

简并四波混频诱导光放大效应的实验研究

周海涛*, 戴玉鹏, 郭瑞翔, 解舒云, 王丹, 杨保东

山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006

摘要 实验研究了铯蒸气中受激简并四波混频(DFWM)产生的一对共轭光束的增益谱。结果表明,在简并二能级跃迁系统中,只有当基态的角动量大于或等于激发态的角动量时,才能发生基于受激 DFWM 的光放大效应。在考虑原子的所有塞曼子能态后,定性理论分析表明,该过程是在稳定的基态塞曼相干且初始塞曼子能级上有大量原子布居的前提下,基于多个 N 型跃迁环路实现的。并进一步分析了泵浦功率、原子数密度和单光子失谐等实验参量对 DFWM 信号增益的影响。此外,研究发现,额外引入一束波长为 852 nm 的抽运光,可显著提高 DFWM 的放大效率。

关键词 量子光学; 光放大; 简并四波混频; 电磁诱导透明; 基态相干; 抽运光

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1827001

Experimental Research on Optical Amplification Effect Induced by Degenerate Four-Wave Mixing

Zhou Haitao*, Dai Yupeng, Guo Ruixiang, Xie Shuyun, Wang Dan, Yang Baodong

College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract We experimentally investigate the gain spectra of a pair of conjugate beams by stimulated degenerate four wave mixing (DFWM) in cesium vapor. The results show that in a degenerate two-level transition system, the optical amplification effect based on stimulated DFWM can occur only when the angular momentum of ground state is greater than or equal to that of excited state. After considering all Zeeman sub-states of atoms, the qualitative theoretical analysis shows that the process is based on multiple N-type transition loops under the premise of stable ground state Zeeman coherence and large population of atoms at the initial Zeeman level. The effects of experimental parameters such as pump power, atomic number density and single photon detuning on the gain of DFWM signals are further analyzed. Moreover, it is found that the amplification efficiency of DFWM can be significantly improved by introducing an additional driving beam with a wavelength of 852 nm.

Key words quantum optics; optical amplification; degenerate four wave mixing; electromagnetically induced transparency; ground state coherence; driving light

OCIS codes 270.1670; 300.1030; 300.3700; 300.6420

1 引言

四波混频(FWM)是基于介质的三阶光学非线性效应,一般用 χ^3 来描述非线性特性, χ 表示介质的复极化率。由于遵从能量守恒和动量守恒定律的

FWM可产生新的光场,因此FWM在量子通信和光信息网络中起着非常重要的作用^[1-3]。基于原子相干的FWM可用于探测光场的量子特性^[4-6],故其被用于全光控制的量子逻辑门的构建^[7-9]、光放大效应的增强^[10-13]及量子纠缠源的制备^[14-17]。比如,

收稿日期: 2021-02-08; 修回日期: 2021-03-15; 录用日期: 2021-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(11704235, 61975102, 61575112)、山西省青年科技研究基金(201901D211166)、山西省高等学校科技创新项目(2020L0038)

通信作者: *zht007@sxu.edu.cn

McCormick 等^[14] 在实验上利用受激拉曼散射 (SRS) 的 FWM, 在实现弱信号光放大的同时, 产生了一束与信号光具有强度关联的共轭光。该过程的机制是: 原子在吸收两个泵浦光子的能量的同时, 辐射出一个信号光子和一个共轭光子。由于被放大的信号光和新产生的共轭光的频率不同, 因此该过程为非简并 FWM (NFWM)。在此过程中, 基于电磁诱导透明 (EIT) 的原子相干性有效抑制了原子的自发辐射噪声^[18-22], 进而被放大的信号光与新产生的共轭光之间获得了较强的量子关联。因此, 基于 SRS 的 FWM 在纠缠图像^[23-24]、量子计量^[25]、级联 NFWM 过程的 Cluster 态制备^[26] 以及多通道全光量子隐形传态^[27] 等领域得到了广泛的应用。

本文对简并二能级原子系综中的光放大效应进行了实验研究。1977 年, Wu 等^[28] 利用二能级钠原子系统证明了光放大 (负吸收) 效应的放大机制为布居数反转^[29-30] 和无反转激光放大 (LWI)^[31]。在我们的实验中, 由于泵浦光、被放大的信号光以及产生的共轭光三者之间的频率完全相同, 因此实现微弱信号光放大的过程又被称为受激简并 FWM (DFWM)^[32]。实验证实了在简并二能级热原子系统中, 只有当基态角动量大于或等于激发态角动量时, 通过调整泵浦光的强度、频率失谐及原子数密度等参量^[12-13], 系统才能由 EIT 效应转变为非线性 FWM。当基态角动量等于激发态角动量时, 可获得效率更高的 DFWM 信号。此外, 实验发现, 通过引入一束非相干抽运光, 可显著提高 DFWM 信号的放大效率。近年来, 基于受激过程的 DFWM 在光子晶体^[33-34]、原子磁力仪^[35] 和超导量子比特中^[36-37] 得到了广泛的应用。例如, Lin 等^[38] 在两束弱信号光对向穿过原子介质的基础上, 从理论角度提出了一种实现非互易光放大操控的可行性方案, 进一步

拓宽了基于原子相干的无磁光量子器件的应用范围。

2 实验过程及结果分析

在实验中, 将¹³³Cs 原子 D1 线作为研究对象, 其简并能级跃迁示意图如图 1(a) 所示, 其中实线代表频率为 ω_p 的泵浦光, 虚线代表频率为 ω_s 的信号光。二能级系统的基态和第一激发态各有两个超精细分裂能级 F_g 和 F_e , 其中 F_g 为 3 或 4, F_e 为 3 或 4, F 为能级的总角动量量子数, 下标 g 代表基态, 下标 e 代表激发态。因此, 能级间可以形成 4 种跃迁: (i) $F_g=4 \rightarrow F_e=3$; (ii) $F_g=4 \rightarrow F_e=4$; (iii) $F_g=3 \rightarrow F_e=3$; (iv) $F_g=3 \rightarrow F_e=4$ 。实验装置示意图如图 1(b) 所示。两台波长为 894.5 nm、可连续调谐的光栅反馈半导体激光器出射的光, 经单模光纤整形后分别作为泵浦光和信号光。泵浦光频率锁定在原子共振中心附近, 信号光频率在原子共振中心附近扫描, 定义 Δ_p 和 Δ_s 分别为泵浦光和信号光的频率失谐。垂直偏振的泵浦光被格兰-泰勒棱镜 (GT1) 反射后, 穿过 Cs 原子气室中心, 随后被另一个格兰-泰勒棱镜 (GT2) 反射出去。水平偏振的信号光透射过 GT1 后, 相对泵浦光以微小角度 θ 穿过 Cs 原子气室, 随后透射过 GT2 进入探测器 PD1。PD2 用于探测 DFWM 产生的共轭光信号。原子气室内泵浦光和信号光的有效束宽分别为 80 μm 和 27 μm , 两束光之间的夹角 θ 约为 0.2°。Cs 原子气室长度 L 为 25 mm, 气室两通光端面镀有减反膜, 减反膜可有效降低气室引起的线性损耗。紧贴气室侧壁处固定一热敏电阻用于测量原子气室温度, 并在气室侧壁外包裹三层高磁导率的金属箔以屏蔽外界磁场的影响。屏蔽筒外侧均匀缠绕电加热带用于改变 Cs 原子气室温度 T 。

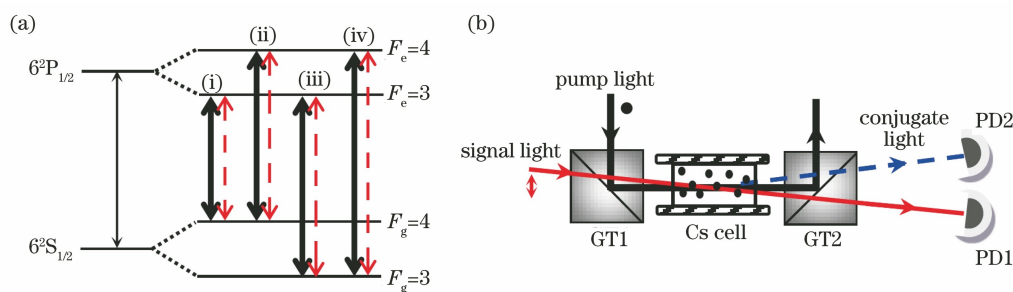


图 1 实验细节图。(a) 在¹³³Cs 原子 D1 线中简并能级跃迁示意图; (b) 实验装置示意图

Fig. 1 Diagrams of experimental details. (a) Schematic diagram of transition between degenerate energy levels in D1 line of ¹³³Cs atom; (b) schematic diagram of experimental equipments

实验测量了在不同 Cs 原子气室温度 T 下, 4 种简并能级跃迁的信号光和共轭光的归一化透射谱, 如图 2 所示。实验中 T 的升高代表参与 FWM 过程的原子数密度在增加。实验结果表明, 在单、双光子共振中心处, 即 $\Delta_s = \Delta_p = 0$ 处, 当 $T = 40^\circ\text{C}$ 时, 对于 $F_g \geq F_e$ 的能级跃迁, 信号光均表现出明显的 EIT 特性, 如图 2(a)~(c) 中的曲线(1)所示; 而对于 $F_g < F_e$ 的能级跃迁, 信号光表现为较弱的 EIT 效应, 如图 2(d) 中的曲线(1)所示。此时, 在 PD2 处均无 DFWM 信号产生, 如图 2(a)~(d) 中的曲线(1')所示。当 $T = 60^\circ\text{C}$ 时, 对于 $F_g \geq F_e$ 的能级跃迁, 相干原子由 EIT 效应转化为受激 DFWM 过程, 即信号光均有不同程度的放大, 如图 2(a)~(c) 中的曲线(2)所示。此时, 在探测器 PD2 处探测到了无多普勒吸收背景的 DFWM 信号, 如图 2(a)~(c) 中的曲线(2')所示。而对于 $F_g < F_e$ 的能级跃迁, EIT 效应稍有提高, 但无 DFWM 信号

产生, 如图 2(d) 中的曲线(2)和(2')所示。当 $T = 80^\circ\text{C}$ 时, 在 $F_g = 4 \rightarrow F_e = 3$ 的能级跃迁中, 信号光和共轭光的放大率不升反降, 如图 2(a) 中的曲线(3)和(3')所示。出现该现象的原因是该跃迁能级下 FWM 效率较小, 而原子数密度的提高又进一步加强了原子对两束 DFWM 信号的吸收。在 $F_g = 4 \rightarrow F_e = 4$ 和 $F_g = 3 \rightarrow F_e = 3$ 的能级跃迁中, 信号光和共轭光的放大率明显提升, 二者的信号光放大率约为 1.5, 共轭光的放大率约为 1, 如图 2(b)、(c) 中的曲线(3)和(3')所示。在 $F_g = 3 \rightarrow F_e = 4$ 的能级跃迁中, 双光子共振中心依然保持透明峰, 并无放大效应, 同时 PD2 处仍然无任何 DFWM 信号产生, 如图 2(d) 中的曲线(3)和(3')所示。综上所述, 在 $F_g \geq F_e$ 的能级跃迁条件下, 虽然 DFWM 的增益效率不同, 但是放大的信号光光谱和产生的共轭光光谱均表现为线宽较窄的洛伦兹单峰结构。

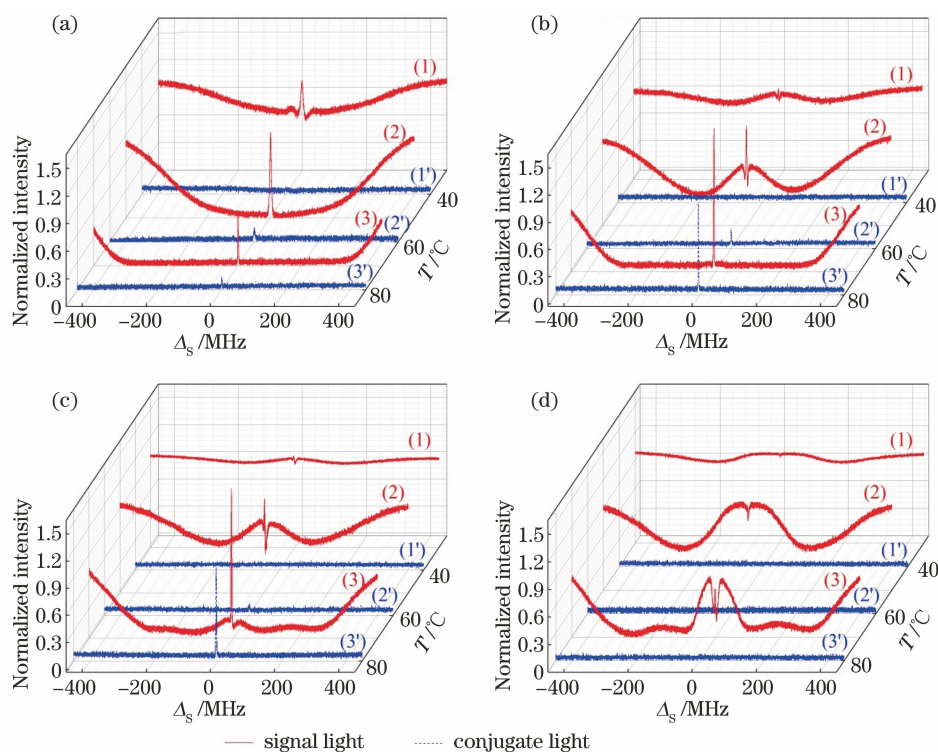


图 2 在不同温度下, 4 种简并能级跃迁的信号光和共轭光的归一化透射谱。(a) $F_g = 4 \rightarrow F_e = 3$; (b) $F_g = 4 \rightarrow F_e = 4$; (c) $F_g = 3 \rightarrow F_e = 3$; (d) $F_g = 3 \rightarrow F_e = 4$

Fig. 2 Normalized transmission spectra of signal light and conjugate light for 4 kinds of transitions between degenerate energy levels at different temperatures. (a) $F_g = 4 \rightarrow F_e = 3$; (b) $F_g = 4 \rightarrow F_e = 4$; (c) $F_g = 3 \rightarrow F_e = 3$; (d) $F_g = 3 \rightarrow F_e = 4$

考虑二能级系统下所有的塞曼子能态, 对图 2 的结果进行定性的分析。上述 4 种 $F_g \rightarrow F_e$ 的简并能级跃迁实际是由各塞曼子能态间的多个跃迁叠加而成的。一束线偏光可以看成一对左旋(σ_+)和右

旋(σ_-)圆偏光的叠加, 它们分别耦合相应的 σ 跃迁。在实验中, 泵浦光和信号光是偏振相互垂直的线偏光, 如果将信号光的偏振方向作为量子化轴, 信号光将激发 π 跃迁, 泵浦光将激发 σ 跃迁, 故可以用

$\sigma_+ \rightarrow \pi \rightarrow \sigma_- \rightarrow \pi$ 等多个 N 型循环跃迁来分析图 2 中的 DFWM 过程。图 3 为 4 种简并能级跃迁的塞曼子能级图。泵浦光的 σ_+ 分量驱动原子从初始能级 $m_{F_g} = m (m = -4, \dots, 4)$ 跃迁到 $m_{F_e} = m + 1$, 该过程用图中的实线表示; 在辐射一个信号光子后, 原子转移到 $m_{F_g} = m + 1$ 能级, 该过程用图中的虚线表示; 随后原子又吸收泵浦光的 σ_- 分量, 被激发到 $m_{F_e} = m$ 能级, 该过程用图中的点线表示; 在最终回落到 $m_{F_g} = m$ 能级的同时, 产生一个共轭光子, 该过程用图中细点划线表示。因此, 共轭光与信号光具有相同的偏振特性, 这已在实验中得到了证明。在建立有效的 DFWM 跃迁环路时, 必须考虑到两个条件: 1) 基态塞曼子能级间具有稳定的塞曼相干性; 2) $\sigma_+ \rightarrow \pi \rightarrow \sigma_- \rightarrow \pi$ 循环跃迁的初始泵浦塞曼子能级上具有足够的原子布居来实现能量由泵浦光转移至信号光和共轭光的过程。在简并二能级系统中, 当 $F_g \rightarrow F_e$ 且 $F_e \leq F_g$ 时, 泵浦诱导的原子绝大多数布居在基态上, 而在 $F_g \rightarrow F_e$ 且 $F_e > F_g$ 时, 原子在激发态上也有显著的布居数。因此, 当信号光与泵浦光作用于同一个超精细能级跃迁时, 基于 $\sigma \rightarrow \pi$ 跃迁的 Λ 型链可构建稳定的基态塞曼相干^[12, 19, 39]。在 DFWM 过程中, 4 个光子之间的能量交换本质上是通过 N 型跃迁的 4 个塞曼能级间的布居数转移来实现的^[13, 40]。如图 3(a)~(c) 中的虚

线框所示, 当 $F_g \rightarrow F_e$ 且 $F_e \leq F_g$ 时, 初始泵浦能态上有效的原子布居均形成了两条 N 型跃迁环路: 1) 在 $F_g = 4 \rightarrow F_e = 3$ 能级跃迁中, $|m_{F_g} = -3\rangle \rightarrow |m_{F_e} = -2\rangle \rightarrow |m_{F_g} = -2\rangle \rightarrow |m_{F_e} = -3\rangle \rightarrow |m_{F_g} = -3\rangle$ 和 $|m_{F_g} = 3\rangle \rightarrow |m_{F_e} = 2\rangle \rightarrow |m_{F_g} = 2\rangle \rightarrow |m_{F_e} = 3\rangle \rightarrow |m_{F_g} = 3\rangle$; 2) 在 $F_g = 4 \rightarrow F_e = 4$ 能级跃迁中, $|m_{F_g} = -4\rangle \rightarrow |m_{F_e} = -3\rangle \rightarrow |m_{F_g} = -3\rangle \rightarrow |m_{F_e} = -4\rangle \rightarrow |m_{F_g} = -4\rangle$ 和 $|m_{F_g} = 4\rangle \rightarrow |m_{F_e} = 3\rangle \rightarrow |m_{F_g} = 3\rangle \rightarrow |m_{F_e} = 4\rangle \rightarrow |m_{F_g} = 4\rangle$; 3) 在 $F_g = 3 \rightarrow F_e = 3$ 能级跃迁中, $|m_{F_g} = -3\rangle \rightarrow |m_{F_e} = -2\rangle \rightarrow |m_{F_g} = -2\rangle \rightarrow |m_{F_e} = -3\rangle \rightarrow |m_{F_g} = -3\rangle$ 和 $|m_{F_g} = 3\rangle \rightarrow |m_{F_e} = 2\rangle \rightarrow |m_{F_g} = 2\rangle \rightarrow |m_{F_e} = 3\rangle \rightarrow |m_{F_g} = 3\rangle$ 。此外, 可以发现, 对于 $F_g = F_e$ 的所有塞曼子能级, 除了泵浦光诱导形成稳定的基态 Λ 型链之外, 激发态还形成一条 V 型链。激发态的高衰减率导致布居在激发态子能级上的原子快速地自发衰减到基态子能级上, 故在 N 型跃迁环路中, 初始泵浦能态上较多的原子布居进一步提高了 DFWM 非线性转换效率。对于 $F_g \rightarrow F_e$ 且 $F_e > F_g$ 的能级跃迁, 在泵浦诱导下只形成了两条稳定的 V 型链, 即原子布居在激发态的所有塞曼子能级上, 如图 3(d) 所示, 此时基态的塞曼相干极易被较强的自发辐射破坏。因此, 对于信号光, 只观察到 EIT 效应。

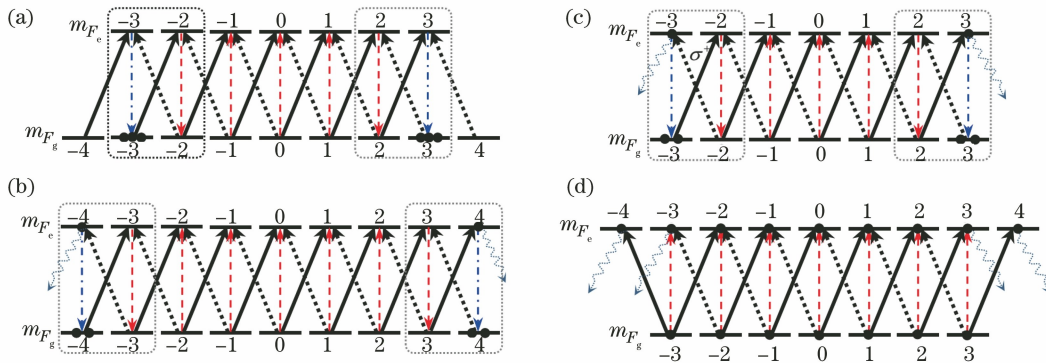


图 3 4 种简并能级跃迁的塞曼子能级。(a) $F_g = 4 \rightarrow F_e = 3$; (b) $F_g = 4 \rightarrow F_e = 4$; (c) $F_g = 3 \rightarrow F_e = 3$; (d) $F_g = 3 \rightarrow F_e = 4$

Fig. 3 Zeeman sublevels for 4 kinds of transitions between degenerate energy levels. (a) $F_g = 4 \rightarrow F_e = 3$;

(b) $F_g = 4 \rightarrow F_e = 4$; (c) $F_g = 3 \rightarrow F_e = 3$; (d) $F_g = 3 \rightarrow F_e = 4$

3 各实验参量对 DFWM 效率的影响

图 4 展示了在 $F_g \rightarrow F_e$ 且 $F_e \leq F_g$ 三种简并能级跃迁中, 各实验参量对信号光和共轭光增益的影响。此处的增益为经过 Cs 原子气室后放大的信号光(产生的共轭光)功率 $P_s(P_c)$ 与输入 Cs 原子气室的信号光功率 P_{s_0} 的比值, 即信号光增益为 $G_s =$

P_s/P_{s_0} , 共轭光增益为 $G_c = G_s - 1 = P_c/P_{s_0}$ 。三种简并结构下, 在原子共振中心处, 即 $\Delta_p = 0$, 一对 DFWM 共轭光束的增益随泵浦光功率 P_p 的升高均先快速增大, 然后变得缓慢并趋于饱和, 只是对应的泵浦饱和功率略有差异。在 $F_g = 4 \rightarrow F_e = 3$ 的能级跃迁中, 在 P_p 约为 50 mW 处增益接近饱和, 信号光增益 G_s 没有超过 1, 共轭光增益也较小, $G_c \approx$

0.22,如图 4(a)中圆圈所示。在 $F_g=4 \rightarrow F_e=4$ 能级跃迁中,在 P_p 约为 80 mW 处增益接近饱和,最大 $G_s \approx 2.03$,最大 $G_c \approx 1.09$,如图 4(a)中三角形所示。在 $F_g=3 \rightarrow F_e=3$ 的能级跃迁中,在 P_p 约为 80 mW 处增益接近饱和,最大 $G_s \approx 2.57$,最大 $G_c \approx 1.59$,如图 4(a)中正方形所示。当泵浦功率固定不变时,即 $P_p=50$ mW,在 $F_g=4 \rightarrow F_e=3$ 的能级跃迁中,一对 DFWM 共轭光束的增益随 Cs 原子气室温度的增加呈单调下降趋势,当 $T=60$ °C 时,最大 $G_s \approx 1.04$,最大 $G_c \approx 0.25$;当 $T=100$ °C 时,二者的增益均降至 0,如图 4(b)中圆圈所示。在 $F_g \rightarrow F_e = F_g$ 两种能级跃迁中,一对 DFWM 共轭光束的增益随 Cs 原子气室温度升高均呈现先增大后减小的变化趋势,且在 $T=80$ °C 时,增益最大。在 $F_g=4 \rightarrow F_e=4$ 的能级跃迁中,最大 $G_s \approx 1.88$,最大 $G_c \approx 1.08$,如图 4(b)中三角所示;在 $F_g=3 \rightarrow F_e=3$ 的能级跃迁中,最大 $G_s \approx 2.13$,最大 $G_c \approx 1.31$,如图 4(b)中正方形所示。

此外,在固定泵浦功率($P_p=50$ mW)和 Cs 原子气室温度($T=80$ °C)的基础上,还研究了各简并跃迁能级的 DFWM 信号与泵浦光频率失谐 Δ_p 间

的关系,发现最大增益并不在原子共振中心处。在 $F_g=4 \rightarrow F_e=3$ 的能级跃迁中,信号光增益 G_s 相对共振中心呈“M”型分布,即在正负失谐处各出现一个极大值,而共轭光增益 G_c 无变化规律,如图 4(c)中圆圈所示。这是因为在图 4(c)中的频率失谐范围内,共轭光的增益本身就很小,且在较高 Cs 原子气室温度下,自聚焦效应导致泵浦光在 Cs 原子气室内的光斑模式变化较大,严重影响了 DFWM 信号的强度。在 $F_g=4 \rightarrow F_e=4$ 的能级跃迁中,一对 DFWM 共轭光束的最大增益出现在 $\Delta_p \approx -200$ MHz 处,最大 $G_s \approx 4.51$,最大 $G_c \approx 3.39$ 。如图 4(c)中三角形所示。此外,随着 Δ_p 的减小或增大,增益快速地减弱。当 $\Delta_p > 0$ 时,信号光增益基本维持在 1.10 左右,而共轭光增益几乎为 0。这是因为在此频率失谐范围内,处于 Cs 原子气室内的泵浦光斑发散严重,抑制了共轭光的产生。在 $F_g=3 \rightarrow F_e=3$ 的能级跃迁中,一对 DFWM 共轭光束的最大增益也出现在 $\Delta_p \approx -200$ MHz 处,最大 $G_s \approx 2.45$,最大 $G_c \approx 1.29$ 。随着 Δ_p 的减小或增大,DFWM 信号的增益缓慢减小,且在正频率失谐范围内,依然有明显的增益信号,如图 4(c)中正方形所示。

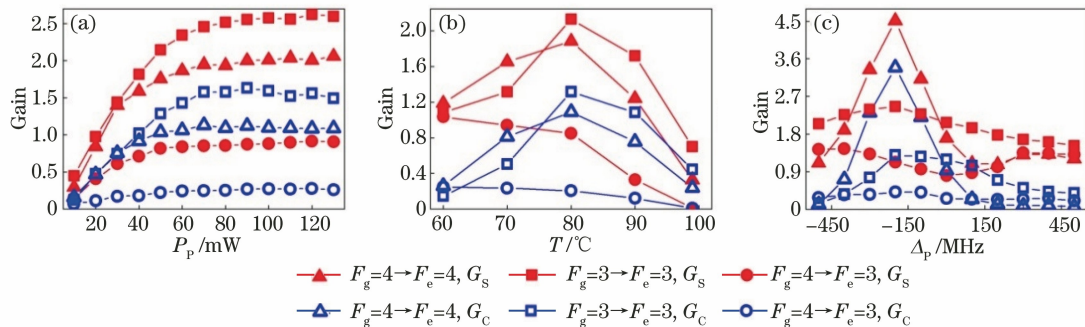


图 4 在三种简并能级跃迁中,各种实验参量对信号光和共轭光增益的影响。(a)泵浦功率;
(b) Cs 原子气室温度;(c)泵浦光的频率失谐

Fig. 4 Effects of various experimental parameters on gains of signal light and conjugate light in three kinds of transitions between degenerate energy levels. (a) Pump power; (b) temperature of Cs atomic chamber; (c) frequency detuning of pump light

4 引入 852 nm 抽运光提高放大效率

从图 4(a)、(b)中可以看出,在原子共振中心处,提高泵浦光功率或增加原子数密度对 DFWM 效率的提升能力有限。虽然提高原子气室有效长度也可以显著地提高放大效率^[16],但是在高功率和高粒子数密度条件下,泵浦光在介质内的自聚焦效应的显著增强以及泵浦光场的横向分布强度随单光子失谐的剧烈变化,均会严重影响增益信号的稳定性。

然而,在实验中我们发现,在图 1(b)所示的实验光路的基础上,利用二向色镜(对 895 nm 波长的光高反,对 852 nm 波长的光增透)将一束垂直偏振的 852 nm 波长的抽运光(频率为 ω_D)输入到 Cs 原子气室中,该抽运光在 Cs 原子气室中心的有效束宽约为 40 μm 。然后再选择合适的跃迁能级,就可以大幅提高 DFWM 的效率。针对不同的简并跃迁能级,抽运光作用能级如图 5 所示。此时,选取的抽运光功率 $P_D=10$ mW。

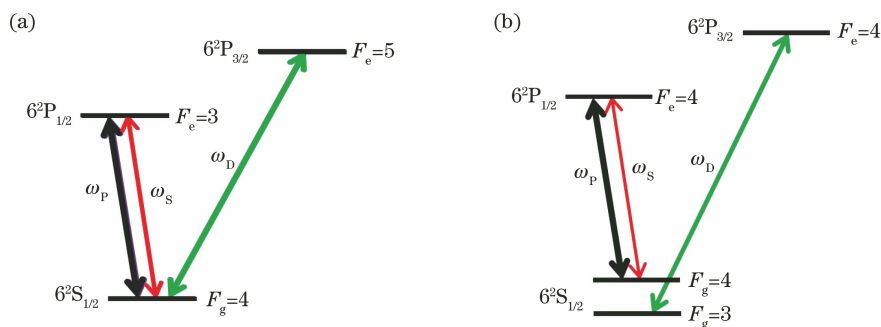


图 5 引入 852 nm 抽运光后,不同简并能级中的跃迁示意图。(a) $F_g=4 \rightarrow F_e=3$; (b) $F_g=4 \rightarrow F_e=4$
 Fig. 5 Schematic diagrams of transitions between different degenerate energy levels after introducing driving light of 852 nm. (a) $F_g=4 \rightarrow F_e=3$; (b) $F_g=4 \rightarrow F_e=4$

在 $F_g=4 \rightarrow F_e=3$ 的能级跃迁中,当抽运光作用于跃迁能级 $6^2S_{1/2}$, $F_g=4 \rightarrow 6^2P_{3/2}$, $F_e=5$ 时,在较低的泵浦功率下,DFWM 信号就可获得较高的增益,但随着 P_p 的增大,增益逐渐下降,如图 6(a) 所示。当 $P_p=20$ mW 时,最大 $G_S \approx 9.90$,最大 $G_C \approx 8.05$,与图 4(a)、(b) 相比,增益均有显著提高。此时,信号光和共轭光光谱依然呈洛仑兹分布,线宽约为 2 MHz,如图 6(b) 所示。在 $F_g=4 \rightarrow F_e=4$ 的能级跃迁中,当抽运光作用于 $6^2S_{1/2}$, $F_g=3 \rightarrow 6^2P_{3/2}$, $F_e=4$ 跃迁能级时,DFWM 信号的增益随 P_p 的变化趋势与图 4(a) 相似,如图 6(c) 所示。但此时增益放大效率明显提高,特别是在饱和泵浦功率附近。

当 $P_p=80$ mW 时,最大 $G_S \approx 11.75$,最大 $G_C \approx 10.67$ 。此时,信号光和共轭光透射谱线线宽约为 4 MHz,如图 6(d) 所示。在 $F_g=3 \rightarrow F_e=3$ 的能级跃迁中,当抽运光作用于 $6^2S_{1/2}$, $F_g=4 \rightarrow 6^2P_{3/2}$, $F_e=3$ 跃迁能级时,DFWM 信号的增益也得到了提高,这里不再赘述。

从图 6 中可以看出,当引入波长为 852 nm 的抽运光时,可显著提高 DFWM 的放大效率,但对于不同的简并能级,抽运光作用的跃迁能级不同,下面结合图 3 进行简单分析。在 $F_g=4 \rightarrow F_e=3$ 的能级跃迁中,在泵浦光作用下,其基态所有塞曼子能级形成了两条稳定的 Λ 型相干暗态链,如图 3(a) 所示,

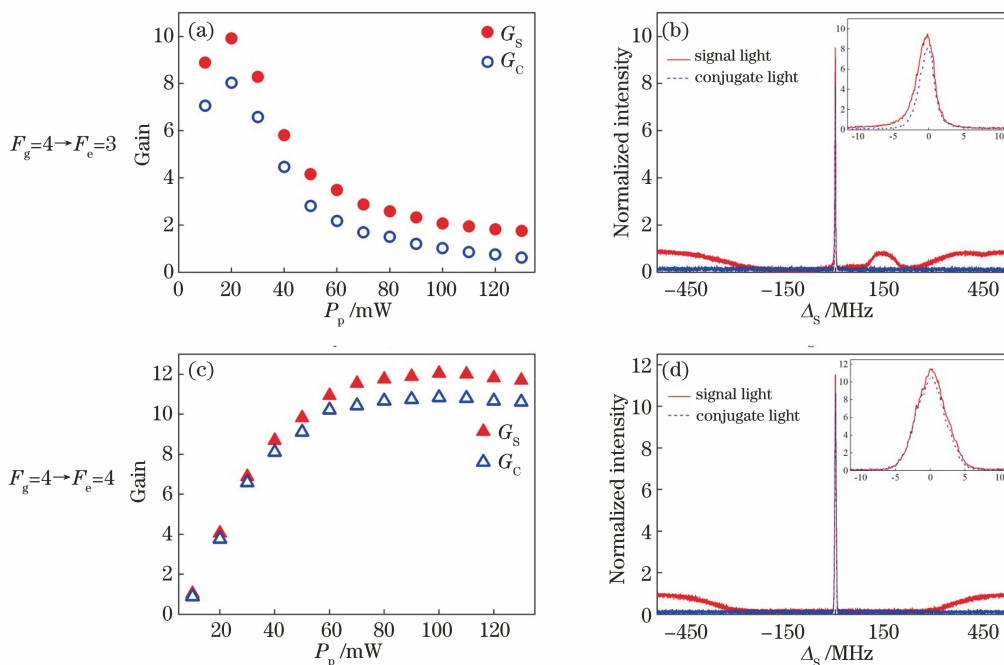


图 6 引入 852 nm 抽运光对一对 DFWM 共轭光束增益的影响。(a)(c) DFWM 信号增益随泵浦功率的变化;
 (b)(d) 增益最大时的归一化透射谱

Fig. 6 Effect of introducing driving light of 852 nm on gain of a pair of DFWM conjugated beams. (a)(c) Gains of DFWM signals versus pump power; (b)(d) normalized transmission spectra at maximum gain

所有原子几乎被束缚在基态两端的 4 个塞曼子能级上,导致整体的 FWM 放大效率较低。当泵浦功率较小时,额外引入的抽运光打破了基态相干,如图 5(a) 所示。抽运光作用于 $6^2S_{1/2}, F_g=4 \rightarrow 6^2P_{3/2}, F_e=5$ 的能级跃迁过程中,部分被抽运至 $6^2P_{3/2}, F_e=5$ 能态上的原子通过自发辐射全部回落至 $6^2S_{1/2}, F_g=4$ 的能态上,这提高了参与 FWM 的原子数,进而提高了放大效率。随着泵浦功率的升高,基态相干性又逐渐增强,导致抽运光的作用减弱。此时,增益放大率也逐渐下降,如图 6(a) 所示。而在 $F_g=4 \rightarrow F_e=4$ 的能级跃迁中,其基态形成一条 Λ 型相干暗态链,这是产生 FWM 的必要条件。激发态形成的 V 型链虽然可以提高基态原子的转移率,但同时又会激发一部分原子自发辐射到基态 $F_g=3$ 上,这会导致参与 FWM 的原子数减少。此时,引入的抽运光将处于 $6S_{1/2}, F_g=3$ 态上的原子激发到 $6^2P_{3/2}, F_e=4$ 态上,而后原子再自发辐射至 $6S_{1/2}, F_g=4$ 态,这提高了 N 型循环跃迁环路上初始泵浦能态上的原子数目,从而增大了 FWM 放大效率,且随着泵浦功率的增强,光放大效应也愈加明显,如图 6(c) 所示。

5 结 论

实验研究了铯原子气室内基于受激 DFWM 技术的一对简并共轭光束的放大特性。通过比较三种简并能级跃迁下的结果发现:1) 只有在 $F_g \geq F_e$ 条件下,才能产生 DFWM 过程。2) 高增益得益于稳定的基态塞曼相干和 DFWM 跃迁循环路径初始抽运子能级上大量的原子布居。此外,实验发现,通过额外引入一束波长为 852 nm 的抽运光,可显著提升信号光和共轭光的增益。最后,在 $F_g \geq F_e$ 的两种情况下,均获得了一对增益高达 10 倍的简并共轭光束。该结果为研究 Tripod 型四能级系统及原子-腔复合系统下的 FWM 提供了重要参考,丰富了 DFWM 的物理内涵,同时该结果可被扩展应用到非互易放大、量子成像和相位灵敏度测量等领域。

参 考 文 献

- [1] Munro W J, Nemoto K, Spiller T P. Weak nonlinearities: a new route to optical quantum computation[J]. *New Journal of Physics*, 2005, 7: 137.
- [2] Boyer V, McCormick C F, Arimondo E, et al. Ultraslow propagation of matched pulses by four-wave mixing in an atomic vapor[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(14): 143601.
- [3] Du S W, Oh E, Wen J M, et al. Four-wave mixing in three-level systems: interference and entanglement [J]. *Physical Review A*, 2007, 76: 013803.
- [4] Yang G Q, Xu P, Wang J, et al. Four-wave mixing in a three-level bichromatic electromagnetically induced transparency system[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(4): 045804.
- [5] Zhang Y P, Wang Z G, Zheng H B, et al. Four-wave-mixing gap solitons [J]. *Physical Review A*, 2010, 82(5): 053837.
- [6] Jiang Q C, Zhang Y, Wang D, et al. Superluminal reflection and transmission of light pulses via resonant four-wave mixing in cesium vapor [J]. *Optics Express*, 2016, 24(21): 24451-24459.
- [7] Brown A W, Xiao M. All-optical switching and routing based on an electromagnetically induced absorption grating[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(7): 699-701.
- [8] Wang L J, Yan L S, Guo Y H, et al. Optical logic gate based on four-wave mixing in subwavelength metallic waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0419002.
王鲁俊, 闫连山, 郭迎辉, 等. 基于微纳波导四波混频效应的全光逻辑实现 [J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0419002.
- [9] Wang D W, Zhou H T, Guo M J, et al. Optical diode made from a moving photonic crystal [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(9): 093901.
- [10] Corzo N V, Marino A M, Jones K M, et al. Noiseless optical amplifier operating on hundreds of spatial modes [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(4): 043602.
- [11] Xie W L, Fsaifes I, Labidi T, et al. Investigation of degenerate dual-pump phase sensitive amplifier using multi-wave model [J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 31896-31907.
- [12] Renzoni F, Maichen W, Windholz L, et al. Coherent population trapping with losses observed on the Hanle effect of the D_1 sodium line [J]. *Physical Review A*, 1997, 55(5): 3710.
- [13] Han Y H, Che S N, Wang D, et al. Electromagnetically induced gain based on degenerate two-level atomic system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0302001.
韩宇宏, 车少娜, 王丹, 等. 基于简并二能级原子系统的电磁诱导增益 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0302001.
- [14] McCormick C F, Marino A M, Boyer V, et al. Strong low-frequency quantum correlations from a four-wave-mixing amplifier[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(4): 043816.

- [15] Glorieux Q, Dubessy R, Guibal S, et al. Double- Λ microscopic model for entangled light generation by four-wave mixing[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033819.
- [16] Guo M J, Zhou H T, Wang D, et al. Experimental investigation of high-frequency-difference twin beams in hot cesium atoms[J]. *Physical Review A*, 2014, 89(3): 033813.
- [17] Liu S S, Lou Y B, Jing J T. Interference-induced quantum squeezing enhancement in a two-beam phase-sensitive amplifier [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(11): 113602.
- [18] Schmidt H, Imamoglu A. Giant Kerr nonlinearities obtained by electromagnetically induced transparency [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(23): 1936-1938.
- [19] Goren C, Wilson-Gordon A D, Rosenbluh M, et al. Electromagnetically induced absorption due to transfer of coherence and to transfer of population [J]. *Physical Review A*, 2003, 67(3): 033807.
- [20] Wong V, Bennink R S, Marino A M, et al. Influence of coherent Raman scattering on coherent population trapping in atomic sodium vapor[J]. *Physical Review A*, 2004, 70(5): 053811.
- [21] Lukin M D, Hemmer P R, Scully M O. Resonant nonlinear optics in phase-coherent media [J]. *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2000, 42: 347-386.
- [22] Zlatković B, Krmpot A J, Šibalić N, et al. Efficient parametric non-degenerate four-wave mixing in hot potassium vapor[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(1): 015205.
- [23] Boyer V, Marino A M, Pooser R C, et al. Entangled images from four-wave mixing[J]. *Science*, 2008, 321(5888): 544-547.
- [24] Knutson E M, Cross J S, Wyllie S, et al. Phase-sensitive amplification via multi-phase-matched four-wave mixing [J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 22748-22754.
- [25] Hudelist F, Kong J, Liu C, et al. Quantum metrology with parametric amplifier-based photon correlation interferometers [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3049.
- [26] Qin Z Z, Cao L M, Jing J T. Experimental characterization of quantum correlated triple beams generated by cascaded four-wave mixing processes [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(21): 211104.
- [27] Liu S S, Lou Y B, Jing J T. Orbital angular momentum multiplexed deterministic all-optical quantum teleportation[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3875.
- [28] Wu F Y, Ezekiel S, Ducloy M, et al. Observation of amplification in a strongly driven two-level atomic system at optical frequencies [J]. *Physical Review Letters*, 1977, 38(19): 1077-1080.
- [29] Astafiev O V, Abdumalikov A A, Zagoskin A M, et al. Ultimate on-chip quantum amplifier[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(18): 183603.
- [30] Koshino K, Terai H, Inomata K, et al. Observation of the three-state dressed states in circuit quantum electrodynamics[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(26): 263601.
- [31] Mompert J, Corbalán R. Lasing without inversion [J]. *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, 2000, 2(3): R7-R24.
- [32] Carman R L, Chiao R Y, Kelley P L. Observation of degenerate stimulated four-photon interaction and four-wave parametric amplification [J]. *Physical Review Letters*, 1966, 17(26): 1281-1283.
- [33] Nodop D, Jauregui C, Schimpf D, et al. Efficient high-power generation of visible and mid-infrared light by degenerate four-wave-mixing in a large-mode-area photonic-crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(22): 3499-3501.
- [34] Li J T, O'Faolain L, Rey I H, et al. Four-wave mixing in photonic crystal waveguides: slow light enhancement and limitations [J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4458-4463.
- [35] Shi M, Wang L, Cheng H X, et al. Research of all-optical Cs atomic magnetometer by using modulation of laser's polarization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0920001. 石铭, 王羚, 程泓勋, 等. 基于激光偏振调制的全光 Cs 原子磁力仪研究 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(9): 0920001.
- [36] Koch J, Yu T M, Gambetta J, et al. Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box[J]. *Physical Review A*, 2007, 76(4): 042319.
- [37] Wen P Y, Kockum A F, Ian H, et al. Reflective amplification without population inversion from a strongly driven superconducting qubit [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(6): 063603.
- [38] Lin G W, Zhang S C, Hu Y Q, et al. Nonreciprocal amplification with four-level hot atoms[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(3): 033902.
- [39] Andreeva C, Cartaleva S, Dancheva Y, et al. Coherent spectroscopy of degenerate two-level systems in Cs [J]. *Physical Review A*, 2002, 66: 012502.
- [40] Mukherjee N, Patel C K N. Electromagnetically induced gain in molecular systems [J]. *Physical Review A*, 2009, 80(6): 063830.