

文章编号: 0253-2239(2006)09-1419-5

准 Λ 型四能级原子系统在弱场中的增益及电磁感应透明*

张丽英^{1,2} 刘正东¹ 陈 峻¹

(¹ 南昌大学近代物理研究所, 南昌 330047)
(² 绍兴文理学院物理系, 绍兴 312000)

摘要: 利用数值模拟的方法讨论了稳态下准型四能级原子与两光场相互作用系统对探测场的增益以及与粒子数布居规律之间的关系。结果表明即使在场较弱的情况下,随着探测场和它所对应能级间跃迁频率失谐量的变化,系统在所有拉比频率相位为零时对探测光总会同时呈现三个增益峰和两个固定的产生电磁感应透明(EIT)现象的位置,并且当系统呈现电磁感应透明的同时,探测场所对应的高能级粒子数为零;而拉比频率相位的变化则会导致系统对探测光既有吸收也有增益,并且也呈现电磁感应透明现象,但仅仅相位的变化并不影响高能级的粒子数分布。值得注意的是该结果均在精确求解下所得。

关键词: 量子光学; 非线性效应; 电磁感应透明; 弱光; 增益

中图分类号: O437 文献标识码: A

Electromagnetically Induced Transparency of Quasi- Λ -Type Four-Level Atom System at Low-Light Levels

Zhang Liying^{1,2} Liu Zhengdong¹ Chen Jun¹

(*Institute of Modern Physics, Nanchang University, Nanchang 330047*)
(*2 Department of Physics, Shaoxing College of Arts and Sciences, Shaoxing 312000*)

Abstract: The probe field gain and its relation with the population rule in high level in the quasi- Λ -type four-level atom system interacting with two light fields at low-light levels under stable state are numerically investigated. It is found that, even for low-light level, with the variation of probe field and the relevant frequency detuning of inter-level transition, the system always displays three gain peaks for probe field simultaneously and two fixed positions where the electromagnetically induced transparency (EIT) is observed, when all phases of Rabi frequencies are zero. When the system displays EIT, the probe field related population in the high level is zero. When the phase of Rabi frequency is changed, gain and absorption for the probe field occur, EIT phenomenon also exists, but the phase change cannot influence the population in the high level alone. It is worth noting that all results are achieved without any approximation.

Key words: quantum optics; nonlinear effect; electromagnetically induced transparency (EIT); low-light levels; gain

1 引 言

近年来,由于量子干涉效应而产生的电磁感应透明(EIT)^[1]现象在量子光学和激光物理领域引起国内外研究学者的广泛兴趣。其原因是当系统发生电磁感应透明现象时,介质的吸收和色散以及其他性质相应都会发生改变,所以可利用电磁感应透明

来控制介质的光学性质^[2~4]。

在场与原子的相互作用领域中人们研究得最多的要属两激光场与三能级原子相互作用系统,模型主要有 Λ 型、V型和级联型^[5~7],四能级原子系统模型目前主要有两个或三个驱动场的级联型、N型、Y型和双型等等^[8~15]。其中不少文献在求解中做

* 国家自然科学基金(60278016;10464002)资助课题。

作者简介: 张丽英(1978~),女,山东人,硕士研究生,主要从事激光物理、量子光学方面的研究。

导师简介: 刘正东(1948~),男,江西南昌人,教授,博士生导师,现为南昌大学近代物理研究所所长,主要从事量子光学、激光物理方面的研究。E-mail: lzdgroup@ncu.edu.cn

收稿日期: 2005-11-14; 收到修改稿日期: 2006-04-12

了各种各样的近似,例如文献[8,11]在求解过程中做了对角元基本不随时间变化的近似或者在探测场为弱光的条件下将吸收系数仅仅计算到探测场强度一阶项。而研究表明无近似的结果将给出更为丰富的物理现象,如文献[14,15]。本文在没做任何类似文献[8,11]处理的情况下研究了准 Λ 型四能级原子与两光场相互作用系统在稳态时探测场增益的变化问题以及与粒子数布居规律之间的关系。

2 物理模型

物理模型如图 1 所示^[16],上能级 $|3\rangle$ 、 $|4\rangle$ 的能量分别为 $\hbar\omega_3, \hbar\omega_4$,两个基态近简并能级 $|2\rangle$ 、 $|1\rangle$ 的能量分别为 $\hbar\omega_2, \hbar\omega_1$,从能级 $|3\rangle$ 向能级 $|4\rangle$ 、 $|2\rangle$ 、 $|1\rangle$ 的跃迁分别由相干场 ω_{02} 和 ω_{01} 驱动;这里将光场 ω_{02} 作为探测场, ω_{01} 作为耦合驱动场;能级 $|4\rangle$ 到 $|2\rangle$ 、 $|1\rangle$ 的跃迁是偶极禁戒的,并且仅考虑能级 $|3\rangle$ 到 $|2\rangle$ 、 $|1\rangle$ 和 $|4\rangle$ 的自发衰变。

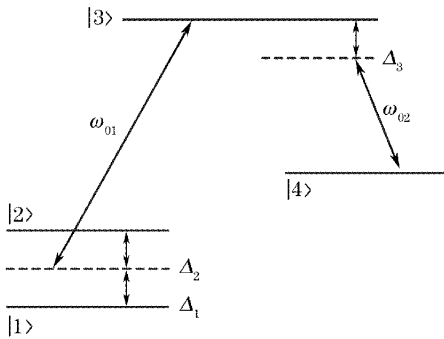


图 1 两光场驱动的四能级系统能级图

Fig.1 Schematic diagrams of four-level system driven by two pumping fields

文献[16]为使问题讨论简化,将密度矩阵方程组中的拉比频率皆用实数表示,但 Kosachiov 等^[1]指出:在闭合系统中原子的动力学行为和稳态性质与跃迁相关相位有关。例如:在非闭合系统中无论激光的相位和强度如何,只要满足多光子共振条件,暗态就会存在,但在闭合系统中若相位取值不当,仅满足多光子共振条件,暗态则不会存在。考虑到本系统是闭合系统,故研究该系统中原子的稳态性质需要考虑拉比相位变化所带来的影响。注意本文在求解过程中没有作任何类似文献[8,11]的处理。本文依据实际情况推得复数密度矩阵方程组如下:

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{11} &= \gamma_1 \rho_{33} + (-i\Omega_1^* \rho_{13} + H. c), \\ \dot{\rho}_{12} &= i[(\Delta_1 - \Delta_2)\rho_{12} + \Omega_2 \rho_{13} - \Omega_1^* \rho_{32}], \\ \dot{\rho}_{13} &= -\frac{1}{2}(\gamma_3 + \gamma_1 + \gamma_2)\rho_{13} + i\Omega_1^* (\rho_{11} - \rho_{33}) + \\ & \quad i(\Omega_2^* \rho_{12} + \Delta_1 \rho_{13} + \Omega_3^* \rho_{14}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{14} &= i[(\Delta_1 - \Delta_3)\rho_{14} + \Omega_3 \rho_{13} - \Omega_1^* \rho_{34}], \\ \dot{\rho}_{22} &= \gamma_2 \rho_{33} + (-i\Omega_2^* \rho_{32} + H. c), \\ \dot{\rho}_{23} &= -\frac{1}{2}(\gamma_3 + \gamma_1 + \gamma_2)\rho_{23} + i\Omega_2^* (\rho_{22} - \rho_{33}) + \\ & \quad i(\Omega_1 \rho_{21} + \Delta_2 \rho_{23} + \Omega_3^* \rho_{24}), \\ \dot{\rho}_{24} &= i[(\Delta_2 - \Delta_3)\rho_{24} + \Omega_3 \rho_{23} - \Omega_2^* \rho_{34}], \\ \dot{\rho}_{33} &= -(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)\rho_{33} + \\ & \quad (i\Omega_1^* \rho_{31} + i\Omega_2^* \rho_{32} + i\Omega_3^* \rho_{34} + H. c), \\ \dot{\rho}_{34} &= -\frac{1}{2}(\gamma_3 + \gamma_1 + \gamma_2)\rho_{34} - i\Omega_3 (\rho_{44} - \rho_{33}) - \\ & \quad i(\Omega_1 \rho_{14} + \Omega_2 \rho_{24}) - i\Delta_3 \rho_{34}, \end{aligned}$$

上述满足关系式 $\rho_{11} + \rho_{22} + \rho_{33} + \rho_{44} = 1$ 。其中,失谐量 $\Delta_1 = \omega_3 - \omega_1 - \omega_{01}, \Delta_2 = \omega_3 - \omega_2 - \omega_{01}, \Delta_3 = \omega_3 - \omega_4 - \omega_{02}; \Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ 分别是相干场驱动能级向能级 $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ 和 $|4\rangle$ 跃迁的拉比频率,其定义为

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= \hbar^{-1} E_1 \boldsymbol{\mu}_{31} \cdot \mathbf{e}_1, \\ \Omega_2 &= \hbar^{-1} E_1 \boldsymbol{\mu}_{32} \cdot \mathbf{e}_2, \\ \Omega_3 &= \hbar^{-1} E_2 \boldsymbol{\mu}_{34} \cdot \mathbf{e}_3 \end{aligned}$$

式中 $\boldsymbol{\mu}_{31} = \langle 3 | -e\mathbf{r} | 1 \rangle, \boldsymbol{\mu}_{32} = \langle 3 | -e\mathbf{r} | 2 \rangle, \boldsymbol{\mu}_{34} = \langle 3 | -e\mathbf{r} | 4 \rangle$,分别为能级 $|3\rangle$ 向能级 $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ 和 $|4\rangle$ 跃迁的电偶极矩孟凶,式中 $E_{1,2}$ 和 $\mathbf{e}_{1,2}$ 分别是两个驱动场的复振幅和偏振方向矢量。 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 为能级 $|3\rangle$ 向能级 $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ 和 $|4\rangle$ 跃迁的自发辐射速率。

3 数值模拟分析

本文在数值计算中以自发辐射系数为单位,并且取 $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 1, \Omega_1 = \Omega_2, \Delta_1 = 2, \Delta_2 = -2$ ^[16]。令 $\Omega_1 = |\Omega_1| \exp(i\Phi_1), \Omega_2 = |\Omega_2| \exp(i\Phi_2), \Omega_3 = |\Omega_3| \exp(i\Phi_3)$,研究在外场较弱的情况下,场的变化对系统的影响。系统对探测光的增益或吸收性质可以从 ρ_{34} 的虚部表现出来。

首先令 $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = 0$,仅考虑场强的变化对探测场的影响。研究发现,在外场较弱的各种条件下, ρ_{34} 的虚部几乎全为负值,系统在大部分区域对探测光表现为增益。

耦合场的强度变化对探测场的增益影响如图 2 所示(为便于观察本图取虚部数值的相反数),探测场的拉比频率 $|\Omega_3| = 2$ 。可以观察到耦合场的拉比频率较小时,随着失谐量的变化系统对探测光总是有三个增益峰,其中有一个增益峰总是出现在失谐量为零时,即当探测场和它所对应的能级间跃迁频率发生共振的情形;另外两个增益峰的位置则受耦合场强度的影响:随着耦合场拉比频率的增大,两峰

之间的距离明显变远,高度逐渐降低,但降低的速度却没有中间的增益峰快;另外耦合场拉比频率较小的时候,中间的增益峰要比两侧的高,而当拉比频率大于一定的数值以后,中间的增益峰则要比两侧的高。从图 2 中还可以看到一个有趣的现象:只要满足条件 $\Delta_1 = 2, \Delta_2 = -2,$, 则无论耦合场的强度取值如何,在 $\Delta_3 = \pm 2$ 处 ρ_{34} 的虚部总是等于零,说明系统对探测场的吸收为零,出现了电磁感应透明现象。

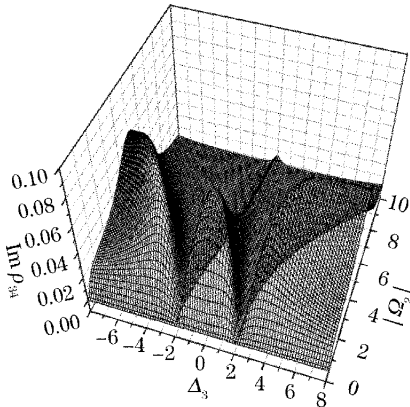


图 2 ρ_{34} 的虚部随探测场的失谐量 Δ_3 和耦合场强度的变化规律,其中参量 $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 1, \Delta_1 = 2, \Delta_2 = -2,$
 $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = 0, |\Omega_3| = 2$

Fig. 2 Imaginary parts for ρ_{34} versus detuning Δ_3 and the intensity of coupling laser field under the conditions $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 1, \Delta_1 = 2, \Delta_2 = -2,$
 $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = 0, |\Omega_3| = 2$

当系统的参量取值同图 2 完全相同时,比较能级 $|3\rangle$ 的粒子数布居(图 3)可看到能级 $|3\rangle$ 粒子数的布居规律和系统对探测光的增益规律基本相同:当系统对探测光的增益达到最大值时,探测场所对应

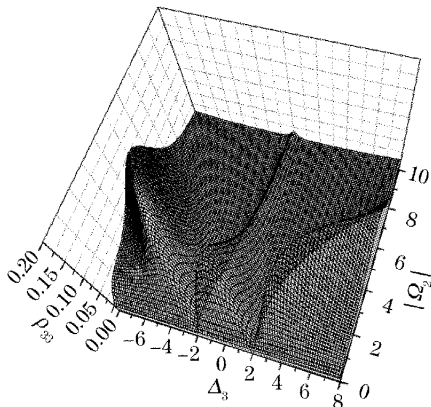


图 3 ρ_{33} 随探测场的失谐量 Δ_3 和耦合场的变化规律。
 参量取值同图 2

Fig. 2 Laws for ρ_{33} versus detuning Δ_3 and the intensity of coupling laser field. All the parameters are the same as in Fig. 2

高能级的粒子数同时达到最大值;当系统呈现电磁感应透明现象时,对应高能级的粒子数为零。可见系统的增益性质与探测场所对应高能级的粒子布居数密切相关:高能级的粒子数越多,因受激辐射而产生的光子数越多,反之则越少;当高能级的粒子数为零时,系统将不再有受激跃迁产生,所以对探测光表现为透明。

探测场拉比强度对探测光增益的影响要比耦合光对它的影响明显,这里仍然取 $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = 0$ (图 4 仍取虚部数值的相反数)。实际上系统在弱场下对探测光仍然有三个增益峰,中间的增益峰还是对应着场与原子间的跃迁频率共振时,随着耦合场强度的增大,峰的高度迅速增大后又迅速降低;两侧的增益峰逐渐远离系统的共振区域(为清晰起见图 4 中只取了失谐量较小的区域),峰值变化要比中心峰的慢;与图 2 中不同的是,在图 4 中当探测场的拉比频率 $|\Omega_3|$ 增大到 5 时,增益已经很弱, $|\Omega_3|$ 大于 5 的大片区域系统基本上对探测光透明;在 $\Delta_3 = \pm 2$ 处系统对探测光的吸收仍然为零,呈现出电磁感应透明现象。

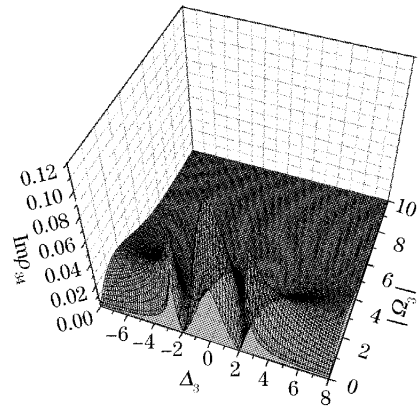


图 4 ρ_{34} 的虚部随探测场的失谐量 Δ_3 和探测场强度的变化规律。 $|\Omega_1| = |\Omega_2| = 1,$ 其他参量同图 2

Fig. 4 Imaginary parts for ρ_{34} versus detuning Δ_3 and the intensity of probe laser field under the condition of $|\Omega_1| = |\Omega_2| = 1$ and other parameters are the same as in Fig. 2

可以发现探测场强度的增大使得能级 $|\Omega_3|$ 的粒子数布居也发生了明显的变化,其变化规律与在相同条件下系统对探测光的增益规律仍然相似(图 5):随着探测场强度的增大,能级 $|\Omega_3|$ 的粒子数布居几率迅速增大后又迅速减小;在 $\Delta_3 = \pm 2$ 处出现电磁感应透明现象的位置,能级 $|\Omega_3|$ 的粒子数为零;在 $|\Omega_3|$ 大于 5 的大片区域内系统处于能级 $|\Omega_3|$ 上的粒子数几乎为零。

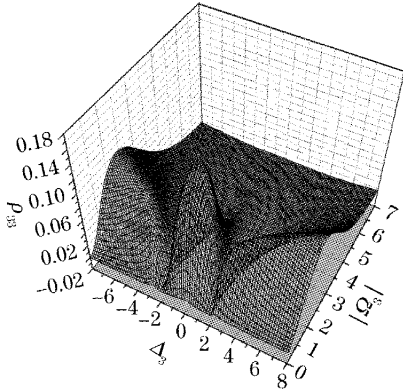


图 5 ρ_{33} 随探测场的失谐量 Δ_3 和探测场强度的变化规律。参量取值同图 4

Fig. 5 Laws for ρ_{33} versus detuning Δ_3 and the intensity of probe laser field. All the parameters are the same as in Fig. 4

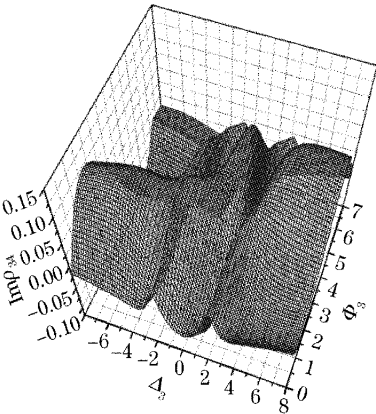


图 6 ρ_{34} 的虚部随探测场的失谐量 Δ_3 和耦合场拉比频率相位的变化规律。 $\Phi_1 = \Phi_2 = 0$, $|\Omega_3| = 1$, 其他参量同图 4

Fig. 6 Imaginary parts for ρ_{34} versus detuning Δ_3 and the Rabi frequency phase of the coupling field. $\Phi_1 = \Phi_2 = 0$, $|\Omega_3| = 1$, and other parameters are the same as in Fig. 4

图 6 显示探测场拉比相位 Φ_3 的变化导致系统对探测光的吸收展现出更加有趣的现象。这里令 $\Phi_1 = \Phi_2 = 0$, $|\Omega_3| = 1$, 其他参量取值与图 4 相同。可以发现由于探测场拉比频率相位的不同, 导致系统表现出来的性质差别很明显: 对于特定的拉比相位, 系统对探测光有些区域表现吸收, 有些区域表现增益, 而有些位置, 系统出现电磁感应透明现象; 一旦拉比相位发生改变, 系统的增益和吸收区间就会发生改变, 并且在 $\Delta_3 = \pm 2$ 处, 系统将不一定出现电磁感应透明现象。特别有趣的是当探测场拉比相位取值比较特殊, 如: $\Phi_3 = 0$ 时, 除在 $\Delta_3 = \pm 2$ 产生电磁感应透明现象外, 系统对探测光全表现为增益(前面已经讨论过); $\Phi_3 = \pi$ 时, 除在 $\Delta_3 = \pm 2$ 处的两个电

磁感应透明窗口外, 系统对探测光则全表现为吸收。

能级 $|3\rangle$ 的粒子数布居则与拉比相位无关, 只要外场的强度一定, 粒子数的分布就一定。如: 在图 6 的参量下, 能级 $|3\rangle$ 的粒子数布居规律同图 5 中 $|\Omega_1| = |\Omega_2| = 1$ 的情况一样。

研究还发现, 能级 $|1\rangle$ 和能级 $|2\rangle$ 之间的分裂程度以及外场与这两个能级之间频率的失谐大小与系统呈现电磁感应透明的两个固定位置密切相关。

4 结 论

本文运用密度矩阵方程组计算和讨论了稳态下准 Λ 型四能级原子与两光场相互作用系统对探测场的增益以及粒子数分布规律。结果表明, 系统在一定的参量下, 不管是驱动场还是探测场的大小发生改变, 系统对探测场总共有三个增益峰, 中间的增益峰总是出现在探测光与原子对应能级跃迁频率产生共振条件时; 同时还有两个呈现电磁感应透明的位置, 这两个位置与驱动场所对应能级间的频率失谐量和拉比相位有关, 当该失谐量一定且所有拉比相位皆取零时, 无论改变探测场还是驱动场的强度, 产生电磁感应透明现象的位置总是不变; 并且发现当系统出现电磁感应透明的时候, 探测场所对应的高能级粒子数分布为零; 而外场的拉比相位发生改变时, 曲线则会变形移动并出现吸收区, 但并不影响对应高能级的粒子数分布, 该分布只与系统拉比频率的大小有关。从上面所述可以看到本模型是一较强的增益模型, 出现强增益的原因主要是因为是在特定的条件下, 驱动场不断的作用使基态的粒子不断地被抽运到上能级 $|3\rangle$ 上, 这样当能级 $|3\rangle$ 的粒子向下跳跃时就会释放大量的光子, 从而表现为较强的增益现象。需要指出的是: 文中所有的拉比频率取值与自发辐射的量级相当, 即所有的结果都是在外场很弱的条件下所得, 并且本文在系统密度矩阵的求解过程中没做任何近似处理。

参 考 文 献

- 1 E. A. Korsunsky, N. Leinfellner, A. Huss *et al.*. Phase-dependent electromagnetically induced transparency [J]. *Phys. Rev. A*, 1999, **59**(3): 2302~2305
- 2 H. Wang, D. Goorskey, M. Xiao. Enhancement Kerr nonlinearity via atomic coherence in a three-level atomic system [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**(7): 073601-1~073601-4
- 3 H. Tao, W. J. Michael, Y. Makoto *et al.*. Enhanced Kerr nonlinearity for self-action via atomic coherence in a four-level atomic system [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **214**: 371~380
- 4 Zhang Hanzhuang, Gao Jinyue, Guo Xiuzhen *et al.*. Effect of finite bandwidths of light fields on inversion less light

- amplification and refractive index[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 1~8 (in Chinese)
- 张汉壮,高锦岳,国秀珍等. 光场的线宽对无粒子数反转光放大增益的影响[J]. *光学学报*, 1998, **18**(1): 1~8
- 5 Cao Zhuoliang, Guo Guangcan. Emission spectrum of a Λ -type three-level atom[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(8): 1045~1049 (in Chinese)
- 曹卓良,郭光灿, Λ 型三能级原子的辐射谱[J]. *光学学报*, 1998, **18**(8): 1045~1049
- 6 Fan Xijun, Zhang Junliang, Li Ping *et al.*. Open ladder-type three level noninversion lasing system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **29**(4): 327~331 (in Chinese)
- 樊锡君,张郡亮,李萍等. 开放的 ladder 型三能级无粒子数反转激光系统[J]. *中国激光*, 2002, **29**(4): 327~331
- 7 Fan Xijun, Tian Shufen, Zhang Yonglin. Lasing without inversion in an open V-type three-level system[J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, **26**(7): 608~612 (in Chinese)
- 樊锡君,田淑芬,张永林. 开放的 V 型三能级系统中的无粒子数反转激光[J]. *中国激光*, 1999, **26**(7): 608~612
- 8 S. N. Sandhya, K. K. Sharma. Atomic coherence effects in four-level systems; Doppler-free absorption within an electromagnetically-induced-transparency window [J]. *Phys. Rev. A*, 1997, **55**(3): 2155~2158
- 9 B. P. Hou, S. J. Wang, W. L. Yu *et al.*. Effect of vacuum-induced coherence on single- and two-photon absorption in a four-level Y-type atomic system[J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **69**(5): 053805-1~053805-6
- 10 Yang Suhui, Guo Xiuzhen, Wang Dong *et al.*. Electromagnetically induced two-photon transparency and absorption enhancement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **20**(3): 309~314 (in Chinese)
- 杨苏辉,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*, 2003, **20**(3): 309~314
- 11 C. Goren, A. D. Wilson-Gordon, M. Rosenbluh *et al.*. Sub-Doppler and subnatural narrowing of an absorption line induced by interacting dark resonances in a tripod system[J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **69**(6): 063802-1~063802-5
- 12 David Petrosyan, Gershon Kurizki. Photon-photon correlations and entanglement in doped photonic crystals[J]. *Phys. Rev. A*, 2001, **64**(2): 023810-1~023810-6
- 13 Liu Zhengdong, Wu Qiang. Electromagnetically induced transparency in a four-level atomic system driven by three coupled fields[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(9): 2970~2973 (in Chinese)
- 刘正东,武强. 被三个耦合场驱动的四能级原子系统的电磁感应透明[J]. *物理学报*, 2004, **53**(9): 2970~2973
- 14 Zhang Liying, Liu Zhengdong. Absorption and dispersion in probe laser in the four-level Y-type atom system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(8): 3641~3645 (in Chinese)
- 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**(8): 3641~3645
- 15 Zhang Liying, Liu Zhengdong, Chen Jun. The electromagnetically induced transparency in the Y-type four-level atom system at low light levels[J]. *Science in China Ser. G Physics, Mechanics & Astronomy*, 2005, **48**(5): 1~7
- 16 Li Yongfang, Zhang Xiangyang, Sun Jianfeng *et al.*. Study on the ac-Stark splitting in a four-level system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(4): 782~787 (in Chinese)
- 李永放,张向阳,孙建峰等. 四能级系统中的 ac-Stark 分裂研究[J]. *物理学报*, 2002, **51**(4): 782~787