

文章编号: 1007-6654(2015)02-0118-05

## 双 $\Lambda$ 共振原子系统中两脉冲光束的同时慢光传输

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, 山西 太原 030006;

2. 运城学院 物理与电子工程系, 山西 运城 044000)

**摘要:** 在热的铯原子汽室中, 借助双  $\Lambda$  共振四波混频效应, 实验研究了入射探针光脉冲和产生的共轭光脉冲的同时慢光传输特性。实验中首先将泵浦光锁定在铯原子 D1 线超精细跃迁  $F=4 \rightarrow F'=3$  上, 将探针光调至超精细跃迁  $F=3 \rightarrow F'=3$  附近扫描, 通过对探针光和共轭光增益特性的分析, 给出获得最大增益所对应的最佳铯泡温度约  $110^\circ\text{C}$ 。最后, 采用  $365\text{ ns}$  高斯脉冲作为入射探针光脉冲, 研究了探针光脉冲和共轭光脉冲的延迟时间与双光子失谐的关系。通过改变双光子失谐, 探针光脉冲的延迟时间可以从  $40\text{ ns}$  增加到  $343\text{ ns}$ , 相应的群速度从  $1\ 875\text{ km/s}$  减小到  $219\text{ km/s}$ ; 产生的共轭光脉冲的延迟时间可以从  $12\text{ ns}$  增加到  $159\text{ ns}$ , 相应的群速度从  $6\ 250\text{ km/s}$  减小到  $472\text{ km/s}$ 。

**关键词:** 群速度; 四波混频; 慢光

中图分类号: O431

文献标识码: A

DOI: 10.3788/ASQO20152102.0118

### 0 引言

原子汽室中的双  $\Lambda$  四波混频效应是量子光学领域的一个研究热点<sup>[1-12]</sup>。一方面, 当四波混频过程中的两束泵浦光分别和两个不同的跃迁能级共振, 可以产生一对关联的斯托克斯和反斯托克斯光<sup>[1]</sup>, 或者支持一对光脉冲同时表现出慢的群速度传输特性<sup>[2]</sup>。另一方面, 如果原子汽室具有较高温度, 也可以只用一束强的泵浦光驱动这一四波混频系统, 在高温高泵浦功率条件下, 这一束强的泵浦光可以分别驱动不同的跃迁能级, 从而起到两束泵浦光的作用。2007年, 美国 P. D. Lett 研究小组在热的铷原子汽室中, 借助远失谐的双  $\Lambda$  四波混频过程, 入射一束强的泵浦光和一束弱的探针光, 实现了放大探针光和产生的共

轭光之间的强度差压缩<sup>[3]</sup>。随后, 他们研究小组在脉冲模式下, 采用类似的双  $\Lambda$  四波混频系统, 在不同实验条件下分别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<sup>[4]</sup>和同时快光<sup>[5]</sup>传输。2011年, 澳大利亚 M. Jasperse 研究小组给出了这一系统的解析模型并对相应的强度差压缩实验进行了分析<sup>[6]</sup>。同时, 日本熊本大学研究小组在热的钠原子系统中, 对共振的双  $\Lambda$  四波混频过程进行了研究。他们将强的泵浦光锁定在钠原子 D1 线的  $3S_{1/2} \rightarrow 3P_{1/2}$  跃迁上, 通过再入射一束弱的探针光, 研究了探针光和产生共轭光的放大特性<sup>[7,8]</sup>; 如果入射探针光是脉冲模式, 就可以得到探针光脉冲和共轭光脉冲的同时慢光传输<sup>[9]</sup>。我们注意到, 在常用的钠原子、铷原子和

收稿日期: 2015-01-09

基金项目: 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); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(批准号: 61121064)

作者简介: 姜其畅(1980-), 男, 山西运城人, 博士研究生, 研究领域: 光与原子相互作用。

†通信作者: 张俊香, E-mail: junxiang@sxu.edu.cn

铯原子汽室中,铯原子 D1 线的基态超精细分裂约 9.2 GHz,这一较大的超精细分裂有利于全光原子钟的实现。所以,我们研究小组在 2014 年,在热的铯原子汽室中借助远失谐的双  $\Delta$  四波混频过程,入射一束强的泵浦光和一束弱的探针光,实现了高频差的探针光和共轭光之间的强度差压缩<sup>[13]</sup>。本文中,我们采用热的铯原子 D1 线构建共振的双  $\Delta$  四波混频结构,研究入射的探针光脉冲和产生的共轭光脉冲的同时慢光传输特性。通过改变系统的双光子失谐,实现对两个光脉冲延迟时间的连续调节。

## 1 实验装置

采用无缓冲气体的铯原子汽室研究共振的双  $\Delta$  四波混频过程,由于铯原子 D1 线的基态超精细分裂远大于钠原子和铷原子的基态超精细分

裂,方便我们分析小失谐对共振的双  $\Delta$  四波混频过程的影响。典型的实验装置和能级结构如图 1 所示。一束强的泵浦光锁定在铯原子 D1 线超精细跃迁  $F=4 \rightarrow F'=3$  上,另外一束弱的探针光在跃迁  $F=3 \rightarrow F'=3$  附近扫描。泵浦光还可以认为锁定在能级  $F=3$  到相应的虚能级上。 $\Delta_1$  表示泵浦光相对于锁定能级的单光子失谐, $\Delta_2 \approx 9.2$  GHz 是铯原子的基态分裂, $\delta$  是泵浦光和探针光之间的双光子失谐。在这样一个封闭循环的四波混频过程中,系统吸收两个泵浦光子,分别产生一个探针光子和共轭光子,从而实现了对探针光和共轭光的放大。实验中探针光和泵浦光具有相互垂直的偏振,相对夹角约  $0.23^\circ$ ,由相位匹配条件决定了产生的共轭光分居在泵浦光的另一侧。铯原子汽室的长度  $L=75$  mm。

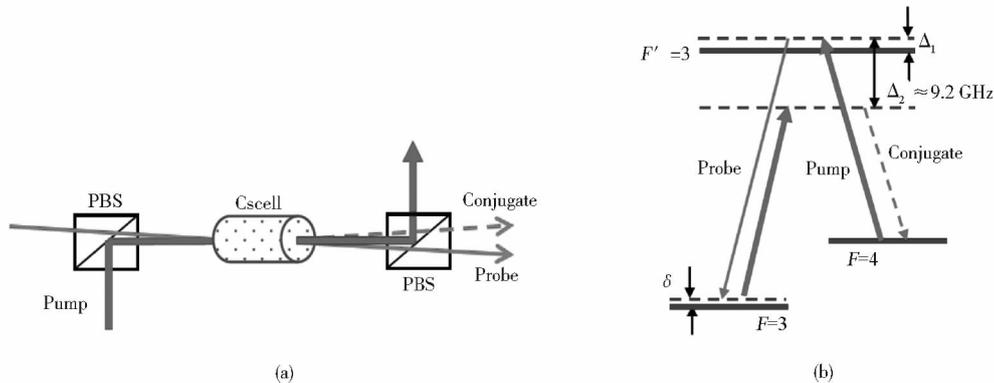


Fig. 1 (a) The experimental setup; (b) The scheme of energy level.

图 1 (a) 实验装置: Pump: 泵浦光, Probe: 探针光, Conjugate: 共轭光, PBS: 偏振分光棱镜. (b) 能级图

## 2 实验结果和讨论

我们首先研究在连续光模式下系统的放大即增益特性。将泵浦光频率锁定在超精细跃迁  $F=4 \rightarrow F'=3$  上,另外一束弱的探针光在跃迁  $F=3 \rightarrow F'=3$  附近扫描,取铯原子汽室的温度  $T=110^\circ\text{C}$ ,泵浦光和探针光功率分别为  $P_{pump}=200$  mW,  $P_{probe}=135$   $\mu\text{W}$ ,可以得到探针光和共轭光的典型透射谱(图 2)。定义输出功率与输入探针光功率之比为系统的增益  $G$ ,从图中可以看到:借助共振的双  $\Delta$  四波混频过程,探针光和共轭光均出现了增益,而且共轭光的增益要大于相应探针光的增益。原因在于探针光和超精细跃

迁  $F=3 \rightarrow F'=3$  共振,而产生的共轭光相对于实际的能级跃迁是远失谐的,所以在同样的实验条件下,系统对探针光的吸收大于对共轭光的吸收,最终导致共轭光的增益大于探针光的增益。在实验中,我们还发现探针光和共轭光的增益对铯原子汽室的温度比较敏感。图 3 分别给出了铯原子汽室在  $T=104^\circ\text{C}$ 、 $T=110^\circ\text{C}$  和  $T=116^\circ\text{C}$  下增益随单光子失谐的变化关系,其他参数与图 2 一致。从图中可以看到:探针光和共轭光要同时获得较好的增益,铯原子汽室的温度取在  $T=110^\circ\text{C}$  左右最好;在特定温度下,随着单光失谐在共振附近变化,探针光和共轭光的增益都呈现出

先增加后减小的趋势,并且在单光子失谐约

104 MHz附近获得最大增益。

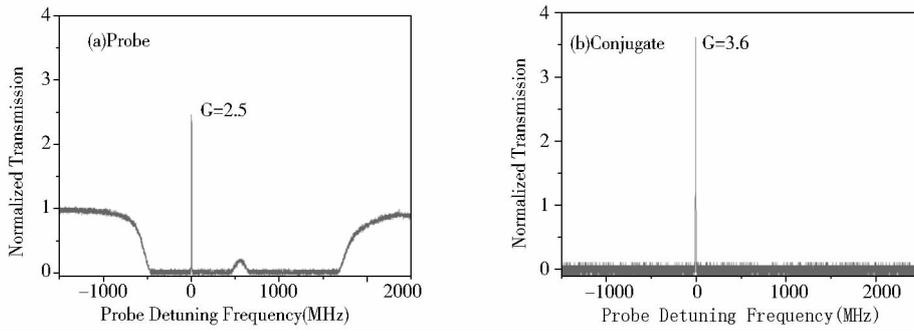


Fig. 2 The normalized transmission spectrums of the probe and conjugate lights when the one-photon detuning is zero.

图2 单光子失谐为零时,探针光和共轭光的归一化透射谱。

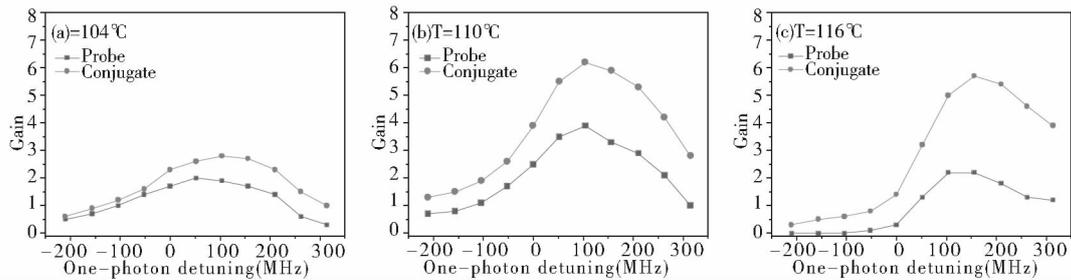


Fig. 3 The relations between the gain and the one-photon detuning at different temperatures.

图3 不同温度下增益和单光子失谐的关系。

在连续光结果的基础上,我们再转换到脉冲模式。用声光调制器 (Acoustic Optical Modulator, AOM) 将探针光调制成 365 ns 高斯脉冲,脉冲重复频率 5.3 kHz,平均功率约 2.3  $\mu$ W。铯原子汽室的温度固定在  $T=110^{\circ}\text{C}$ 。实验中脉冲的一小部分在进入铯原子汽室之前被分离作为参考光脉冲,通过铯原子汽室的探针光和产生的共轭光脉冲也同时探测并记录到示波器。从示波器上我们可以方便地给出探针光和共轭光脉冲相对于参考光脉冲的延迟时间  $\Delta\tau$ ,然后借助公式  $v_g \approx L/\Delta\tau$  可以得出相应的群速度。图 4 是探针光和共轭光脉冲的延迟时间和双光子失谐的关系。此时泵浦光的频率和超精细跃迁  $F=4 \rightarrow F'=3$  严格共振即单光子失谐为零,双光子失谐的大小由 AOM 的驱动电压精确控制。可以看到:当双光子失谐从 8.4 MHz 变化到 -9.6 MHz,探针光脉冲的延迟时间从 40 ns 增加到 343 ns,对应的群速度从 1 875 km/s 减小到 219 km/s;产生的共轭光脉冲的延迟时间可以从 12 ns 增加到最大 159 ns,相应的群速度从 6 250 km/s 减小到 472

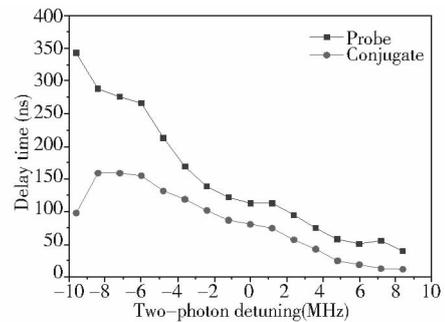


Fig. 4 The delay times of the probe and conjugate pulses vs two-photon detuning with  $P_{pump} = 390 \text{ mW}$

图4 探针光和共轭光脉冲的延迟时间与双光子失谐的关系,泵浦光功率  $P_{pump} = 390 \text{ mW}$ 。

km/s。在同样参数下,探针光脉冲的延迟时间要大于共轭光脉冲的延迟时间,这是因为探针光脉冲相比于共轭光脉冲经历了额外的相位积累,对应着更大的正常色散,从而获得更慢的群速度<sup>[4,14]</sup>。此外,探针光和共轭光脉冲的延迟时间在双光子失谐 -9.6 MHz 附近的解耦现象还有待于进一步的研究。

在图 4 的结果中,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 1.6 和 2.2,

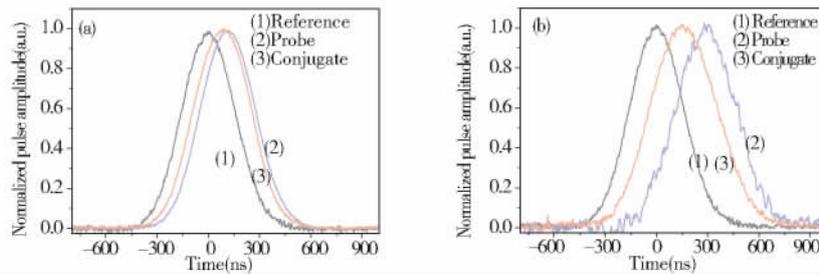


Fig. 5 The normalized pulse amplitudes of the probe and conjugate pulses when the two-photon detuning are zero (a) and  $-8.4$  MHz (b).

图 5 双光子失谐分别为 0 (a) 和  $-8.4$  MHz (b) 时, 探针和共轭光脉冲的归一化脉冲幅度。

此时脉冲几乎没有形变如图 5(a) 所示。当双光子失谐变为  $-8.4$  MHz 时, 探针光和共轭光脉冲的延迟时间较大分别为  $288$  ns 和  $159$  ns, 但是对应的增益较小分别为  $0.11$  和  $0.38$ , 此时脉冲有所展宽, 展宽比约为  $0.12$  和  $0.22$ , 如图 5(b)。

最后, 我们根据连续光的结果, 将单光子失谐固定在获得最大增益的  $104$  MHz 附近, 其他参数不变, 观察探针光和共轭光脉冲的延迟时间与双光子失谐的关系, 如图 6 所示。相比于单光子失谐为零的情况, 此时, 在双光子共振处探针和共轭光脉冲的增益也较大分别为  $3.2$  和  $3.6$ 。通过改变双光子失谐, 可以得到的探针和共轭光脉冲的最大延迟时间分别为  $359$  ns 和  $212$  ns, 相应的群速度分别为  $209$  km/s 和  $354$  km/s。当然, 在获得更大延迟时间的同时, 脉冲的展宽也略有加大。

### 3 总结

借助双  $\Delta$  共振四波混频过程, 实验研究了热的铯原子汽室中探针光脉冲和共轭光脉冲的同

#### 参考文献:

- [1] Lukin M D, Hemmer P R, Löffler M, *et al.* Resonant Enhancement of Parametric Processes Via Radiative Interference and Induced Coherence[J]. *Phys Rev Lett*, 1998, **81**: 2675-2678.
- [2] Kang H, Hernandez G, Zhu Y. Resonant Four-wave Mixing with Slow Light[J]. *Phys Rev A*, 2004, **70**: 061804.
- [3] McCormick C F, Boyer V, Arimondo E, *et al.* Strong Relative Intensity Squeezing by Four-wave Mixing in Rubidium Vapor[J]. *Opt Lett*, 2007, **32**: 178-180.
- [4] Boyer V, McCormick C F, Arimondo E, *et al.* Ultraslow Propagation of Matched Pulses by Four-wave Mixing in an Atomic Vapor[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, **99**: 143601.
- [5] Glasser R T, Vogl U, Lett P D. Stimulated Generation of Superluminal Light Pulses Via Four-wave Mixing[J]. *Phys Rev Lett*, 2012, **108**: 173902.

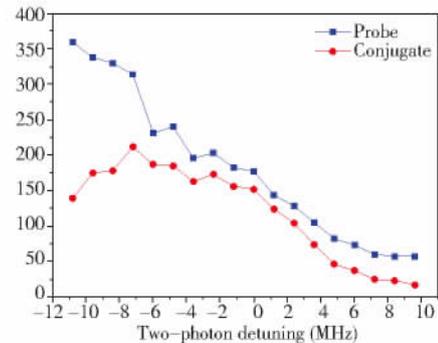


Fig. 6 The delay times of pulses vs two-photon detuning when the one-photon detuning is  $104$  MHz.

图 6 当单光子失谐为  $104$  MHz 时脉冲延迟时间和双光子失谐的关系。

时慢光传输特性。通过对连续光增益特性的研究, 优化了实验参数。随后在脉冲模式下, 通过改变双光子失谐, 放大的探针光脉冲和产生的共轭光脉冲的延迟时间可以连续调节。实验结果在全光开光和多通道量子信息处理等方面具有一定的参考价值和应用前景。

- [6] Jasperse M, Turner L D, Scholten R E. Relative Intensity Squeezing by Four-wave Mixing with Loss: an Analytic Model and Experimental Diagnostic[J]. *Opt Express*, 2011, **19**:3765-3774.
- [7] Harada K, Mori K, Okuma J, *et al.* Parametric Amplification in an Electromagnetically-induced-transparency Medium[J]. *Phys Rev A*, 2008, **78**:013809.
- [8] Takahashi K, Hayashi N, Kido H, *et al.* Coherent Pump-probe Spectroscopy in Sodium Vapor: from Electromagnetically Induced Transparency to Parametric Amplification[J]. *Phys Rev A*, 2011, **83**:063824.
- [9] Okuma J, Hayashi N, Fujisawa A, *et al.* Ultraslow Matched-pulse Propagation in Sodium Vapor[J]. *Opt Lett*, 2009, **34**:1654-1656.
- [10] 陈良超, 孟增明, 于旭东. 原子气室中四波混频线型的实验研究[J]. 量子光学学报, 2014, **20**:119-123.
- [11] 黄静波, 郭苗军, 周海涛, 等. 在不同原子汽室空间中原子相干特性的比较[J]. 量子光学学报, 2014, **20**:51-55.
- [12] 庞秀梅, 张俊香, 朱诗尧. 双  $\Lambda$  原子系统中的有效哈密顿量[J]. 量子光学学报, 2013, **19**:100-105.
- [13] Guo M J, Zhou H T, Wang D, *et al.* Experimental Investigation of High-frequency-difference Twin Beams in Hot Cesium Atoms[J]. *Phys Rev A*, 2014, **89**:033813.
- [14] Fujisawa A, Hayashi N, Takahashi K, *et al.* Arbitrary Delay-time Control of Ultraslow Matched Pulses[J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, **27**:1280-1285.

## Simultaneous Slow Light Propagation of Two Pulse Beams Based on Resonant Atomic System of Double-lambda

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 College, Yuncheng 044000, China*)

**Abstract:** The characteristics of simultaneous slow light propagation of the injected probe and generated conjugate pulses were investigated experimentally in a double-lambda resonant atomic system. Firstly, the pump light was fixed on the hyperfine transition of  $F=4 \rightarrow F'=3$  and the probe light was scanned around the transition of  $F=3 \rightarrow F'=3$  of Cs D1 line. The 110°C optimum temperature for the maximum gain is obtained by analyzing the gain properties of the probe and conjugate lights. Finally, the dependences of delay time of the probe and conjugate pulses on the two-photon detuning were studied with 365 ns injected Gaussian pulse. By adjusting the two-photon detuning, the delay time of the probe pulse can rise from 40 ns to 343 ns, corresponding to the group velocity decrease from 1 875 km/s to 219 km/s. At the same time, the delay time of the conjugate pulse can increase from 12 ns to 159 ns, corresponding to the group velocity decrease from 6 250 km/s to 472 km/s.

**Key words:** group velocity; four-wave mixing; slow light