

原子系统中远失谐脉冲光束对的群速度操控

姜其畅 刘超 刘晋宏 张俊香

Group velocity manipulation of far off-resonant pulse-pair in atomic system

Jiang Qi-Chang Liu Chao Liu Jin-Hong Zhang Jun-Xiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 094208 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.094208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微波场作用下三能级原子系统的无反转光放大

Amplification without population inversion in tree-level system driven by an additional microwave field

物理学报.2015, 64(6): 064205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064205>

芯片原子钟相干布居囚禁谱线特性研究

Study on characteristics of coherent population trapping spectral line for chip-scale atomic clock

物理学报.2015, 64(3): 034207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034207>

Rb<sup>87</sup> 冷原子电磁感应透明吸收曲线不对称性的分析

Analysis on the absorption curve asymmetry of electromagnetically induced transparency in Rb<sup>87</sup> cold atoms

物理学报.2015, 64(3): 034206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034206>

二维电磁感应光子带隙的动态生成与调控

Dynamic generation and manipulation of electromagnetically induced 2D photonic band-gaps

物理学报.2014, 63(22): 224203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224203>

循环跃迁的  $\Delta$  型三能级系统中的无反转激光

Laser without inversion in a  $\Delta$ -configuration three-level system with cyclic transition

物理学报.2012, 61(14): 144205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.144205>

## 原子系统中远失谐脉冲光束对的群速度操控\*

姜其畅<sup>1)2)</sup> 刘超<sup>1)</sup> 刘晋宏<sup>1)</sup> 张俊香<sup>1)†</sup>

1) (山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

2) (山西运城学院, 物理与电子工程系, 运城 044000)

(2014年10月20日收到; 2015年1月6日收到修改稿)

基于远失谐的四波混频过程, 在实验上得到了放大的探针光脉冲和产生的共轭光脉冲的同时慢光传输, 并通过改变抽运光和探针光之间的双光子失谐实现了群速度的同时操控. 首先在连续光模式下, 研究了入射探针光和新产生共轭光的增益与单光子失谐之间的变化关系. 随着单光子失谐在一定范围内加大, 探针光和共轭光的增益均表现出先增加后减小的变化趋势. 在具有增益特性的基础上, 分别采用  $6\ \mu\text{s}$  和  $365\ \text{ns}$  探针光脉冲, 研究了慢光的延迟时间和双光子失谐的关系. 对  $6\ \mu\text{s}$  的探针光, 得到探针和共轭光脉冲的最大延迟分别为  $2.1\ \mu\text{s}$  和  $1.9\ \mu\text{s}$ , 对应的群速度分别约为  $0.000119c$  和  $0.000132c$ , 相应延迟比分别为  $0.35$  和  $0.32$ . 对  $365\ \text{ns}$  探针光, 探针和共轭光脉冲的最大延迟分别为  $756\ \text{ns}$  和  $670\ \text{ns}$ , 对应的群速度分别约为  $0.00033c$  和  $0.00037c$ , 相应延迟比提高到  $2.07$  和  $1.83$ .

关键词: 群速度, 慢光, 四波混频, 远失谐

PACS: 42.50.Ct, 42.50.Gy, 42.50.Nn

DOI: 10.7498/aps.64.094208

## 1 引言

光脉冲的群速度操控在全光信号处理和光学延迟线中有实际的应用价值. 自从1999年, Hau等<sup>[1]</sup>在BEC原子中实现了  $17\ \text{m/s}$  的光速传输, 从而将基于原子相干的群速度操控变为量子光学领域的一个研究热点. 慢的群速度源于大的正常色散, 它通常可以在电磁诱导透明<sup>[2-4]</sup>、相干布局振荡<sup>[5,6]</sup>或者受激布里渊散射等<sup>[7,8]</sup>相干过程中获得, 在这些相干过程中, 探针光的共振吸收受到抑制, 甚至会产生增益, 从而产生大的正常色散, 导致光速的减慢. 快的群速度源于大的反常色散, 反常色散通常对应一个吸收过程, 在二能级吸收过程中, 原则上可以产生快光传输, 但是由于吸收的影响使得信号不易观察<sup>[9]</sup>. 随后, 人们采用电磁诱导吸收<sup>[10,11]</sup>或者双增益峰<sup>[12,13]</sup>, 尤其是利用双增益

峰中间的吸收凹陷, 产生反常色散, 从而获得较高透射效率和较好脉冲保持的快光.

如果系统远离共振吸收线即远失谐时, 借助受激拉曼(Raman)过程, 在高抽运功率的条件下, 系统会对探针光产生增益, 与此同时, 在四波混频(four-wave mixing, FWM)效应中, 会同时产生一束新的共轭光<sup>[14-16]</sup>, 在增益峰附近系统表现出较强的正常色散特性<sup>[17]</sup>, 从而使光在增益放大或产生的过程中, 导致群速度的降低. Lett等先后在铷(Rb)原子泡中, 实现了具有增益特性的探针光和共轭光的同时慢光传输<sup>[16]</sup>和快慢光<sup>[18]</sup>传输, 得到的最大延迟比约0.6. 这种对两个光脉冲群速度的同时操控由于其在全光延迟线和路由领域的应用价值而逐渐受到人们的关注<sup>[19-22]</sup>. 相比铷钠等原子而言, 在同样温度下, 铯(Cs)原子汽室的密度较高, 且Cs原子基态超精细分裂也较高( $9.2\ \text{GHz}$ ), 其Raman增益峰带宽近似反比于基态超精细分裂

\* 国家自然科学基金(批准号: 11274210, 61108003)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20131401110013)和国家自然科学基金创新研究群体科学基金(批准号: 61121064)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: junxiang@sxu.edu.cn

( $\Delta_R = \Omega^2/4(\Delta_1 + \Delta_2)$ ,  $\Delta_R$  为 Raman 增益峰带宽,  $\Omega$  为抽运光拉比频率,  $\Delta_1$  为抽运光的 Raman 单光子失谐,  $\Delta_2$  为基态超精细分裂)<sup>[16]</sup>, 从而 Cs 原子的 Raman 增益峰带宽较窄. 高原子密度导致大的增益, 以及窄的增益峰带宽均可以产生较高的正常色散, 可用以获得较低的群速度. 为此我们在 Cs 原子系统中, 通过双 lambda FWM 过程, 对注入探针和产生的共轭光脉冲的群速度延迟作了研究, 在远失谐条件下, 分别采用 6  $\mu$ s 和 365 ns 探针光脉冲实现了增益的探针和共轭光脉冲的同时慢光传输, 实验中得到的脉冲最大延迟比可以达到文献 [16] 的 3 倍左右.

## 2 四波混频过程

实验中采用的原子系统为双 lambda 型原子系统, 如图 1 所示, 两个基态能级分别为铯原子 D1 线  $6^2S_{1/2}$ ,  $F = 3$  和  $6^2S_{1/2}$ ,  $F = 4$ , 两个上能态分别为 D1 线  $6^2P_{1/2}$ ,  $F' = 4$  蓝移  $\Delta_1$  和  $\Delta_1 + \Delta_2$  的虚能态,  $\Delta_1$  称之为抽运光的 Raman 单光子失谐,  $\Delta_2$  为基态超精细分裂. 抽运光频率锁定在超精细跃迁  $F = 3 \rightarrow F' = 4$  蓝移  $\Delta_1$  处, 与此同时, 也等同于锁定于  $F = 4 \rightarrow F' = 4$  蓝移  $\Delta_1 + \Delta_2$  处. 探针光频率在超精细跃迁  $F = 4 \rightarrow F' = 4$  附近扫描. 抽运光和探针光成一小角度 (约  $0.4^\circ$ ) 耦合进入长度为 75 mm 的无缓冲气体铯原子汽室. 当两束抽运光与一束探针光作用于双 lambda 型原子系统时, 基态  $F = 3$  上的电子吸收一个抽运光跃迁到失谐  $\Delta_1$  的上能态  $F' = 4$ , 之后电子从上能态跃迁到下能态  $F = 4$  时辐射一探针光, 再吸收一个抽运光跃迁到失谐  $\Delta_1 + \Delta_2$  的虚能态上, 再辐射一个共轭光回到初始基态. 这一循环跃迁形成了吸收两个抽运光, 产生一探针光和一共轭光的 FWM 效应. 因此, 注入的探针光经过 FWM 过程后被放大, 并产生第四束共轭光, 其共轭光出射方向由 FWM 相位匹配条件决定, 如图 1 虚线所示, 在探针光相对于抽运光的反侧. 探针光与共轭光强度由两个光电二极管同时探测.

对于图 1 所示 FWM 过程, 探针光和共轭光的位置是可以交换的, 由入射探针光的频率扫描范围决定. 如果探针光频率扫描范围足够大, 即将探针光由图 1 所示的跃迁频率处一直扫描至共轭光的跃迁频率处. 如图 2 所示, 中间蓝色线代表探针

光扫描时的功率分布, 最下面红线对应共轭光的功率. 最上面的黑线为饱和吸收谱.

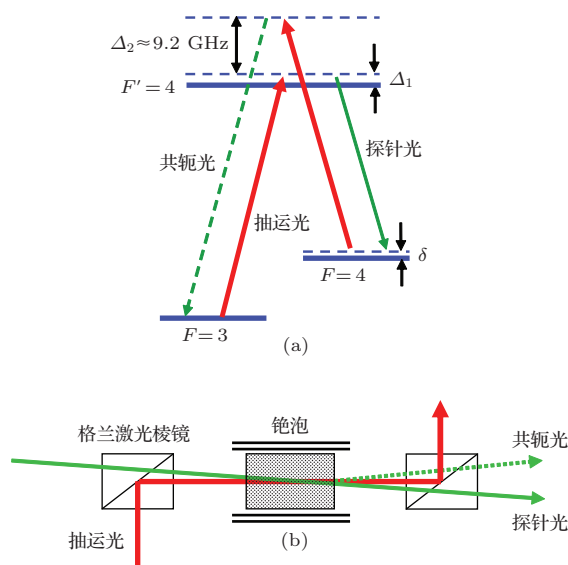


图 1 (a) 原子系统; (b) 实验装置

Fig. 1. (a) The atomic system; (b) The experimental setup.

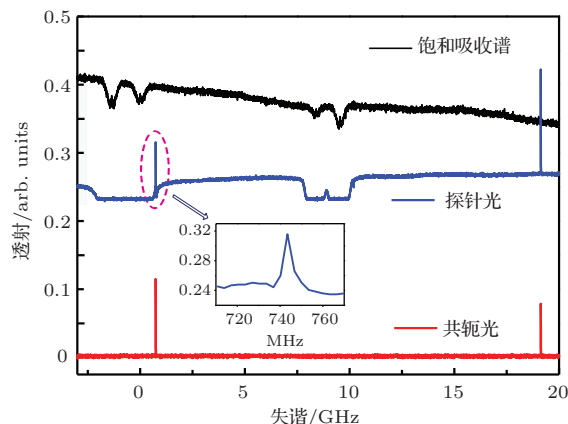


图 2 (网刊彩色) 探针光和共轭光的透射谱

Fig. 2. (color online) The transmission spectra of the probe and conjugate lights.

实验中, 我们将探针光调节到超精细跃迁  $F = 4 \rightarrow F' = 4$  附近扫描, 抽运光锁定于失谐 0.745 GHz 处, 取如下参数: 抽运光功率 200 mW, 探针光功率 12  $\mu$ W, 铯泡温度 120  $^\circ$ C. 观察探针光和共轭光的功率, 如图 2 蓝线和红线. 蓝线中功率出现突然增加处即为双 lambda 型系统中由于 FWM 效应导致探针光增益的产生. 对探针光而言, 出现 Raman 增益放大, 与此同时, 产生强的共轭光 (红线所示). 其 Raman 增益定义为探针光和共轭光的功率与注入探针光功率之比. 可以看到: 增益在双光子共振处存在. 探针光增益峰带宽 10 MHz

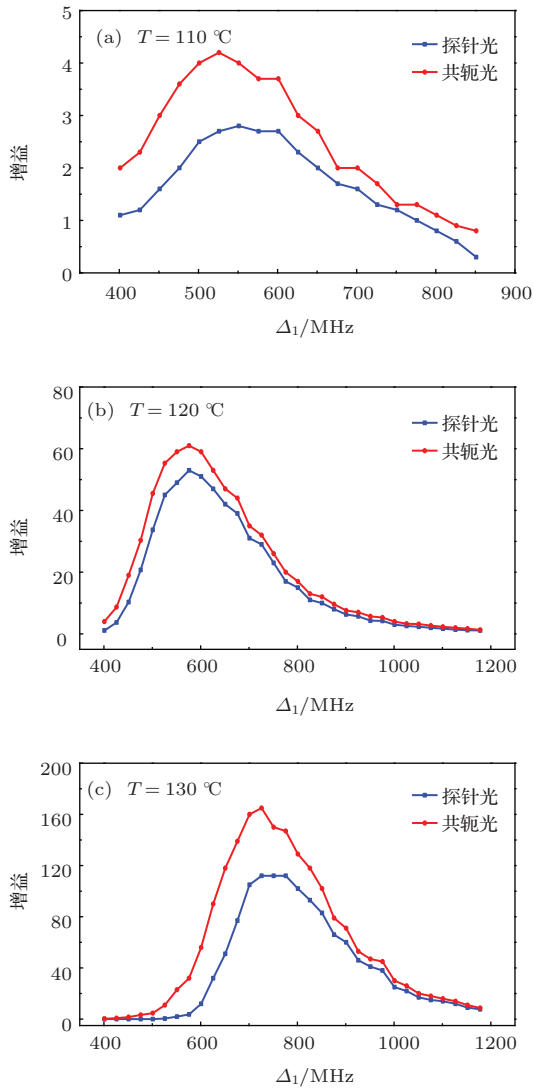


图3 不同温度下探针光和共轭光的增益与单光子失谐的关系  
Fig. 3. The gains of the probe and conjugate lights vs one-photon detuning at different temperatures.

左右, 如图2中的插图. 图3为双光子共振处, 增益随单光子失谐及温度的变化情况. 随温度增加, 增益最大值所对应的单光子失谐  $\Delta_1$  的值也有所加大. 图3中铯泡温度分别控制在 110 °C, 120 °C, 130 °C.

固定温度 120 °C, 改变抽运光功率分别为 150 mW, 200 mW 和 250 mW, 得到如图4的增益情况.

从图4可以看到: 随着抽运光功率增加, 探针光、共轭光增益都会加大, 同时增益取得最大值的位置也有所变化, 即对应的单光子失谐加大, 这与温度升高的情况类似. 根据连续光的情况, 我们下面选择合适参数, 分析脉冲光和共轭光在增益峰范围内 (10 MHz 带宽范围) 的群速度操

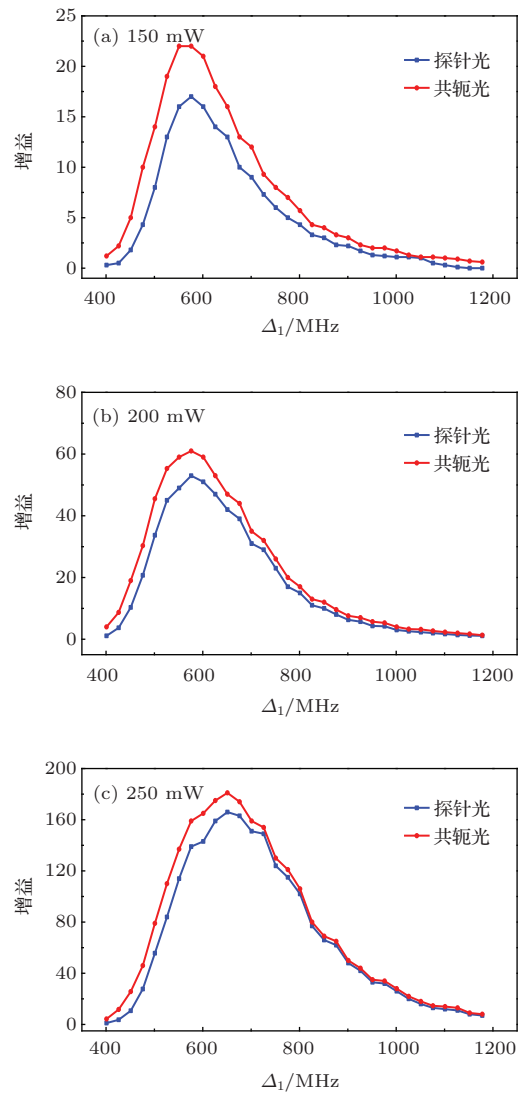


图4 不同抽运光功率下探针光和共轭光的增益特性  
Fig. 4. The gain properties of the probe and conjugate lights at different pump powers.

控特性.

### 3 探针光与共轭光的群速度操控

从上述连续模式的结果可以看到: 双光子共振情况下, 由于FWM的非线性增益, 同时产生了两个不同频率 (探针、共轭) 处的增益峰, 在增益峰附近的范围内 (10 MHz), 对应大的正常色散, 从而可导致群速度的慢光传输<sup>[17]</sup>. 实验中我们利用一束在空气中传播的脉冲作为参考光, 与通过有原子汽室在内 ( $L$  表示原子汽室长度) 的同样距离的探针光和共轭光的传输时间进行比较, 从而得到探针和共轭光脉冲相对于参考光脉冲的延迟时间  $\Delta\tau \approx L/v_g$ , 相应的群速度  $v_g$  即可由延迟时间获

得. 图5为探针光与共轭光的延迟时间和增益与双光子失谐 $\delta$ 的关系. 实验中我们采用的单光子失谐约1427 MHz, 此时远失谐对应的探针和共轭光束的光斑质量较好, 而且远离吸收背景, 相应的探针脉冲增益大于共轭脉冲增益, 与忽略吸收的理论预期相符合<sup>[23]</sup>. 取其他参数分别为: 抽运光功率330 mW, 探针光峰值功率330  $\mu$ W, 温度125  $^{\circ}$ C, 探针光脉冲半宽度为6  $\mu$ s. 随着双光子失谐由-4.8 MHz变化到2.4 MHz, 探针光和共轭光的延迟时间都呈现出增加的特性, 当双光子失谐为2.4 MHz时, 探针光和共轭光脉冲的延迟时间达到最大, 分别为2.1  $\mu$ s和1.9  $\mu$ s, 对应的群速度分别约为0.000119*c*和0.000132*c*, 相应的延迟比(脉冲延迟时间 $\Delta\tau$ 和注入探针脉冲半宽度之间的比值)分别为0.35和0.32. 在双光子失谐由-4.8 MHz变化到2.4 MHz范围内, 探针光和共轭光脉冲的增益(透射脉冲峰值功率与注入探针脉冲峰值功率的比值)呈现先增加后减小的趋势, 在双光子共振处(即双光子失谐0 MHz)达到最大, 分别为26和23; 需要说明的是, 所获得的最大延迟在双光子失谐2.4 MHz处(对应的增益为3.3和2.4), 而并非最大增益即双光子共振处. 这是由于2.4 MHz频率点位于增益峰和Raman吸收凹陷之间(如图2细节部分所示), 此时, 吸收和增益之间的竞争非常激烈, 导致色散曲线出现不完全对称的情况, 在2.4 MHz处会出现较双光子共振处更大的变化<sup>[16]</sup>.

在群速度操控及其应用中, 在获得较高群速度降低的同时, 还需获得较大的延迟比, 这样才可实现脉冲全部包络的延迟. 脉冲宽度越小, 越易于获得大的延迟比, 当然前提是脉冲的谱宽要小于透明或者增益窗口宽度<sup>[24]</sup>. 我们在实验中采用相同的实验参数, 将注入脉冲宽度减小到365 ns, 分析了探针光和共轭光脉冲的延迟特性, 如图6所示. 当双光子失谐从-4.8 MHz变化到2.4 MHz时, 探针脉冲的延迟时间从380 ns增加到756 ns, 对应的群速度约从0.00066*c*减小到0.00033*c*, 相应的延迟比从1.04增加到2.07; 共轭脉冲的延迟时间从237 ns增加到670 ns, 对应的群速度约从0.00105*c*减小到0.00037*c*, 相应的延迟比从0.65增加到1.83. 通过改变双光子失谐, 实现了对探针光和共轭光脉冲群速度的同时操控. 对比图5和图6的结果: 在同样条件下, 365 ns脉冲的延迟时间要小于6  $\mu$ s脉冲的延迟时间, 但是相应的延迟比明显增加.

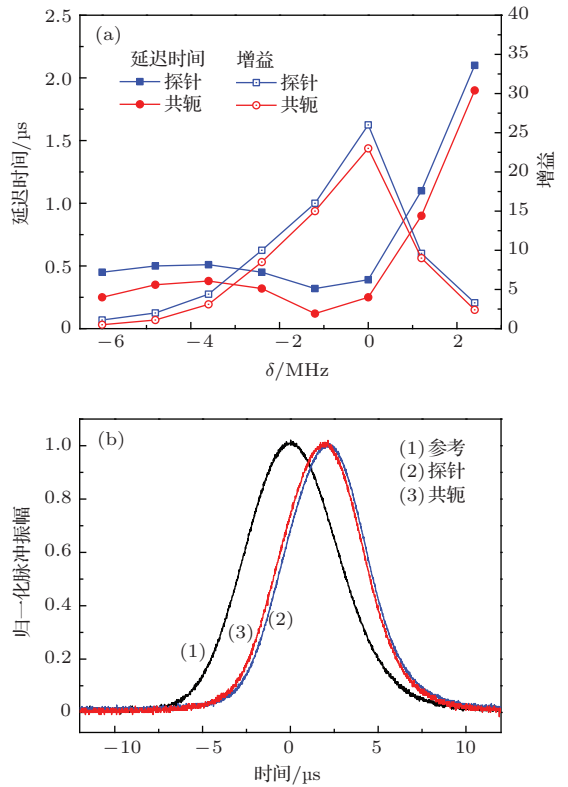


图5 (a) 探针和共轭脉冲的延迟时间与增益特性; (b) 最大延迟所对应的归一化脉冲振幅

Fig. 5. (a) The delay time and gain properties of the probe and conjugate pulses; (b) The normalized pulse amplitude for the maximum delay.

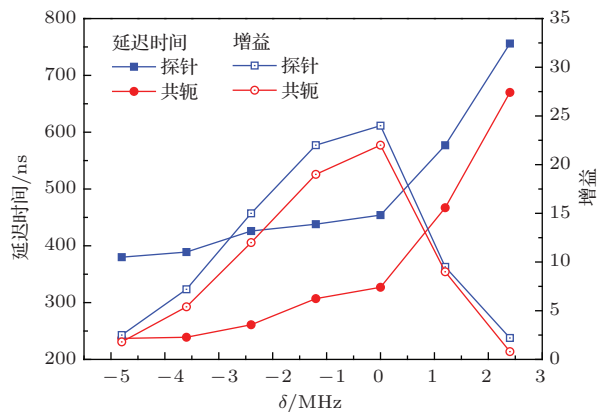


图6 365 ns高斯脉冲下探针和共轭脉冲的延迟时间与增益特性

Fig. 6. The delay time and gain properties of the probe and conjugate pulses with 365 ns Gaussian pulse.

为了更形象的理解脉冲延迟比指标的不同, 我们给出了三个特殊点的归一化强度包络. 延迟时间的最小值对应双光子失谐-4.8 MHz, 此时探针光和共轭光脉冲的延迟比(增益)分别为1.04(2.5), 0.65(1.8), 脉冲的高斯线型保持较好. 当双光子失谐为零时, 探针光和共轭光脉冲的增益最大分别为24和22, 延迟比都有所增加. 两脉冲的最大延迟

比在双光子失谐为 2.4 MHz 处获得, 分别为 2.07 和 1.83, 对应的增益分别为 2.2 和 0.8, 此时脉冲的展宽比较明显(图 7). 和已有工作相比, 我们脉冲的展宽有些严重, 但是我们的增益和延迟比要比文献 [16] 大很多, 尤其是脉冲延迟比是其三倍多, 这主要源于 Cs 原子较大的基态超精细分裂. 大的延迟比表征系统具有更大的缓冲能力, 这对慢光技术在全光缓冲器件中的应用是有利的 [25].

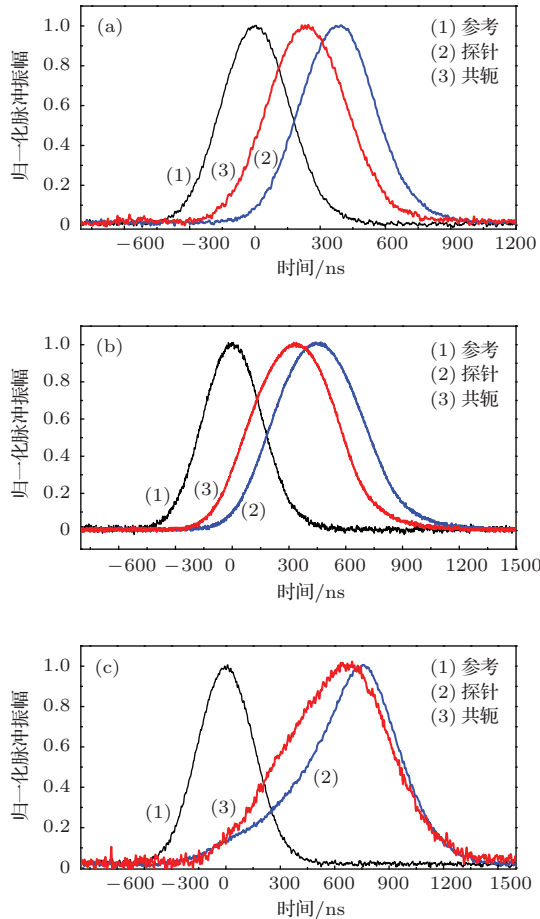


图 7 不同双光子失谐下的归一化脉冲振幅 (a) -4.8 MHz; (b) 0 MHz; (c) 2.4 MHz

Fig. 7. The normalized pulse amplitudes at different two-photon detunings (a) -4.8 MHz; (b) 0 MHz; (c) 2.4 MHz.

## 4 结 论

借助远失谐的 Raman 增益特性, 在双 lambda FWM 过程中得到了增益的探针光和共轭光的慢光传输特性. 为了减小吸收背景的影响, 在单光子失谐约 1427 MHz 的远失谐条件下, 测量了脉冲延迟时间和双光子失谐的关系, 实现了对探针光和共轭

光脉冲群速度的同时慢光操控. 将会在多通道量子信息传输、量子信息处理等中具有实际应用价值.

## 参考文献

- [1] Hau L V, Harris S E, Dutton Z, Behroozi C H 1999 *Nature* **397** 594
- [2] Fleischhauer M, Imamoglu A, Marangos J P 2005 *Rev. Mod. Phys.* **77** 633
- [3] Novikova I, Walsworth R L, Xiao Y H 2012 *Laser Photonics Rev.* **6** 333
- [4] Meng D D, Liu X D, Zhang S L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 020305 (in Chinese) [孟冬冬, 刘晓东, 张森林 2011 物理学报 **60** 020305]
- [5] Bigelow M S, Lepeshkin N N, Boyd R W 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 113903
- [6] Bigelow M S, Lepeshkin N N, Boyd R W 2003 *Nature* **301** 200
- [7] Thevenaz L 2008 *Nature Photonics* **2** 474
- [8] Zhang Z Y, Shi S H, Liang R, Zhou X J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4694 (in Chinese) [张旨遥, 石胜辉, 梁锐, 周晓军 2010 物理学报 **59** 4694]
- [9] Chu S, Wong S 1982 *Phys. Rev. Lett.* **48** 738
- [10] Akulshin A M, Cimmino A, Sidorov A I, Hannaford P, Opat G I 2003 *Phys. Rev. A* **67** 011801
- [11] Kim K, Moon H S, Lee C, Kim S K, Kim J B 2003 *Phys. Rev. A* **68** 013810
- [12] Wang L J, Kuzmich A, Dogariu A 2000 *Nature* **406** 277
- [13] Stenner M D, Gauthier D J, Neifeld M A 2003 *Nature* **425** 695
- [14] Jasperse M, Turner L D, Scholten R E 2011 *Opt. Express* **19** 3765
- [15] Guo M J, Zhou H T, Wang D, Gao J R, Zhang J X, et al 2014 *Phys. Rev. A* **89** 033813
- [16] Boyer V, McCormick C F, Arimondo E, Lett P D 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 143601
- [17] Boyd R W 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** A38
- [18] Glasser R T, Vogl U, Lett P D 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 173902
- [19] Pati G S, Salit M, Salit K, Shahriar M S 2009 *Opt. Express* **17** 8775
- [20] Fan Y F, Wang H H, Wei X G, Li A J, Kang Z H 2012 *Phys. Lett. A* **376** 785
- [21] Chen Z J, Luo B, Liu Y, Guo H 2013 *Opt. Commun.* **309** 187
- [22] Ding D S, Zhou Z Y, Shi B S 2013 *Chin. Phys. B* **22** 114203
- [23] Pooser R C, Marino A M, Boyer V, Jones K M, Lett P D 2009 *Opt. Express* **17** 16722
- [24] Boyd R W, Gauthier D J, Gaeta A L, Willner A E 2005 *Phys. Rev. A* **71** 023801
- [25] Ishikura N, Baba T, Kuramochi E, Notomi M 2011 *Opt. Express* **19** 24102

# Group velocity manipulation of far off-resonant pulse-pair in atomic system\*

Jiang Qi-Chang<sup>1)2)</sup> Liu Chao<sup>1)</sup> Liu Jin-Hong<sup>1)</sup> Zhang Jun-Xiang<sup>1)†</sup>

1) (*The State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

2) (*Departments of Physics and Electronic Engineering, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China*)

( Received 20 October 2014; revised manuscript received 6 January 2015 )

## Abstract

Based on the far off-resonant four-wave mixing process, the slow light propagations of the amplified probe and generated conjugate pulses are obtained experimentally. Simultaneous manipulations of group velocity are realized by changing the two-photon detuning between the pump light and the probe light. The dependences of gains of the injected probe and generated conjugate light on the one-photon detuning for continuous wave mode are studied at different cesium vapor temperatures and pump light powers. It is shown that the maximum of gains occurs at the proper Raman one-photon detuning. The dependence of delay time on the two-photon detuning is measured using the 6  $\mu\text{s}$  and 365 ns probe pulses, respectively. For the 6  $\mu\text{s}$  input probe pulse, the maximum delay times of the probe and the conjugate pulses are 2.1  $\mu\text{s}$  and 1.9  $\mu\text{s}$  with the fractional delays of 0.35 and 0.32, respectively, corresponding to 0.000119*c* and 0.000132*c* group velocity. The high fractional delays of 2.07 and 1.83 with the maximum delay times of 756 ns and 670 ns for the 365 ns input pulse are obtained.

**Keywords:** group velocity, slow light, four-wave mixing, far off-resonant detuning

**PACS:** 42.50.Ct, 42.50.Gy, 42.50.Nn

**DOI:** [10.7498/aps.64.094208](https://doi.org/10.7498/aps.64.094208)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11274210, 61108003), the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20131401110013), and the Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61121064).

† Corresponding author. E-mail: [junxiang@sxu.edu.cn](mailto:junxiang@sxu.edu.cn)