

## 铯原子汽室中吸收线附近的双色光放大实验研究

王丹,武晋泽,刘晋宏,张俊香\*

(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;  
极端光学协同创新中心,山西 太原 030006)

**摘要:**在温度为 75℃ 的铯原子汽室中,研究了基于 D1 线封闭四能级系统中探针场在原子吸收线附近的双色光放大。分析了放大过程的物理本质:相干制备原子介质中共振增强的双四波混频。实验上通过调节耦合场的失谐量得到了作用光场之间最佳的相位匹配。

**关键词:**原子相干;四波混频;相位匹配;光放大

**中图分类号:**O431.2      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2395(2016)02-0247-04

## Experimental Investigation of Near-Resonance Bichromatic Light Amplification in Cesium Vapor

WANG Dan, WU Jinze, LIU Jinhong, ZHANG Junxiang\*

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,  
Institute of Opto-electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** We experimentally investigate the near-resonance bichromatic light amplification of probe field based on closed four-level system with the D1 line of cesium vapor heated at 75 °C. The physical essence of this amplification is resonance enhanced doubled four-wave mixing in coherently established atomic system. The perfect phase matching is achieved by tuning the frequency of the coupling field relative to atomic transition.

**Key words:** atomic coherence; four-wave mixing; phase matching; light amplification

### 0 引言

在光-原子耦合体系中,近共振光放大的实验研究可用于制备波长与原子吸收线精确匹配的量子纠缠源,从而应用于长距离的连续变量量子通信<sup>[1-2]</sup>,但伴随着光放大过程的吸收损耗以及自发辐射额外噪声,是量子网络信息传输过程中所面临的两大挑战<sup>[1,3-4]</sup>。近年来,通过提高四波混频过程中泵浦场失谐量的方法<sup>[5]</sup>来抑制吸收损耗以及自发辐射噪声,获得了原子吸收线附近的低噪声连续变量量子纠缠<sup>[6-9]</sup>,但是需要较高的泵浦功率。

此外,实现低噪声、低损耗纠缠源的另外一种光放大机制是基于电磁诱导透明(EIT)的共振增强非线性

收稿日期:2015-12-21;修回日期:2016-01-18

基金项目:国家自然科学基金(11574188;11274210);国家重点基础研究发展计划(2010CB923102);国家自然科学基金优秀团队计划(61121064)

作者简介:王丹(1987-),女,山西运城人,博士研究生,主要从事量子光学方面的研究,E-mail:wnwdwq@163.com,

\*通信作者:张俊香(ZHANG Junxiang),E-mail:junxiang@sxu.edu.cn

四波混频方案<sup>[10-12]</sup>。在耦合场以及泵浦场的操控下,探针场经过相干制备的原子介质时,其共振处吸收被强烈抑制,同时介质的三阶非线性效应得到增强。

本文利用铯原子 D1 线的超精细分裂能态构建双  $\Lambda$  型的封闭四能级体系。其中一个  $\Lambda$  型结构作用于原子的共振吸收线,用于制备基态之间的相干性,进而增强介质的非线性效应。另外一个  $\Lambda$  型结构失谐于原子共振吸收线,用于补偿四波混频过程的相位失配。实验上获得了原子吸收线附近探针场的双色光放大。因为被放大的其中一个频率成分与原子吸收线精确匹配,所以其在量子网络的量子信息处理方面具有潜在的应用价值。

### 1 能级结构与放大机理

如图 1 所示,为铯原子 D1 线的超精细分裂能级示意图。两个基态  $|a\rangle$  和  $|b\rangle$  ( $6^2S_{1/2}, F=3,4$ ) 的频率间隔为  $\omega_{ba} = 9.192$  GHz; 两个激发态  $|c\rangle$  和  $|d\rangle$  ( $6^2P_{1/2}, F'=3,4$ ) 的频率间隔为  $\omega_{dc} = 1.168$  GHz。初始时刻处于  $|b\rangle$  能态的原子在耦合场  $\omega_{c1}$  的作用下被泵浦到  $|c\rangle$  能态,经第一个拉曼跃迁  $|b\rangle \leftrightarrow |c\rangle \leftrightarrow |a\rangle$  辐射频率为  $\omega_{aS}$  的反斯托克斯光场原子跃迁至能态  $|a\rangle$ ; 能态  $|a\rangle$  的原子再被另外一束耦合场  $\omega_{c2}$  泵浦到激发态  $|d\rangle$ , 经第二个拉曼跃迁  $|a\rangle \leftrightarrow |d\rangle \leftrightarrow |b\rangle$  辐射频率为  $\omega_S$  的斯托克斯光场原子重新回到  $|b\rangle$  能态。光场相对原子跃迁的失谐量分别为  $\Delta_{c1} = \omega_{c1} - \omega_{cb}$ ,  $\Delta_{c2} = \omega_{c2} - \omega_{db}$ ,  $\Delta_S = \omega_S - \omega_{ab}$  和  $\Delta_{aS} = \omega_{aS} - \omega_{ba}$ 。拉比频率表示为  $\Omega_i$ , 这里  $i \in \{c1, c2, S, aS\}$ 。能级之间的退相干速率为  $\gamma_{ij}$  ( $i, j = a, b, c, d$ , 且  $i \neq j$ )。

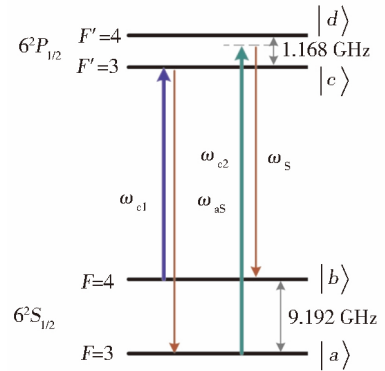


Fig. 1 (Color online) Energy levels  
图 1 能级结构

该放大过程其实是基于双拉曼跃迁的双四波混频,其物理解释为:第一个拉曼过程  $|b\rangle \leftrightarrow |c\rangle \leftrightarrow |a\rangle$  经  $\omega_{c1}$  和  $\omega_{aS}$  的共振激发制备原子基态之间的相干性  $\rho_{ab}$ :

$$\rho_{ab} = \frac{-\Omega_{aS}\Omega_{c1}^*}{[\gamma_{ba} - i(\Delta_{aS} - \Delta_{c1})](\gamma_{aa} - i\Delta_{aS}) + \Omega_{c1}^2},$$

并增强介质的非线性效应;此时在耦合场  $\omega_{c2}$  的作用下,诱导第一个四波混频过程,产生频率为  $\omega_S = \omega_{c1} - \omega_{aS} + \omega_{c2}$  斯托克斯光场,同时放大频率为  $\omega_{aS}$  的反斯托克斯光场;反过来,当注入光场频率为  $\omega_S$  时,在两束耦合场激发下,诱导第二个四波混频过程,产生频率为  $\omega_{aS} = \omega_{c2} - \omega_S + \omega_{c1}$  的反斯托克斯光场,同时放大频率为  $\omega_S$  的斯托克斯光场。因此,这两个四波混频过程使得光场能量由  $\omega_{c1}$  向  $\omega_{aS}$ ,  $\omega_{c2}$  向  $\omega_S$  的有效转移。整个过程满足能量守恒  $\omega_S + \omega_{aS} = \omega_{c1} + \omega_{c2}$ 。

### 2 实验装置

如图 2 所示,为四波混频的实验装置简图。三台相互独立的激光光源分别提供实验中的耦合场与探针

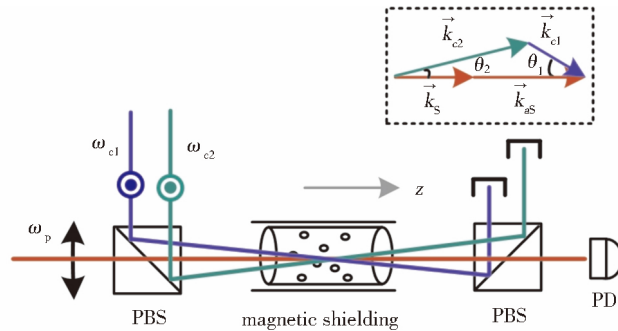


Fig. 2 (Color online) Experimental setup. PBS: polarizing beam splitter; PD: photodetector.

Inset in the dashed frame: wave-vectors configuration of phase-matched FWM

图 2 实验装置图。PBS:偏振分光棱镜;PD:光电探测器。虚线内的插图:光场波矢量描述的相位匹配示意图

场  $\omega_{c1}, \omega_{c2}$  和  $\omega_p$ 。两束耦合场采用各自的激光频率稳定系统将光场频率  $\omega_{c1}, \omega_{c2}$  锁定在图 1 所示的能级跃迁

线上。探针场频率扫描范围为 13 GHz, 覆盖了 D1 线的四个共振跃迁(也即同时涵盖了图 1 所示的斯托克斯与反斯托克斯光场), 其失谐量的定义为  $\Delta_p = \omega_p - \omega_a$ 。垂直偏振的耦合场与水平偏振的探针场在第一块 PBS 上耦合, 同向穿过长度为 75 mm 温度为 75°C 的铯原子汽室, 最终经第二块 PBS 分开。原子汽室外层包裹有三层  $\mu$  金属材料屏蔽地磁场。探针场的透射谱线由探测器 PD 收集。在原子汽室中心位置处, 三个高斯光束的光斑直径分别为  $d_{c1} = 825 \mu\text{m}$ ,  $d_{c2} = 705 \mu\text{m}$ ,  $d_p = 550 \mu\text{m}$ 。为消除由于 PBS 分光不完全导致探测器收集到泄露的耦合场信号, 耦合场  $\omega_{c1}$ ,  $\omega_{c2}$  与探针场  $\omega_p$  之间的夹角分别为  $\theta_1 = 8 \text{ mrad}$  和  $\theta_2 = 7 \text{ mrad}$ 。

高效率的四波混频要求严格的相位匹配条件, 对图 1 所示的能级体系来说作用光场的波矢量之间需满足  $\vec{\Delta k} = \vec{k}_s + \vec{k}_{as} - \vec{k}_{c1} - \vec{k}_{c2} = 0$ 。由能量守恒关系, 我们得知真空环境下的相位匹配只发生在四束光场完全共线同向传播的情况( $k_s + k_{as} - k_{c1} - k_{c2} = 0$ ), 但是共线传播会导致探测器收集到较强的背景信号。所以对于图 2 所示光场之间有角度传播的情况, 相位失配量  $\vec{\Delta k}$  沿  $z$  方向的投影为

$$\Delta k_z = n_s k_s + n_{as} k_{as} - k_{c1} \cos\theta_1 - k_{c2} \cos\theta_2 \quad (1)$$

这里考虑了介质色散对相位失配量的补偿。其中, 折射率  $n_i = \sqrt{1 + \text{Re}\chi_i}$  ( $i = S, as$ ),  $\chi_i$  为介质的线性极化率。因为耦合场  $\omega_{c1}$  和  $\omega_{c2}$  的强度较大, 假定其在介质内无损耗传输, 折射率为 1。反斯托克斯光场与能级严格共振, 共振处色散为  $\text{Re}\chi_{as} = 0$ , 所以  $n_{as} = 1$ 。由此, 方程(1)的相位失配量只有当斯托克斯光场频率相对能级有特定失谐时, 此时  $\text{Re}\chi_s < 0$  (也即  $n_s < 1$  时), 才能满足相位匹配条件  $\vec{\Delta k} = 0$ , 从而获得高效率的四波混频。

### 3 实验结果与分析

探针场的透射谱线如图 3(a) 中的曲线(ii) 所示, 透射强度的归一化单位为注入探针场在远失谐频率位置处的强度。图中曲线(i) 为铯原子 D1 线的饱和吸收谱, 用于标定光场频率, 从左到右四个多普勒展宽吸收凹陷分别对应四个偶极跃迁  $|b\rangle \leftrightarrow |c\rangle$ ,  $|b\rangle \leftrightarrow |d\rangle$ ,  $|a\rangle \leftrightarrow |c\rangle$  以及  $|a\rangle \leftrightarrow |d\rangle$ 。颜色相同的区域代表构成同一个  $\Lambda$  型能级结构的两个跃迁通道。实验中, 锁定  $\omega_{c1}$  与  $|b\rangle \leftrightarrow |c\rangle$  的能级跃迁共振,  $\omega_{c2}$  相对  $|a\rangle \leftrightarrow |d\rangle$  的能级跃迁红失谐 400 MHz。实验结果指出, 尽管探针场在吸收线附近属于完全不透明的介质, 经双四波混频过程, 光场能量由耦合场向探针场高效率转移。在大约 10 mW 的泵浦功率下同时获得了 7 倍的反斯托克斯光场增益与 10 倍的斯托克斯光场增益, 且反斯托克斯光场的频率与能级跃迁严格共振。

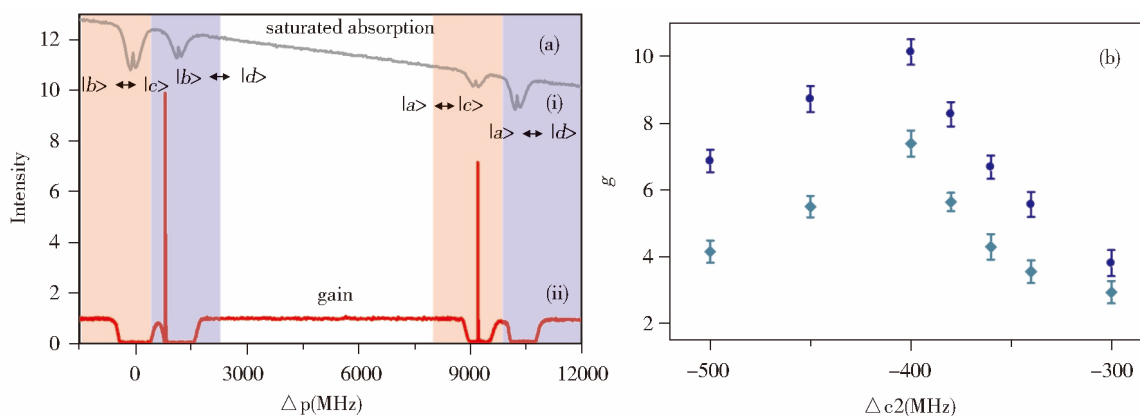


Fig. 3 Experimental results (Color online) (a) Probe transmission spectrum. Experimental parameters:

Optical powers  $P_{c1} = 8 \text{ mW}$ ,  $P_{c2} = 10 \text{ mW}$ , and  $P_p = 8 \mu\text{W}$ . Frequency detuning of coupling fields  $\Delta_{c1} = 0$ ,  $\Delta_{c2} = -400 \text{ MHz}$ . (b) The gain ( $g = P_{p-out}/P_{p-in}$ )

as a function of the detuning  $\Delta_{c2}$ , blue circles and green squares for the Stokes and anti-Stokes, respectively.

图 3 实验结果 (a) 探针场透射谱线。实验参数: 耦合场功率  $P_{c1} = 8 \text{ mW}$ ,  $P_{c2} = 10 \text{ mW}$ ,

探针场功率  $P_p = 8 \mu\text{W}$ , 耦合场失谐量  $\Delta_{c1} = 0$ ,  $\Delta_{c2} = -400 \text{ MHz}$ 。(b) 增益大小

( $g = P_{p-out}/P_{p-in}$ ) 随耦合场失谐量  $\Delta_{c2}$  的变化, 蓝色的圆点与绿色的方块分别代表斯托克斯与反斯托克斯光场

如上所述, 为了获得高效率的四波混频, 我们需调节  $(\omega_{c2}, \omega_s)$  这对光场的失谐量, 使其在某一特定的单光子失谐但双光子共振的频率位置处补偿相位失配量。为此, 我们实验上寻找出最佳的失谐量为  $\Delta_s = \Delta_{c2} = -400 \text{ MHz}$ , 如图 3(b) 所示, 此时对应最大的斯托克斯与反斯托克斯增益。尽管在光放大过程中反斯托

克斯光场由于面临共振处的吸收问题,其增益小于斯托克斯光场的增益。但是共振频率处的高效率光放大有助于解决参量过程中非经典光场与原子跃迁频率精确匹配的难题。

#### 4 结论

分析了封闭四能级光-原子耦合体系中基于双拉曼跃迁实现探针场双色光放大的物理机制。利用非共振的线性色散补偿相位失配,得到双四波混频过程的最佳的相位匹配条件,实现了注入探针场在斯托克斯与反斯托克斯频率处的双色光放大。且被放大的反斯托克斯光场与原子吸收线精确匹配。推动了原子参量放大过程在量子信息处理方面的应用。

#### 参考文献:

- [1] Duan L M, Lukin M D, Cirac J I, *et al.* Long-distance Quantum Communication with Atomic Ensembles and Linear Optics [J]. *Nature*, 2001, **414**: 413-418. DOI: 10. 1038/35106500.
- [2] Samuel L Braunstein, Peter van Loock. Quantum Information with Continuous Variables[J]. *Rev Mod Phys*, 2005, **77**: 513. DOI: 10. 1103/RevModPhys. 77. 513.
- [3] Carlton M. Caves. Quantum Limits on Noise in Linear Amplifiers[J]. *Phys Rev D*, 1982, **26**: 1817. DOI: 10. 1103/PhysRevD. 26. 1817.
- [4] Thomas Scheidl, Rupert Ursin, Alessandro Fedrizzi, *et al.* Feasibility of 300 km Quantum Key Distribution with Entangled States[J]. *New J of Phys*, 2009, **11**: 085002. DOI: 10. 1088/1367-2630/11/8/085002.
- [5] Pooser R C, Marino A M, Boyer V, *et al.* Low-Noise Amplification of a Continuous-Variable Quantum State[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, **103**: 010501. DOI: 10. 1103/Phys Rev Lett. 103. 010501
- [6] 王红丽, 王丹, 郭苗军, 等. 铯原子介质中受激拉曼四波混频的光放大特性[J]. *量子光学学报*, 2015, **21**: 33-38. DOI: 10. 3788/ASQO20152101. 0033.
- [7] Guo Miaojun, Zhou Haitao, Wang Dan, *et al.* Experimental Investigation of High-frequency-difference Twin Beams in Hot Cesium Atoms[J]. *Phys Rev A*, 2014, **89**: 033813. DOI: 10. 1103/PhysRevA. 89. 033813.
- [8] Marino A M, Pooser R C, Boyer V, *et al.* Tunable Delay of Einstein-Podolsky-Rosen Entanglement[J]. *Nature*, 2009, **457**: 859-862. DOI: 10. 1038/nature07751.
- [9] Ken-ichi Harada, Kenji Mori, Junji Okuma, *et al.* Parametric Amplification in an Electromagnetically-induced-transparency Medium[J]. *Phys Rev A*, 2008, **78**: 013809. DOI: 10. 1103/Phys Rev A. 78. 013809.
- [10] Lukin M D, Matsko A B, Fleischhauer M, *et al.* Quantum Noise and Correlations in Resonantly Enhanced Wave Mixing Based on Atomic Coherence[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **82**: 1847. DOI: 10. 1103/Phys Rev Lett. 82. 1847.
- [11] Vlatko Vedral, Danielle A Braje, Pavel Kolchin, *et al.* Generation of Paired Photons with Controllable Waveforms[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, **94**: 183601. DOI: 10. 1103/PhysRevLett. 94. 183601.
- [12] Wu Haibin, Xiao Min, Bright Correlated Twin Beams from an Atomic Ensemble in the Optical Cavity[J]. *Phys Rev A*, 2009, **80**: 063415. DOI: 10. 1103/PhysRevA. 80. 063415.