基于六波混频的双波长红外光信号研究

朱长军,张国青,翟学军,薛 兵

(西安工程大学 理学院 物理系,陕西 西安 710048)

摘 要: 利用钛宝石激光脉冲在铷原子蒸汽中通过非线性光学混频产生两个不同波长的红外光脉冲信号。研究了铷原子数密度、泵浦激光强度以及光脉冲啁啾对两个红外光信号之间竞争特性的影响。结果表明,两个红外光信号主要产生于两个耦合的差频参量六波混频过程;信号的强度随铷原子数密度、泵浦激光强度和光脉冲啁啾发生变化;两个红外光信号间的竞争主要由两个参量六波混频过程的相位匹配决定,相位匹配与铷原子数密度相关度很强,而与泵浦激光强度和光脉冲啁啾相关度很弱。

关键词: 红外脉冲信号; 参量六波混频; 耦合; 相位匹配

中图分类号: O437 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1462-05

Two-wavelength infrared optical signals based on six-wave mixing

Zhu Changjun, Zhang Guoqing, Zhai Xuejun, Xue Bing

(Department of Physics, School of Science, Xi′an Polytechnic University, Xi′an 710048, China)

Abstract: Optical pulse signals of two different wavelengths in the infrared regime were generated in atomic Rb vapor by nonlinear optical frequency mixing using optical pulses generated in a Ti:sapphire laser. The effects of Rb number density, pump laser intensity, and the chirp of laser pulses on the competition characteristics of the two signals were investigated. The results show that the two signals are mainly generated from two coupled parametric six-wave mixings processes, and the signals vary with Rb number density, pump laser intensity and the chirp of pump laser pulses. The competition between the two signals is dominantly governed by phase matching conditions which are closely related to Rb number density, but scarcely related to pump laser intensity and the chirp of pump laser pulses.

Key words: infrared pulse signals; parametric six-wave mixing; coupling; phase matching

收稿日期: 2014-09-18; **修订日期:** 2014-10-23

基金项目: 陕西省普通高校重点学科建设专项资金((2008)169);陕西省自然科学基金(2012JM1011)

作者简介: 朱长军(1964-),男,教授,博士,主要从事超快光学、光电子学方面的研究。Email:cjzhu@xpu.edu.cn

0 引 言

红外光信号被广泛应用于遥感、红外线感应以及各种物质的化学结构鉴定等领域。双波长红外光脉冲信号在光学瞬态开关、光学逻辑门、红外成像等领域具有广阔的应用前景[1-2]。近年来,两个非线性光学混频之间的相互作用成为研究热点。张彦鹏等人[3]研究了铷原子中两个相干的四波混频通道的竞争,并且在实验上通过双重电磁感应透明窗[4]研究了铷原子中四波混频和六波混频过程的相互作用。王志国等人[5]通过相位调制实现了六波混频信号与荧光信号的增强和抑制。张贻齐等人[6]通过移动的电磁感应光栅实现了荧光信号的非倒易性控制。

然而,目前通过耦合的非线性六波混频产生双波长红外光脉冲信号和多波长红外光脉冲信号的研究比较薄弱。深入研究不同波长红外光脉冲信号间的相互作用不仅能够揭示相关过程的相互作用机制,而且能够拓展红外光脉冲信号的应用范围。文中研究了铷原子蒸汽中两个耦合的六波混频通道之间的相互作用机制,以及双波长红外光脉冲信号之间的竞争特性。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示。钛宝石激光再生放大系统产生重复频率为 1 kHz 的脉冲,单脉冲能量 1 mJ,脉冲宽度 120 fs,脉冲光谱宽度 9 nm。泵浦激光脉冲经过衰减后通过焦距为 25 cm 的透镜聚焦在铷原子蒸汽盒中,光脉冲的中心波长调谐至 760 nm,通过双光子跃迁激发铷原子的 $7^2S_{1/2}$ 态。铷原子数密度可以通过改变加热炉的温度进行调节。经过铷原子蒸汽盒后,残余的泵浦激光用近红外虑波器过滤,红外光信号用红外光谱仪探测并记录。

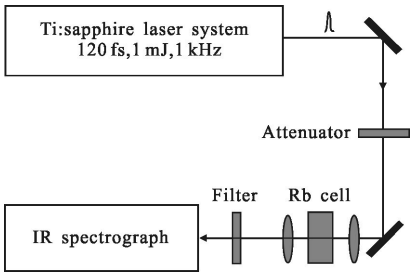

图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental arrangement

图 2 给出了铷原子的部分能级,其中 $5^2S_{1/2}\rightarrow\rightarrow7^2S_{1/2}$ 满足双光子跃迁选择定则,对应的波长为 380 nm。$7^2S_{1/2}\rightarrow6^2P_{3/2}$,$6^2P_{3/2}\rightarrow6^2S_{1/2}$,$6^2S_{1/2}\rightarrow5^2P_{1/2}$,$6^2S_{1/2}\rightarrow5^2P_{3/2}$,$5^2P_{1/2}\rightarrow5^2S_{1/2}$,$5^2P_{3/2}\rightarrow5^2S_{1/2}$ 满足单光子跃迁选择定则,可以产生共振跃迁,对应的波长分别为 3 970、2 732、1 324、1 366、795、780 nm。利用 760 nm 的双光子泵浦能够实现 $5^2S_{1/2}\rightarrow\rightarrow7^2S_{1/2}$ 的双光子跃迁,从而产生差频的六波混频。由于 $6^2S_{1/2}\rightarrow5^2P_{1/2}$ 和 $6^2S_{1/2}\rightarrow5^2P_{3/2}$ 同时发生,会出现两个耦合的差频六波混频过程,即 $5^2S_{1/2}\rightarrow\rightarrow7^2S_{1/2}\rightarrow6^2P_{3/2}\rightarrow5^2S_{1/2}\rightarrow5^2P_{1/2}\rightarrow5^2S_{1/2}$ 和 $5^2S_{1/2}\rightarrow\rightarrow7^2S_{1/2}\rightarrow6^2P_{3/2}\rightarrow6^2S_{1/2}\rightarrow5^2P_{3/2}\rightarrow5^2S_{1/2}$。

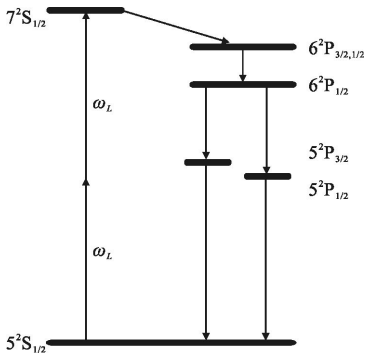

图 2 两个耦合参量六波混频过程涉及的铷原子能级

Fig.2 Rb energy levels involved in the two coupled parametric SWM processes

2 结果与讨论

实验中,在泵浦光强为 $2\times10^{10}\ W\cdot cm^{-2}$、铷原子数密度为 $1.5\times10^{16}\ cm^{-3}$ 且泵浦光脉冲无初始啁啾的条件下,探测到 1 323 nm 和 1 367 nm 的光信号如图3所示。同时,也探测到 781、793、2 731、3 969 nm 的辐射。实验探测到的 1 323 nm 和 1 367 nm 红外信号非常靠近 $6^2S_{1/2}\rightarrow5^2P_{1/2}$ 和 $6^2S_{1/2}\rightarrow5^2P_{3/2}$ 的共振跃迁波长。$6^2S_{1/2}\rightarrow5^2P_{1/2}$ 和 $6^2S_{1/2}\rightarrow5^2P_{3/2}$ 的共振跃迁波长分别为 1 324 nm 和 1 366 nm。这一结果表明,实验探测到的红外信号的中心波长并不等于相应能级间的共振跃迁波长,信号主要不是源于共振辐射。实验中还发现,只能在沿泵浦光前进的方向观测到相干辐射,而且探测到的 1 323 nm 和 1 367 nm 红外光信号的谱宽(半高全宽)约为 1.5 nm,远远大于相关能级共振跃迁产生的光谱宽度。Boyd 等人[7]从理论上分析了四波混频和放大的自发辐射的竞争,并在实验中证实了四波混频的增强和放大的自发辐射的抑制。在笔者

的实验中,由于泵浦光脉冲具有较宽的谱宽,在四波混频产生的同时能够产生六波混频，在一定条件下放大的自发辐射受到抑制。由于实验探测到的红外信号的中心波长并不等于相应能级间的共振跃迁波长,六波混频过程不是共振过程,而是参量过程。参量六波混频和参量四波混频过程有许多相似点,其中之一就是参量四波混频和放大的自发辐射之间的竞争，在满足相位匹配的条件下放大的自发辐射会受到抑制。此外，两个参量六波混频通道共享能级 $6^2S_{1/2}$,因此两通道存在耦合与竞争,竞争引起两红外光信号的增强与抑制。下文讨论实验参数对光信号增强与抑制的影响。

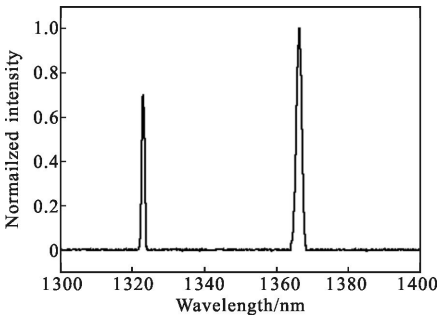

图 3 波长为 1 323 nm 和 1 367 nm 的相干信号,泵浦光强 2×10^{10} W·cm^{-2},铷原子数密度 1.5×10^{16} cm^{-3}

Fig.3 Coherent signals at 1 323 nm and 1 367 nm, pump laser intensity 2×10^{10} W·cm^{-2} and Rb number density 1.5×10^{16} cm^{-3}

2.1 铷原子数密度的影响

实验中，泵浦光强为 2×10^{10} W·cm^{-2}，光脉冲无啁啾，铷原子数密度在 0.5×10^{16}~5×10^{16} cm^{-3}的范围内变化。测量得到两个信号随铷原子数密度的变化，如图 4 所示。可以看出,两个信号随铷原子数密度

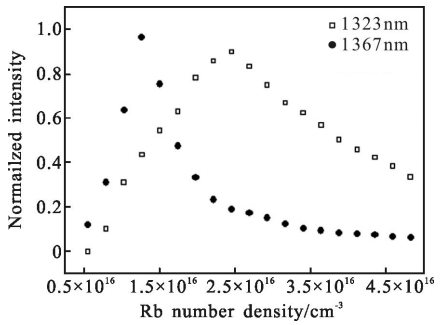

图 4 信号随铷原子密度的变化,泵浦光强 2×10^{10} W·cm^{-2}

Fig.4 Variation of parametric SWM signals with Rb number density at pump laser intensity 2×10^{10} W·cm^{-2}

增加而增强,达到各自的峰值后,随铷原子数密度增加而减小。波长为 1 323 nm 的信号在铷原子数密度约为 2.5×10^{16} cm^{-3} 时信号达到最强,波长为 1 367 nm 的信号在铷原子数密度约为 1.3×10^{16} cm^{-3} 时信号达到最强。当铷原子数密度处在 1.3×10^{16}~2.5×10^{16} cm^{-3} 之间,这两个信号表现出竞争,波长为 1 323 nm 的信号随铷原子数密度增加而增强，而波长为 1 367 nm 的信号随铷原子数密度增加而减弱。

为了研究两个信号之间的竞争机制，分别计算每个六波混频过程中的相位匹配条件。在共线情况下,六波混频过程的相位失配为:

$$\Delta k=\frac{1}{c}[2n(\omega_1)\omega_1-n(\omega_2)\omega_2-n(\omega_3)\omega_3-n(\omega_4)\omega_4-n(\omega_5)\omega_5] \quad (1)$$

式中:c 为真空中的光速;ω_1 为泵浦光的角频率;ω_2 为信号光的角频率;ω_3, ω_4 和 ω_5 为闲频光的角频率。对于气体介质,折射率 $n(\omega)$可表示为[8]:

$$n^2(\omega)=1+\frac{Ne^2}{2\varepsilon_0 m_e}\sum_i\frac{f_{ig}(\omega_{ig}^2-\omega^2)}{(\omega_{ig}^2-\omega^2)^2+\gamma_{ig}^2\omega^2} \quad (2)$$

式中:N 为原子数密度;e 和 m_e 分别为电子的电荷和质量;f_{ig} 和 ω_{ig} 分别为从原子初态 g 到终态 i 的偶极跃迁强度和角频率;γ_{ig} 为原子跃迁谱线的宽度。通过查阅参考文献[9]可以得到铷原子相关跃迁的振子强度和跃迁角频率,泵浦光、信号、闲频光波长附近的铷原子折射率可通过不同铷原子数密度计算得到。对于每一个给定的铷原子数密度,将六波混频通道中泵浦光、信号、闲频光的波长和折射率代入公式(1)计算得到相位失配量。

图 5 给出了两个六波混频通道中相位失配随铷原子数密度变化的计算结果。当铷原子数密度为 1.3×10^{16} cm^{-3} 时,1 323 nm 光信号所在的通道中相位失配的绝对值(70.71 cm^{-1})远远大于 1 367 nm 光信号所在的通道中相位失配的绝对值(0.93 cm^{-1}),导致 1 323 nm 光信号强度远远小于 1 367 nm 光信号强度,如图 4 所示。然而，当铷原子数密度为 2.5×10^{16} cm^{-3} 时,1 323 nm 光信号所在的通道中相位失配的绝对值(2.82 cm^{-1})远远小于 1 367 nm 光信号所在的通道中相位失配的绝对值(64.68 cm^{-1}),导致 1 323 nm 光信号强度远远大于 1 367 nm 光信号强度，如图 4 所示。由于相位匹配与光学混频过程有密切的联系,从理论计算和实验结果相比较可知，两个红外光信号主要产生于参量六波混频过程。

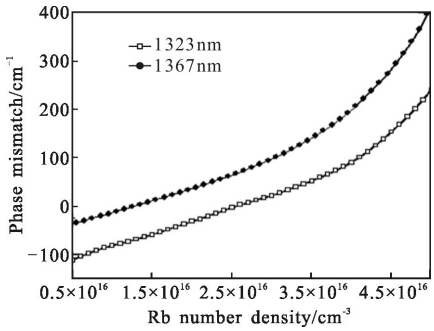

图 5 不同铷原子密度下两个六波混频通道中的相位失配

Fig.5 Phase mismatches in the two parametric SWM channels for different Rb number densities

2.2 泵浦激光强度的影响

实验中，铷原子数密度为 $1.5\times10^{16}\ \mathrm{cm}^{-3}$，且光脉冲无初始啁啾，泵浦光强在 1.7×10^{9}~$6.9\times10^{12}\ \mathrm{W\cdot cm}^{-2}$ 的范围内变化。测量得到两个信号随泵浦激光强度的变化，如图 6 所示。

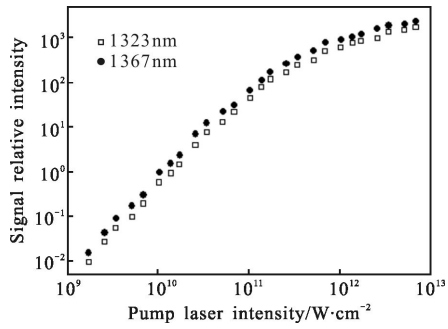

图 6 六波混频信号随泵浦光强的变化，铷原子数密度 $1.5\times10^{16}\ \mathrm{cm}^{-3}$

Fig.6 Variation of parametric SWM signals with pump laser intensity at Rb number density $1.5\times10^{16}\ \mathrm{cm}^{-3}$

从图 6 可以看出，两个信号均随泵浦光强的增加而增加。泵浦光强小于 $2\times10^{11}\ \mathrm{W\cdot cm}^{-2}$ 时，两个信号增长率较大，泵浦光强大于 $2\times10^{11}\ \mathrm{W\cdot cm}^{-2}$ 时，两个信号增长率逐渐变小。其主要原因如下：(1) 随泵浦光强的增加，铷原子电离率增加，降低了有效铷原子数密度；(2) 铷原子电离会引起泵浦激光在电离区产生自散焦效应，降低了焦点处有效泵浦光强，从而出现饱和效应。

考虑光克尔效应，介质的折射率 $n(\omega)$ 可表示为：

$$n(\omega)=n_0(\omega)+n_2(\omega)I \tag{3}$$

式中：$n_0(\omega)$ 为介质的线性折射率；$n_2(\omega)I$ 为光克尔效应引起的非线性折射率；I 为泵浦光强。由于气体的 n_2 和固体、液体的 n_2 相比非常小，由光克尔效应引起的两个参量六波混频通道中各个相应波长的非线性折射率非常小，相位匹配条件几乎不变。

在不同原子数密度下重复上述实验，结果基本一致，即两个信号均随泵浦光强的增加而增加，并出现信号饱和。进一步研究表明，随原子数密度增大，饱和泵浦光强增大。产生这一现象的机制在于，原子数密度增加会导致电离率降低，同时减弱自散焦效应，饱和泵浦光强增大。

2.3 泵浦脉冲啁啾的影响

实验中，泵浦光脉冲能量为 1 μJ（峰值强度为 $2\times10^{10}\ \mathrm{W\cdot cm}^{-2}$），铷原子数密度为 $1.5\times10^{16}\ \mathrm{cm}^{-3}$，改变光脉冲的啁啾参量。测量得到两个信号随泵浦光脉冲啁啾参量的变化，如图 7 所示。可以看出，泵浦光脉冲无啁啾时，参量六波混频信号达到最大值。随着啁啾参量绝对值的增大，参量六波混频信号强度减小。

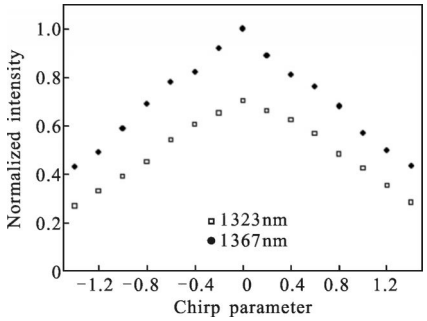

图 7 参量六波混频信号随泵浦光脉冲啁啾参量的变化，铷原子密度 $1.5\times10^{16}\ \mathrm{cm}^{-3}$，单脉冲能量 1 μJ

Fig.7 Variation of parametric SWM signals with chirp parameter of the pump laser pulses at Rb number density $1.5\times10^{16}\ \mathrm{cm}^{-3}$ and pump laser pulse energy 1 μJ

这一结果可以用以下机制解释：由于光脉冲能量固定不变，啁啾会引起脉冲的展宽，随着啁啾参量的增加，光脉冲的展宽量会增大，峰值强度随之减弱，参量六波混频信号的强度会减小；另一方面，啁啾参量的正负均会导致光脉冲展宽，且正负啁啾对参量六波混频信号的影响基本相同。综上所述，泵浦光脉冲的啁啾参量不影响两个参量六波混频信号之间的竞争，随着泵浦光脉冲啁啾参量的增加，两个信号均减小，但减小速率有一些差别。强信号的减小速率比弱信号的减小速率大，主要原因在于，非线性光学混频过程中信号与泵浦光脉冲强度之间存在非线性关系，强信号对泵浦光脉冲强度的变化更加敏感。

3 结 论

采用钛宝石激光放大系统产生宽带宽的光脉冲,通过双光子激发,在铷原子蒸汽中产生 1 323 nm 和 1 367 nm 的光脉冲信号,同时,探测到 781、793、2731、3 969 nm 的光辐射。两个红光外信号产生于两个耦合的差频参量六波混频过程,信号间的竞争主要由两个参量六波混频通道的相位匹配条件决定,相位匹配与铷原子数密度密切相关。泵浦激光强度和啁啾对两个红外光信号都产生影响,但不引起两个红外光信号间的竞争。通过控制相位匹配能够控制两个参量六波混频信号之间的竞争,改变泵浦激光强度和啁啾可以改变两个参量六波混频信号的强度。上述结果不但拓展了双波长红外光脉冲信号的产生方法,而且在光学瞬态开关、光学逻辑门等领域具有重要的应用价值。

参考文献:

[1] Wang Haitao, Geng Anbing. Unified infrared imaging optical system of dual spectral[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(3): 489-492. (in Chinese)
王海涛, 耿安兵. 一体化红外双波段成像光学系统 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 489-492.

[2] Li Peimao, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Dual-band infrared optical system design and image quality evaluation [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(11): 2882-2888. (in Chinese)
李培茂, 王霞, 金伟其, 等. 双波段红外光学系统设计与像质评价[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 2882-2888.

[3] Zhang Yanpeng, Anderson B, Brown A W, et al. Competition between two four-wave mixing channels via atomic coherence[J]. ***Appl Phys Lett***. 2007, 91(6): 061113.

[4] Zhang Yanpeng, Brown A W, Xiao Min. Opening four-wave mixing and six-wave mixing channels via dual electromagnetically induced transparency windows [J]. ***Phys Rev Lett***, 2007, 99(12): 123603.

[5] Wang Zhiguo, Ying Peng, Li Peiying, et al. Switching suppression and enhancement of fluorescence and six-wave mixing by phase modulation[J]. ***Scientific Reports***, 2013, 3(3): 3417.

[6] Zhang Yiqi, Wu Zhenkun, Zheng Huaibin, et al. Controllable nonreciprocity of six-wave mixing by a moving electromagnetically induced grating [J]. ***Laser Phys***, 2014, 24(4): 045402.

[7] Boyd R W, Malcuit M S, Gauthier D J, et al. Competition between amplified spontaneous emission and the four-wave-mixing process [J]. ***Phys Rev A***, 1987, 35(4): 1648-1658.

[8] Katharakis M, Merlemis N, Serafetinides A, et al. Four-wave mixing and parametric four-wave mixing near the 4P-4S transition of the potassium atom [J]. ***J Phys B***, 2002, 35(24): 4969-4980.

[9] Miles R, Harris S E. Optical third-harmonic generation in alkali metal vapors [J]. ***IEEE J Quantum Electron***, 1973, QE-9(4): 470-484.