

掺杂稀土离子晶体中的电磁感应光透明现象

贾继奎^{1*}, 侯兰香²

(1. 枣庄学院 光电工程学院, 山东 枣庄 277160; 2. 枣庄学院 机电工程学院, 山东 枣庄 277160)

摘要:对在掺杂稀土离子晶体中实现电磁感应光透明进行了实验研究。首先,以 $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体为样品,用旋转波近似下的密度矩阵方程理论计算了探测场的吸收特性随 Er^{3+} 离子浓度的变化规律,结果表明:在探测场失谐 $\Delta p = 0$ 时,形成了一个对于探测光透明的窗口,从而在理论上论证了在掺杂稀土离子晶体中实现电磁感应光透明效应的可行性。设计了一个以 $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 晶体为样品的实验激发方案,吸收光谱显示,当温度为 6 K 时其在共振吸收峰处可形成一个完全透明的窗口,实现了在掺杂离子晶体中的电磁感应光透明。实验还分析了工作温度、耦合场失谐对探测光透过率的影响,结果显示:当样品温度上升到 15 K 时,透明窗口消失,耦合场的失谐量越大,透射率越小。

关键词:电磁感应光透明;晶体;掺杂;稀土离子

中图分类号: O431.2; O734 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20120504.0430

Electromagnetically induced transparency in crystals doped with rare-earth ions

JIA Ji-kui^{1*}, HOU Lan-xiang²

(1. College of Opto-electronic Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China)

* Corresponding author, E-mail: jiajikui@sina.com

Abstract: The Electromagnetically Induced Transparency (EIT) in crystals doped with rare-earth ions was researched. By taking a $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ crystal for a sample, the probe field absorption as a function of the concentration of Er^{3+} ions was calculated by using density matrix equations in rotating-wave approximation. It indicates that when the detuning of the probe field Δp is 0, the transparency window of a probe field is generated, which demonstrates the feasibility to achieve the EIT in crystals doped with rare-earth ions. Furthermore, an excitation scheme for $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ was performed, and it experimentally exhibits that when the temperature is 6 K, a 100% transparency window in the resonant absorption peak is formed in the absorption spectrum of

收稿日期:2012-02-21;修订日期:2012-05-23

基金项目:山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(No. 2008BS01021)

$\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$, and the EIT phenomenon in crystals doped with rare-earth ions is realized. In addition, the dependence of temperature and coupling field detuning on the EIT was presented. It is found that when the temperature increases to 15 K, the transparency window disappears, while the detuning of coupling field becomes larger and the transparency window gets smaller.

Key words: Electromagnetically Induced Transparency (EIT); crystal; doping; rare-earth ion

1 引言

激光与物质的量子相干效应研究是量子光学领域的一个研究热点。人们已在不同研究体系中展示了许多有趣的光学现象,例如,电磁感应光透明、无反转光放大、光群速度减慢、可逆光信息存储以及折射率增强等^[1-6]。从实验的角度考虑,在气体(如碱金属)热原子蒸汽和冷原子团等介质中进行实验更易取得成功,这主要是因为这些气体介质具有能级结构简单、退相干时间长等特点。但从实际应用方面考虑,结构紧凑、性能稳定并易于集成的固体材料更具有应用价值。不过,由于固体材料中普遍存在晶格振动等复杂的退相干机制,限制了激光诱导量子相干效应的实现和利用。

目前,只有几种掺杂晶体和半导体量子阱固体材料可应用于量子相干效应的研究。其中,由于掺杂稀土离子晶体具有良好的光学特性和相对简单的离子能级结构而获得广泛关注。人们已探讨了在掺杂稀土离子晶体中实现电磁感应光透明、量子非门、光群速度减慢、可逆光信息存储等不同量子相干效应的可行性。本文将重点介绍电磁感应光透明量子相关效应及在掺杂稀土离子晶体中实现此效应的研究工作。

2 理论模型

首先以 $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体为样品,从理论上分析在掺杂稀土离子晶体中实现电磁感应光透明效应以及离子浓度对实现电磁感应光透明的影响^[7]。如图1所示,建立一个与 $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体相关的三能级梯形模型,能级 $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ 和 $|3\rangle$ 分别对应 $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体3个能态 $^4\text{I}_{15/2}$ 、 $^4\text{I}_{13/2}$ 和 $^4\text{S}_{3/2}$ 的最低 Stark 能级; ω_p 和 ω_c 分别为探测场和耦合场

的频率; Δ_p 和 Δ_c 可表示为 $\Delta_p = \omega_{21} - \omega_p$ 和 $\Delta_c = \omega_{32} - \omega_c$,分别为探测场和耦合场的失谐量(ω_{ij} 为能级 $|i\rangle$ 和 $|j\rangle$ 之间的跃迁频率); Γ_{ij} 为从能级 $|i\rangle$ 和 $|j\rangle$ 的自发辐射弛豫项, γ_i 为能级 $|i\rangle$ 的非辐射弛豫项。

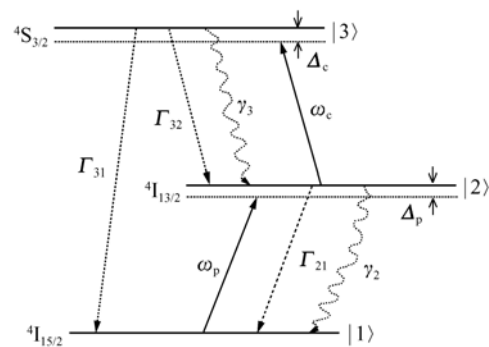


图1 $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体中的三能级梯形模型

Fig.1 Three level trapezoid model in $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ crystal

此模型在相互作用图像下的哈密顿量可表示为:

$$H = \hbar\Delta_p |2\rangle\langle 2| + \hbar(\Delta_p + \Delta_c) |3\rangle\langle 3| - \hbar(G_p |2\rangle\langle 1| + G_c |3\rangle\langle 2| + c.c.), \quad (1)$$

式中, G_p 和 G_c 为探测场和耦合场的拉比频率,定义为:

$$G_p = \frac{\mu_{12}E_p}{2\hbar}, \quad (2a)$$

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

式中, μ_{ij} 为三价 Er 离子能级 $|i\rangle$ 和 $|j\rangle$ 之间的电偶极矩, E_p 和 E_c 分别为探测场和耦合场的强度。在密度矩阵理论中,考虑离子能级的衰变,可得到:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar}[H_1, \rho] - \frac{1}{2}\{\Gamma, \rho\}, \quad (3)$$

式中: $\{\Gamma, \rho\} = \Gamma\rho + \rho\Gamma$, Γ 为弛豫项, ρ 为密度算

符。式(3)中矩阵元方程可表示为:

$$\begin{aligned}
 \dot{\rho}_{11} &= (\Gamma_{21} + \gamma_2)\rho_{22} + \Gamma_{31}\rho_{33} + iG_p^*\rho_{21} - iG_p\rho_{12}, \\
 \dot{\rho}_{22} &= -(\Gamma_{21} + \gamma_2)\rho_{22} + (\Gamma_{32} + \gamma_3)\rho_{33} - iG_p^*\rho_{21} + iG_p\rho_{12} + iG_c^*\rho_{32} - iG_c\rho_{23}, \\
 \dot{\rho}_{21} &= -(\gamma_{21} + i\Delta_p)\rho_{21} + iG_p(\rho_{11} - \rho_{22}) + iG_c^*\rho_{31}, \\
 \dot{\rho}_{31} &= -[\gamma_{31} + i(\Delta_p + \Delta_c)]\rho_{31} - iG_p\rho_{32} + iG_c\rho_{21}, \\
 \dot{\rho}_{32} &= -(\gamma_{32} + i\Delta_c)\rho_{32} + iG_c(\rho_{22} - \rho_{33}) - iG_p^*\rho_{31}, \\
 \rho_{ij} &= \rho_{ji}^*, \\
 \rho_{11} + \rho_{22} + \rho_{33} &= 1.
 \end{aligned} \tag{4}$$

γ_{ij} 为能级 $|i\rangle$ 和 $|j\rangle$ 间的相关弛豫项,可用下式表示:

$$\begin{aligned}
 \gamma_{21} &= \frac{1}{2}(\Gamma_{21} + \gamma_2), \\
 \gamma_{31} &= \frac{1}{2}(\Gamma_{31} + \Gamma_{32} + \gamma_3), \\
 \gamma_{32} &= \frac{1}{2}(\Gamma_{31} + \Gamma_{32} + \Gamma_{21} + \gamma_2 + \gamma_3).
 \end{aligned} \tag{5}$$

根据密度矩阵理论,探测场的吸收可用下式表示:

$$\chi'' = \text{Im}\left(\frac{2N\mu_{12}\rho_{21}}{\varepsilon_0 E_p}\right). \tag{6}$$

代入 $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体中的辐射参数,可获得方程(6)的数值解。从图2中可清楚地观察到探

测场的吸收在未加耦合场(图2(a))和加上耦合场(图2(b))时随晶体掺杂浓度的变化。耦合场可使晶体在原吸收峰处产生一个对探测场透明的窗口,但这个窗口随晶体掺杂离子浓度而发生变化。这种变化主要是由于晶体中的光谱强度参量及非辐射弛豫速率在不同的掺杂浓度下是不同的,所以,能级间的电偶极矩及能级寿命在不同的掺杂浓度下也要发生变化。因而,在矩阵方程中,掺杂离子的浓度是一个变量。通过对这组矩阵方程求数值解并对结果进行分析,可获得 $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体中探测场的吸收特性随不同 Er^{3+} 离子浓度的变化规律。

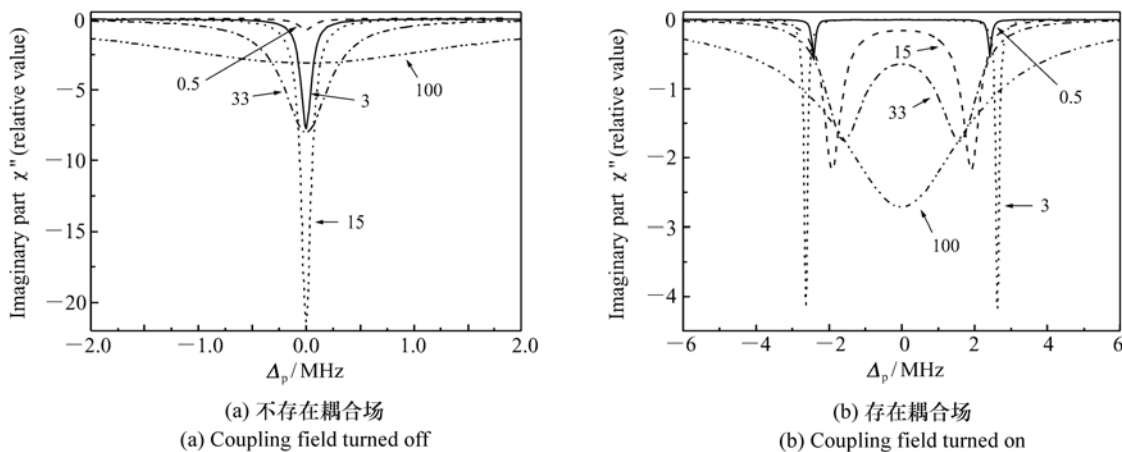


图2 不同 Er^{3+} 离子浓度的探测吸收光谱

Fig. 2 Probe absorption spectra for different concentrations of Er^{3+} ions with the coupling field turned off and turned on

在 $\text{Er}^{3+}:\text{YAlO}_3$ 晶体中人们也获得了相似的理论结果^[8]。如图3所示,在存在耦合场和不存在耦合场的两种情况下,晶体对探测光的吸收系

数发生很大变化,特别是在探测场失谐 Δ_p 为零时,形成了一个对于探测光透明的窗口。这些结果表明:在一定条件下可以在掺杂稀土离子晶体

中实现电磁感应光透明量子相干效应。

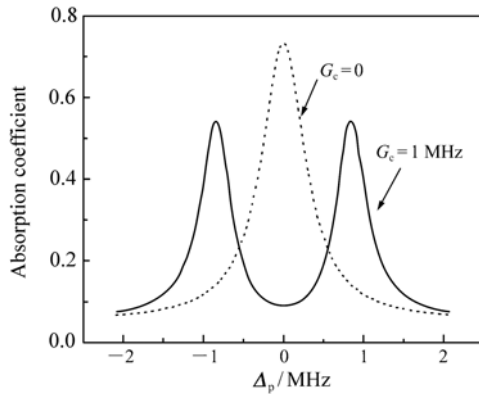


图 3 存在耦合场(实线)和不存在耦合场(虚线)时探测光吸收系数随探测场失谐的变化

Fig. 3 Probe absorption coefficient vs. probe detuning in the coupling field turned on (solid) and turned off(dashed)

3 电磁感应光透明的物理实现

以 $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 晶体为样品,利用图 4 所示的能级模型,在掺杂稀土离子晶体中实现了电磁感应光透明的量子相干过程^[9]。 $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 晶体的 $^3\text{H}_4$ 和 $^1\text{D}_2$ 能态的共振波长为 605.7 nm,每个能级均有 3 个 Kramers 双重态超精细能级。如图 4 所示,基态 $^3\text{H}_4$ 的 3 个超精细能级间的跃迁频率分别

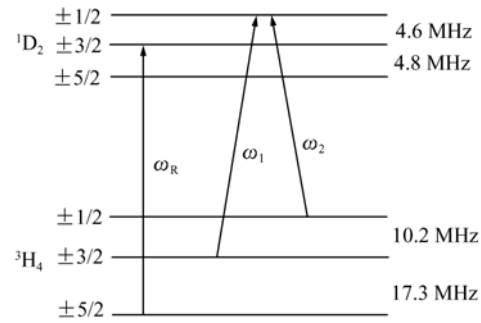


图 4 $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 晶体中实现电磁感应电磁光透明的激发方案

Fig. 4 Excitation scheme of electromagnetically induced transparency in the $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ crystal

为 10.2 和 17.3 MHz;激发态 $^1\text{D}_2$ 的 3 个超精细能级间的跃迁频率分别为 4.8 和 4.6 MHz。图 4 中的频率为 ω_2 的光是探测光,用来探测从 $^3\text{H}_4$ 基态的超精细能级 $\pm 1/2$ 到 $^1\text{D}_2$ 激发态的超精细能级 $\pm 1/2$ 的吸收。频率为 ω_R 的光用来清空基态在 $\pm 5/2$ 超精细能级的粒子分布,而频率为 ω_1 的光在不同的条件下有不同的作用,下面将分别解释它们的作用。

在 6 K 低温下,当 ω_1 、 ω_2 和 ω_R 的激光功率分别为 6,4 和 6 W/cm^2 时, ω_1 和 ω_R 的作用都用来清空基态在 $\pm 3/2$ 超精细能级的粒子分布。这种情况下,粒子数主要分布在基态的 $\pm 1/2$ 能级上,当

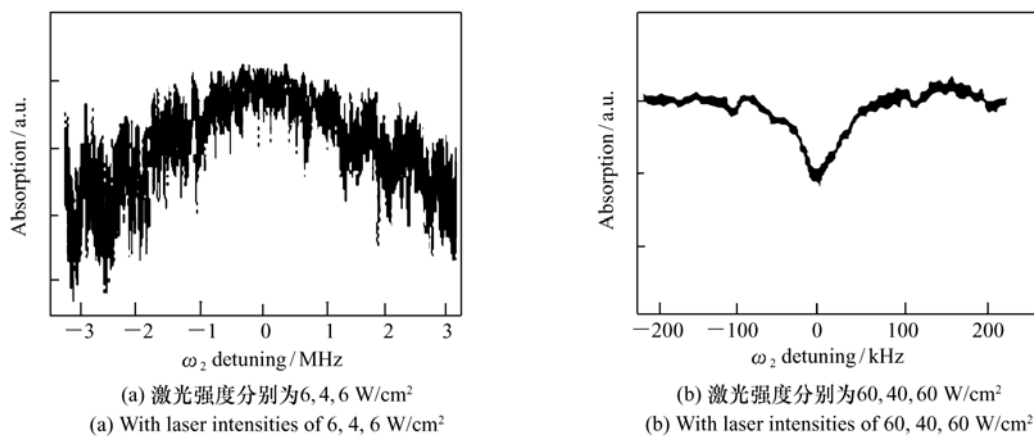


图 5 $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 晶体在 $\omega_1, \omega_2, \omega_R$ 的激光强度不同时的吸收光谱

Fig. 5 Probe absorption spectra of $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ crystal with different laser intensities of $\omega_1, \omega_2, \omega_R$

扫描 ω_2 的光的频率,就可获得从基态的超精细能级 $\pm 1/2$ 到 1D_2 激发态的超精细能级 $\pm 1/2$ 的吸收谱,如图 5(a) 所示,吸收谱的半宽为 3.5 MHz。但从图 5(b) 可知,当提高 ω_1 、 ω_2 和 ω_R 的激光功率为 60、40 和 60 W/cm² 时, ω_1 既有清空基态在 $\pm 3/2$ 超精细能级粒子分布的作用,又作为耦合场对激发态能级产生影响。在光谱共振频率处,晶体对 ω_2 的探测光吸收变弱,吸收率从 85% 变为 70%,吸收减弱处的半宽约为 60 kHz。在电磁感应光透明的情况下,窄带变弱的吸收线宽的半宽主要由自旋态 $^3H_4(\pm 3/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 1/2)$ 跃迁线宽决定,而不是由激光线宽决定。实验中激光的线宽约为 3 MHz,大于窄带吸收半宽。因而,图 5(b) 可作为电磁感应光透明的实验证据。

在稀土掺杂晶体中,工作温度和耦合场强度

对形成透明窗口及其深度(即吸收减弱的程度)都有影响^[10]。如图 6(a) 所示,在耦合光强度保持恒定的条件下,当 $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 晶体样品的温度上升时,探测光的透射率从 16% 下降到 0,即被完全吸收,透明窗口消失。激光在稀土掺杂晶体中的电磁感应光透明主要是因为晶体中的光学均匀线宽随着温度增加而被增宽了。图 6(b) 展示了另外一种情况,当工作温度恒定在 12 K 时,通过调谐耦合场的频率可看到耦合场失谐对电磁感应光透明效应的影响:失谐量越大,透射率越小。对实验参数的研究表明:通过最优化实验参数,可获得对探测光完全透明的窗口^[11]。实验也表明:在不同的稀土离子掺杂晶体中(如 $\text{Pr}^{3+}:\text{La}_2(\text{WO}_4)_3$ 和 $\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 等)均可实现电磁感应光透明量子相干效应^[12-13]。

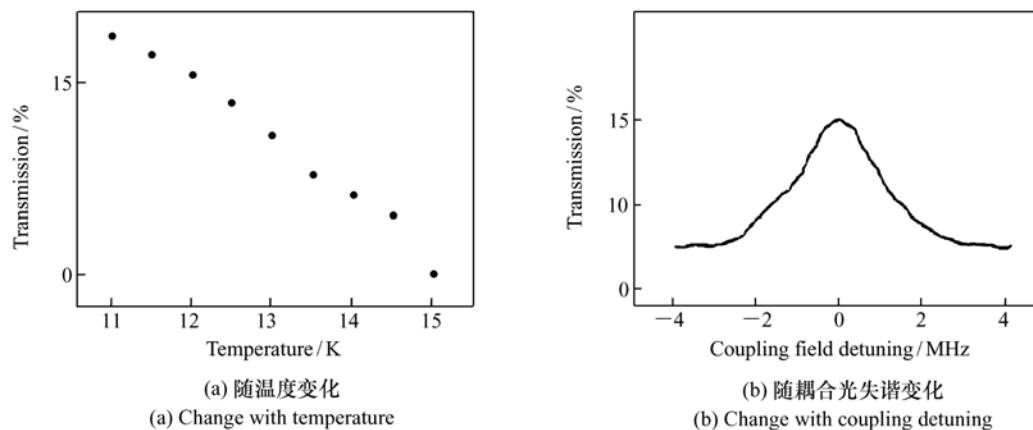


图 6 $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 晶体中电磁感应光透明窗口内的探测光透过率随温度和耦合光失谐的变化

Fig. 6 Changes of probe transmission within the electromagnetically induced transparency window of $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ crystal with temperature and coupling detuning

4 结 论

本文讨论了在掺杂稀土离子晶体中实现电磁感应光透明量子相干效应的可行性,发现晶体种类、掺杂离子种类以及工作条件对实现电磁感应

光透明量子相干效应都具有决定性的影响。当样品温度上升到 15 K 时,透明窗口消失;耦合场的失谐量越大,透射率越小。通过优化实验参数,可以实现对探测光完全透明的窗口,这一结果对在固体中实现量子信息处理极为重要^[14-16]。

参考文献:

- [1] FLEISCHHAUER M, IMAMOGLU A, MARANGOS J P. Electromagnetically induced transparency: optics in coherent media[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2005, 77: 633-673.
- [2] MOMPART J, CORBALÁN R. Lasing without inversion[J]. *J. Opt. B: Quantum Semiclass Opt.*, 2000, 2: R7-R24.

- [3] BERGMANN K, THEUER H, SHORE B W. Coherent population transfer among quantum states of atoms and molecules [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1998, 70:1003-1025.
- [4] HAU L V, HARRIS S E, DUTTON Z, *et al.*. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas [J]. *Nature*, 1999, 397:594-598.
- [5] 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.
- [6] ARTONI M, LA ROCCA G C. Optically tunable photonic stop bands in homogeneous absorbing media [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96:073905.
- [7] XU H L, DAI Z W, JIANG Z K. Effect of concentration of the Er^{3+} ion on electromagnetically induced transparency in $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ crystal [J]. *Phys. Lett. A*, 2002, 294:19-25.
- [8] FANG A P, XU H L, DAI Z W, *et al.*. Theoretical study of electromagnetically induced transparency in $\text{Er}^{3+}:\text{YAlO}_3$ crystal [J]. *Physica B*, 2003, 328:204-210.
- [9] HAM B S, SHAHRIAR M S, HEMMER P R. Enhanced nondegenerate four-wave mixing owing to electromagnetically induced transparency in a spectral hole-burning crystal [J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22:1138-1140.
- [10] HAM B S, SHAHRIAR M S, HEMMER P R. Electromagnetically induced transparency over spectral hole-burning temperature in a rare-earth doped solid [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, 16:801-804.
- [11] HAM B S, HEMMER P R, SHAHRIAR M S. Efficient electromagnetically induced transparency in a rare-earth doped crystal [J]. *Opt. Commun.*, 1997, 144:317-130.
- [12] GOLDNER P, GUILLOT-NOËL O, BEAUDOUX F, *et al.*. Long coherence lifetime and electromagnetically induced transparency in a highly-spinconcentrated solid [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, 79:033809.
- [13] BALDIT E, BENCHEIKH K, MONNIER P, *et al.*. Identification of Λ -like systems in $\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ and observation of electromagnetically induced transparency [J]. *Phys. Rev. B*, 2010, 81:144303.
- [14] WANG H H, LI A J, DU D M, *et al.*. All-optical routing by light storage in a $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93:221112.
- [15] WANG H H, FAN Y F, WANG R, *et al.*. Slowing and storage of double light pulses in a $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34:2596.
- [16] KLEIN J, BEIL F, HALFMANN T. Robust population transfer by stimulated Raman adiabatic passage in a $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ crystal [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 99:113003.

作者简介:贾继奎(1976—),男,黑龙江庆安人,硕士,讲师,主要从事原子气体、半导体量子阱和稀土离子掺杂固体材料中激光诱导量子相干效应等方面的研究。E-mail:jiajikui@sina.com