

原子类原子系统光学特性的量子相干调控应用基础研究

龚尚庆^{1,2} 钮月萍^{1,2} 周凤雪^{1*} 祁义红¹ 彭延东³

¹ 华东理工大学物理系, 上海 200237

² 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800

³ 山东科技大学理学院, 山东 青岛 266510

摘要 简要介绍了在原子类原子小量子系统光学特性的量子相干调控应用基础研究方面所取得的一些成果, 主要包括周期调制场控制弱光孤子传输、光学腔超窄线宽输出、非对称双量子阱中光学前驱波的分离以及极性分子系统中的电磁诱导透明现象等。

关键词 量子光学; 电磁诱导透明; 非线性增强; 空间光孤子; 光学前驱波

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0900123

Application Foundation Research on Quantum Coherent Control of Optical Properties in Atomic and Atomic-Like Media

Gong Shangqing^{1,2} Niu Yueping^{1,2} Zhou Fengxue¹ Qi Yihong¹ Peng Yandong³

¹ Department of Physics, School of Science, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

² State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

³ College of Science, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China

Abstract A short report of application foundation of quantum coherent control of optics properties in atomic and atomic-like media is given, including controlling the weak-light soliton propagating via the periodic modulation of the control field, narrowing the cavity-linewidth, separating optical precursors through asymmetric double quantum wells structure and investigating electromagnetically induced transparency in a polar molecule system, etc.

Key words quantum optics; electromagnetically induced transparency; nonlinearity enhancement; spatial solitons; optical precursors

OCIS codes 270.1670; 020.1670; 190.6135

1 引 言

所谓量子相干调控就是利用激光场激发原子、分子和半导体微结构等量子体系的相干, 来实现人们所需要的目标。其实质是激光场的相干性诱导了量子体系不同量子态之间的关联, 在不可分辨的量子跃迁通道之间发生干涉相长或相消, 即量子相干效应, 从而显著改变介质的光学特性, 包括吸收、色散和折射率等。量子相干调控前沿问题及应用研究一直是物理学领域的重要研究课题之一。目前, 在

原子类原子系统量子相干调控的基础理论研究方面取得了很多重要的成果, 发现了光与物质相互作用的诸多新现象, 如相干粒子数捕获(CPT)^[1]、电磁诱导透明(EIT)^[2]、受激拉曼绝热跟随(STIRAP)^[3]和隧穿诱导透明(TIT)^[4]等。同时, 也在其应用方面进行了大量积极的探索。例如, 利用 EIT 介质中的暗态极化子理论, 实现光信息的存储和读取^[5]; 利用 EIT 技术进行激光稳频^[6]; 利用 STIRAP 实现原子镜和分束器^[7]; 利用 EIT 增强非线性效应^[8]等。

收稿日期: 2011-07-12; 收到修改稿日期: 2011-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(10874194, 60978013, 60921004, 11074263)和上海市科委启明星计划(11QA1407400)资助课题。

作者简介: 龚尚庆(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事原子分子及激光物理等方面的研究。

E-mail: sqgong@ecust.edu.cn(中国光学学会会员号: 040420790)

* 通信联系人。E-mail: zhoufengxue@ecust.edu.cn

近年来,本课题组在原子类原子系统量子相干调控方面也做了一系列的研究工作^[9~19]:探讨了双激发态四能级原子系统的绝热跟随特性^[9],提出了利用双暗态共振提高克尔非线性的方案^[10]以及利用自发辐射诱导相干来提高非线性极化率的构想^[11]等。因为固体材料更便于集成化和器件化,具有更高的实际应用价值,课题组还将量子调控非线性光学特性研究从原子系统推广到半导体量子阱、量子点等类原子系统中:分别利用 Fano 干涉与 TIT 实现了弱吸收条件下的自相位调制和交叉相位调制增强^[12,13];利用交叉克尔非线性甄别多光子 GHz 态^[14];考察了多量子阱中的自感应传输现象^[15];利用少周期非线性啁啾脉冲,研究了对称的双量子阱中 THz 波辐射的量子相干控制^[16]等。

在前期工作的基础上,进一步开展了原子类原子系统量子相干调控应用基础方面的研究,包括空间光孤子的传输控制^[20],可用于激光稳频的光学腔输出线宽压窄^[21,22],光学前驱波^[23]的有效分离以及极性分子系统中的 EIT 现象^[24]等。本文对比进行了简要介绍。

2 基于 EIT 的空间光孤子传输

空间光孤子是光的一种特殊传输状态,当光在介质中传播时非线性效应与其衍射互相平衡,可以保持波形、幅度和传播速度不变的空间光强分布,这种状态称为空间光孤子,在光通信、光学信息处理等方面有着重要的应用。早期对光孤子的研究需要利用非常强的激光场以实现较大的非线性效应,近年来,由于 EIT 效应的发现,可以在弱光下实现非线性增强,从而为弱光下实现光孤子提供了可能,基于 EIT 的弱光孤子研究也因此成为量子相干调控和非线性光学领域的热点之一^[25,26]。

基于图 1 所示的三能级 Λ 型原子系统中的 EIT,用横向周期性调制的控制场 Ω_c 实现对空间光孤子传输路径的控制^[20]。考虑稳态传输的情况,探测场满足传输方程

$$i \frac{\partial \Omega_p}{\partial z} + \frac{c}{2\omega_p} \frac{\partial^2 \Omega_p}{\partial x^2} + \kappa \rho_{21} = 0, \quad (1)$$

式中 $\kappa = N\omega_p |\mu_{12}|^2 / (2\epsilon_0 \hbar c)$, c 为真空中的光速。使用微扰方法求解稳态条件下密度矩阵元 ρ_{21} 的一阶到三阶解。为了便于分析,引入新的变量 $\zeta = z/L_d$, $\eta = x/R$, $L_d = \omega_p R^2 / c$, $u = \Omega_p / \Omega_{p0}$, Ω_{p0} 表示探测场的特征拉比频率, L_d 和 R 分别表示特征衍射长度和特征光束半径, μ 表示归一化的探测场,可以得到探

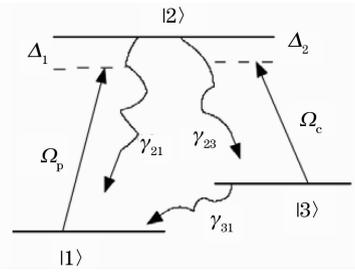


图 1 原子能级结构与激光场的耦合方案。拉比频率为 Ω_c (频率 ω_c) 控制场耦合能级 $|2\rangle$ 和 $|3\rangle$, 拉比频率为 Ω_p (频率 ω_p) 弱探测场耦合能级 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$

Fig. 1 Energy level diagram and laser excitation scheme. The control field with Rabi frequency Ω_c (frequency ω_c) couple levels $|2\rangle$ and $|3\rangle$, the weak probe field with Rabi frequency Ω_p (frequency ω_p) couple levels $|1\rangle$ and $|2\rangle$

测场满足

$$i \frac{\partial u}{\partial \zeta} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} + (a_r + ia_i) \left(1 - \frac{m_r + im_i}{m_0} |u|^2 \right) u = 0, \quad (2)$$

式中 a_r, a_i, m_r, m_i 和 m_0 表示线性和非线性系数,与控制场强度和失谐有关,其具体表达式及其他相关变量请参考文献[10]。如果控制场是周期性的,那么 a_r 和 a_i 也呈现周期性变化,从而实现控制场对探测光孤子的调制。

考虑控制场的形式为 $\Omega_c = \Omega_{c0} [1 + A \cos(B\eta)]$, Ω_{c0} 表示控制场拉比频率的振幅, A 表示调制深度, B 表示调制周期。控制场的这种形式可以利用具有相同纵向波矢分量和相反横向波矢分量的两束光形成一个驻波场来实现。这样可以保证 EIT 条件始终成立,从而整个介质中吸收都很小。从(2)式可以看出,周期性调制的控制场类似于光晶格或波导阵列,对探测光会起到周期性势垒的作用,因而探测孤子可以被囚禁在传输通道中,从而实现弱光探测孤子在倾斜传输方向上的开关效应。如图 2 所示(彩色图见网络电子版), (a)~(d) 表示以一定倾斜角度入射的探测孤子在均匀控制场 ($A=0$) 的条件下,沿各自入射方向传输的情况。然而,若控制场变为周期性调制场 ($A \neq 0$), 则其产生的周期势作用会阻碍孤子在横向方向上的传输,实际上使得调制增强的区域相当于探测孤子的一个传输通道,探测孤子被周期势很好地囚禁在入射的通道内并在其中振荡传输,如图 2(e)~(h) 所示。由此可以看出,利用控制场的周期性调制来控制 EIT 介质中的弱光孤子传输,作用类似于孤子开关,这在孤子通信和光学信息处理方面具有潜在的应用优势。

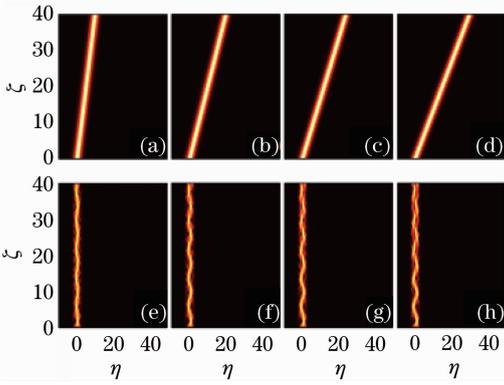


图 2 以不同入射角入射的弱光空间孤子在介质中的传输
Fig. 2 Soliton propagation in the medium with different incident directions

3 光学腔内可调谐超窄线宽

一般来讲,腔内光谱技术的精度高于其他光谱技术,常常借助于高品质的光学腔来开展精密光谱实验。Lukin 等^[27]提出了将 EIT 介质放入腔内,利用量子干涉效应来有效地压窄腔的透射峰线宽。虽然放入介质后降低了腔的品质因数,但是仍然能得到亚线宽透射谱。基于 Tripod 型系统中的双暗态,提出了一种利用暗态相互作用得到超窄可调光学线宽的方案^[21]。

考虑如图 3 所示的实验方案。两控制场共轴同

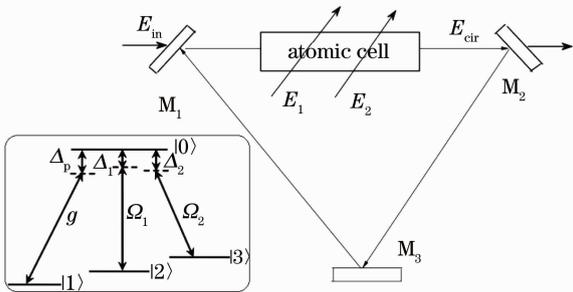


图 3 原子气室和环形腔,子图为 Tripod 型四能级原子系统。 E_{in} 和 E_{cir} 分别是输入场和腔内光场, E_1 和 E_2 是两控制场, M_1 , M_2 和 M_3 是腔反射镜。 g , Ω_1 和 Ω_2 分别为弱耦合场和两个控制场的拉比频率。 Δ_p , Δ_1 和 Δ_2 为相应场的失谐

Fig. 3 Ring cavity containing an atomic cell. The subfigure is the scheme of the tripod model configuration. E_{in} and E_{cir} are the incident field and the field inside the cavity, respectively. E_1 and E_2 are two control fields. M_1 , M_2 and M_3 are reflecting mirrors. g , Ω_1 and Ω_2 are the Rabi frequencies of the weak coupling field and two control fields, respectively. Δ_p , Δ_1 and Δ_2 are the corresponding detunings

向通过原子气室(不在腔内循环),组成双光子消多普勒光路。通过求解腔场的输出方程,可以获得如图 4 所示的数值模拟结果,其中 γ_1 是从 $|0\rangle$ 到 $|1\rangle$ 的自发辐射衰减速率,其他参数见文献[18]。一定的参数条件下,可以得到如图 4(a)所示的超窄透射峰,要远远窄于图 4(c)所示单暗态时的腔透射谱。当控制场的失谐改变时,腔的透射峰位置发生移动,如图 4(b)所示。可见,双暗态 EIT 介质的加入,显著地改变了光学腔的输出特性。相比于单暗态的情况,双暗态间的相互作用使得窄透明窗口处的色散变大,从而导致光学腔的线宽变窄。并且,通过调节控制场失谐可以实现不同频率的超窄线宽输出。

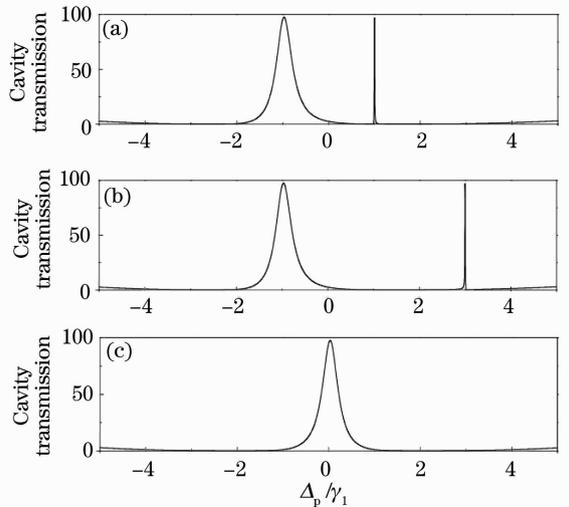


图 4 腔的透射谱线随探测场失谐 Δ_p 的变化。(a) 双暗态 $\Omega_2 = 0.3\gamma_1$, $\Delta_2 = \gamma_1$; (b) 双暗态 $\Omega_2 = 0.3\gamma_1$, $\Delta_2 = 3\gamma_1$; (c) 单暗态 $\Omega_2 = \Delta_2 = 0$

Fig. 4 Transmission spectra of cavity versus change of the probe detuning. (a) Double dark state $\Omega_2 = 0.3\gamma_1$, $\Delta_2 = \gamma_1$; (b) double dark state $\Omega_2 = 0.3\gamma_1$, $\Delta_2 = 3\gamma_1$; (c) single dark state $\Omega_2 = \Delta_2 = 0$

另外,还将研究对象推广到半导体结构中,提出了基于双量子点分子中电压控制的 TIT 效应来改善光学腔光学特性的方案,实现了电压控制的稳频效果和光学腔窄线宽输出,详细内容请参考文献[22]。这些方案在高精密光谱分析、激光稳频、光学磁力计等方面有着重要的应用前景。

4 基于非线性效应的光学前驱波分离

光学前驱波是由 Sommerfeld 等^[28,29]提出的,理论证明了阶跃型脉冲通过吸收介质时,其前沿将以真空中的光速传播。这个以瞬态形式传播的前沿就是 Sommerfeld-Brillouin 前驱波,之后的主脉冲

以一定的群速度在介质中传播。光学前驱波在生物医学成像、水下通信和探测等方面有着很好的应用前景,尤其是在实验上可以直接观测到前驱波信号之后,关于前驱波与主信号场分离的传输控制问题引起了人们的研究兴趣^[30]。

利用量子阱结构中的 TIT 增强的克尔非线性效应,提出了一种从矩形长脉冲中分离出光学前驱波的方案^[23]。采用图 5 所示(彩色图见网络电子版)的非对称双量子阱结构,入射一矩形脉冲 $E(0,t) = E_0\Theta(t)\exp(-i\omega_p t)$, 其时域谱如图 6(a)所示,其中 $\Theta(t)$ 为 Heaviside 函数。

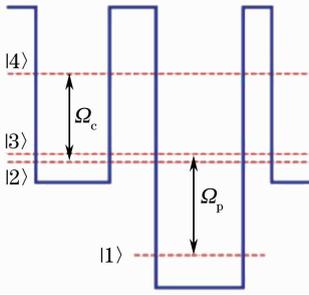


图 5 非对称 AlGaAs/GaAs 双量子阱结构

Fig. 5 Conduction subband of asymmetric AlGaAs/GaAs double quantum wells

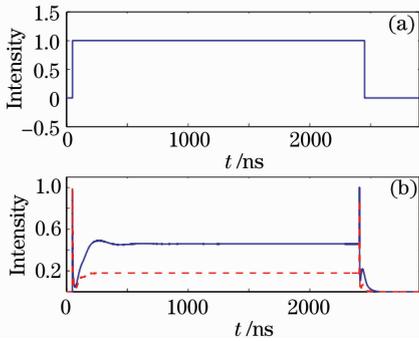


图 6 (a) 2.4 μs 入射方波脉冲; (b) 出射脉冲(实线为有 TIT 的情况,虚线为没有 TIT 的情况)

Fig. 6 (a) Input square pulse with no quantum wells present; (b) optical precursor signal and delayed main pulse with TIT (solid line) and without TIT (dashed line)

共振的相邻量子阱的子带能级由于隧穿效应分裂为双重态 $|2\rangle$ 和 $|3\rangle$, 该双重态在探测场的作用下与基态耦合,形成 2 个跃迁通道,这 2 个跃迁通道间的相消干涉消除线性吸收,导致了 TIT 窗口的出现。入射脉冲从 TIT 窗口通过,该窗口处的慢光效果延迟了主脉冲,如图 6(b)实线所示,可以看到与主脉冲分离的光学前驱波信号。其中虚线表示的是没有 TIT 时的情况,可以看到前驱波信号无法很好

地与主脉冲分开。

当打开连续的控制场 Ω_c 时,由于共振隧穿,介质的非线性表现为相长干涉,增强的交叉 Kerr 非线性变得尤为重要。此时,原来的一个 TIT 窗口分裂成两个透明窗口,如图 7(a)所示(彩图请见网络电子版)。一定条件下,窄的透明窗口内,极化率的实部 $\text{Re } \chi$ 曲线变得非常陡峭,如图中 A 点所示。同时,如图 7(b)所示,在 A 点所对应的色散强度要比控制场关闭时增强了 1 个数量级。入射脉冲通过这个窄透明窗口后的波形如图 7(c)所示。可以看出,与控制场关闭的情况相比,主脉冲被大大地延迟且强度增大。也就是说,前驱波能够更好地与主脉冲分离。

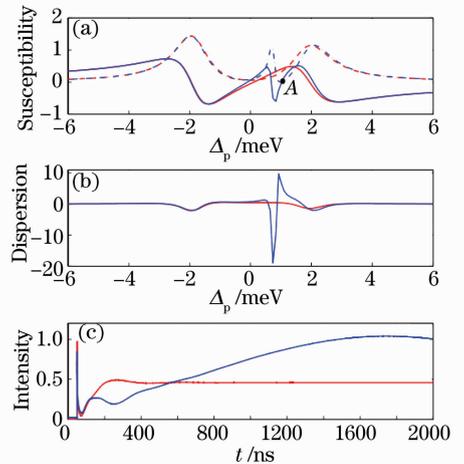


图 7 (a) $\text{Re } \chi^{(1)}$ (红实线), $\text{Im } \chi^{(1)}$ (红虚线), $\text{Re } \chi$ (蓝实线) 和 $\text{Im } \chi$ (蓝点线) 随探测场失谐的变化; (b) 量子阱系统色散曲线; (c) 2 种情况下出射脉冲的比较,红线对应 $\Omega_c = 0$, 蓝线对应 $\Omega_c = 0.2 \text{ meV}$, $\Delta_c = 0.73 \text{ meV}$ 。光学深度 $\alpha_0 z \approx 43$, $\chi = \chi^{(1)} + 3\chi^{(3)} E_c^2$

Fig. 7 (a) $\text{Re } \chi^{(1)}$ (red solid), $\text{Im } \chi^{(1)}$ (red dashed), $\text{Re } \chi$ (blue solid) and $\text{Im } \chi$ (blue dotted) versus the probe detuning; (b) dispersion of quantum wells; (c) intensity of optical precursors at the rising edge of input pulse, red line for $\Omega_c = 0$, blue line for $\Omega_c = 0.2 \text{ meV}$ and $\Delta_c = 0.73 \text{ meV}$. Optical depth $\alpha_0 z \approx 43$, $\chi = \chi^{(1)} + 3\chi^{(3)} E_c^2$

5 极性分子中的 EIT

自从 1990 年 Harris 等^[8] 首先命名了 EIT,并接着在实验上观测到该现象以来,人们对 EIT 进行了大量和深入的研究。其研究介质由最初的原子蒸气,逐渐扩展到固体材料中,例如稀土掺杂离子晶体、低维半导体材料和超导量子器件等。然而,尚未有人研究极性分子系统中的电磁诱导透明现象。近年来的一些研究表明^[31,32],极性分子中固有偶极矩

$\mu_{ij} \neq 0$ 不但会影响分子-激光耦合^[33], 而且使得极性分子的能级具有混合宇称, 在这些系统中的 2 个能级之间不光能产生单光子跃迁, 还能产生双光子跃迁。因此, 固有偶极矩存在与否不仅会引起显著的差别, 而且会为一些现象引入新的物理机制。基于这些考虑, 研究了如图 8 所示的三能级 Λ 型 HCN \rightarrow HNC 异质结构极性分子中的 EIT 现象^[24]。

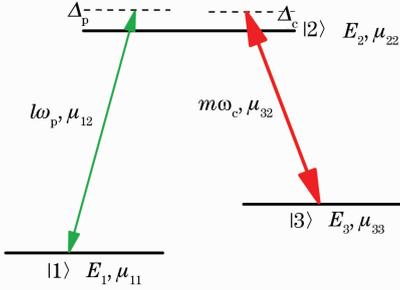


图 8 三能级 Λ 型极性分子与频率为 ω_p 的弱探测场和频率为 ω_c 的共振场的相互作用模型。 μ_{jj} 为能级 $|j\rangle$ 的固有偶极矩, μ_{ij} ($i \neq j$, $i, j = 1, 2, 3$) 为相应能级间的跃迁偶极矩。 l, m 取整数, 表示相应光子跃迁过程中吸收的光子数目

Fig. 8 Schematic of a three-level Λ polar molecular system interacting with probe field of frequency ω_p and resonant coupling field of frequency ω_c . μ_{jj} is the permanent dipole moment of level $|j\rangle$, μ_{ij} ($i \neq j$, $i, j = 1, 2, 3$) is the corresponding transition dipole moment. l and m are integers, denote the number of the photons absorbed in the transition process

在广义旋转波近似条件下利用半经典的处理方法, 求解出系统的线性极化率表达式为

$$\chi = K \left(\frac{d_{21}}{\omega_p} \right)^{l-1} \times \frac{\Delta_c - \Delta_p + i\gamma_{31}}{(\gamma_{21} + i\Delta_p)[\gamma_{31} - i(\Delta_c - \Delta_p)] + \frac{m^2 \Omega_c^2}{z_{23}^C} J_m^2(z_{23}^C)}, \quad (3)$$

式中 $d_{21} = \mu_{22} - \mu_{11}$ 为 $|2\rangle$ 和 $|1\rangle$ 2 个能级之间的固有偶极矩差, $J_m(z)$ 是 m 阶第一类贝塞尔函数, $z_{23}^C = d_{23}\epsilon_c/\omega_c$, ϵ_c 为耦合场的振幅, $\Omega_c = \mu_{32}\epsilon_c$, Δ_c 和 Δ_p 分别为耦合场和探测场的失谐, γ_{ij} 为相应的退相干衰减速率。极化率的实部和虚部分别表征介质的色散和吸收特性。

研究发现, 虽然固有偶极矩的存在, 导致贝塞尔函数限制了耦合场的有效拉比频率。但是通过适当调节耦合场的强度, 不但可以实现传统构型的 EIT, 还可以利用 $(2+2)$ 双光子跃迁过程 (即探测跃迁和

耦合跃迁分别吸收 2 个来自探测场的光子和 2 个来自耦合场的光子) 实现理想的 EIT, 如图 9 所示。同时, 在 EIT 窗口内, 陡峭的正常色散曲线可以导致群折射率 $n_g > 1$ 的慢光传播。此外, 在 $(2+2)$ 双光子跃迁过程中, 通过理论分析发现, 正是由于固有偶极矩的存在, 不但可以实现理想的 EIT, 还可以通过适当调控固有偶极矩系数, 来实现伴随着陡峭的反常色散曲线的无反转增益现象。这意味着, 在此三能级极性分子系统中, 可以通过激发分子到具有特定固有偶极矩 μ_{22} 的不同的高激发的振动态 $|2\rangle$, 来实现探测场接近零吸收的慢光或者快光传播。鉴于极性分子系统的多样性以及分子能级的多样性, 尤其是在有机染料分子中, 相邻能级的固有偶极矩可以相差很大, 那么在同一种分子内部通过选择不同的能级系统来实现 EIT 或者无反转增益现象是切实可行的。如果可以通过一些技术手段调控极性分子的固有偶极矩系数, 那么也可以实现同样的效果。当然, 这仍然需要对极性分子系统的特性做进一步的研究和探索。这个工作为在分子介质进行中的

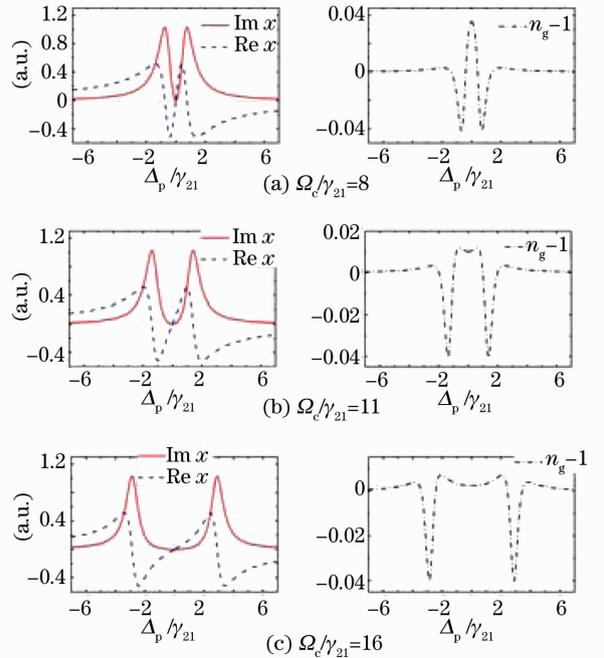


图 9 $(2+2)$ 双光子跃迁过程 $\mu_{22} > \mu_{11}$ 时, 不同耦合场强度下极化率虚部 $\text{Im } \chi$ (实线)、实部 $\text{Re } \chi$ (虚线) 和群折射率 $n_g - 1$ (点划线) 随探测场频率失谐 Δ_p 的变化曲线。 γ_{21} 为能级 $|2\rangle \rightarrow |1\rangle$ 退相干衰减速率

Fig. 9 Variations of $\text{Im } \chi$ (solid), $\text{Re } \chi$ (dashed), and group index $n_g - 1$ (dashed dotted) versus the probe detuning Δ_p for the $(2+2)$ -transition with $\mu_{22} > \mu_{11}$ at different coupling field strengths

EIT 研究增添了新的物理内容,也为分子中的量子相干调控研究提供了新方案。

6 结 论

本课题组最近两三年在量子相干调控应用基础方面的研究成果有:在原子系统中利用 EIT 实现非强线性的基础上,利用周期性控制场实现了弱光空间孤子传输调控;基于量子相干效应,实现了可调谐的光学腔透射线宽压窄;利用非对称量子阱的 TIT 增强的非线性效应,获得了与主信号大大分离的光学前驱波;研究了极性分子系统中的 EIT 现象等。这些研究工作将为量子相干调控走向实际应用提供理论基础。

参 考 文 献

- H. R. Gray, R. M. Whitley, C. R. Stroud. Coherent trapping of atomic populations[J]. *Opt. Lett.*, 1978, **3**(6): 218~220
- M. Fleischhauer, A. Imamoglu, J. P. Marangos. Electromagnetically induced transparency; optics in coherent media[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2005, **77**(2): 633~673
- V. A. Sautenkov, C. Y. Ye, Y. V. Rostovtsev *et al.*. Enhancement of field generation via maximal atomic coherence prepared by fast adiabatic passage in Rb vapor[J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **70**(3): 033406
- H. Schmidt, K. L. Campman, A. C. Gossard *et al.*. Tunneling induced transparency: fano interference in intersubband transitions[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(25): 3455~3457
- C. Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi *et al.*. Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses[J]. *Nature*, 2001, **409**(6819): 490~493
- H. S. Moon, L. Lee, K. Kim *et al.*. Laser frequency stabilizations using electromagnetically induced transparency[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(16): 3001~3003
- P. Marte, P. Zoller, J. L. Hall. Coherent atomic mirrors and beam-splitters by adiabatic passage in multilevel systems [J]. *Phys. Rev. A*, 1989, **44**(7): 4118~4121
- S. E. Harris, J. E. Field, A. Imamoglu. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(10): 1107~1110
- S. Q. Jin, S. Q. Gong, R. X. Li *et al.*. Coherent population transfer and superposition of atomic states via stimulated Raman adiabatic passage using an excited-doublet four-level atom [J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **69**(2): 023408
- Y. P. Niu, S. Q. Gong, R. X. Li *et al.*. Giant Kerr nonlinearity induced by interacting dark resonances [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(24): 3371~3373
- Y. P. Niu, S. Q. Gong. Enhancing Kerr nonlinearity via spontaneously generated coherence [J]. *Phys. Rev. A*, 2006, **73**(5): 053811
- H. Sun, S. Q. Gong, Y. P. Niu *et al.*. Enhancing of Kerr nonlinearity in an asymmetric quantum well via Fano interference [J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **74**(15): 155314
- H. Sun, Y. P. Niu, R. X. Li *et al.*. Tunneling-induced large cross-phase modulation in an asymmetric quantum well [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2475~2477
- J. Qian, Y. Qian, X. L. Feng *et al.*. Generation and discrimination of Greenberger-Horne-Zeilinger states using dipole-induced transparency in a cavity-waveguide system [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(3): 032309
- N. Cui, Y. P. Niu, H. Sun *et al.*. Self-induced transmission on intersubband resonance in multiple quantum wells [J]. *Phys. Rev. B*, 2008, **78**(7): 075323
- N. Cui, Y. Xiang, Y. P. Niu *et al.*. Coherent control of terahertz harmonic generation by a chirped few-cycle pulse in a quantum well [J]. *New J. Phys.*, 2010, **12**(1): 013009
- 钮月萍, 龚尚庆. 激光场控制双暗态原子系统中若干动力学行为研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(12): 37~38
- Hongji Guo, Lichun Wang, Yueping Niu *et al.*. Tunneling-induced pi-phase shift with a single-photon signal field in asymmetric double quantum wells [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(10): 886~890
- Qi Yihong, Niu Yueping, Cui Ni *et al.*. Study on nonlinear propagation effects of special laser beams [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(7): 071902
- 祁义红, 钮月萍, 崔妮等. 特殊激光光束的非线性传输特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(7): 071902
- Y. H. Qi, Y. P. Niu, Y. Xiang *et al.*. Control of resonant weak-light soliton via a periodic modulated control field [J]. *Phys. Rev. E*, 2010, **82**(1): 016602
- Y. D. Peng, Y. P. Niu, N. Cui *et al.*. Cavity linewidth narrowing by voltage-controlled induced transparency in asymmetry quantum dot molecules [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(3): 824~827
- Y. D. Peng, L. L. Jin, Y. P. Niu *et al.*. Tunable ultranarrow linewidth of a cavity induced by interacting dark resonances [J]. *J. Mod. Opt.*, 2010, **57**(8): 641~645
- Y. D. Peng, Y. P. Niu, Y. H. Qi *et al.*. Optical precursors with tunneling induced transparency in asymmetric quantum wells [J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **83**(1): 013812
- F. X. Zhou, Y. P. Niu, S. Q. Gong. Electromagnetically induced transparency in a three-level lambda system with permanent dipole moments [J]. *J. Chem. Phys.*, 2009, **131**(3): 034105
- Y. Wu, L. Deng. Ultraslow optical solitons in a cold four-state medium [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(14): 143904
- G. X. Huang, K. J. Jiang, M. G. Payne *et al.*. Formation and propagation of coupled ultraslow optical soliton pairs in a cold three-state double-Lambda system [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, **73**(5): 056606
- M. D. Lukin, M. Fleischhauer, M. O. Scully *et al.*. Intracavity electromagnetically induced transparency [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(4): 295~297
- A. Sommerfeld. Lectures on Theoretical Physics [M]. New York: Academic Press, 1950. 88~101
- L. Brillouin. Wave Propagation and Group Velocity [M]. New York: Academic Press, 1960
- H. Jeong, A. M. C. Dawes, D. J. Gauthier. Direct observation of optical precursors in a region of anomalous dispersion [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(14): 143901
- M. A. Anton, I. Gonzalo. Two-photon phase conjugation by degenerate four-wave mixing in polar molecules [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(5): 1035~1041
- A. Brown, W. J. Meath. Role of permanent dipoles and orientational averaging in the phase control of two-color, simultaneous one- and three-photon molecular excitations [J]. *Phys. Rev. A*, 1996, **53**(4): 2571~2586
- A. Brown. Effects of permanent dipole moments on stimulated Raman adiabatic passage [J]. *Chem. Phys.*, 2007, **342**(1-3): 16~24