

文章编号: 1007-6654(2004)03-0125-06

四能级原子系统中量子相干增强的 Kerr 非线性效应的研究

沈云¹, 王海²

(1. 武汉大学物理科学与技术学院, 湖北 武汉, 430072; 2. 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: 应用密度矩阵方程计算了四能级原子系统中三阶非线性极化率随信号光和探针光频率失谐的变化关系。结果表明, 由于量子干涉对信号光强度的敏感性, 使四能级原子介质的交叉 Kerr 非线性作用大大增强, 与三能级系统相比, 四能级原子介质的 Kerr 非线性系数可增强两个数量级。

关键词: 量子相干效应; EIT; Kerr 非线性效应

中图分类号: O431 **文献标识码:** A

0 引言

光学介质的有效非线性效应是实现全光学通讯、量子通讯及量子信息处理的一个重要物理过程。特别是三阶 Kerr 非线性过程是实现全光学开关及全光学逻辑运算, 光量子逻辑门, 光子开关^[1~4]的一个有效途径。有效的非线性过程取决于激光强度及介质的非线性系数, 提高激光强度或增强光学介质的非线性系数都可以增强非线性效应, 但强度的过分提高会引起其他非线性过程, 同时还会增加器件的热效应, 不利于全光学集成。增强 Kerr 非线性效应的关键是提高三阶非线性极化率, 同时要求减小所有参与非线性过程中光场的线性极化率以降低吸收损耗。在普通的三能级系统中, 介质在近共振情况下具有高的非线性系数, 但共振时线性吸收很大, 难以进行光学通讯。普通三能级系统如图 1 所示。通过减小探针光和耦合光的失谐 Δ_a 、 Δ_b 可以有效的提高三阶非线性极化率, 但 Δ_a 的减小同时也会极

大的增强探针光的单光子损耗, 不利于光学信号的传输, 尤其对光量子态的传递更是一种破坏。近年来, 由原子相干性导致的电磁感应透明(EIT)效应引起了科学界的广泛关注。理论和实验研究表明, 在三能级 EIT 过程中, 非线性极化率可以得到极大的增强。最近, 加州大学圣芭芭拉的 H. Schmidt 和 A. Imamoglu 在理论上提出了利用 N-型四能级原子量子相干性增强非线性极化率 $\chi^{(3)}$ 的方法^[5]。他们把 N-型四能级原子系统看作一个 Λ 型三能级再加另外一个能级的复合结构, 当耦合光与 Λ 型三能级原子作用产生量子干涉效应时, 介质对探针光的吸收锐减, 发生 EIT 效应, 这时, 如果把控制光调谐到另外一个两能级跃迁频率上, 原子的量子干涉效应就会被破坏, 介质的折射率就会发生变化, 变化的大小取决于信号光的强度, 这样就使得信号光与探针光产生强的交叉 Kerr 非线性极化率 $\chi^{(3)}$ 。2000 年, M. D. Luking 和 D. Vitali 通过理论研究分

收稿日期: 2004-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(60238010; 19974021); 山西省自然科学基金(20031007)

作者简介: 沈云(1980-), 男, 湖北随州人, 武汉大学物理科学与技术学院在读硕士研究生。

别指出,利用四能级原子 EIT 产生的巨大交叉 Kerr 非线性效应,有可能使一个单光子脉冲导致另一个单光子脉冲产生 π 相移,从而实现两单光子脉冲的量子纠缠和量子相位门(QPG)^[6]。我们应用密度矩阵方程计算了四能级原子系统中三阶非线性极化率随信号光和探针光频率失谐的变化关系。结果表明,由于信号光对 EIT 过程中原子相干性的破坏,使得四能级系统中的交叉 Kerr 非线性系数大大提高,较三能级系统可增强两个数量级。

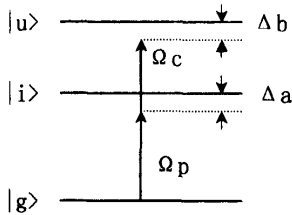


图 1 三能级系统

1 理论模型

N 型四能级系统如图 2 所示, ω_p , ω_c , ω 分别为探针光,耦合光,信号光的频率,其相应的拉比频率分别为 Ω_p , ω_c , Ω , 探针光,耦合光,信号光的频率失谐量分别为 $\Delta_p = \omega_{31} - \omega_p$, $\Delta_c = \omega_{32} - \omega_c$, $\Delta = \omega_{42} - \omega$ 。当入射的探针光 Ω_p 和耦合光 Ω_c 与相应的原子能级之间的失谐均为 0 时,形成双光子共振, $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ 、 $|3\rangle$ 能级构成 Λ -型三能级 EIT 系统。该 EIT 系统消除了参与非线性过程的入射探针光及耦合光的单光子损耗。在 Λ -型 + $|4\rangle$ 组成的四能级系统中,作为亚稳态能级 $|2\rangle$,其衰减率很小,以致由该衰减率所决定的双光子吸收也很小, Λ -型三能级构成的 EIT 系统的吸收损耗被有效的减小,即抑制了线性极化率。同时,四能级系统非线性过程中 $|2\rangle - |4\rangle$ 之间的跃迁也不是单光子吸收^[5]。由此,整个系统仅受到极小的双光子吸收限制,在满足 EIT 情况下,四能级系统可以实现既抑

制线性极化率,同时又极大地增强三阶非线性极化效应。

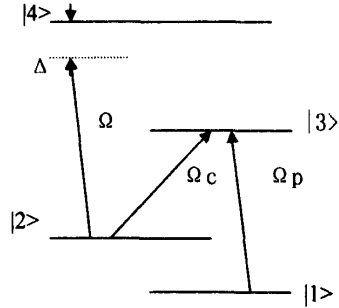


图 2 四能级系统

四能级系统的密度矩阵方程可以写为:

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{31} = & -(i\omega_{31} + \gamma_{31})\rho_{31} \\ & - \frac{i}{2}\Omega_p e^{-i\nu_p t} e^{-i\phi_p} (\rho_{33} - \rho_{11}) \\ & + \frac{i}{2}\Omega_c e^{-i\nu_c t} e^{-i\phi_c} \rho_{21} \\ \dot{\rho}_{21} = & -(i\omega_{21} + \gamma_{21})\rho_{21} + \frac{i}{2}\Omega_c e^{i\nu_c t} e^{i\phi_c} \rho_{31} \\ & - \frac{i}{2}\Omega_p e^{-i\nu_p t} e^{-i\phi_p} \rho_{23} + \frac{i}{2}\Omega_c e^{i\nu_c t} e^{i\phi_c} \rho_{41} \\ \dot{\rho}_{41} = & -(i\omega_{41} + \gamma_{41})\rho_{41} - \frac{i}{2}\Omega_p e^{-i\nu_p t} e^{-i\phi_p} \rho_{43} \\ & + \frac{i}{2}\Omega_c e^{-i\nu_c t} e^{-i\phi_c} \rho_{21} \\ \dot{\rho}_{23} = & -(i\omega_{23} + \gamma_{23})\rho_{23} - \frac{i}{2}\Omega_p e^{i\nu_p t} e^{i\phi_p} \rho_{21} \\ & + \frac{i}{2}\Omega_c e^{i\nu_c t} e^{i\phi_c} \rho_{43} + \frac{i}{2}\Omega_c e^{i\nu_c t} e^{i\phi_c} (\rho_{33} - \rho_{22}) \\ \dot{\rho}_{43} = & -(i\omega_{43} + \gamma_{43})\rho_{43} - \frac{i}{2}\Omega_p e^{i\nu_p t} e^{i\phi_p} \rho_{41} \\ & + \frac{i}{2}\Omega_c e^{i\nu_c t} e^{i\phi_c} \rho_{23} - \frac{i}{2}\Omega_c e^{i\nu_c t} e^{i\phi_c} \rho_{42} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\gamma_{nm} = \frac{1}{2} \cdot (\Gamma_m + \Gamma_n)$, $n = 1, 2, 3, 4$ 。 Γ_n 为 $|n\rangle$ 能级的衰减率。在旋转波近似下上述方程的解为:

$$\rho_{31} = \frac{i}{2}$$

$$\frac{\left\{ \Omega^2 + 4[i(\Delta_p - \Delta_c) + \gamma_{21}] \left[i(\Delta_p + \Delta - \Delta_c) + \frac{\Gamma_4}{2} \right] \right\} \Omega_p e^{-i\nu_p t} e^{-i\phi_p}}{\left[i\Delta_p + \frac{\Gamma_3}{2} \right] \left\{ \Omega^2 + 4[i(\Delta_p - \Delta_c) + \gamma_{21}] \left[i(\Delta_p + \Delta - \Delta_c) + \frac{\Gamma_4}{2} \right] \right\} + \left[i(\Delta_p + \Delta - \Delta_c) + \frac{\Gamma_4}{2} \right] \Omega_c^2} \quad (2)$$

并由此可得到极化率表达式为:

$$\chi = \frac{iN_0 |\rho_{31}|^2}{\hbar\epsilon_0} \times \frac{\left\{ \Omega^2 + 4[i(\Delta_p - \Delta_c) + \gamma_{21}] \left[i(\Delta_p + \Delta - \Delta_c) + \frac{\Gamma_4}{2} \right] \right\}}{\left[i\Delta_p + \frac{\Gamma_3}{2} \right] \left\{ \Omega^2 + 4[i(\Delta_p - \Delta_c) + \gamma_{21}] \left[i(\Delta_p + \Delta - \Delta_c) + \frac{\Gamma_4}{2} \right] \right\} + \left[i(\Delta_p + \Delta - \Delta_c) + \frac{\Gamma_4}{2} \right] \Omega_c^2} \quad (3)$$

2 Kerr 非线性效应增强的计算与分析

四能级系统总极化率的实部 $R_e[\chi]$ 和虚部 $I_m[\chi]$ 分

在满足 $\Omega_c \gg \Omega_p$ 及 $\Delta_p = \Delta_c = 0$ 的条件下,四

别为:

$$R_e[\chi] = \frac{4N_0 |\rho_{31}|^2}{\hbar\epsilon_0} \cdot \frac{\Omega_c^2 \Omega^2 \Delta}{(\Gamma_3 \Omega^2 + 2\gamma_{21} \Gamma_3 \Gamma_4 + \Gamma_4 \Omega_c^2)^2 + 4(\Omega_c^2 + 2\Gamma_3 \gamma_{21})^2 \Delta^2} \quad (4)$$

$$I_m[\chi] = \frac{2N_0 |\rho_{31}|^2}{\hbar\epsilon_0} \cdot \frac{\Omega^2 (\Gamma_3 \Omega^2 + 4\gamma_{21} \Gamma_3 \Gamma_4 + \Gamma_4 \Omega_c^2) + \gamma_{21} (\Gamma_4^2 + 4\Delta^2) (\Omega_c^2 + 2\Gamma_3 \gamma_{21})}{(\Gamma_3 \Omega^2 + 2\gamma_{21} \Gamma_3 \Gamma_4 + \Gamma_4 \Omega_c^2)^2 + 4(\Omega_c^2 + 2\Gamma_3 \gamma_{21})^2 \Delta^2} \quad (5)$$

当耦合光拉比频率 $\Omega_c = 23$ MHz, 信号光拉比频率 $\Omega = 0$ 时, 公式(3)可以简化为三能级 Λ -型系统的极化率表达式^[7], Λ -型介质的色散及吸收

随探针光失谐的变化关系如图 3 所示。我们计算了四能级系统不同信号光强所对应的色散及吸收随探针光失谐的变化关系, 如图 4 和图 5。

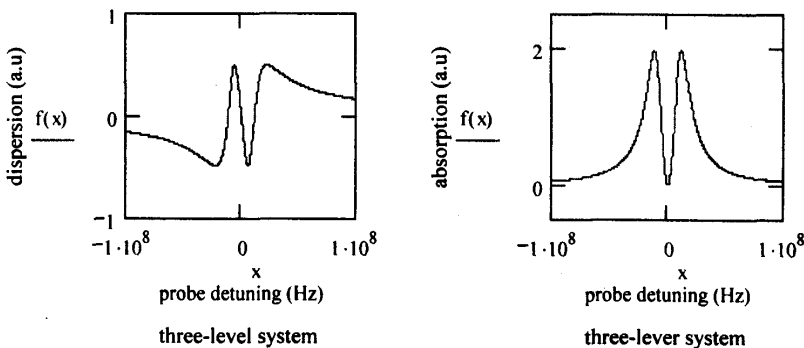


图3 $\Omega_p = 0.2$ MHz, $\Omega_c = 23$ MHz, $\Delta = \Delta_c = 0$, $\gamma_{21} = 0.01$ MHz

可以看出,普通三能级所对应的以 $\Delta_p = 0$ 为中心的 EIT 透明窗口被吸收峰所代替,且在 $\Delta_p = 0$ 附近色散出现反常现象,该反常色散及吸收的大小随信号光强的变化而作相应变化。这种较三能级系统

的不同现象表明了,在四能级系统中信号光破坏了 EIT 过程中的原子相干性,导致色散和吸收极大的变化,这种变化还对应着非线性吸收和 Kerr 非线性折射率。

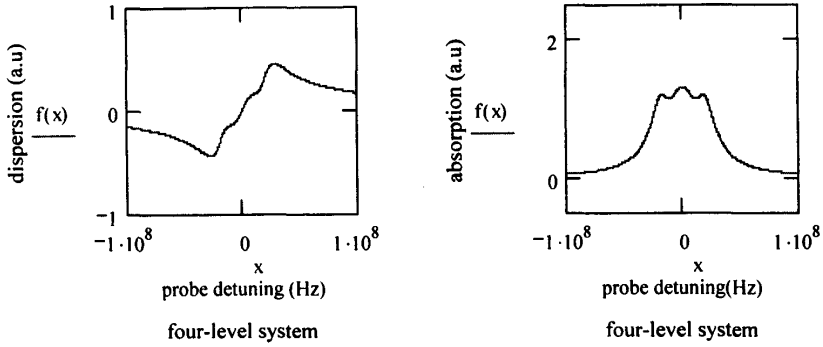
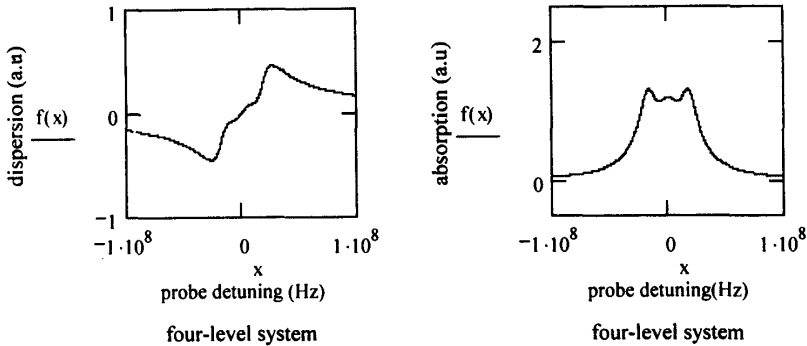


图4 $\Omega_p = 0.2$ MHz, $\Omega_c = 23$ MHz, $\Omega = 34$ MHz, $\Delta = \Delta_c = 0$, $\gamma_{21} = 0.01$ MHz



$\Omega_p = 0.2$ MHz, $\Omega_c = 23$ MHz, $\Omega = 30$ MHz, $\Delta = \Delta_c = 0$, $\gamma_{21} = 0.01$ MHz

图5 色散及吸收随探针光失谐的变化关系

在四能级系统的总极化率中,实部 $\text{Re}(\chi)$ 可近似表示为非线性项 $\text{Re}[\chi^{(3)}] |E(\omega)|^2$, 虚部 $I_m(\chi)$ 中的 $\gamma_{21}(\Gamma_4^2 + 4\Delta^2)(\Omega_c^2 + 2\Gamma_3\gamma_{21})$ 项为线性吸收损耗项。当 $\Omega_c > \Omega$ 时,其 Kerr 极化率的实部和虚部分别为:

$$\begin{aligned} & \text{Re}[\chi^{(3)}] \\ &= \frac{16N_0 |\phi_{31}|^2 |\phi_{42}|^2}{\hbar^3 \epsilon_0} \\ & \cdot \frac{\Omega_c^2 \Delta}{(2\gamma_{21}\Gamma_3\Gamma_4 + \Gamma_4\Omega_c^2)^2 + 4(\Omega_c^2 + 2\Gamma_3\gamma_{21})^2 \Delta^2} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & I_m[\chi^{(3)}] \\ &= \frac{8N_0 |\phi_{31}|^2 |\phi_{24}|^2}{\hbar^3 \epsilon_0} \\ & \cdot \frac{4\gamma_{21}\Gamma_3\Gamma_4 + \Gamma_4\Omega_c^2}{(2\gamma_{21}\Gamma_3\Gamma_4 + \Gamma_4\Omega_c^2)^2 + 4(\Omega_c^2 + 2\Gamma_3\gamma_{21})^2 \Delta^2} \end{aligned} \quad (7)$$

对于图 1 所示的普通三能级系统,其三阶极化率的实部和虚部分别为:

$$\begin{aligned} & \text{Re}[\chi^{(3)}] \\ &= \frac{N_0 |\phi_{ig}|^2 |\phi_{ui}|^2}{3\hbar^3 \epsilon_0} \\ & \cdot \frac{-\left(\frac{\Gamma_i^2}{4} - \Delta_a^2\right)\Delta_b - \Delta_a \frac{\Gamma_i\Gamma_u}{2}}{\left[\Delta_a^2 + \frac{\Gamma_i^2}{4}\right]^2 \left[\Delta_b^2 + \frac{\Gamma_u^2}{4}\right]} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & I_m[\chi^{(3)}] \\ &= \frac{N_0 |\phi_{ig}|^2 |\phi_{ui}|^2}{3\hbar^3 \epsilon_0} \\ & \cdot \frac{\Delta_a\Delta_b \frac{\Gamma_i}{2} - \frac{\Gamma_u}{2} \left(\frac{\Gamma_i^2}{4} - \Delta_a^2\right)}{\left[\Delta_a^2 + \frac{\Gamma_i^2}{4}\right]^2 \left[\Delta_b^2 + \frac{\Gamma_u^2}{4}\right]} \end{aligned} \quad (9)$$

四能级系统的三阶极化率非线性随信号光失谐变化如图 6,图 7 为普通三能级中耦合光失谐 Δ_b 所对应的三阶极化率实部及虚部的变化。

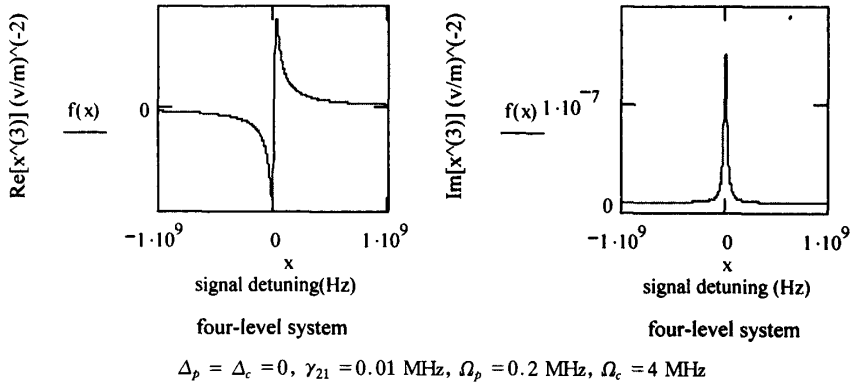


图6 三阶非线性极化率随信号光失谐量的变化关系

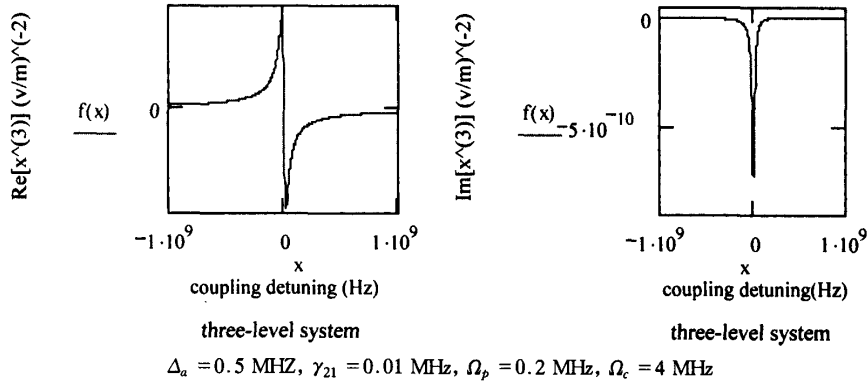


图7 三阶非线性极化率随信号光失谐量的变化关系

比较可知,由于信号光对 EIT 过程中原子相干性的破坏,使四能级系统中的三阶极化率大大提高,较三能级系统增强两个数量级。四能级 EIT 系统中, $\Omega_c \gg \Omega_p$ 时, $R_e(\chi) \sim R_e[\chi^{(3)}] |E(\omega)|^2$, EIT 抑制了线性极化率,使三阶极化率处于主导地

位,其 Kerr 非线性效应的交叉相移及吸收系数为^[8]:

$$\begin{aligned} \Phi_{XPM} &= \pi R_e(\chi) / \lambda \\ \alpha &= 2\pi I_m(\chi) / \lambda \end{aligned} \quad (10)$$

其中 λ 为探针光波长, l 为介质长度。在一般的实验条件中, Φ_{XPM}, α 随信号光失谐的变化如图 8。

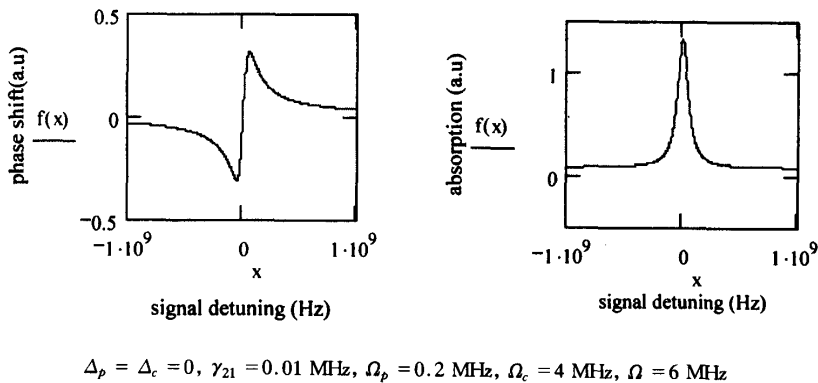


图8 ϕ_{XPM}, α 随信号光失谐的变化

4 结论

对四能级系统在 EIT 条件下非线性特性的计算与分析及与三能级比较表明,在 Λ - 型 + $|4\rangle$ 组成的四能级系统中,由于信号光对四能级原子系统的作用,两基态的原子相干性受到了破坏,而这种量

子干涉的破坏引起了探针光的交叉 Kerr 相位调制,即依赖于信号光强度的 Kerr 非线性效应。由于量子干涉对信号光强度的敏感性,使交叉 Kerr 非线性作用大大增强,与三能级系统相比,介质的 Kerr 非线性系数可增强两个数量级。

参考文献:

- [1] POIZAT J P, GRANGIER P. Experimental realization of a quantum optical tap [J]. *Phys Rev Lett*, 1993, **70**: 271.
- [2] TURCHETTE Q A, HOOD C J, LANGE W, *et al.* Measurement of conditional phase shifts quantum logic [J]. *Phys Rev Lett*, 1995, **75**: 4710.
- [3] REBIC S, TAN S M, PARKINS A S, *et al.* Large Kerr nonlinearity with a single atom [J]. *J Opt B: Quantum Semiclass*, 1990, **B1**: 490.
- [4] WANG H, GOORSKEY D, XIAO M. Atomic coherence induced Kerr nonlinearity enhancement in Rb vapour [J]. *Opt Lett*, 2002, **27**: 1354.
- [5] SCHMIDT H, IMAMOGLU A. Giant Kerr nonlinearities obtained by electromagnetically induced transparency [J]. *Opt Lett*, 1996, **21**: 1936.
- [6] LUKIN M D, IMAMOGLU A. Nonlinear optics and quantum entanglement of ultra - slow single photons [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**: 1419.
- [7] GEA - BANACLOCHE J, LI Y Q, JIN S Z, *et al.* Electromagnetically induced transparency in ladder - type inhomogeneously broadened media: Theory and experiment [J]. *Phys Rev A*, 1995, **51**: 576.
- [8] KANG HOONSOO, ZHU Yifu. Observation of large Kerr nonlinearity at low light intensities [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, **91**: 093601.

The Research of Quantum Coherence Induced Kerr Nonlinearity Enhancement in Four - level Atomic System


SHEN Yun¹, WANG Hai²

(1. Department of physics, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. The State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto - Electronics, Shanxi University Taiyuan 030006, China)

Abstract: The third - order susceptibilities in four - level atomic system versus the probe detuning and the signal detuning is calculated based on the matrix equation. The results show that the cross phase nonlinearity in four - level system is increased by 2 orders of magnitude than that in three - level system due to the destruction of atom quantum interference induced by the signal light.

Key words: Quantum coherence effect; EIT; Kerr nonlinearity

四能级原子系统中量子相干增强的Kerr非线性效应的研究

作者: 沈云, 王海
作者单位: 沈云(武汉大学物理科学与技术学院, 湖北, 武汉, 430072), 王海(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 
英文刊名: ACTA SINICA QUANTUM OPTICA
年, 卷(期): 2004, 10(3)
被引用次数: 2次

参考文献(8条)

1. Poizat J P;GRANGIER P [Experimental realization of a quantum optical tap](#)[外文期刊] 1993
2. Turchette Q A;HOOD C J;LANGE W [Measurement of conditional phase shifts quantum logic](#)[外文期刊] 1995
3. REBICS;TANSM;PARKINSAS [Large Kerr nonlinearity with a single atom](#) 1990
4. Wang H;GOORSKEY D;XIAO M [Atomic coherence induced Kerr nonlinearity enhancement in Rb vapour](#) 2002
5. Schmidt H;IMAMOGLU A [Giant Kerr nonlinearities obtained by electromagnetically induced transparency](#) 1996
6. Lukin M D;IMAMOGLU A [Nonlinear optics and quantum entanglement of ultra-slow single photons](#) 2000
7. Gea-Banacloche J;LI Y Q;JIN S Z [Electromagnetically induced transparency in ladder-type inhomogeneously broadened media:Theory and experiment](#) 1995
8. Kang Hoonsoo;ZHU Yifu [Observation of large Kerr nonlinearity at low light intensities](#) 2003

本文读者也读过(5条)

1. 蒋文娟. 严祥安. 尹宝银. 郑淮斌. 宋建平. 白亚莉. 张彦鹏. JIANG Wen-juan. YAN Xiang-an. YIN Bao-yin. ZHENG Huai-bin. SONG Jian-ping. BAI Ya-li. ZHANG Yan-peng [Y型四能级系统中电磁感应透明和巨Kerr非线性效应的研究](#) [期刊论文]-量子光学学报2008, 14(4)
2. 张君 [碰撞产生的量子相干对相干布居转移的影响](#)[学位论文]2009
3. 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)
4. 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, 10(1)
5. 冯东太 [四原子分子振动与转动能级的李代数方法](#) [学位论文]2003

引证文献(2条)

1. 严祥安. 刘汉臣. 王秋萍 [RY型四能级原子系统中增强的交叉Kerr非线性](#) [期刊论文]-量子电子学报 2010(4)
2. HAO Dong-shan. ZHANG Xiao-fu [Nonlinear Propagation of Coupling Optical Pulse under Compton Scattering in Laser Medium](#) [期刊论文]-半导体光子学与技术(英文版) 2006(3)

引用本文格式: 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(3)