

文章编号: 0253-2239(2007)05-0946-5

Eu³⁺:Y₂SiO₅ 晶体中电磁感应透明及群速度减慢研究*

梁卿昌¹ 王海华² 蒋占魁^{1,2}

(¹ 烟台大学光电信息科学技术学院物理系, 烟台 264005)
(² 吉林大学物理学院, 长春 130023)

摘要: 利用光与物质相互作用的密度矩阵方程及其数值解研究了 Eu³⁺:Y₂SiO₅ 晶体中一种 Λ 型的电磁感应透明(EIT)和群速度减慢(SGV),得到了探测场的透射率随着探测场的失谐与耦合场的拉比频率的变化关系。分析了自旋子能级非均匀线宽及光学跃迁非均匀线宽对电磁感应透明和群速度减慢的影响,这两个线宽的增加不同程度地抑制了电磁感应透明。根据浓度与非均匀线宽的关系发现中心透射率不是随着浓度的增加而单调变化,而是存在一个最佳浓度使电磁感应透明的效果更加明显。分析表明对某一耦合场强,光群速度存在一极小值。

关键词: 量子光学; 量子相干效应; 电磁感应光透明; 群速度减慢; 密度矩阵方程; Eu³⁺:Y₂SiO₅

中图分类号: O431.2 文献标识码: A

Investigation on Electromagnetically Induced Transparency and Slowing-Down of Group Velocity in Eu³⁺:Y₂SiO₅ Crystal

Liang Qingchang¹ Wang Haihua² Jiang Zhankui^{1,2}

(¹ Institute of Science and Technology for Opto-Electronic Information, Yantai 246005)
(² Institute of Physics, Jilin University, Changchun 130023)

Abstract: Electromagnetically induced transparency (EIT) and slowing-down of group velocity (SGV) in Eu³⁺:Y₂SiO₅ were investigated by using the density matrix equations of the interaction between the light and the matter and their numerical solutions. The relationship of the probe transmissivity with different probe detuning and coupling Rabi frequency was obtained. The influence of inhomogeneous line width on electromagnetically induced transparency and slowing-down of group velocity were analyzed. Electromagnetically induced transparency was restrained when increasing the inhomogeneous line width. The center transmission was not homogeneously change with the increase of ions-doped concentration. There is an optimal concentration which can make the electromagnetically induced transparent remarkable. It is evident that group velocity of the probe has a minimum value for a certain coupling field strength.

Key word: quantum optics; quantum coherent effect; electromagnetically induced transparency; slowing-down of group velocity; density matrix equation; Eu³⁺:Y₂SiO₅

1 引 言

十多年来,基于量子相干效应的诸多物理现象,包括电磁感应透明^[1~7]、无反转光放大^[8]、群速度减慢^[9]、非线性增强^[10]等,由于其在光信息存储^[11]、光计算^[12]、弱光非线性^[13,14]等方面潜在的应用价值而倍受人们关注。然而,到目前为止大多数的研究工作限于气态工作物质,使其在实际中的应用受到一定限制。

近几年来,人们开始转向固体材料的量子相干效应的研究^[15]。与气体材料相比,固体材料具有原子密度高、结构紧凑、无原子扩散等优点,因此易于制成器件。而在固体中实现量子相干效应的主要困难是非常宽的光学线宽和快的相干衰减时间。

B. S. Ham 等在 Pr³⁺:Y₂SiO₅ 晶体中观测到了电磁感应透明现象^[15],他们利用再抽运(Repumping)方法减少了非均匀光学跃迁线宽。

* 国家自然科学基金(10074020)资助课题。

作者简介: 梁卿昌(1977-),山东莱阳人,硕士研究生,主要从事稀土离子掺杂光学晶体的电磁感光透明方面的研究。
E-mail: lqccql@netease.com

导师简介: 蒋占魁(1936-),男,吉林长春人,教授,博士生导师,主要从事激光光谱学和量子光学方面的研究。
E-mail: jzk@mail.jlu.edu.cn

收稿日期: 2006-08-08; 收到修改稿日期: 2006-09-19

2002 年 A. V. Turukhin 等^[16]在同一种晶体中测量出光群速度减慢到 45 m/s, E. Kuznetsova 等给出了固体中量子相干效应的一般理论^[17]。

本文利用光与物质相互作用的半经典理论,分析了 $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 晶体电磁感应透明和群速度减慢现象,讨论了它们与耦合场强度、激光线宽、非均匀加宽、掺杂浓度等的关系。本文主要目的是探讨各种实验参量对电磁感应透明和群速度减慢的影响,为寻求最佳实验条件提供科学依据。

2 理论模型

理论模型采用的能级系统为图 1 所示的 Λ 模型。 7F_0 是 Eu^{3+} 的基态,它有三个简并的超精细能级($\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$)或称自旋子能级; 5D_0 是 Eu^{3+} 的一个激发态,也有三个简并的超精细能级。 ω_p 为弱探测场频率, ω_c 为强耦合场频率, ω_r 为再抽运光的频率。再抽运光的作用是避免由于 ω_p, ω_c 的光学抽运产生的下能级($\pm 1/2, \pm 3/2$)的布居抽空,它不参与相互作用的密度矩阵,而只影响非均匀光学线宽,即光学跃迁的非均匀加宽是由激光线宽决定。 Λ 型三能级原子在相互作用绘景中的相互作用

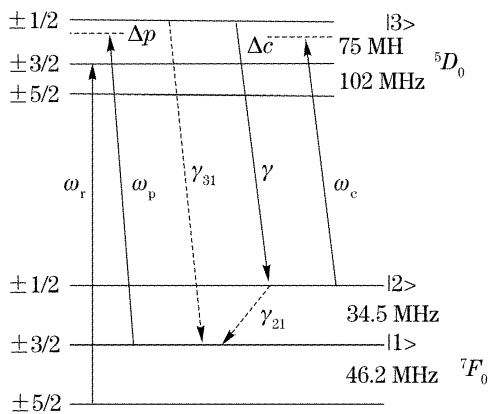


图 1 $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 的能级结构

Fig. 1 Energy level diagram of $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$

哈密顿量为

$$H_1 = \hbar(\Delta_p - \Delta_c) |2\rangle\langle 2| + \hbar\Delta_p |3\rangle\langle 3| - (\hbar G_p |3\rangle\langle 1| + \hbar G_c |3\rangle\langle 2| + \text{H. C.}), \quad (1)$$

其中, 1, 2, 3 分别表示从低到高的三个能级, Δ_p, Δ_c 分别是探测场和耦合场的失谐量。

G_p, G_c 分别为探测场与耦合场的拉比频率, 定义为

$$G_p = \mu_{13} E_p / (2\hbar), \quad (2a)$$

$$G_c = \mu_{23} E_c / (2\hbar), \quad (2b)$$

其中 μ_{ij} 是 Eu^{3+} 能级 i 和 j 之间的电偶极矩, E_p 和 E_c 分别是探测场与耦合场的强度。根据光与物质相互作用的密度矩阵理论^[17], 考虑到布居数弛豫速率 Γ 及跃迁弛豫速率 γ_{ij} , 该 Λ 型密度矩阵元的运动方程可以由密度矩阵的主方程

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar} [H, \rho] - \frac{1}{2} \{\Gamma, \rho\}, \quad (3)$$

表示为

$$\dot{\rho}_{11} = \Gamma_{21}(\rho_{22} - \rho_{11}) + \Gamma_{31}\rho_{33} + iG_p(\rho_{31} - \rho_{13}), \quad (3a)$$

$$\dot{\rho}_{22} = -\Gamma_{21}\rho_{22} + \Gamma_{32}\rho_{33} + \Gamma_{21}\rho_{11} + iG_c(\rho_{32} - \rho_{23}), \quad (3b)$$

$$\dot{\rho}_{33} = -(\Gamma_{31} + \Gamma_{32})\rho_{33} - iG_p(\rho_{31} - \rho_{13}) - iG_c(\rho_{32} - \rho_{23}), \quad (3c)$$

$$\dot{\rho}_{21} = [-\gamma_{21} + i(\Delta_p - \Delta_c + \Delta\omega_{21})]\rho_{21} - iG_p\rho_{23} + iG_c\rho_{31}, \quad (3d)$$

$$\dot{\rho}_{31} = [-\gamma_{31} + i(\Delta_p + \Delta\omega_{31})]\rho_{31} - iG_p(\rho_{33} - \rho_{11}) + iG_c\rho_{21}, \quad (3e)$$

$$\dot{\rho}_{32} = [-\gamma_{32} + i(\Delta_c + \Delta\omega_{31} - \Delta\omega_{21})]\rho_{32} - iG_p\rho_{23} + iG_c\rho_{31}, \quad (3f)$$

$$\dot{\rho}_{ij} = \dot{\rho}_{ji}^*, \quad (3g)$$

其中 $\Delta\omega_{31}, \Delta\omega_{21}$ 分别为 $|3\rangle$ 到 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 到 $|1\rangle$ 的原子跃迁频率与非均匀线宽中心的偏移量。 ρ_{31} 对于探测场的拉比频率的一级近似解为

$$\rho_{31} = \frac{-iG_p}{C} \frac{1}{2B} \left[-(\gamma_{21} + i\Delta_p - i\Delta_c + i\Delta\omega_{21})(4A\gamma T_{21} + 2G_c^2\gamma + \frac{G_c^2}{\gamma - i(\Delta\omega_{31} - \Delta\omega_{21} + \Delta_c)})4\gamma A\Gamma_{21} \right], \quad (4)$$

ρ_{31} 可分成实部和虚部, 即

$$\rho_{31} = \chi' + i\chi'', \quad (5)$$

χ' 代表探测场色散, χ'' 代表探测场吸收。其中,

$$A = [\gamma^2 + (\Delta_c + \Delta\omega_{31} - \Delta\omega_{21})^2] / (2\gamma),$$

$$B = 4\gamma A\omega_{21} + \gamma G_c^2 (1 + 3\Gamma_{21}/\Gamma_{32}),$$

$$C = (\gamma + i\Delta_p + i\Delta\omega_{31})(\gamma_{21} + i\Delta_c + i\Delta_c + i\Delta\omega_{21}) + G_c^2,$$

这里已假设 $\gamma_{31} = \gamma_{32} = \gamma$ 及 $\Gamma_{12} = \Gamma_{21}$ 。考虑到掺稀土离子在晶体中的非均匀加宽 W_{inh}^i , 探测场的吸收则必须对非均匀线宽积分:

$$\chi'' = \text{Im} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\omega_{31}) f(\omega_{21}) \frac{2N\mu_{31}\rho_{31}}{\epsilon_0 E_p} d(\omega_{31}) d(\omega_{21}) \right], \quad (6)$$

其中 $\mu_{31}^2 = fe^2\hbar\lambda / (4\pi cm_e)$, e 为一个电子的电量, c

为真空中的光速, m_e 为一个电子的质量, f 是 1 ~ 3 能级的振子强度:

$$f(\omega_{ij}) = W_{inh}^j / \pi [\Delta\omega_{ij}^2 - (W_{inh}^j)^2]$$

为非均匀线加宽线型函数, 其线型假设为洛伦兹线型。

吸收系数

$$\alpha = k\chi'', \quad k = 2\pi/\lambda, \quad (7)$$

透射率

$$T = \exp(-\alpha L), \quad (8)$$

式中 L 是光通过样品的长度。

3 电磁感应透明的数值计算

由(4)式~(8)式可计算探测场经过晶体的透射率, 由文献[18~20]可知, 在 1.4 K 低温下, Eu 掺杂

原子数浓度为 0.1% 的晶体的各个参量由表 1 给出。

表 1 不同参量的值

Table 1 Value of different parameters

γ^{-1}/ms	477	λ/nm	578.879
$\Gamma_{31}^{-1}/\text{ms}$	2	$\gamma_{21}^{-1}/\text{h}$	2
$\Gamma_{21}^{-1}/\text{h}$	24	W_{inh}^{21}/kHz	100
f	1.2×10^{-8}	N/cm^{-3}	1.83×10^{19}

将表中数值代入(4)式~(8)式, 取值 $L=9$ mm, $W_{inh}^{31}=1$ MHz(激光线宽), 可以得出探测场透射率 T 与探测场失谐量 Δ_p 及耦合场拉比频率 G_c 的关系曲线, 如图 2(a)所示。图 2(b)给出了中心处($\Delta_p=0$)的透射率随着耦合光拉比频率的变化曲线。从图 2(b)可以看出, 耦合场的拉比频率由 300~1000 kHz 范围变化时, 探测场的透射率急剧上升, 耦合场拉比频率超过 1000 kHz 后, 透射率缓慢上升。

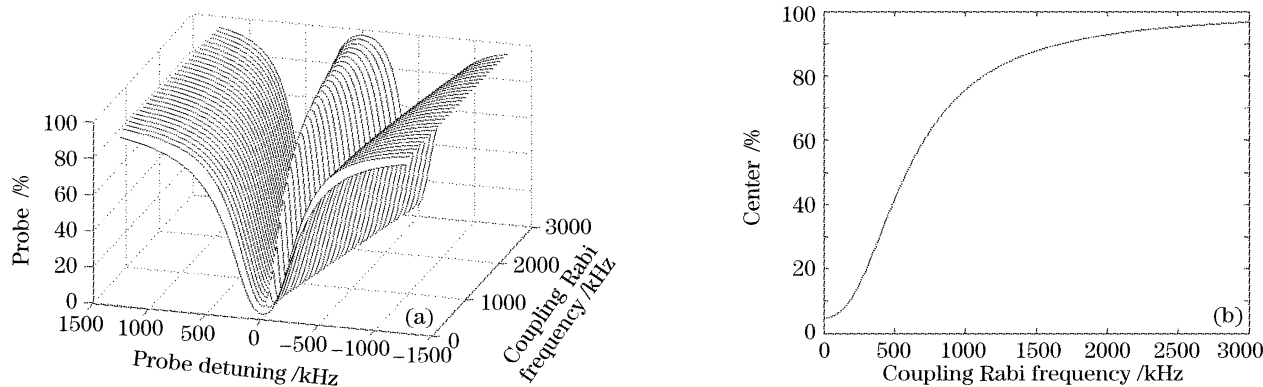


图 2 (a)不同相干场和探测场失谐下的探测场透射率, (b)相干场的强度对中心透射率的影响

Fig. 2 (a) Transmissivity of probe with different coherent fields and probe detuning, (b) influence of coherent field intensity on the center transmissivity

4 相关参量对电磁感应透明的影响

4.1 自旋子能级间的非均匀线宽对电磁感应光透明的影响

在其它参量不变的情况下, 只改变自旋子能级

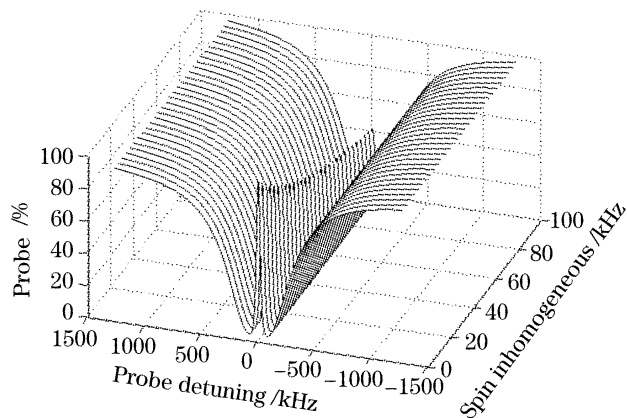


图 3 自旋子能级非均匀线宽对探测场透射率的影响

Fig. 3 Influence of inhomogeneous line width of the spin sublevels on the probe transmissivity

间的非均匀加宽 W_{inh}^{21} (0~100 kHz), 计算探测场透射率随 W_{inh}^{21} 的变化曲线, 结果如图 3 所示。激光线宽取值为 1 MHz, 耦合场的拉比频率取值为 500 kHz。由图中可以看出, 中心处的透射率随着 W_{inh}^{21} 的增加逐渐减少。

4.2 光学跃迁非均匀加宽对电磁感应光透明的影响

在其它参量不变的情况下, 只改变光学跃迁的非均匀加宽(在本模型中即改变激光线宽)的大小, 计算探测场透射率随激光线宽的变化曲线, 结果如图 4 所示。自旋子能级之间的非均匀线宽取值为 100 kHz, 耦合场的拉比频率取值为 500 kHz。由图中可以看出, 中心处的透射率随着激光线宽的增加而逐渐减少。

4.3 粒子掺杂浓度对电磁感应光透明的影响

根据文献[20]所给出的浓度与非均匀线宽实验数据, 晶体的光学非均匀加宽与粒子掺杂浓度呈线性关系, 忽略其它因素的影响, 可以得到不同 Eu^{3+}

掺杂原子数浓度的探测场的透射率与探测场失谐的关系,如图 5 所示。从图 5 可以看出,探测场的透射率并不随掺杂浓度增加而单调变化,而存在一个最佳浓度值使电磁感应透明现象更加明显。

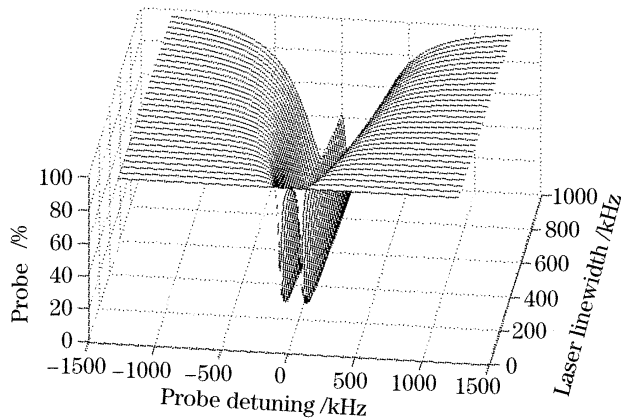


图 4 光学非均匀线宽对探测场透射率的影响

Fig. 4 Influence of optical inhomogeneous line width on the probe transmissivity

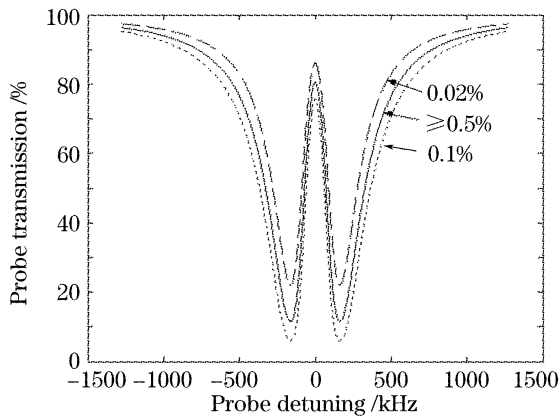


图 5 不同粒子掺杂原子数浓度对电磁感应透明的影响

Fig. 5 Influence of different ions-doped concentration on the electromagnetically induced transparency

5 群速度减慢的初步研究

在电磁感应透明区域,介质的折射率会急速变化,从而引起探测光的群速度减慢甚至停止。群速度的一般表达式为

$$V_g = \frac{c}{n + 0.5\nu(d\chi'/d\nu)}, \quad (9)$$

这里 $n \approx 1 + 0.5\chi'$, 所以只要算出 $d\chi'/d\nu$ 由(9)式即可得到光的群速度,利用(4)式~(7)式,计算了 χ' 与探测场失谐及耦合场拉比频率的关系,如图 6 所示。根据(9)式,分别计算了 $\Delta_p = 0$ 时不同的激光线宽与不同自旋子能级非均匀线宽的群速度 V_g 与耦合场拉比频率的关系曲线,结果如图 7、图 8 所示。由图 7 可以看出,随着激光线宽的增加,在达到最小值前同一耦合场强对应的群速度随激光线宽的增加而

增加,在达到最小值之后则按相反的规律变化。由图 8 可以看出,随着子能级之间的非均匀线宽的减少,群速度所能达到的最小值越来越小。

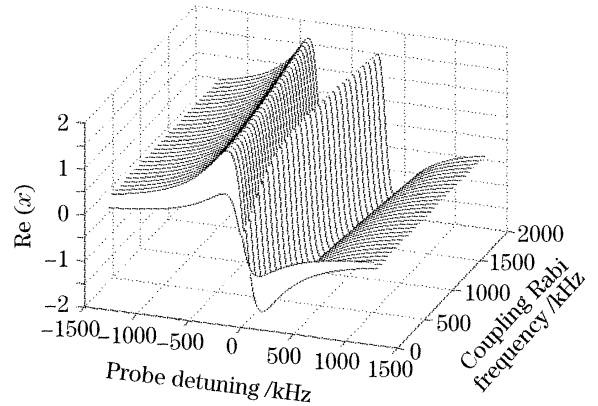


图 6 极化率的实部随着探测场失谐与相干光拉比频率的变化曲线

Fig. 6 Susceptibility χ' as a function of probe detuning Δ_p and coupling Rabi frequency

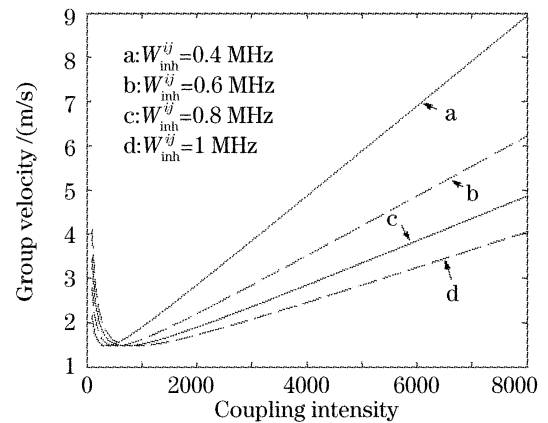


图 7 不同的非均匀线宽值对应的群速度随相干场强度的变化曲线

Fig. 7 Group velocity of different line width with different coupling intensity

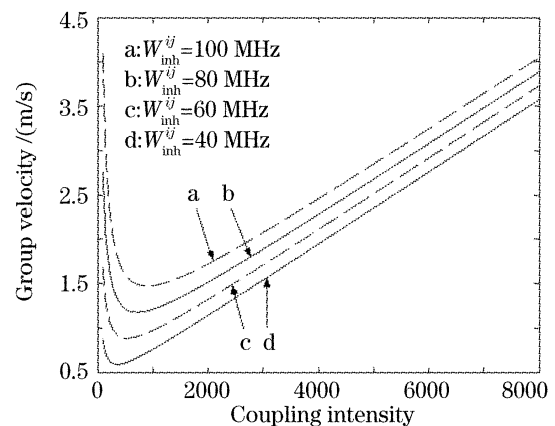


图 8 不同的自旋子能级非均匀线宽值对应的群速度随相干强度的变化曲线

Fig. 8 Group velocity of different line width of spin sublevels with different coupling intensity

6 结 论

本文以 $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 晶体为样品,理论上研究了一个 Λ 型的电磁感应透明和群速度减慢效应。研究表明,随着耦合驱动场强的增大,电磁感应透明越明显,而激光线宽和自旋子能级非均匀线宽都对电磁感应透明起抑制作用,且存在一个最佳粒子掺杂浓度使电磁感应透明现象最明显。计算了群速度与耦合驱动场的关系,通过定性分析,得到对某一耦合驱动场存在一群速度极小值的结果。并分析了激光线宽及自旋子能级非均匀线宽对光的群速度的影响,结果表明,随着激光线宽的增加,在达到最小值前同一耦合场强对应的群速度随激光线宽的增加而增加,在达到最小值之后则按相反规律变化;随着子能级之间的非均匀线宽的减少,群速度所能达到的最小值越来越小。

参 考 文 献

- 1 Min Xiao, Yongqin Li, Shaozheng Jin *et al.*. Measurement of dispersive properties of electromagnetically induced transparency in rubidium atoms[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(5): 666~669
- 2 Gong Shangqing, Xu Zhizhan. Nonlinear theory of electromagnetically induced transparency[J]. *Chin. J. Lasers*, 1996, **A23**(4): 311~314 (in Chinese)
龚尚庆,徐至展. 电磁感应光透明的非线性理论[J]. 中国激光, 1996, **A23**(4): 311~314
- 3 Gong Shangqing, Xu Zhizhan, Zhang Wenqi *et al.*. Influence of driving-field linewidth on electromagnetically induced transparency[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(3): 321~324 (in Chinese)
龚尚庆,徐至展,张文琦等. 相干驱动场的线宽对电磁感应透明的影响[J]. 光学学报, 1996, **16**(3): 321~324
- 4 J. R. Boch, E. Zekou, D. J. Fulton *et al.*. Experimental observation of a coherently induced transparency on a blue probe in a Doppler-broadened mismatched V-type system[J]. *Phys. Rev. A*, 1998, **57**(2): 1323~1328
- 5 Yang Suhui, Guo Xiuzhen, Wang Dong *et al.*. Electromagnetically induced two-photon transparency and absorption enhancement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **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, 2000, **20**(3): 309~314
- 6 Zhang Yanliang, Zhang Xunli, Sun Zhenrong *et al.*. Double electromagnetically induced transparency and ultra-narrow linewidth in Y-type energy level system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 563~567 (in Chinese)
张衍亮,张循利,孙真荣等. Y型四能级中的双电磁感应透明和超窄吸收[J]. 光学学报, 2004, **24**(4): 563~567
- 7 Dong Yabin, Zhang Junxiang, Gao Jiangrui. Quantum statistical property of radiation field in three-level electromagnetically induced transparency system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1271~1276 (in Chinese)
董雅宾,张俊香,郜江瑞. 三能级电磁感应透明中辐射场的量子统计特性[J]. 光学学报, 2005, **25**(9): 1271~1276
- 8 S. E. Harris, J. J. Macklin. Lasers without inversion: single-atom transient response[J]. *Phys. Rev. A*, 1989, **40**(7): 4135~4137
- 9 S. E. Harris. Pondermotive forces with slow light[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(19): 4032~4035
- 10 S. E. Harris. Laser without inversion: interference of life time-broadened resonances[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **62**(9): 1033~1036
- 11 O. Kocharovskaya, Y. Rostovtsev, M. O. Scully. Stopping light via hot atoms[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(4): 628~631
- 12 M. Fleischhauer, M. D. Lukin. Dark-state polaritons in electromagnetically induced transparency[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(22): 5094~5097
- 13 S. E. Harris, L. V. Hau. Nonlinear optics at low light levels[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(23): 4611~4614
- 14 M. D. Lukin, A. Imamoglu. Nonlinear optics and quantum entanglement of ultraslow single photons[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(7): 1419~1422
- 15 B. S. Ham, P. R. Hemmer, M. S. Shahriar. Efficient electromagnetically induced transparency in a rare-earth doped crystal[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **144**: 227~230
- 16 A. V. Turukhin, V. S. Sudarshanam, M. S. Shahriar *et al.*. Observation of ultraslow and stored light pulses in a solid[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(2): 023602-1~023602-4
- 17 E. Kuznetsova, O. Kocharovskaya, P. Hemmer *et al.*. Atomic interference phenomena in solids with a long-lived spin coherence[J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **66**(6): 063802-1~063802-13
- 18 R. W. Equall, Y. Sun, R. L. Cone. Ultraslow optical dephasing in $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **72**(14): 2179~2182
- 19 J. J. Longdell, M. J. Sellars, N. B. Manson. Demonstration of conditional quantum phase shift between ions in a solid[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(13): 13053-1~13053-4
- 20 F. Könz, Y. Sun, C. W. Thiel. Temperature and concentration dependence of optical dephasing, spectral-hole lifetime, and anisotropic absorption in $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ [J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **68**(8): 085109-1~085109-9