 490.
- [18] PHILIPS D F , FLEISCHHAUER A , MAIR A , *et al.* Storage of light in atomic vapor[J]. *Phys Rev Lett* , 2001 , **86** : 783.
- [19] HARRIS S E , YAMAMOTO Y. Photon switching by quantum interference[J]. *Phys Rev Lett* , 1998 , **81** : 3611.
- [20] SCULLY MARLAN O , SUHAIL ZUBAIRY M. Quantum Optics[M]. United Kingdom : Cambridge University Press , 1997. 152.

Atomic Coherence Effects in Four - level System

DU Yingjie , ZHANG Junxiang , GAO Jiangrui

(*The State Key laboratory of quantum optics and Quantum Optics Devices , Institute of Opto - electronics , Shanxi University , taiyuan 030006 , P. R. China*)

Abstract : Atomic coherence effects in four - level N - type atomic system are discussed. Compared with three - level atomic system , the atomic coherence effects in four - level system can lead to EIT (Electromagnetically Induced Transparency) and EIA (Electromagnetically Induced Absorption) , which are dependent on the intensity of control light and the relaxation of the fourth level.

Key words : EIT ; EIA ; Rabi frequency ; level relaxation

四能级系统中的原子相干效应

作者: 杜英杰, 张俊香, 郜江瑞
作者单位: 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电所, 山西, 太原, 030006
刊名: 量子光学学报 **ISTIC** **PKU**
英文刊名: ACTA SINICA QUANTUM OPTICA
年, 卷(期): 2004, 10(1)
被引用次数: 5次

参考文献(20条)

1. Aspect A;ARIMONDO E;KAISER R Laser Cooling below the One-Photon Recoil Energy by Velocity-Selective Coherent Population Trapping 1988
2. NAGEL LI;NAGEL A;GRAF LI Experimental realization of coherent dark-state magnetometers[外文期刊] 1998
3. Harris S E;FIELD J E;KASAPI A Dispersive properties of electromagnetically induced transparency[外文期刊] 1992
4. Bergmann K;THEUR H;SHORE B W Coherent population transfer among quantum states of atoms and molecules[外文期刊] 1998(3)
5. HAU L V;HARRIS S E;DUTTON Z Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas [外文期刊] 1999
6. 郭瑞民;肖峰;刘成 Dependence of electromagnetically induced transparency on laser linewidth[外文期刊] 2003(08)
7. Hald J;SORENSEN J L;SCHORI C Spin squeezed atoms: a macroscopic entangled ensemble created by light[外文期刊] 1999(7)
8. BRAJE DANIELLE A;VLATKO BALIC;YIN G Y Low-light-level nonlinear optics with slow light 2003
9. WHITLEY R M;STROUD R, JR Double optical resonance 1976
10. Valente P;FAILACHE H;LEZAMA A Temporal buildup of electromagnetically induced transparency and absorption resonances in degenerate two-level transitions[外文期刊] 2003
11. Wang L J;KUZMICH A;DOGARIU A German librarians cautious of brave new digital world 2000
12. Harris S E;FIELD J E;IMAMOGLU A Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency 1990
13. XU Xinye;WANG Yuzhu;WONHO JHE theory of atom guidance in a hollow laser beam: dressed-atom approach 2000
14. 扬苏辉;国秀珍;王冬 电磁感应双光子光透明及共振吸收增强[期刊论文]-光学学报 2000(03)
15. Xiao M;LI Y;Jin S Measurement of dispersive properties of Electromagnetically induced transparency in rubidium atoms 1995
16. XIAO Min;WANG Hai;David Goorskey Light Controlling Light
17. Liu C;DUTTON Z;BEHROOZJ C H Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses[外文期刊] 2001
18. PHILIPS D F;FLEISCHHAUER A;MAIR A Storage of light in atomic vapor[外文期刊] 2001
19. Harris S E;YAMAMOTO Y Photon switching by quantum interference[外文期刊] 1998
20. SCULLY MARLAN O;SUHAIL ZUBAIRY M Quantum Optics 1997

本文读者也读过(10条)

1. [汪丽蓉, 肖连团, 赵建明, 贾锁堂](#) 驱动场失谐对 Λ 型原子EIT的影响[期刊论文]-[量子光学学报](#)2001, 7(4)
2. [李转, 许永晗, LI Zhuan, XU Yong-han](#) 双- Λ 型四能级原子系统中的EIT效应[期刊论文]-[山西大学学报\(自然科学版\)](#) 2009, 32(1)
3. [The electromagnetically induced transparency in the Y-type four-level atom system at low light levels](#)[期刊论文]-[中国科学G辑\(英文版\)](#) 2005, 48(5)
4. [沈云, 王海](#) 四能级原子系统中量子相干增强的Kerr非线性效应的研究[期刊论文]-[量子光学学报](#)2004, 10(3)
5. [翟淑琴, 杨荣国, 刘奎, 郜江瑞, 张俊香, ZHAI Shu-qin, YANG Rong-guo, LIU Kui, GAO Jiang-rui, ZHANG Jun-xiang](#) 孪生光束时域内的关联特性[期刊论文]-[量子光学学报](#)2009, 15(3)
6. [张春红, 杨旭东, 李淑静, 王海, ZHANG Chun-hong, YANG Xu-dong, LI Shu-jing, WANG Hai](#) 原子消相干对四能级EIT系统中非线性效应的影响[期刊论文]-[量子光学学报](#)2009, 15(2)
7. [杜英杰, 葛国库, Du Yingjie, Ge Guoku](#) N型四能级系统的原子吸收[期刊论文]-[光学学报](#)2008, 28(2)
8. [王海红, 董雅宾, 郜江瑞, 张俊香, WANG Hai-hong, DONG Ya-bin, GAO Jiang-rui, ZHANG Jun-xiang](#) 原子相干效应中的量子噪声特性研究[期刊论文]-[量子光学学报](#)2006, 12(1)
9. [杜英杰, 张俊香, DU Ying-jie, ZHANG Jun-xiang](#) 四能级原子相干系统的探讨[期刊论文]-[量子光学学报](#) 2006, 12(1)
10. [荆杰泰, 张俊香](#) 结合双模压缩真空态对EPR“佯谬”与量子力学几率波的统一性解释[期刊论文]-[量子光学学报](#) 2002, 8(2)

引证文献(5条)

1. [杜英杰, 张俊香](#) 四能级原子相干系统的探讨[期刊论文]-[量子光学学报](#) 2006(1)
2. [郑军, 刘正东, 曾福华](#) 倒Y型四能级原子系统的吸收和色散特性[期刊论文]-[南昌大学学报\(理科版\)](#) 2009(2)
3. [王丽, 宋海珍, 肖绍武](#) 激光场线宽对四能级原子系统相干效应的影响[期刊论文]-[光学学报](#) 2008(1)
4. [王丽, 杨兴强, 肖绍武](#) 激光场线宽对电磁诱导吸收效应的影响[期刊论文]-[量子光学学报](#) 2008(3)
5. [王丽, 宋海珍](#) 四能级原子系统中的电磁诱导吸收[期刊论文]-[物理学报](#) 2006(8)

引用本文格式: [杜英杰, 张俊香, 郜江瑞](#) 四能级系统中的原子相干效应[期刊论文]-[量子光学学报](#) 2004(1)