

# 固体材料中原子相干效应的研究进展

王 荣,姜 云,范云飞,康智慧,王海华,高锦岳  
(吉林大学 物理学院,吉林 长春 130023)

**摘要:**原子相干效应是光与物质相互作用的结果,它导致了一系列重要的物理现象。目前原子相干的实验研究工作主要在原子气体中开展,而与之相比固体材料中的相关实验研究具有更实际的应用前景。本文系统介绍了近年来固体材料中原子相干效应的研究进展,主要涉及电磁感应光透明、光速减慢与相干存储、存储光信息的可控制擦除、基于光存储的全光路由、双光脉冲的速度减慢和可逆存储和基于原子相干的增强四波混频等基本内容,最后还讨论了其在相关领域的应用。

**关键词:**原子相干;固体材料;电磁感应光透明;光信息;相干控制

**中图分类号:** O431.2; O562.1 **文献标识码:** A

## Research progress of atomic coherence effect in solid-state materials

WANG Rong, JIANG Yun, FAN Yun-fei, KANG Zhi-hui, WANG Hai-hua, GAO Jin-yue

(College of Physics, Jilin University, Changchun 130023, China)

**Abstract:** Atomic coherence is the result of interaction between light and materials, which leads to many important physical phenomenon. Currently, most experimental researches on atomic coherence are reported in atomic gases. Compared with atomic gases, the related experimental researches in solid materials have more practical applications. This paper introduces the recent research progress of atomic coherence in solid-state materials in detail, including the Electromagnetically Induced Transparency (EIT) in solid materials, light velocity reduction and coherent storage, controllable eraser of optical storage information, all-optical route based on optical storage, optical velocity reduction and reversible storage of double light pulses and enhanced four-wave mixing based on atomic coherence, it also discusses its application to relative fields.

**Key words:** atomic coherence; solid-state materials; Electromagnetically Induced Transparency (EIT); optical information; coherent control

收稿日期:2010-01-11;修订日期:2010-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10774059;0904048);国家重点基础研究发展规划(973计划)资助项目(No. 2006CB921103)

## 1 引言

原子相干效应是光与物质相互作用的产物,其实质是利用相干光场使原子的不同能级之间发生关联,从而在原子的多通道跃迁中发生量子干涉。近20年来,原子相干效应一直是量子光学领域的研究热点。原子相干效应已经导致了一系列重要的物理现象,例如相干粒子数捕获<sup>[1,2]</sup>,电磁感应光透明<sup>[3-5]</sup>,无反转光放大<sup>[6-9]</sup>,增强的非线性光学效应<sup>[10]</sup>等等。特别地,研究者已经利用原子相干效应成功地实现了光速减慢和光信息的相干存储<sup>[11-13]</sup>,克服了光难以控制和定位的缺陷,有助于对光波上的编码信息进行直接的操控和处理。最近,利用电磁感应光透明,研究者又成功地实现了压缩态光场和纠缠光子对的速度减慢和相干存储<sup>[14-16]</sup>,量子光场的相干操控在量子网络、量子计算机和量子信息处理中有着重要的意义,将带动相关领域研究的迅猛发展。

目前多数原子相干效应的实验研究都集中在原子气体里,为了将这一技术在实际中有所应用,在固体材料里进行相关的研究具有更大的应用价值。固体材料明显的优点是良好的紧密性、高原子密度、无原子运动。然而,多数的固体材料中存在着众多复杂的退相干机制,它们严重阻碍了原子相干效应的实验观测。同时,一般的固体材料都有大的光学非均匀加宽,这也增加了原子相干实验的难度。因此,需要选择合适的固体材料进行原子相干效应的实验研究。鉴于固体材料中原子相干效应的重要性,国际上几个研究小组已经在红宝石、NV色心、 $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  (Pr: YSO)晶体和半导体量子阱等固体材料中开展了电磁感应光透明的研究工作<sup>[17-20]</sup>。其中 Pr: YSO 晶体中的原子相干效应的研究工作开展的最为广泛,这是因为 Pr: YSO 晶体具有窄的光谱线宽、长的退相干时间和高的振子强度,可作为原子相干效应研究的优良实验介质。

本文具体介绍了近年来固体材料中原子相干效应研究的进展<sup>[19,21-25]</sup>,同时讨论了该项研究在相关领域的应用。固体材料中原子相干效应的开展必将加快其在量子信息、全光网络和非线性光

学等领域中的实用化进程。

## 2 电磁感应光透明

电磁感应光透明(EIT)是一种基本的原子相干效应,常用三能级 $\Lambda$ 型原子系统来研究EIT现象。EIT是利用一个强耦合光将探测场作用跃迁的一个能级与第三个辅助能级耦合起来,从而对探测场产生两个受激吸收通道,这两个跃迁通道之间的量子干涉效应导致了探测场在双光子共振处的极窄的透明并伴随强烈的反常色散。大量的理论和实验都已证明,EIT可以增强非线性系数,提高混频效率,实现慢光和光存储等<sup>[10-13,26]</sup>,进而在精密光谱、非线性光学、量子信息等诸多领域具有潜在的应用价值。美国学者 Harris 首先提出了电磁感应光透明的概念,并于1991年以铯为介质利用强激光脉冲首次在实验上观察到EIT现象<sup>[4]</sup>。1995年,Xiao Min 采用消多普勒的方法,用低功率的半导体激光器在铷蒸汽中也成功地实现了EIT<sup>[27]</sup>。近年来,随着对EIT现象研究的不断深入,研究的对象由原子蒸汽介质扩展到了固体介质。对于实际应用来讲,固体材料更利于集成化和器件化,更具实际的价值,所以固体中的EIT对人们有着很大的吸引力。

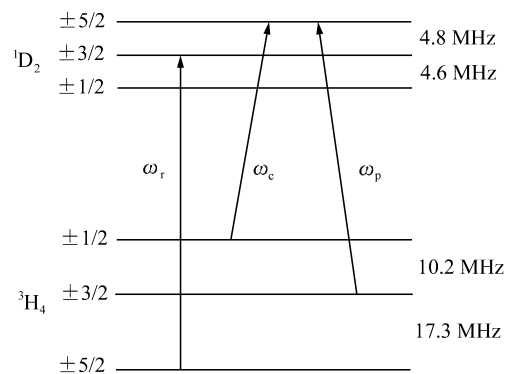


图1 Pr: YSO 晶体的能级图<sup>[19]</sup>

Fig. 1 Energy level in solid Pr: YSO<sup>[19]</sup>

1997年,Ham首先在Pr: YSO晶体中实验研究了电磁感应光透明现象<sup>[19]</sup>。Pr: YSO晶体的尺寸是3 mm × 6 mm × 9 mm,其中Pr离子的掺杂浓度为0.05%。如图1所示,选用的光学跃迁

是 $^3H_4 \leftrightarrow ^1D_2$ ,对应的跃迁波长是 605.7 nm。激光源是相干公司的 699 环形染料激光器。通过声光调制器分束和移频光源,从而产生需要的各个光场。探测场 $\omega_p$ 与跃迁 $^3H_4(\pm 3/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 1/2)$ 共振,耦合场 $\omega_c$ 与跃迁 $^3H_4(\pm 1/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 1/2)$ 共振,重新泵浦场 $\omega_r$ 与跃迁 $^3H_4(\pm 5/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 3/2)$ 共振。重新泵浦场的作用是在能级 $^3H_4(\pm 1/2)$ 和 $^3H_4(\pm 3/2)$ 上泵浦粒子,防止光谱烧孔效应的发生。耦合场和探测场作用的能级形成三能级 $\Lambda$ 型模型的 EIT 系统。这 3 个激光场只作用了一小部分 Pr 离子,由于永久性的光谱烧孔效应,激光器的线宽决定了这个系统的有效光学非均匀加宽。因此,原子相干可以在比较低的光功率下建立。他们在耦合场的强度分别为 9、28、90 以及 280 W/cm<sup>2</sup>,探测场强度为 9 W/cm<sup>2</sup>,重新泵浦场强度为 16 W/cm<sup>2</sup>的情况下观察了 EIT 现象。由于强耦合场的作用,探测场中心频率处的吸收减弱,透过率增加。如图 2 所示,当耦合场的强度分别为 28、90 以及 280 W/cm<sup>2</sup>时,在探测场的零失谐处,观察到探测场的透过率分别是 14%、36% 和 65%。耦合场越强,探测场的透过率就越高。接着他们又在温度为 5.5 K,耦合场强度分别为 90、280 和

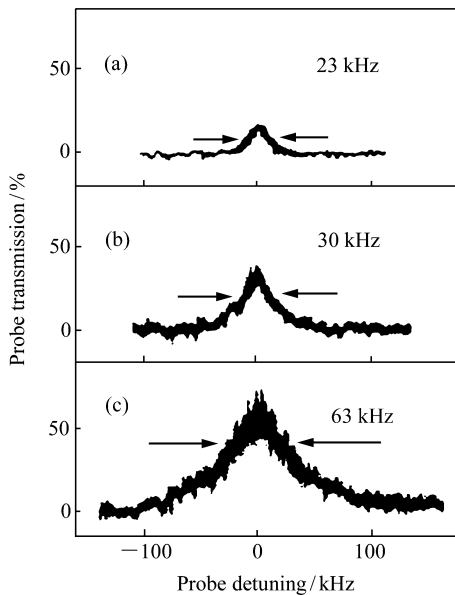


图 2 Pr: YSO 晶体中的电磁感应光透明现象<sup>[19]</sup>

Fig. 2 EIT in solid Pr: YSO<sup>[19]</sup>

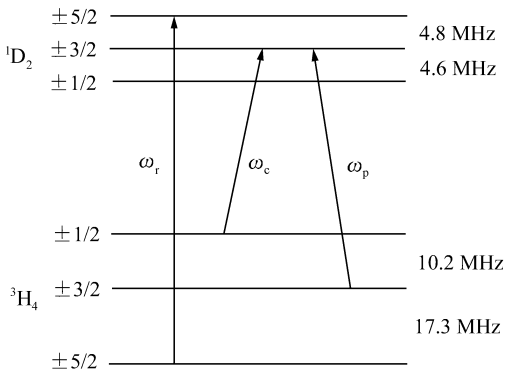
900 W/cm<sup>2</sup>情况下观察了 EIT 现象,发现当耦合场的强度为 900 W/cm<sup>2</sup>时,探测场的透过率几乎达到 100%,从而得到了比较理想的 EIT 现象。当温度升高的时候,由于声子作用,自旋和光跃迁的失相率将增大,会导致 EIT 现象减弱。

除了 Pr: YSO 晶体,研究者们还在其它的固体材料中观察到了 EIT 现象。1997 年,Zhao 等人在红宝石中利用微波场作为相干场研究了 EIT 现象,他们分别在 V 模型和梯模型系统中观察到了 EIT<sup>[17]</sup>。1999 年,Wei 等人在 NV 色心中研究了射频波段的 EIT<sup>[18]</sup>。2003 年,Phillips 等人在 GaAs 量子阱中也成功实现了 EIT<sup>[20]</sup>。

### 3 光速减慢和光存储

光是信息的优良载体,它具有传播速度快和通讯波段宽的优点,但同时光也具有难于定位和不易操控的缺点。在现代光学中,对光的相干控制已经变得越来越重要。最近,利用 EIT 的光脉冲速度减慢和可逆存储已经被理论上设计和实验上演示<sup>[11-13]</sup>。这种相干控制是基于光和介质之间的量子态转换。通过调制耦合光的强度,即可以控制 EIT 窗口的宽度和介质的色散,从而方便地改变探测光脉冲的群速度。绝热地将耦合光强度减小为零,可使探测光群速度降低为零并以自旋相干的形式存储于介质中。一段时间之后,再绝热地恢复耦合光强度,可将原子自旋相干转化为光信号。1999 年,Hau 等人利用 EIT 技术在超冷钠原子中使光脉冲的群速度降至 17 m/s<sup>[26]</sup>。2001 年,Liu 等人在超冷的钠原子中通过对相干光场的时间调制实现了光脉冲的存储和释放<sup>[15]</sup>;同年,Phillips 等人在铷原子蒸汽中观察到了相似的光存储和释放<sup>[16]</sup>。

2002 年,Turukhin 等人首次研究了 Pr: YSO 晶体中基于 EIT 的光速减慢与可逆存储<sup>[21]</sup>。选用的晶体长度是 3 mm,Pr 离子的掺杂浓度是 0.05%。Pr 离子的能级结构如图 3 所示。 $\omega_p$ 、 $\omega_c$  和  $\omega_r$  分别为探测场、耦合场和重新泵浦场。探测场 $\omega_p$ 与跃迁 $^3H_4(\pm 3/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 3/2)$ 共振;耦合场 $\omega_c$ 与跃迁 $^3H_4(\pm 1/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 3/2)$ 共振;重新泵浦场 $\omega_r$ 与跃迁 $^3H_4(\pm 5/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 5/2)$

图3 Pr: YSO晶体的能级图<sup>[21]</sup>Fig. 3 Energy level in solid Pr: YSO<sup>[21]</sup>

共振。耦合场和探测场作用的能级形成三能级  $\Lambda$  型的 EIT 系统。

通过开启 10 ms 时间长度的耦合场和重新泵浦场,粒子数被制备到探测场对应的下能级  $^3H_4$  ( $\pm 3/2$ ) 能级上。再经过 1 ms 的间隔,开启耦合场和探测场进入晶体。由于 EIT 窗口中心伴随着陡峭的反常色散,探测脉冲进入 EIT 介质后,其群速度会被减慢。图 4 显示了探测脉冲在不同失谐情况下的群速度减慢。图中虚线对应着不经过晶体的探测脉冲的信号,实线对应着经过 EIT 晶体

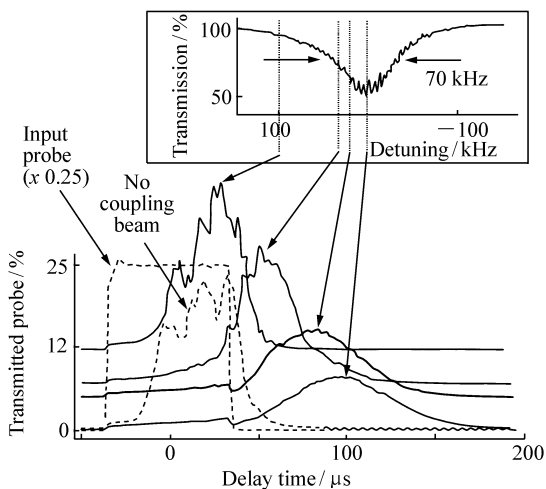


图4 EIT 导致的光脉冲群速度减慢

Fig. 4 Reduction of group velocity of light pulse induced by EIT

探测脉冲信号。探测脉冲的延迟时间对双光子失谐是非常敏感的,不同的失谐对应着不同的探测脉冲延迟。通过测量输入脉冲中心和慢光的中心,

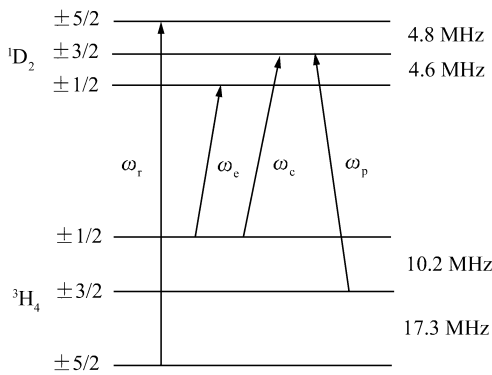
在共振频率处得到了 100  $\mu\text{s}$  的最大时间延迟。慢光曲线前半部分的信号是快光成分,它是由于探测光与晶体没有完全作用导致的,它在晶体内部以快光的速度传播。在慢光的基础上,通过控制耦合场的开启和关断,研究者们又研究了光脉冲的存储和释放。实验中输入探测脉冲的周期是 50  $\mu\text{s}$ ,耦合场、探测场和重新泵浦场的强度分别是 77、11 和 60  $\text{W}/\text{cm}^2$ 。当探测脉冲以慢光的形式在晶体内部传输时,绝热地关断耦合场,探测光脉冲就会存入介质内部,转化为基态能级之间的自旋相干。随后开启耦合场,原子自旋相干又转化为光脉冲,实现存储信息的释放。

在光存储期间通过施加反退位相脉冲,上述实验的存储时间达到了 300  $\mu\text{s}$ 。2005 年,Longdell 等人在 Pr: YSO 晶体中报道了更长存储时间的实验<sup>[28]</sup>。他们通过动力学退相干控制技术 (DDC) 来抑制 Pr 离子基态能级之间的退相干,增强了光信号在晶体内部的存储时间。实验观测到的最大存储时间接近 10 s,这是目前报道的最长的 EIT 光存储时间。另外,在 Pr: YSO 晶体中的相似的基于 EIT 的光脉冲存储的实验研究也有了报道<sup>[29~31]</sup>。

## 4 存储光信息的可控制擦除

在光信息处理中,信息的存储和擦除是两个同等重要的操作。目前多数的实验研究都集中在光存储的研究上,例如,利用反退位相脉冲和动力学退相干控制技术,研究者在 Pr: YSO 晶体中得到了长的存储时间<sup>[21,28]</sup>。但是,关于存储光信息擦除的研究工作几乎没有报道。在一些时间应用中,信息的擦除也是非常重要的。例如,介质记录了一个错误或者没有用的信息,人们就需要快速地擦除存储的信息,才能进行下一步的操作,这就需要发展一种快速和可控制的擦除信息方法。

通过擦除脉冲破坏原子相干,Wang 等人实验研究了 Pr: YSO 晶体中存储光信息的可控制性擦除<sup>[22]</sup>。图 5 显示了 Pr: YSO 晶体的能级图。相关的光学跃迁是  $^3H_4 \rightarrow ^1D_2$ ,两能级之间的跃迁波长是 605.977 nm。 $\omega_p$ 、 $\omega_c$ 、 $\omega_r$  和  $\omega_r$  分别为探测场、相干场、擦除场和重新泵浦场。探测场  $\omega_p$  与跃

图5 Pr:YSO晶体的能级图<sup>[22]</sup>Fig. 5 Energy level in solid Pr:YSO<sup>[22]</sup>

迁 $^3H_4(\pm 3/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 3/2)$ 共振;相干场 $\omega_c$ 与跃迁 $^3H_4(\pm 1/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 3/2)$ 共振;擦除场 $\omega_e$ 与跃迁 $^3H_4(\pm 1/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 1/2)$ 共振;重新泵浦场 $\omega_r$ 与跃迁 $^3H_4(\pm 5/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 5/2)$ 共振。

图6演示了减慢的探光测脉冲的存储和擦除过程。当大部分的慢光脉冲在晶体内部传播时,绝热地关断相干场,探测光脉冲就会被存储到晶

位相信息。在 $10 \mu s$ 的存储时间内,一个擦除光脉冲施加到晶体上,作用于 $^3H_4(\pm 1/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 1/2)$ 跃迁。由于擦除脉冲的作用,产生的原子自旋相干会被部分破坏,这直接导致了存储信息的擦除。图6(b)演示了存储光信息的擦除。由于擦除操作,存储 $10 \mu s$ 后释放的探测光脉冲能量明显减少。因此,通过施加擦除脉冲破坏存储的原子相干,可实现存储光信息的可控制性擦除。实验中发现擦除效率取决于擦除脉冲的能量,与存储时间无光。获得的最大擦除效率是85%。

利用擦除光脉冲破坏原子相干,从而实现存储光信息的可控制擦除,是一种光信息的全光操作手段,该项研究工作丰富和发展了光脉冲相干控制的技术和方法,加深了人们对光脉冲在相干介质中传播的动力学过程的认识,在信息处理和全光网络中有着重要的应用。

## 5 基于光存储的全光路由

全光路由在未来的量子信息和全光网络中是非常重要的,它可以避免光电和电光转换,克服电子瓶颈的限制,从而保证大容量信息的有效转换和传输。光信息的路由和波长分配有着很多实际的应用,例如,它可用于不同波长通讯线之间的连接,在不同光波长之间实现信息的转换和分配。目前的研究表明,利用原子相干效应对光脉冲的相干调控可以实现光信息在不同波长之间转换与分配的新型全光路由。

在Pr:YSO晶体中,Wang等人实验研究了基于光存储的新型全光路由<sup>[23]</sup>。图7显示了Pr:YSO晶体的能级图。相关的光学跃迁是 $^3H_4 \leftrightarrow ^1D_2$ ,对应的跃迁波长是 $605.977 \text{ nm}$ 。 $\omega_{p1}$ 、 $\omega_{c1}$ 、 $\omega_{c2}$ 和 $\omega_r$ 分别为探测场、控制场-1、控制场-2和重新泵浦场。探测场 $\omega_{p1}$ 与跃迁 $^3H_4(\pm 3/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 3/2)$ 共振,相干场 $\omega_{c1}$ 与跃迁 $^3H_4(\pm 1/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 3/2)$ 共振,相干场 $\omega_{c2}$ 与跃迁 $^3H_4(\pm 1/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 1/2)$ 共振,重新泵浦场 $\omega_r$ 与跃迁 $^3H_4(\pm 5/2) \leftrightarrow ^1D_2(\pm 5/2)$ 共振。

在EIT条件下,由于控制场的作用,探测光脉冲的群速度被减慢,图8(a)显示了 $37 \mu s$ 的时间

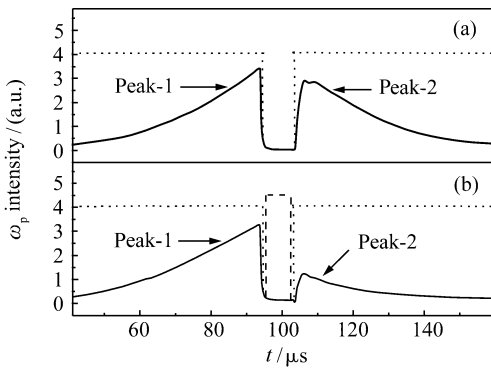
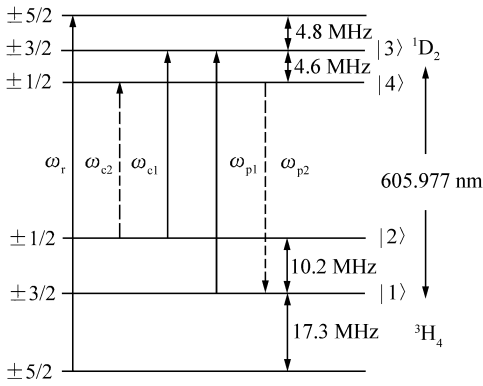


图6 存储光信息擦除的实验演示

Fig. 6 Experimental demonstration of eraser of stored light information

体中。Peak-1是在相干场关断以前就已经离开晶体的探测脉冲部分,这部分光脉冲没有经历存储操作,通过晶体以后直接被探测器接受。Peak-2是经历了相干场的关断与开启被存储和随后释放的探测脉冲部分。Peak-1和Peak-2之间的间隔是 $10 \mu s$ 的存储时间。存储的过程中,当关断相干场的时候,会有原子相干在晶体内部产生。正是这个产生的原子相干存储了探测脉冲的幅度和

图7 Pr: YSO 晶体的能级图<sup>[23]</sup>Fig. 7 Energy level in solid Pr: YSO<sup>[23]</sup>

延迟。在获得慢光的情况下,通过关断和开启控制场-1,可实现光信息的存储和释放。图8(b)显示了典型的 EIT 光存储实验。Peak-1 是在控制场

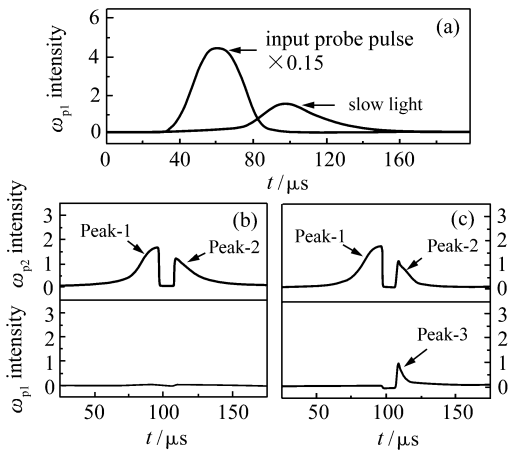


图8 基于光存储的全光路由实验演示

Fig. 8 Experiments of all-optical router based on stored light

关断以前就离开了晶体的探测场部分,这部分光没有经过存储操作。Peak-2 是被存储和随后释放的探测场部分。两个峰之间的间隔是  $10 \mu\text{s}$  的存储时间。由于在释放过程中只有一个控制场  $\omega_{c1}$  开启,存储的信息以通道  $\omega_{p1}$  释放,在通道  $\omega_{p2}$  上没有观察到光信号。图8(c)显示了基于光存储的全光路由。在释放的过程中两个控制场同时开启,存储的光信息被分配进入两个不同的光通道( $\omega_{p1}$  和  $\omega_{p2}$ ),从而实现了新型的全光路由。对比起始的光信号,释放的  $\omega_{p1}$ ,  $\omega_{p2}$  具有新的传播方向和频率。两个释放控制场的同时开启确保了两个

光通道上信号的同时传输。

2004 年,利用双光子相干转换,Ham 在 Pr: YSO 晶体中通过四波混频过程实验上研究了全光的量子路由<sup>[32]</sup>。2008 年,利用 EIT 导致的慢光效应,Ham 又基于 Pr: YSO 晶体实验报道了时间延迟的全光路由<sup>[33]</sup>,这些全光路由的实验研究对量子信息和全光网络的发展有着重要的意义。

## 6 双光脉冲的速度减慢和可逆存储

基于原子相干的光速减慢和信息存储在量子信息领域有着重要应用。传统的 EIT 三能级只包含一个黑态极子,只能实现单通道光信息的相干控制。一个量子比特包含两个基本态,无法在三能级  $\Lambda$  系统中实现对其操控。因此,如何在单个原子系统中实现两个或多个通道光子信息的相干控制成为研究者关注的焦点。目前的研究已经发现,在四能级 Tripod 模型系统中包含双黑态极子,可同时实现两个光通道的群速度减慢和可逆存储等相干控制<sup>[34,35]</sup>。利用在碱金属蒸汽的 Tripod 模型系统,也在实验上成功实现了双 EIT 窗口和加强的非线性光学作用<sup>[36~38]</sup>。

利用 Pr: YSO 晶体中的 Tripod 系统,Wang 等人实验研究双光脉冲的速度减慢和可逆存储<sup>[24]</sup>。

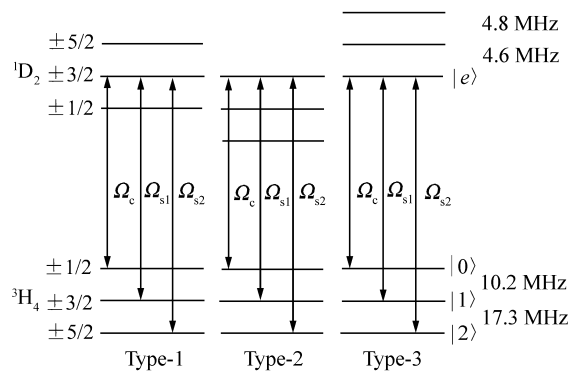


图9 Pr: YSO 晶体的能级图

Fig. 9 Energy level in solid Pr: YSO

图9显示了 Pr: YSO 晶体的能级结构。Pr 离子的掺杂浓度是 0.05%,相关的光学跃迁是  ${}^3\text{H}_4 \leftrightarrow {}^1\text{D}_2$ 。 $\Omega_{s1}$ 、 $\Omega_{s2}$ 、 $\Omega_c$  分别为信号场 1、信号场 2 和控制场。Pr 离子有 3 个激发态能级,相应的光学跃迁是非均匀加宽的,因此晶体中有 3 种离子具

有 Tripod 系统。 $^1D_2(\pm 3/2)$ 、 $^1D_2(\pm 5/2)$  和  $^1D_2(\pm 1/2)$  分别是 3 种 Pr 离子的激发态  $|e\rangle$ 。

为了在基态上制备粒子,控制场首先开启 12 ms。由于光泵浦效应,粒子被制备到基态  $^3H_4(\pm 3/2)$  和  $^3H_4(\pm 5/2)$  能级上。图 10 显示了双光脉冲的速度减慢,虚线对应着输入的两个信号脉冲,两个信号脉冲通过声光调制器同时产生。在慢光的演示中,控制场比信号场先开启 10  $\mu\text{s}$ 。由于 Tripod 系统中的双黑态极子,两个信号脉冲

的群速度被减慢,都经历了大的时间延迟。在 Tripod 系统中,一个信号脉冲的群速度可以通过调节另一个信号场的强度来控制。通过仔细调节两个信号场的强度,两个信号脉冲获得了基本相等的群速度。两个信号经历的时间延迟是 18  $\mu\text{s}$ ,对应的群速度  $v_g \approx 167 \text{ m/s}$ 。因此,利用 Tripod 系统,在晶体内部获得了具有近似匹配群速度的双光脉冲。

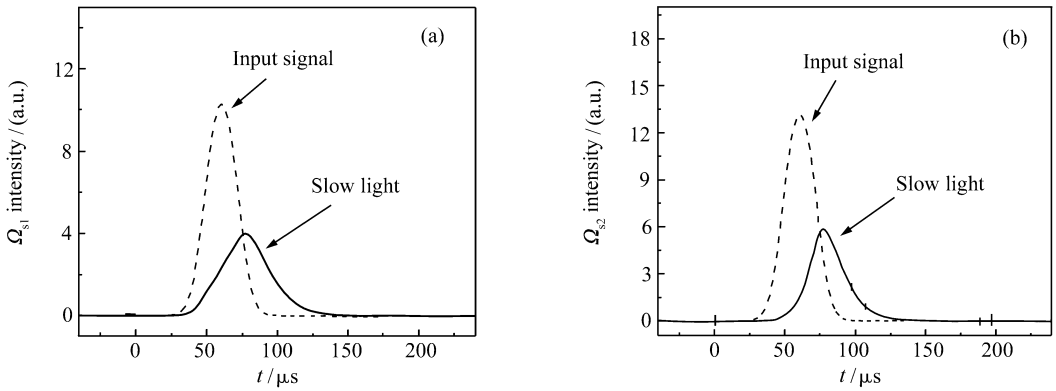


图 10 双光脉冲的群速度减慢

Fig. 10 Reducation of group velocity of double light pulses

根据光存储的黑态极子理论,当减慢的信号脉冲在晶体内部传播时,通过关断和开启控制场可实现双光脉冲的存储和释放。当控制场关断以后,两个信号脉冲转换为基态的自旋激发(自旋相干),信号场的相干光学信息存储于其中。当控制场重新开启以后,自旋相干转换为相应的信号光场,释放的光信号以减慢的群速度在晶体内

部继续传播。图 11 显示了在 Tripod 系统的晶体中双光脉冲的同时存储和释放。Peak-1 是控制场关断以前就离开了晶体的信号场部分,这部分信号光没有经历存储操作。Peak-2 是经历存储和随后释放的信号光部分。Peak-1 和 Peak-2 之间的间隔是 10  $\mu\text{s}$  的存储时间。释放的 Peak-2 保持了慢光的后半部分线型,减小的强度是由于自旋相

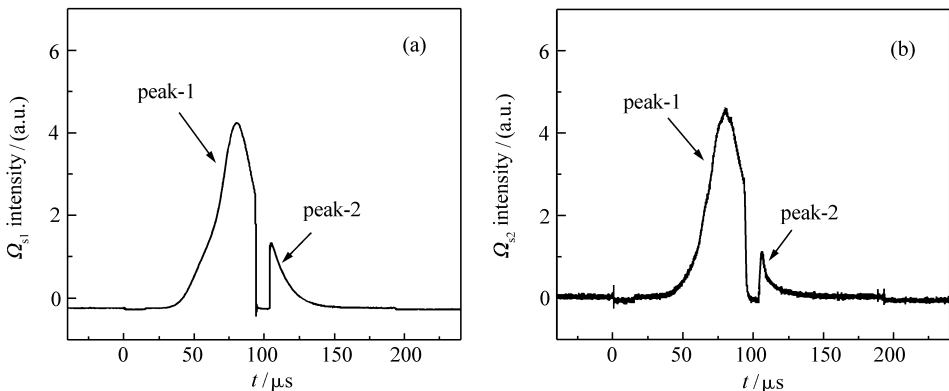


图 11 双光脉冲的可逆存储

Fig. 11 Stored light of double light pulses

干的失相。匹配群速度的双光脉冲可以用来增强弱光脉冲之间的非线性作用时间,从而产生大的交叉相位调制。双光脉冲速度减慢与相干存储使实现光量子比特的相干操控成为可能,这些研究工作将在量子信息和量子通讯中有实际的应用。

## 7 基于原子相干的增强四波混频

原子相干导致的增强四波混频过程是最近的研究热点。研究者已经发现利用 EIT 可增强非线性光学过程,并已经成功地在实验中观测到基于 EIT 的增强四波混频<sup>[39~41]</sup>。增强的非线性光学过程的关键是通过原子相干获得大的非线性极化率。如果相干驱动的介质被制备到最大原子相干的状态,人们可获得最大的非线性极化率<sup>[42]</sup>。最近,基于最大原子相干的非线性过程已经引起了研究者的广泛关注<sup>[43~46]</sup>。

利用相干粒子数回归(CPR)和部分受激拉曼绝热过程(F-STIRAP)制备最大原子相干,Wang 等人在 Pr: YSO 晶体中实验研究了增强的四波混频<sup>[25]</sup>。图 12 显示了 Pr: YSO 晶体的能级图。 $\Omega_p$ 、 $\Omega_1$ 、 $\Omega_2$  和  $\Omega_r$  分别为探测场、泵浦场、斯托克斯场合重新泵浦场。通过施加泵浦场和重新泵浦场,粒子数首先被制备到能级  $|1\rangle$  上。对于 CPR 和 F-STIRAP,都是用泵浦场和斯托克斯场在基态能级

级  $|2\rangle$  上,作用之后又回到能级  $|1\rangle$ 。当能级  $|1\rangle$  和  $|2\rangle$  上的粒子数相等时,就建立了瞬时的最大原子相干。对于 F-STIRAP,泵浦场和斯托克斯场都是脉冲的,两者有相同的时间后沿。当他们同时关断的时候,最大原子相干在晶体内部产生。对 CPR 和 F-STIRAP,原子相干时间演化为  $\rho_{12} = \cos\theta(t) \sin\theta(t)$ , 角度  $\theta(t)$  由  $\tan\theta(t) = \Omega_1(t)/\Omega_2(t)$  决定,因此原子相干由时间演化的拉比频率决定。通过弱的探测场散射原子相干,可以产生一个有效的四波混频信号。时间演化的原子相干决定了四波混频信号的强度和线形。

图 13 显示了在不同的斯托克斯场强度下基于 CPR 的增强四波混频信号。当斯托克斯场强度等于泵浦场强度时,四波混频信号呈现单峰结构,如图 13(a)所示。在这种情况下,当斯托克斯脉冲达到峰值时,能级  $|1\rangle$  和  $|2\rangle$  上有相等的粒子数分布,此时瞬态的最大原子相干建立,原子相干呈现单峰结构,产生的四波混频信号也呈现单峰结构。当  $\Omega_{20} < \Omega_1$  时,瞬态最大原子相干可在两个不同的  $\Omega_{20}(t) = \Omega_1$  时刻建立。因此原子相干的时间演化呈现双峰结构,产生的四波混频信号也呈现双峰结构,如图 13(b)所示。当  $\Omega_{20} < \Omega_1$

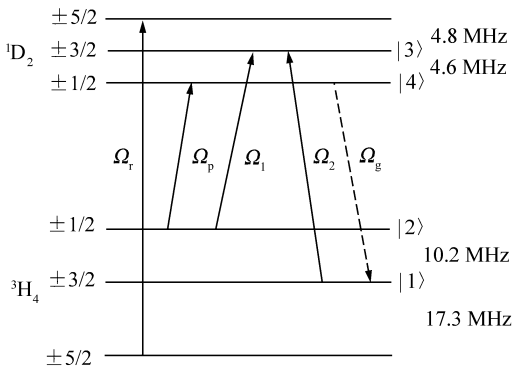


图 12 Pr: YSO 晶体的能级图

Fig. 12 Energy level in solid Pr: YSO

之间制备原子相干。对于 CPR,泵浦场是连续的,斯托克斯场是高斯脉冲形的  $\Omega_2 = \Omega_{20} \exp[-(t-t_0)^2/(W/2)^2]$ 。当泵浦场和斯托克斯场作用时,起始在能级  $|1\rangle$  上的粒子被转移到能

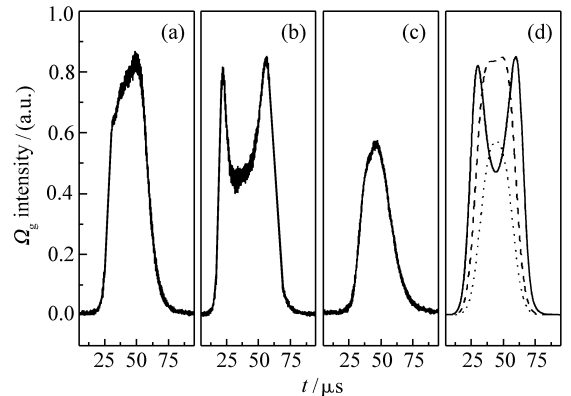


图 13 基于 CPR 的增强四波混频

Fig. 13 Enhanced four-wave mixing based on CPR

时,能级  $|1\rangle$  上的粒子数总是多于能级  $|2\rangle$ ,得不到最大原子相干,原子相干总是单峰结构,并且强度比较弱。因而产生的四波混频信号比较弱,且呈现单峰结构,如图 13(c)所示。图 13(d)是理论曲线,与实验结果基本一致。

图 14 显示了基于 F-STIRAP 的增强四波混频。在进行实验时,首先还是把粒子数制备到能



级 $|1\rangle$ 上。图 14(a)反映了实验中光场的脉冲序列情况。当泵浦场和斯托克斯场同时关断的时候,最大原子相干在晶体内部建立。建立的原子相干由于基态能级的退位相而慢慢减弱。通过一个弱探测脉冲散射原子相干,可产生有效的四波混频信号。图 14(b)显示了四波混频信号的强度随探测脉冲时间延迟的变化。最强的四波混频信号出现在泵浦场和斯托克斯场同时关断的时候,随后强度慢慢变弱,与理论分析基本一致。

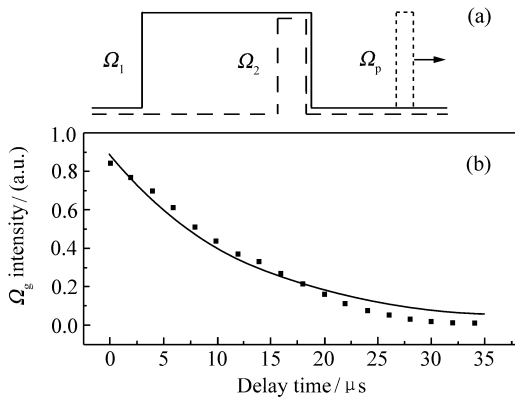


图 14 基于 F-STIRAP 的增强四波混频

Fig. 14 Enhanced four-wave mixing based on F-STIRAP

时间演化的四波混频信号有效地反映了原子相干的动力学过程,因而通过研究增强四波混频信号可实现对晶体内部原子相干动力学过程的监测,该实验研究将在非线性光学和激光光谱中有重要的应用。

## 8 结束语

原子相干效应导致了一系列重要的物理现

象,它们在量子信息和全光网络中有着广泛地应用。目前主要的研究工作在原子气体里开展,为了实际应用,固体介质应该是首选的材料。通过选择恰当的工作材料和合适的实验条件,研究者已经开展了固体材料中原子相干效应的实验研究工作。

本文介绍了固体材料中原子相干效应研究的最新进展。固体材料中电磁感应光透明的研究工作,把原子相干效应的工作介质由原子气体转向了固体材料,为电磁感应光透明及相关效应的实际应用奠定了基础。光速减慢和信息存储的研究工作,发展了光脉冲在固体材料中传播的动力学特性,有利于光脉冲相干控制的实际应用。存储光信息可控制擦除的研究工作,丰富和发展了光信息相干控制方法和手段,在光信息处理中有实际的应用。基于光存储的全光路由的研究工作,发展了一种光信息在不同波长之间转换与分配的新型全光路由,在全光网络领域有重要的应用。双光脉冲速度减慢和相干存储的研究工作,使实现光量子比特的相干控制成为可能,在量子信息和量子通讯领域有着重要的实际应用价值。基于原子相干的增强四波混频的研究工作,探讨了相干驱动固体介质中光学非线性系数增强的物理过程,在激光光谱和非线性光学中有实际的应用。

鉴于固体材料中的原子相干效应的应用前景,探索固体材料中的各种原子相干效应的基本现象和物理规律是当代物理学家们的努力方向。固体材料中原子相干效应的深入研究将在不同的光学领域引发深刻的变革,并将推动和加快其在相应领域中的实用化进程。

## 参考文献:

- [1] ALZETTA G, GOZZINI A, MOI L, *et al.*. An experimental method for the observation of r. f. transitions and laser beat resonances in oriented sodium vapor[J]. *Nuovo Cimento B*, 1976, 36(11): 5-20.
- [2] GRAY H R, WHITLEY R M, STROUD C R Jr, Coherent trapping of atomic populations[J]. *Opt. Lett.*, 1978, 3(6): 218-220.
- [3] FLEISCHHAUER M, IMAMOGLU A, MARANGOS J P. Electromagnetically induced transparency: optics in coherent media[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2005, 77(2): 633-673.
- [4] BOLLER K J, IMAMOGLU A, HARRIS S E. Observation of electromagnetically induced transparency[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 66(20): 2593-2596.
- [5] FIELD J E, HAHN K H, HARRIS S E. Observation of electromagnetically induced transparency in collisionally broadened

- lead vapor[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 67(22):3062-3065.
- [6] HARRIS S E. Lasers without inversion; interference of lifetime-broadened resonances[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, 62(9):1033-1036.
- [7] SCULLY M O, ZHU S Y, GRAVRIELIDES A. Degenerate quantum-beat laser: lasing without inversion and inversion without lasing[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, 62(24):2813-2816.
- [8] GAO J Y, GUO C, GUO X Z, *et al.*. Observation of light amplification without population inversion in sodium[J]. *Opt. Commun.*, 1992, 93(5-6):323-327.
- [9] ZIBROV A S, LUKIN M D, NIKONOV D E, *et al.*. Experimental demonstration of laser oscillation without population inversion via quantum interference in Rb[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 75(8):1499-1452.
- [10] HARRIS S E, FIELD M J E, IMAMOGLU A. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 64(10):1107-1110.
- [11] FLEISCHHAUER M, LUKIN M D. Dark-state polaritons in electromagnetically induced transparency[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84(22):5094-5097.
- [12] 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(6819):490-483.
- [13] PHILLIPS D F, FLEISCHHAUER A, MAIR A, *et al.*. Storage of light in atomic vapour[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 86(5):783-786.
- [14] APPEL J, FIGUEROA E, KORYSTOV D, *et al.*. Quantum memory for squeezed light. [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100(9):093602.
- [15] HONDA K, AKAMATSU D, ARIKAWA M, *et al.*. Storage and retrieval of a squeezed vacuum[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100(9):093601.
- [16] CHOI K S, DENG H, LAURAT J, *et al.*. Mapping photonic entanglement into and out a quantum memory[J]. *Nature*, 2008, 452(7183):67-71.
- [17] ZHAO Y, WU C K, HAM B S, *et al.*. Microwave induced transparency in ruby[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 79(4):641-644.
- [18] WEI C J, MANSON N B. Observation of electromagnetically induced transparency within an electron spin resonance transition[J]. *J. Opt. B*, 1999, 1(4):464-468.
- [19] HAM B S, HEMMER P R, SHAHRIAR M S. Efficient electromagnetically induced transparency in a rare-earth doped crystal[J]. *Opt. Commun.*, 1997, 144(1997):227-230.
- [20] PHILLIPS M C, WANG H L, RUMYANTSEV I, *et al.*. Electromagnetically induced transparency in semiconductors via biexciton coherence[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 91(18):183602.
- [21] TURUKHIN A V, SUDARSHANAM V S, SHAHRIAR M S, *et al.*. Observation of ultraslow and stored light pulses in a solid[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 88(2):023602.
- [22] WANG H H, KANG Z H, JIANG Y, *et al.*. Erasure of stored optical information in a  $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  crystal[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(1):011105.
- [23] 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(22):221112.
- [24] 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(17):2596-259.
- [25] WANG H H, DU D M, FAN Y F, *et al.*. Enhanced four-wave mixing by atomic coherence in a  $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  crystal[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93(23):231107.
- [26] 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(6720):594-598.
- [27] XIAO M, LI Y Q, JIN S Z, *et al.*. Measurement of dispersive properties of electromagnetically induced transparency in rubidium atoms[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 74(5):666-669.

- [28] LONGDELL J J, FRAVAL E, SELLARS M J, *et al.*. Stopped light with storage times greater than one second using electromagnetically induced transparency in a solid[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95(6):063601.
- [29] WANG H H, WEI X G, WANG L, *et al.*. Optical information transfer between two light channels in  $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  crystal [J]. *Opt. Express*, 2007, 15(24):16044-16050.
- [30] TU Y F, ZHANG G Q, ZHAI Z H, *et al.*. Angular multiplexing storage of light pulses and addressable optical buffer memory in a  $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  based on electromagnetically induced transparency[J]. *Phys. Rev. A*, 2009, 80(3):033816.
- [31] BEIL F, KLEIN J, NIKOGHOSYAN G, *et al.*. Electromagnetically induced transparency and retrieval of light pulses in a  $\Lambda$ -type and a  $V$ -type level scheme in  $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ [J]. *J. Phys. B:At. Mol. Opt. Phys.*, 2008, 41(7):074001.
- [32] HAM B S. Experimental demonstration of all-optical  $1 * 2$  quantum routing[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85(6):893-895.
- [33] HAM B S. Observation of delayed all-optical routing in a slow-light regime[J]. *Phys. Rev. A*, 2008, 78(1):011808 (R).
- [34] KARPA L, VEWINGER F, WEITZ M. Resonance beating of light stored using atomic spinor polaritons[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 101(17):170406.
- [35] MACRAE A, CAMPBELL G, LVOVSKY A I. Matched slow pulses using double electromagnetically induced transparency [J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(22):2659-2661.
- [36] LI S J, YANG X D, CAO X M, *et al.*. Two EIT windows and an enhanced EIT signal in a four-level tripod atomic system [J]. *J. Phys. B*, 2007, 40(16):3211-3219.
- [37] HAN Y X, XIAO J T, LIU Y H, *et al.*. Interacting dark states with enhanced nonlinearity in an ideal four-level tripod atomic system[J]. *Phys. Rev. A*, 2008, 77(2):023824.
- [38] LI S J, YANG X D, CAO X M, *et al.*. Enhanced cross-phase modulation based on a double EIT in a four-level tripod atomic system[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 101(7):073602.
- [39] LI Y, XIAO M. Coherent transient amplification in inhomogeneously broadened rubidium atoms by diode-laser frequency switching[J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21(13):982-984.
- [40] ZHANG Y P, KHADKA U, ANDERSON B, *et al.*. Controlling four-wave and six-wave mixing processes in multilevel atomic systems[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(22):221108
- [41] ZHANG Y P, BROWN A W, XIAO M. Opening four-wave mixing and six-wave mixing channels via dual electromagnetically induced transparency windows[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 99(12):123603.
- [42] OBERST M, KLEIN J, HALFMANN T. Enhanced four-wave mixing in mercury isotopes, prepared by Stark-chirped rapid adiabatic passage[J]. *Opt. Commun.*, 2006, 264(2):463-470.
- [43] CONDE A P, BRANDT L, HALFMANN T. Trace isotope detection enhanced by coherent elimination of power broadening [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 97(24):243004.
- [44] OBERST M, VEWINGER F, LVOVSKY A I. Time-resolved probing of the ground state coherence in rubidium[J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(12):1755-1757.
- [45] VITANOV N V, HALFMANN T, SHORE B W, *et al.*. Laser-induced population transfer by adiabatic passage techniques [J]. *Annu. Rev. Phys. Chem.*, 2001, 52:763-809.
- [46] 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(11):113003.

作者简介:王 荣(1966—),女,黑龙江佳木斯人,博士,副教授,主要从事量子光学和非线性光学的研究工作。

E-mail:wrzfl72@sohu.com

通讯作者:王海华(1978—),男,辽宁营口人,博士,讲师,主要从事量子光学和激光物理的研究工作。

E-mail:haihua@jlu.edu.cn

高锦岳(1940—),男,陕西米脂人,教授,主要从事量子光学和激光物理的研究工作。

E-mail:jygao@mail.jlu.edu.cn