

文章编号:1004-4213(2010)04-0728-6

# 控制场对 M 型原子系统吸收色散性质的影响\*

郑军<sup>a,c</sup>, 刘正东<sup>a,b,†</sup>, 赵顺才<sup>a,b</sup>

(南昌大学 a. 近代物理研究所; b. 纳米技术工程研究中心; c. 理学院, 南昌 330031)

**摘要:**运用数值模拟方法讨论了控制场的变化对 M 型五能级原子系统相对于探测场的吸收和色散等光学性质的影响. 结果表明, 改变控制场拉比频率时, 系统的吸收和色散性质会发生规律性变化. 在特定区域会呈现电磁感应透明窗口, 其中透明窗口的数量与外加控制场数目成正比, 而透明窗口宽度与拉比频率大小相关, 拉比频率越大, 透明窗口越平坦, 当拉比频率减小, 透明窗口变窄同时介质色散增强可获得慢光速光脉冲.

**关键词:**量子干涉; 电磁感应透明; 光速减慢; 控制

中图分类号: O430

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20103904. 0728

## 0 引言

研究光与原子相互作用时, 光场诱导的原子相干和量子干涉是研究热点. 原子相干和量子干涉会改变原子的吸收和色散等光学性质, 导致许多惊奇的现象出现: 如相干布居数捕获 (Coherent Population Trapping, CPT), 无反转激光, 介质折射率的增强, 电磁诱导透明 (Electromagnetically Induced Transparency, EIT) 和弱光非线性, 电磁感应左手效应<sup>[1-6]</sup>等, 这些效应有着极其广泛的应用前景. 如 CPT 技术已被成熟应用在频标和精密测量领域; 无反转激光可以用来实现新型的相干光源; EIT 技术能够实现光脉冲群速度的慢光速传播, 甚至能将光脉冲存储在原子介质中<sup>[7-10]</sup>, 为实现光子量子信息存储打下了基础; 弱光相干非线性使得单光子水平的非线性光学研究成为可能, 实验上已观察到弱光下多波混频、增强的高阶非线性折射率、量子相位门和光子开关<sup>[11-13]</sup>, 都对量子计算和量子信息处理有着重要的意义.

目前对介质光学特性的理论和实验研究多集中于三能级原子系统和四能级原子系统, 如 Sumanta<sup>[14]</sup>等研究了真空感应相干效应对四能级原子系统光子相关性的影响; Zhang<sup>[15]</sup>等研究了光与 Y 型四能级原子相互作用系统中原子对探测光的吸收和色散性质; Chen<sup>[16]</sup>等研究了准  $\Lambda$  型四能级原子系统中的烧孔和光学双稳现象以及 EIT 现象; Zheng<sup>[17]</sup>等研究了倒 Y 型四能级原子系统利用量子干涉实现左手效应的问题; Xu<sup>[18]</sup>等利用密度矩阵

元方法、缀饰态理论和 Mainfold 等方法研究了 N 型四能级原子的吸收机制, 并且说明三种方法得出了相同的研究结论; LI<sup>[19]</sup>等研究了多层电介质中三能级原子系统衰变通道间的量子干涉问题. 本文研究了一种 M 型五能级原子系统<sup>[20]</sup>, 该系统在 N 型四能级的基础上附加一个能级形成, 这个多能级原子与多模光场相互作用系统将会得到更丰富的结果. 文献[20]主要讨论了交叉相位调制等问题, 本文主要分析控制场强度变化引起原子系统对探测光的吸收和色散等光学性质变化问题.

## 1 模型与计算

与四个激光场相互作用的 M 型五能级原子模型如图 1, 其中有三个基态  $|1\rangle, |3\rangle, |5\rangle$ , 和两个激发态  $|2\rangle, |4\rangle$ , 此结构可由碱金属原子例如铷原子的塞曼分裂实现. 光场与原子跃迁间的拉比频率定义为:  $\Omega_k = -\mu_{ij}\epsilon_k/\hbar$ , 其中  $\epsilon_k$  是外加电场强度, ( $k=1, \dots, 4$ ),  $\mu_{ij}$  是由能级跃迁  $|i\rangle \leftrightarrow |j\rangle$  间感应的偶极矩阵元. 其中若只有  $\Omega_1, \Omega_2$  两个光场作用于原子则构成一个标准的  $\Lambda$  型三能级系统, 若只有  $\Omega_1, \Omega_2$  和  $\Omega_3$  作用, 则构成 N 型四能级原子系统. 在能级跃迁  $|1\rangle$

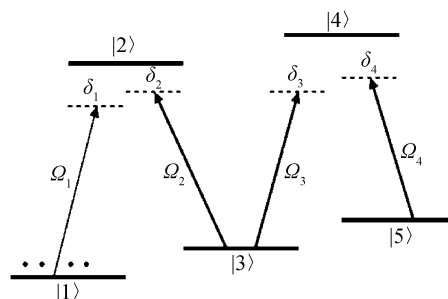


图 1 M 型五能级原子与四个光场相互作用系统  
Fig. 1 Schematic diagram of an M-type five-level atom system interacting with four fields

\* 国家自然科学基金项目(60768001、10464002)资助

† Tel: 0791-8304515

Email: lzdgroup@ncu.edu.cn

收稿日期: 2009-04-07

修回日期: 2009-11-02

$\leftrightarrow|2\rangle$ 间加上探测场,而在能级跃迁 $|2\rangle\leftrightarrow|3\rangle,|3\rangle\leftrightarrow|4\rangle$ 和 $|4\rangle\leftrightarrow|5\rangle$ 加上控制场.在图 1 中相应的失谐量定义: $E_2 - E_1 = \hbar\omega_1 - \hbar\delta_1, E_2 - E_3 = \hbar\omega_2 - \hbar\delta_2, E_4 - E_3 = \hbar\omega_3 - \hbar\delta_3, E_4 - E_5 = \hbar\omega_4 - \hbar\delta_4$ ,其中  $E_i (i=1, \dots, 5)$  是能级  $|i\rangle$  的能量,  $\omega_i$  是外加电场  $\epsilon_k$  的频率. 此系统的哈密顿量<sup>[20]</sup>

$$H = \sum_i^5 E_i |i\rangle\langle i| + \hbar(\Omega_1 e^{-i\omega_1 t} |2\rangle\langle 1| + \Omega_2 e^{-i\omega_2 t} |2\rangle\langle 3| + \Omega_3 e^{-i\omega_3 t} |4\rangle\langle 3| + \Omega_4 e^{-i\omega_4 t} |4\rangle\langle 5| + h.c.) \quad (1)$$

式中  $h.c.$  表示厄米共轭. 将上式变换到相互作用表象,若自由哈密顿量表示为

$$H_0 = E_1 |1\rangle\langle 1| + (E_2 - \hbar\delta_1) |2\rangle\langle 2| + (E_3 - \hbar\delta_{12}) |3\rangle\langle 3| + (E_4 - \hbar\delta_{13}) |4\rangle\langle 4| + (E_5 - \hbar\delta_{15}) |5\rangle\langle 5| \quad (2)$$

式中  $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2, \delta_{13} = \delta_1 - \delta_2 + \delta_3, \delta_{14} = \delta_1 - \delta_2 + \delta_3 - \delta_4$ , 可得到有效哈密顿量

$$H_{\text{eff}} = \hbar\delta_1 |2\rangle\langle 2| + \hbar\delta_{12} |3\rangle\langle 3| + \hbar\delta_{13} |4\rangle\langle 4| + \hbar\delta_{14} |5\rangle\langle 5| + \hbar\Omega_1 |2\rangle\langle 1| + \hbar\Omega_2 |2\rangle\langle 3| + \hbar\Omega_3 |4\rangle\langle 3| + \hbar\Omega_4 |4\rangle\langle 5| + \hbar\Omega_1^* |1\rangle\langle 2| + \hbar\Omega_2^* |3\rangle\langle 2| + \hbar\Omega_3^* |3\rangle\langle 4| + \hbar\Omega_4^* |5\rangle\langle 4| \quad (3)$$

研究该系统的光学性质的光布洛赫方程为

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar} [H_{\text{eff}}, \rho] + \sum_{l=2,4,k=1,3,5} \frac{\Gamma_{lk}}{2} (2 \hat{\sigma}_{kl} \rho \hat{\sigma}_{kl}^\dagger - \hat{\sigma}_{kl}^\dagger \hat{\sigma}_{kl} - \rho \hat{\sigma}_{kl}^\dagger \hat{\sigma}_{kl}) + \sum \frac{\gamma_{kk}}{2} (2 \hat{\sigma}_{kk} \rho \hat{\sigma}_{kk} - \hat{\sigma}_{kk} \rho - \rho \hat{\sigma}_{kk}) \quad (4)$$

式中  $H_{\text{eff}}$  是式(3)给出,而  $\hat{\sigma}_{kl} = |k\rangle\langle l|$ , 其系统平均值  $\sigma_{ij}(t) \equiv \langle \hat{\sigma}_{ij}(t) \rangle \equiv \rho_{ji}(t)$ . 为方便起见,计算中所有拉比频率取实数. 定义总衰变率  $\Gamma_2 = \Gamma_{21} + \Gamma_{23} + \Gamma_{25}, \Gamma_4 = \Gamma_{41} + \Gamma_{43} + \Gamma_{45}$ , 总退位相速率  $\gamma_{ij} = \gamma_{ii} + \gamma_{jj}$ , 复合失谐量  $\delta_{23} = \delta_2 - \delta_3, \delta_{24} = \delta_2 - \delta_3 + \delta_4, \delta_{34} = \delta_3 - \delta_4$ , 将式(3)代入式(4), 得到光布洛赫方程组(5)

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{11} &= i\Omega_1 \sigma_{21} - i\Omega_1^* \sigma_{12} + \Gamma_{41} \sigma_{44} + \Gamma_{21} \sigma_{22}, \\ \dot{\sigma}_{22} &= -i\Omega_1 \sigma_{21} + i\Omega_1^* \sigma_{12} - i\Omega_2 \sigma_{23} + i\Omega_2^* \sigma_{32} - \Gamma_2 \sigma_{22}, \\ \dot{\sigma}_{33} &= i\Omega_3 \sigma_{43} - i\Omega_3^* \sigma_{34} + i\Omega_2 \sigma_{23} - i\Omega_2^* \sigma_{32} + \Gamma_{43} \sigma_{44} + \Gamma_{23} \sigma_{22}, \\ \dot{\sigma}_{44} &= i\Omega_3^* \sigma_{34} - i\Omega_3 \sigma_{43} - i\Omega_4 \sigma_{45} + i\Omega_4^* \sigma_{54} - \Gamma_4 \sigma_{44}, \\ \dot{\sigma}_{55} &= i\Omega_4 \sigma_{45} - i\Omega_4^* \sigma_{54} + \Gamma_{25} \sigma_{22} + \Gamma_{45} \sigma_{44}, \\ \dot{\sigma}_{12} &= -i\delta_1 \sigma_{12} + i\Omega_1 (\sigma_{22} - \sigma_{11}) - i\Omega_2 \sigma_{13} - \frac{\Gamma_2 + \gamma_{12}}{2} \sigma_{12}, \\ \dot{\sigma}_{13} &= -i\delta_{12} \sigma_{13} + i\Omega_1 \sigma_{23} - i\Omega_3^* \sigma_{14} - i\Omega_2^* \sigma_{12} - \frac{\gamma_{13}}{2} \sigma_{13}, \end{aligned}$$

$$\dot{\sigma}_{14} = -i\delta_{13} \sigma_{14} + i\Omega_1 \sigma_{24} - i\Omega_3 \sigma_{13} - i\Omega_4 \sigma_{15} - \frac{\gamma_{14} + \Gamma_4}{2} \sigma_{14},$$

$$\dot{\sigma}_{15} = -i\delta_{14} \sigma_{15} + i\Omega_1 \sigma_{25} - i\Omega_4^* \sigma_{14} - \frac{\gamma_{15}}{2} \sigma_{15},$$

$$\dot{\sigma}_{23} = i\delta_2 \sigma_{23} + i\Omega_1^* \sigma_{13} - i\Omega_3^* \sigma_{24} + i\Omega_2^* (\sigma_{33} - \sigma_{22}) - \frac{\gamma_{23} + \Gamma_2}{2} \sigma_{23},$$

$$\dot{\sigma}_{24} = i\delta_{23} \sigma_{24} - i\Omega_3 \sigma_{23} - i\Omega_4 \sigma_{25} + i\Omega_2^* \sigma_{34} + i\Omega_1^* \sigma_{14} - \frac{\gamma_{24} + \Gamma_2 + \Gamma_4}{2} \sigma_{24},$$

$$\dot{\sigma}_{25} = i\delta_{24} \sigma_{25} + i\Omega_1^* \sigma_{15} + i\Omega_2^* \sigma_{35} - i\Omega_4^* \sigma_{24} - \frac{\gamma_{25} + \Gamma_2}{2} \sigma_{25},$$

$$\dot{\sigma}_{34} = -i\delta_3 \sigma_{34} + i\Omega_3 (\sigma_{44} - \sigma_{33}) + i\Omega_2 \sigma_{24} - i\Omega_4 \sigma_{35} - \frac{\gamma_{34} + \Gamma_4}{2} \sigma_{34},$$

$$\dot{\sigma}_{35} = -i\delta_{34} \sigma_{35} + i\Omega_3 \sigma_{45} + i\Omega_2 \sigma_{25} - i\Omega_4^* \sigma_{34} - \frac{\gamma_{35}}{2} \sigma_{35},$$

$$\dot{\sigma}_{45} = i\delta_4 \sigma_{45} + i\Omega_3^* \sigma_{35} + i\Omega_4 (\sigma_{55} - \sigma_{44}) - \frac{\gamma_{45} + \Gamma_4}{2} \sigma_{45},$$

$$\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} + \sigma_{44} + \sigma_{55} = 1 \quad (5)$$

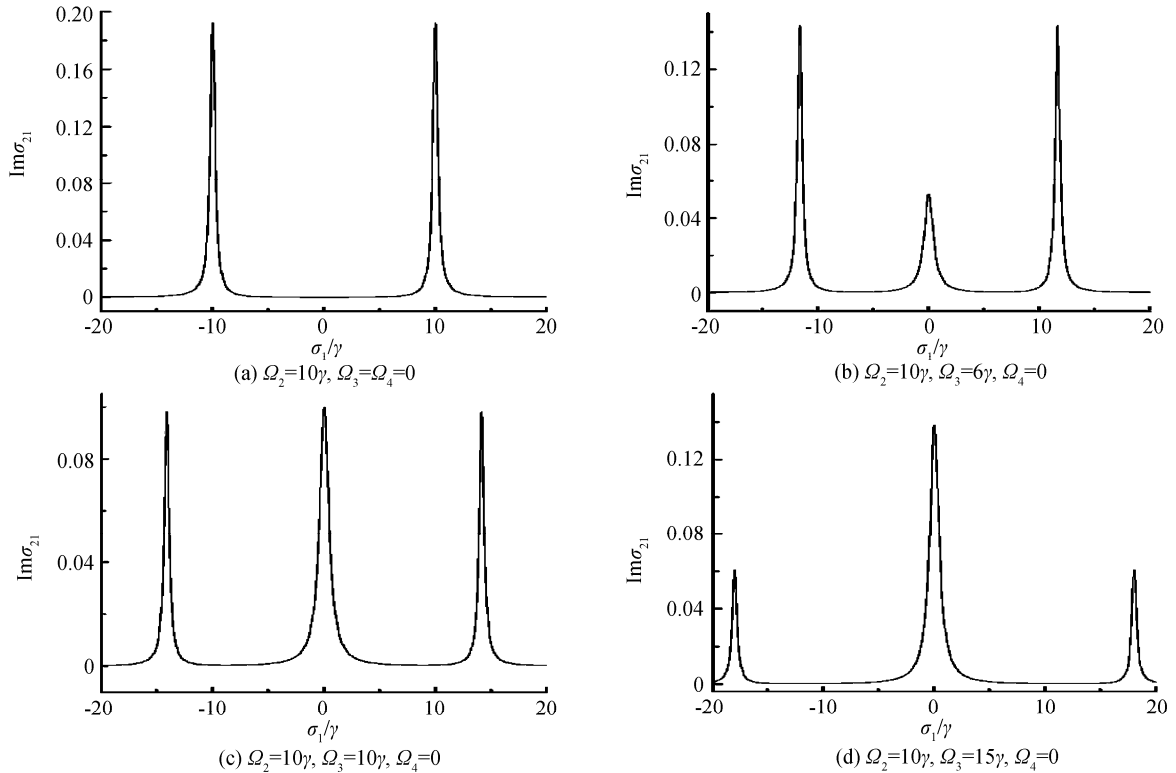
方程中  $\sigma_{ii} (i=1, \dots, 5)$  表示原子在能级  $|i\rangle$  布居数,  $\sigma_{ij} (i \neq j)$  表示原子相干项. 原子系统对于探测场的极化率系数  $\chi_p$  的实部反映介质的折射率, 其虚部代表介质吸收(增益)系数.  $\chi_p$  表达式

$$\chi_p = \frac{N |\mu_{12}|^2}{\hbar \epsilon_0 \Omega_1} \sigma_{21} \quad (6)$$

式中  $N$  是单位体积的原子数,  $\epsilon_0$  是真空介电常量.

## 2 结果与讨论

介质对光场的折射率和吸收系数是重要光学性质,由式(6)看出介质对探测场的折射率和吸收(增益)系数由  $\sigma_{21}$  的实部和虚部决定,通过数值计算求解方程(5)的稳态数值解从而确定  $\sigma_{21}$ ,数值分析其实部  $\text{Re}\sigma_{21}$  和虚部  $\text{Im}\sigma_{21}$  取值情况,以判断介质对探测场的色散和吸收性质. 在计算过程中,假设原子初始时刻制备在低能级  $|1\rangle$  上,由于相干布居数捕获发生,之后的原子也大都集中在初态  $|1\rangle$  上,因此假设  $\sigma_{11} \approx 1, \sigma_{jj} \approx 0, (j=2, \dots, 5)$ . 计算中各参量取值以衰变率  $\gamma$  为单位,具体设定如下:各光场失谐量:  $\delta_2 = 0, \delta_3 = 0, \delta_4 = 0$ ; 总衰变率  $\Gamma_2 = \gamma, \Gamma_4 = \gamma$ ; 总退位相速率  $\gamma_{ij} = 0.000 1\gamma$ ; 探测场拉比频率  $\Omega_1 = 0.1\gamma$ , 各控制场拉比频率如图 2~5. 其中图 2、图 4 显示的是不同控制场强度下相干项的虚部  $\text{Im}\sigma_{21}$  随探测场失谐量的变化关系,图 5 显示  $\sigma_{21}$  的实部和虚部随探测场失谐量的变化情况.

图 2  $\sigma_{21}$  的虚部随探测光失谐量变化曲线Fig. 2 The imaginary parts for  $\sigma_{21}$  versus the probe detuning  $\delta_1$ 

首先从图 2(图中  $\Omega_1 = 0.1\gamma$ ;  $\delta_2 = 0$ ,  $\delta_3 = 0$ ,  $\delta_4 = 0$ ;  $\Gamma_2 = \gamma$ ,  $\Gamma_4 = \gamma$ ;  $\gamma_{ij} = 0.0001\gamma$ ; 其它参量如图注)、图 4(除图中标注, 其它参量同图 2) 以及图 5(除图中标注, 其它参量同图 2) 的虚线部分考察介质对探测场的吸收特性。

当假设外光场中只有探测场  $\Omega_1$  与控制场  $\Omega_2$  作用, 则探测场和耦合场形成一个典型的  $\Lambda$  型三能级 EIT 和相干布居数捕获结构. 如图 2(a) 和 4(a), 在  $\Lambda$  型三能级系统中, 由于两个相干场  $\Omega_1$  与  $\Omega_2$  作用, 系统被制备在由两个基态所组成的相干叠加态, 因为两个不同吸收通道之间的相消干涉, 粒子数被捕获在基态能级上, 并且在  $\delta_1 = 0$  处呈现出 EIT. 比较图 2(a) 和图 4(a) 发现 EIT 窗口宽度随着控制场拉比频率  $\Omega_2$  的增加而增大。

当增加了第三个光场  $\Omega_3$ , 如图 2(b)、(c)、(d), 能级  $|1\rangle$  和  $|2\rangle$  的相干叠加态被破坏, 而系统对此相干叠加态的变化非常敏感, 所以介质对于探测场的响应被改变, 此时对探测场而言, 在  $\delta_1 = 0$  处不再表现为透明, 而是表现为吸收, 图中呈现出两个 EIT 窗口. 图中显示, 系统对探测场的吸收线型与拉比频率  $\Omega_2, \Omega_3$  有关, 随着  $\Omega_3$  逐渐增大, 在谱线中心探测场的吸收逐渐增强. 当  $\Omega_3 = \Omega_2$  时, 三个吸收峰高度相等, 而当  $\Omega_3 > \Omega_2$  时, 中央吸收峰高于两侧双峰. 当  $\Omega_3 \gg \Omega_2$  时, 两侧吸收峰将出现在  $\delta_1 \rightarrow \infty$  处, 这时除了在  $\delta_1 = 0$  处出现吸收峰, 将无 EIT 窗口出现。

吸收谱线型可用缀饰原子态解释<sup>[18]</sup>. 当  $\Omega_3 = 0$  时, 驱动场  $\Omega_2$  产生的一对缀饰态  $|+\rangle$  和  $|-\rangle$  在整个过程中起主要作用, 如图 3(a), 导致系统对探测场吸收在线中心处被抑制, 显示曲线中心处为 EIT. 当  $\Omega_3 \neq 0$  时, 由相干场  $\Omega_3$  产生的一对缀饰子能级  $|+\rangle$  和  $|-\rangle$  起了主要作用, 如图 3(b), 此时各个激发通道在探测场共振处发生相消干涉, 导致了单光子吸收占了主要作用, 中心处 ( $\delta_1 = 0$ ) 为吸收. 从图 2(b)、(c)、(d) 中可以看出, 随着  $\Omega_3$  的增加,  $\delta_1 = 0$  处的吸收逐渐增强。

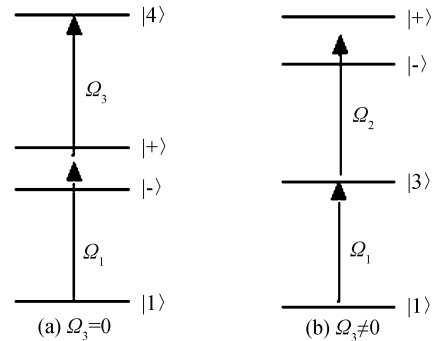


图 3 N 型四能原子系统缀饰态能级图

Fig. 3 Dressed-state pictures for an N-type four-level atomic system corresponding for the situations

由图 2 和图 4 各曲线显示, 系统对探测场的吸收线型由拉比频率比值  $\Omega_2/\Omega_3$  决定. 同样的比值导致相似的结果, 如图 2(b) 和 4(b); 2(c) 和 4(c); 2(d) 和 4(d). 不同的之处在于当  $\Omega_2, \Omega_3$  实际值减小时(保持

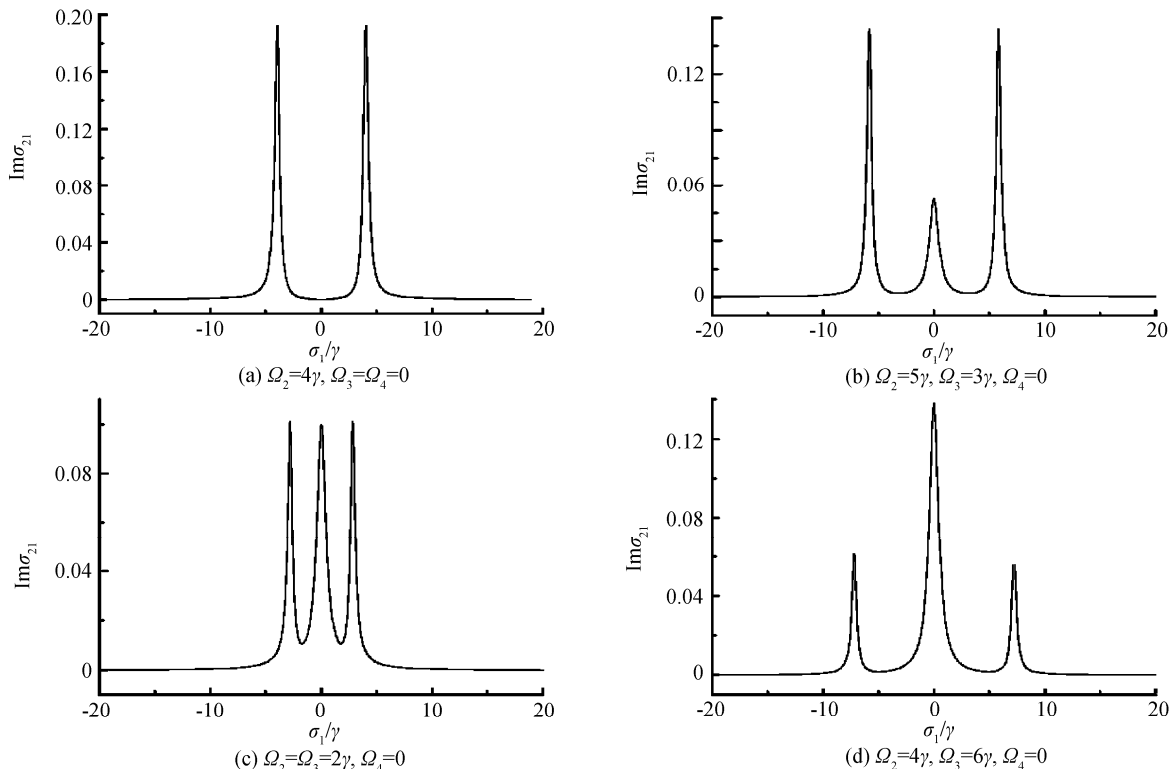
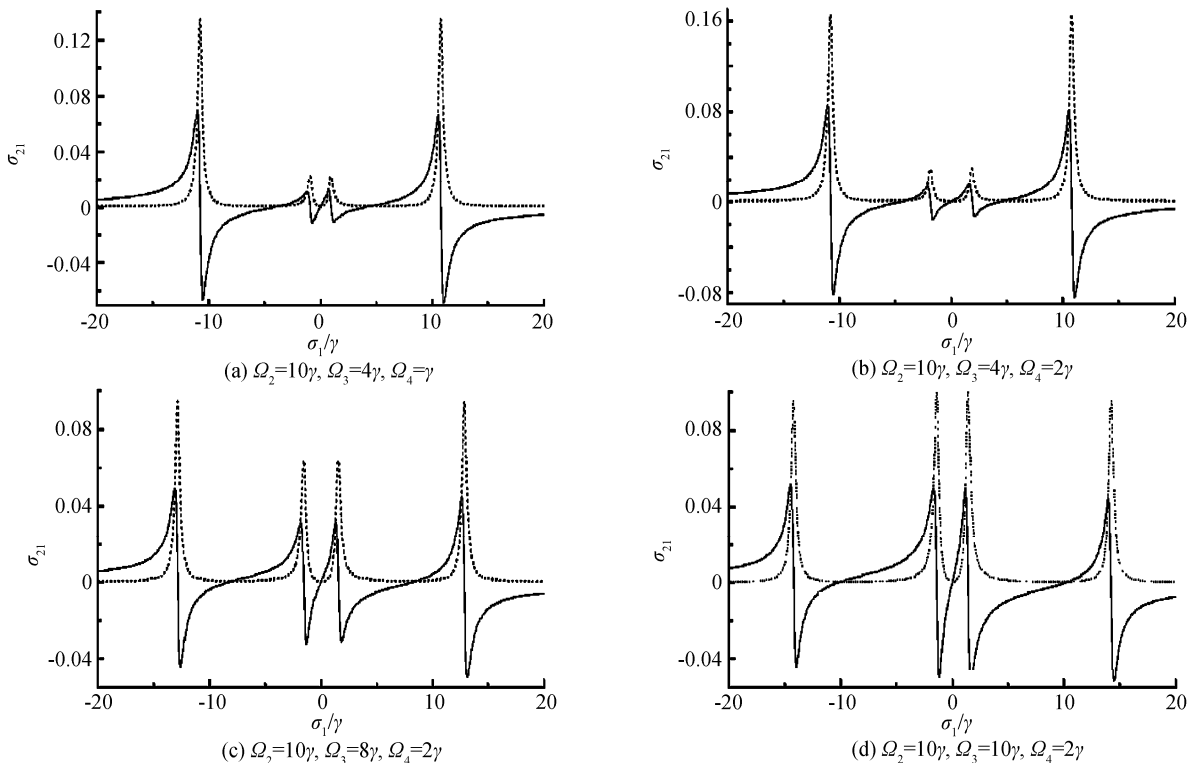


图 4  $\sigma_{21}$  的虚部随探测光失谐量变化曲线  
 Fig. 4 The imaginary parts for  $\sigma_{21}$  versus the probe detuning  $\delta_1$

$\Omega_2/\Omega_3$  比值不变), 吸收谱中吸收峰之间的间隔变窄, 而且透明程度也随之降低.

当四个光场同时作用于原子介质时, 呈现 M 型五能级原子系统, 此时出现的吸收线型如图 5 虚线部分. 由于光场  $\Omega_4$  作用, 破坏了原来的缀饰原子态, 使

吸收机制发生了新的变化. 由图 5 中  $\text{Im}\sigma_{21}$  曲线看到, 吸收谱线出现了四峰结构, 特别是在探测场共振  $\delta_1 = 0$  附近, 重现 EIT, 吸收曲线中共呈现了三个 EIT 窗口. 从图中看出吸收峰的高度和吸收峰间距可以通过改变驱动场的拉比频率来调



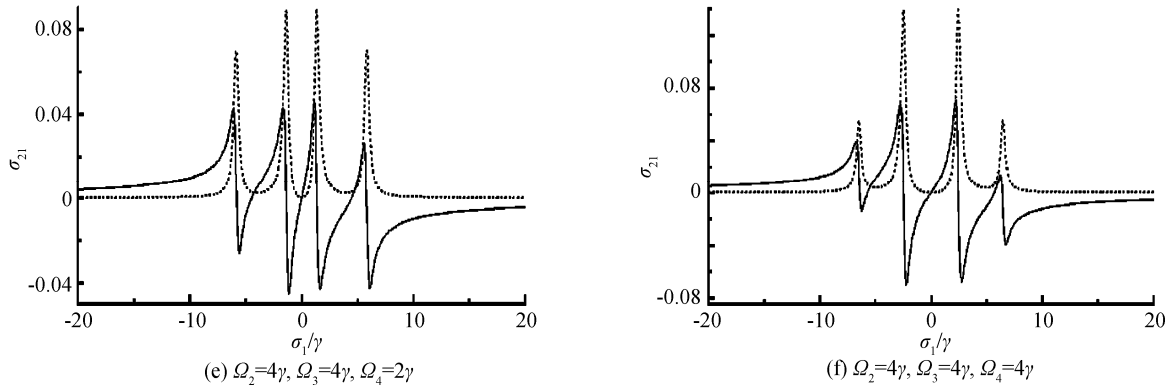


图 5  $\sigma_{21}$  的实部(实线)及其虚部(虚线)随探测光失谐量变化曲线

Fig. 5 The real parts and imaginary parts for  $\sigma_{21}$  versus the probe detuning  $\delta_1$

节. 例如图 5(a) 和 5(b),  $\Omega_4$  大小的作用决定了中央 EIT 窗口的宽度, 当  $\Omega_4$  增加时, 中央 EIT 窗口的宽度增加, 中央两峰间距增大. 另一方面, 如图 5(d)、(e)、(f), 四峰高度由  $\Omega_2$ ,  $\Omega_3$  和  $\Omega_4$  决定, 如图 5(b) 和 (c), 当  $\Omega_3 < \Omega_2$  中央两峰低于旁边两峰, 随着  $\Omega_3$  的增加, 中央两峰高度增加; 当  $\Omega_3 \geq \Omega_2$ , 中央峰高于两边峰高度; 当各拉比频率减小时, 各吸收峰间距缩小.

最后考虑 M 型五能级原子系统对探测光的色散情况. 考察图 5 中各图实线部分  $\text{Re}\sigma_{21}$  曲线. 从图中看出, 在每个 EIT 窗口, 色散曲线都是正常色散, 并发现当透明窗口越窄折射率越大, 此时将获得无吸收高折射率. 另一方面, 由于在色散介质中相速度和群速度是不同的, 群速度表达式为

$$v = \frac{c}{n_g} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c \sqrt{1 + \text{Re}[\chi_p]}}{1 + (\omega \frac{d\text{Re}[\chi_p]}{d\omega})/2} \approx \frac{c}{1 + (\omega \frac{d\text{Re}[\chi_p]}{d\omega})/2} \quad (7)$$

要使一个光脉冲在介质中传播时以远小于光速的速度传播, 由上式要求  $\frac{d\text{Re}[\chi_p]}{d\omega} > 0$ , 即满足正常色散关系. 如图 5(a)~(f) 中各图的实线所示, 在 EIT 窗口附近是正常色散关系 ( $\frac{d\text{Re}[\chi_p]}{d\omega} > 0$ ), 并且随着控制场强度减小 EIT 窗口也减小, 使得  $d\text{Re}[\chi_p]/d\omega$  值增大, 色散增强, 即可以通过细窄的 EIT 窗口获得慢群速度光脉冲传播.

### 3 结论

本文讨论了多能级原子的介质在多控制场作用下对于探测场的吸收和色散性质. 结果显示, 控制场拉比频率发生变化时, 吸收谱表现出不同的线型. 不同的控制场强度导致不同的 EIT 窗口. 在本文中的多能级共振原子系统中, 在探测场共振线中心处 ( $\delta_1 = 0$ ) 观察到电磁感应透明或吸收有一定的规律

性, 即  $n$  能级系统中 ( $n=3, 4, 5$ ), 当  $n$  为奇数时, 在探测场共振线中心观察到透明. 当  $n$  为偶数时, 在探测场共振线中心观察到吸收. 特别是四个光场作用下出现多透明窗口, 控制场拉比频率越大, 透明窗口越平坦, 透明程度越高, 而折射率减小. 当减小控制场拉比频率, 得到较窄透明窗口同时色散增强, 可获得无吸收高折射率. 这种同光速减慢相联系着的多透明窗现象在量子信息领域有着潜在应用价值.

### 参考文献

- [1] GOZZINI S, CARTALEVA S, LUCCHESINI A, *et al.* Coherent population trapping and strong on the D<sub>1</sub> line of potassium[J]. *European Physical Journal D*, 2009, **53**(2): 153-161.
- [2] SOKOLOV A V, MATVEEV A N, SAMOKOTIN A Y, *et al.* Coherent population trapping resonances in the presence of the frequency-phase noises of an exciting filed [J]. *Quantum Electronics*, 2009, **39**(5): 449-454.
- [3] HAU L V, HARRIS S E, DUTTON Z, BEHROOZI C H. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas [J]. *Nature*, 1999, **39**: 594-598.
- [4] FLEISCHHAUER M, IMAMOGLU A, MARANGOS J P. Electromagnetically induced transparency[J]. *Rev Mod Phys*, 2005, **77**: 633.
- [5] LI Fu-li, Xiong Han, ZUBAIRY M S. Coherence-induced entanglement[J]. *Phys Rev A*, 2005, **72**: 010303.
- [6] THOMMEN Q, MANDEL P. Electromagnetically induced left-handedness optically excited four level atomic media[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **96**: 053601.
- [7] SCHWINDT P D D, KNAPPE S, SHAH V, *et al.* Chip-scale atomic magnetometer[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **85**: 6409.
- [8] WANG Hai, GOORSKEY D, XIAO Min. Enhanced Kerr nonlinearity via atomic coherence in a three-level atomic system[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **87**: 073601.
- [9] LIU C, DUTTON Z, BEHROOZI C H, *et al.* Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses[J]. *Nature*, 2001, **409**: 490-493.
- [10] VAN der WAL C H, EISAMAN M D, ANDRE A R L, *et al.* Atomic memory for correlated photon states[J]. *Science*, 2003, **301**: 196.
- [11] DUTTON Z, HAU L V. Storing and processing optical information with ultraslow light in Bose-Einstein condensates[J]. *Phys Rev A*, 2004, **70**: 053831.
- [12] KANG H, HERNANDEZ G, ZHU Yi-fu. Slow-light six-wave mixing at low light intensities [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, **93**: 073601.

- [13] WANG Fei, ZHENG Yang-dong, LI Chun-fei. Analysis of the characteristics of all-optical switch based on the SPM and XPM [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**:790-795.  
王菲,郑仰东,李淳飞. 基于自相位调制和交叉相位调制的全光开关特性研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**:790-795.
- [14] SUMANTA D, AGARWAL G S. Photon-photon correlations as a probe of vacuum-induced coherence effect[J]. *Phys Rev A*, 2008, **77**:033850.
- [15] ZHANG Li-ying, LIU Zheng-dong. The absorption and dispersion to the probe in the Y-type four-level atom system[J]. *Acta Phys Sin*, 2005, **54**:3641-3645.  
张丽英,刘正东. Y型四能级原子系统对探测场的吸收和色散[J]. *物理学报*, 2005, **54**:3641-3645.
- [16] CHEN Jun, LIU Zheng-dong, YOU Su-ping. The hole burning and optical bistability of quasi- $\Delta$ -type four-level atom system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**:6410-6414.  
陈峻,刘正东,尤素萍. 准  $\Delta$  型四能级原子系统中的烧孔和光学双稳现象[J]. *物理学报*, 2006, **55**:6410-6414.
- [17] ZHENG Jun, LIU Zheng-dong, ZENG Fu-hua, *et al.* Left-handedness in a inverted Y-type four-level atomic system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(7):4219-4223.  
郑军,刘正东,曾福华,等. 倒 Y 型四能级原子的左手效应[J]. *物理学报*, 2008, **57**(7):4219-4223.
- [18] XU Wei-hua, GAO Jin-yue. Absorption mechanism in a four-level system[J]. *Phys Rev A*, 2003, **67**:033816.
- [19] LI Gao-xiang, LI Fu-li, ZHU Shi-yao. Quantum interference between decay channels of a three-level atom in a multilayer dielectric medium[J]. *Phys Rev A*, 2001, **64**:013819.
- [20] OTTAVIANI C, REBIC S, VITALI D, *et al.* Cross phase modulation in a five - level atomic medium; Semiclassical theory [J]. arXiv:physics/0510200 v2(2006).

## Impact of Controlling Fields on the Absorption-dispersion Properties in an M-type Atomic System

ZHENG Jun<sup>a,c</sup>, LIU Zheng-dong<sup>a,b</sup>, ZHAO Shun-cai<sup>a,b</sup>

(a, *Institute of Modern Physics*; b, *Engineering Research Center for Nanotechnology*;

c, *School of Science, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

**Abstract:** The impact on the absorption-dispersion properties in an M- type five-level atomic system interacting with external fields system are discussed by using numerical analysis. It is shown that changing the control fields can influence the absorption-dispersion properties regularly. The electromagnetically induce transparency windows can be obtained if the parameters are taken appropriately. The number of transparency windows is proportion to the number of control fields and the width of the transparency windows is related to Rabi frequencies. It is found that the electromagnetically induce transparency windows in the system narrow gradually as decreasing control fields Rabi frequencies while the dispersion of medium would be enhanced and slow-light would be realized.

**Key words:** Quantum interference; Electromagnetically induced transparency; Slow-light; Control



**ZHENG Jun** was born in 1964. She pursuing the Ph. D. degree, and works as a physics teacher at Science School, Nanchang University. Her major research interests focus on quantum optics.



**LIU Zheng-dong** was born in 1948. Now he is a professor and Doctoral Supervisor of Nanchang University. From 1992, he has received the Government Special Allowance awarded by the State Council of China. His research interests focus on quantum optics and laser physic.