

文章编号: 0258-7025(2008)06-0845-04

大信号布里渊增强四波混频相位共轭镜

朱成禹¹ 吕志伟¹ 何伟明¹ 关 键¹ 徐小川²

(¹ 哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; ² 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要 对大信号偏振去耦布里渊增强四波混频(BEFWM)相位共轭光的输出特性(波形、束散角、能量转换效率等)进行了系统的研究。结果表明,使布里渊增强四波混频工作在大信号强相互作用状态下,可以很好地克服同等抽运及结构条件下小信号布里渊增强四波混频中经常出现的波形调制现象,具有良好的波形稳定性以及输入输出脉冲的波形相关性;输出光相位共轭保真度接近 100%,且在不同注入信号强度下几乎保持恒定;大信号布里渊增强四波混频能量转换效率相对小信号情况也有很大的提高。

关键词 非线性光学; 布里渊增强四波混频; 四波混频; 相位共轭镜; 光学相位共轭

中图分类号 O 437.2 **文献标识码** A

Brillouin-Enhanced Four-Wave Mixing Phase Conjugation Mirror with Large Signals

Zhu Chengyu¹ Lü Zhiwei¹ He Weiming¹ Guan Jian¹ Xu Xiaochuan²

(¹ Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)
(² Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract The characteristics of the conjugate wave in Brillouin-enhanced four-wave mixing (BEFWM) with large incident signal are investigated experimentally. It is demonstrated that under the condition of large signal and deep interaction, temporal stability and correlation between the input and output pulse shapes are better than that of BEFWM with small signals, and modulation phenomena will no longer appear in this case. At the same time, the conjugation fidelity is almost 100% and constant with different signal intensities. With enlargement of the signal intensity, energy transform efficiency of BEFWM increases.

Key words nonlinear optics; Brillouin-enhanced four-wave mixing; four-wave mixing; phase conjugation mirror; optical phase conjugation

1 引 言

布里渊增强四波混频(BEFWM)是一种特殊的近简并四波混频效应,由于其内在的受激过程可为共轭光带来很高的增益,所以长期以来一直被用在微弱光学信号放大领域,并取得了良好效果^[1~3]。然而布里渊增强四波混频的特殊性并非仅局限于此,从其相位共轭光产生的机制来看,为能量耦合提供载体的声波场由光波相干拍频驱动而成,其建立不受介质声学弛豫时间制约和声学噪声影响,使布

里渊增强四波混频具备响应快、无阈值以及高保真矢量相位共轭等许多优点,对于中、高功率激光相位共轭镜(PCM)装置的性能需求是相当具有吸引力的^[4~7]。

以前对布里渊增强四波混频的研究主要在于小信号布里渊增强四波混频的高反射率(小信号布里渊增强四波混频通常定义为信号光与抽运光强度比远小于0.01的情况^[8]),若尝试将其用于中、高功率相位共轭镜中^[9],首先要确保布里渊增强四波混

收稿日期:2007-09-01; 收到修改稿日期:2007-11-15

基金项目:国家自然科学基金(10476009,60478020)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助项目。

作者简介:朱成禹(1975—),男,黑龙江人,博士研究生,主要从事高功率激光及非线性光学方面的研究。

E-mail: zhuchy_cn@126.com 或 zhuchy@hit.edu.cn

导师简介:吕志伟(1961—),男,辽宁人,教授,主要从事非线性光学、固体激光技术和光电控制技术等领域的研究。

E-mail: zhiweilu@yeah.net

频高相位共轭质量仍能有效发挥,同时还要克服小信号布里渊增强四波混频常出现的时域调制问题^[10~12],使波形稳定性得到保证。为此,本文研究了布里渊增强四波混频相位共轭镜性能特征对信号光相对注入强度的关系,分析了和抽运光近于同一强度量级的大信号布里渊增强四波混频的输出特性。

2 实验装置

实验采用偏振去耦布里渊增强四波混频结构,光路如图1所示。Nd:YLF激光器输出近高斯型单模线偏振基频脉冲激光,脉冲宽度为20~22 ns,光斑直径约5 mm,以1 Hz重复率运行。激光束经1/2波片调整后具备了P态和S态两个偏振成分,其中P分量透过偏振片 P_1 直接进入充有液态布里渊介质的布里渊增强四波混频池,形成抽运光 E_1 ,其脉冲前沿部分通过布里渊增强四波混频池后经1/4波片成为圆偏振光,被短焦透镜($f=10$ cm)聚焦到充有同种介质的受激布里渊散射(SBS)池中,在此发生受激布里渊散射产生斯托克斯后向散射光。该光沿原路返回,再经1/4波片成为S偏振的线偏振光,反向进入布里渊增强四波混频池,构成布里渊增强四波混频的斯托克斯抽运光 E_2 。在 P_1 处被反射的S偏振激光分量用作布里渊增强四波混频的信号光 E_3 ,其经过一块1/2波片后投射至偏振片 P_2 ,通过调节该1/2波片光轴方向可以控制其在 P_2 处被反射(继而由延时反射镜 M_1, M_2 耦合进布里渊增强四波混频池)的光能量。在布里渊增强四波混频池中光波间相互作用过程如下:S偏振的信号光 E_3 与斯托克斯光 E_2 相遇相干产生拍频,由于其二者相差一个布里渊频移,因而其拍频花样在介质中驱动起一系列声学波,正向抽运光 E_1 则在该声光栅上发生斯托克斯散射生成与 E_3 相位共轭却与 E_1 同处于P偏振态的共轭光 E_4 。在 E_1 到 E_4 的能量耦合过程中,声波场不断得到加强,从而给 E_4 带来很高的增益。

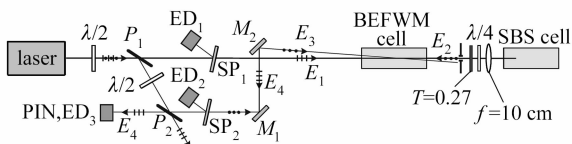


图1 实验光路图

Fig. 1 Experimental layout

共轭光 E_4 沿信号光 E_3 反向传播,最终在 P_2 处透射输出。实验中,在布里渊增强四波混频后端面附近放置孔阑,以阻挡剩余信号光 E_3 进入受激布里

渊散射池。为增大正反向抽运强度比以提高布里渊增强四波混频效率,在两池之间还插入一块透过率 $T=0.27$ 的衰减片以削弱 E_2 。另外在光路中放置4%取样镜 SP_1 和 SP_2 ,分别实现对 E_1 和 E_3 入射能量的测量。各光波能量由OPHIR能量计(PE50BB-DIF)ED₁~ED₃探测,脉冲波形用PIN管探测并用数字示波器记录。

3 实验结果及分析

在布里渊增强四波混频小信号研究中,经常出现的共轭光波形调制现象一直是影响其实用性的主要因素,尤其在声子寿命短的介质中更为严重^[7~9]。实验中首先以 CCl_4 (声子寿命 $\tau=0.6$ ns)为介质,使布里渊增强四波混频池中光束有效叠交长度约为20 cm,抽运光 E_1 注入强度 I_1 保持在16 MW/cm²左右,调节 E_3 注入能量,得到不同信号强度 I_3 作用下共轭光的典型输出波形,如图2所示。当 $I_3=0.4$ MW/cm²时(图2(a)),共轭光波形调制严重,且脉冲间随机性很大;当 I_3 为1.6 MW/cm²(图2(b))和10 MW/cm²(图2(c))时,调制现象得到明显改善,脉冲间波形趋于稳定。

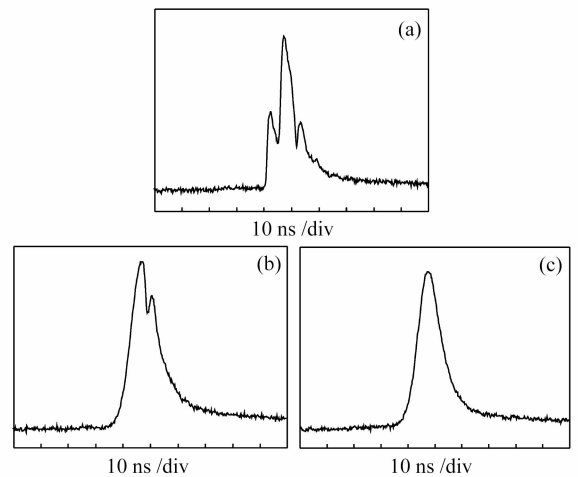


图2 不同信号强度下的共轭光输出波形(CCl_4)

Fig. 2 Pulse shapes of the conjugate wave with different signal intensities. (a) $I_3 = 0.4$ MW/cm²; (b) $I_3 = 1.6$ MW/cm²; (c) $I_3 = 10$ MW/cm²

将实验介质更换为高增益长声子寿命的 CS_2 ($\tau=0.6$ ns), I_1 升高到40 MW/cm²左右,信号强度 I_3 由0.4 MW/cm²逐渐增加到27.2 MW/cm²。实验发现,此时共轭光波形稳定性进一步得到加强,并且随着信号强度的增大,共轭光脉冲宽度逐渐接近入射激光脉冲水平,输入输出脉冲间的波形相关性良好。对于相位共轭镜而言,除了输出光的相位共轭保真

度,共轭输出光的波形保真性也同样关键,这一点对于高精度相位共轭镜尤为重要。图 3(a)为 CS_2 介质共轭光典型输出波形,(b)为入射激光信号光脉冲波形,(c)为共轭光脉冲宽度随信号光强度的变化。

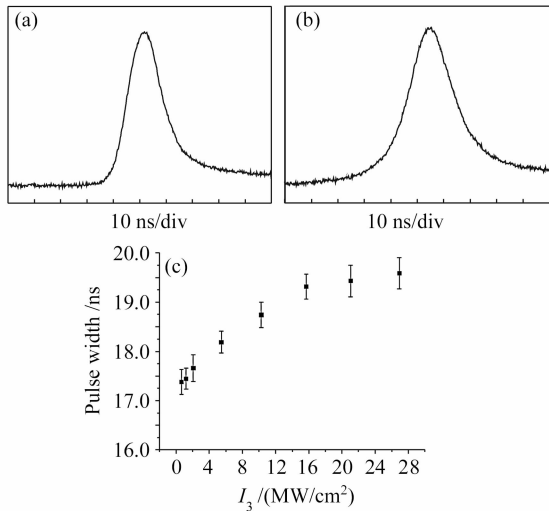


图 3 共轭光脉冲(a),激光信号脉冲(b)以及共轭光脉宽随信号光入射强度的变化(c)(CS_2)

Fig. 3 Pulse shape of the conjugate wave (a), pulse shape of the signal wave (b), and dependence of the pulse width on the signal intensities (c)

随着信号光 E_3 的增强,其在介质中驱动的初始声场强度也随之加大,这使布里渊增强四波混频处于能量耦合逐渐趋于饱和的强相互作用状态之中。能量转换效率(共轭光与正向抽运光的脉冲能量之比, E_4/E_1) 随信号光的增强而提高,如图 4(a)所示。通过阵列相机测量发现,在整个信号光强度变化范围内,共轭输出光的远场发散角始终处在和入射激光相当的水平(约 0.45 mrad),相位共轭保真度接近 100%,如图 4(b)所示。说明了布里渊增强四波混频的高相位共轭保真度并不因信号光注入强度的变化而受到影响。

4 结 论

实验表明,大信号强相互作用布里渊增强四波混频具备如下特征:1) 共轭光波形具有良好的稳定性,小信号布里渊增强四波混频中经常发生的调制现象不再出现,并且其输出脉冲与注入脉冲之间的波形保真性也随信号光的增大而提高;2) 兼备小信号布里渊增强四波混频高共轭保真的优点,共轭光远场发散角与注入信号光基本一致,相位共轭保真度接近 100%,且在不同激光入射强度下保持恒定;

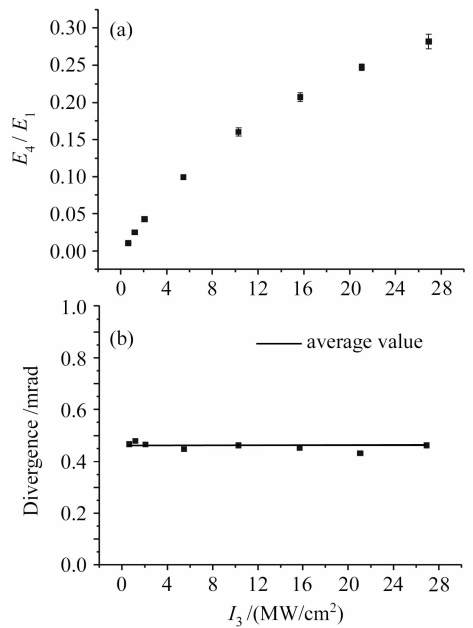


图 4 能量转换效率(a),共轭光远场发散角(b)随信号光入射强度的变化

Fig. 4 Dependence of energy transfer efficiency (a) and divergence of the conjugate beam (b) on the signal intensity

3) 大信号作用条件下,布里渊增强四波混频将获得更高的能量转换效率。说明了大信号布里渊增强四波混频相位共轭镜在时空保真能力上的突出优势,体现了其在中、高功率激光相位共轭镜系统中的应用潜力。

参 考 文 献

- 1 A. M. Scott, K. D. Ridley. A review of Brillouin-enhanced four-wave mixing [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25** (3):438~459
- 2 M. Y. Lanzerotti, Robert W. Schirmer, Alexander L. Gaeta. Phase conjugation of weak continuous-wave optical signals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(11):2202~2205
- 3 N. F. Andreev, V. I. Bespalov, M. A. Dvoretzky. Phase conjugation of single photons [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(3):346~350
- 4 V. E. Yashin. Problems of SBS phase conjugation application in large scale fusion laser facilities [C]. *SPIE*, 1995, **2633**:412~421
- 5 Dianyuan Fan, Guojun Wen, Junxiao Lu. Four-pass laser amplifier with active SBS mirror for application to ICF driver [C]. *SPIE*, 1995, **2633**:29~35
- 6 Liu Danping, Hu Yu. Experimental study of overcoming laser rod's thermal effect with stimulated Brillouin scattering phase conjugation mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):184~187
- 7 刘丹平, 胡渝. 利用受激布里渊散射相位共轭镜克服激光棒热效应的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):184~187
- 8 Liu Anling, Zhang Weijun, Gao Xiaoming *et al.*. Competition between stimulated thermal and Brillouin scattering and its phase conjugation characteristic [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):204~208
- 9 刘安玲, 张为俊, 高晓明 等. 受激热散射与布里渊散射的竞争

及其共轭特性[J]. 中国激光, 2005, **32**(2):204~208

8 W. A. Schroeder, M. J. Damzen, M. H. R. Hutchinson. Polarization-decoupled Brillouin-enhanced four-wave mixing [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(3):460~469

9 Zhu Chengyu, Lü Zhiwei, He Weiming *et al.*. Theoretical study on Brillouin-enhanced four-wave mixing with large incident signals [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(7):1081~1084

朱成禹, 吕志伟, 何伟明 等. 大信号布里渊增强四波混频理论研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(7):1081~1084

10 Byoung Il Chio, Min Sik Jo, Chang Hee Nam. A frequency-

upshifting Brillouin-enhanced four-wave mixing scheme using an iodine laser as a pump source [J]. *Opt. Commun.*, 1994, **107** (5-6):425~431

11 B. I. Choi, C. H. Nam. Temporal characteristics of polarization-decoupled, anti-Stokes-type Brillouin-enhanced four-wave mixing [J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **69**(1):55~60

12 Zhu Chengyu, Lü Zhiwei, He Weiming *et al.*. Theoretical study on temporal behavior of Brillouin-enhanced four-wave mixing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(1):229~235

朱成禹, 吕志伟, 何伟明 等. 布里渊增强四波混频时域特性的理论研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(1):229~235

基于倏逝波激发的染料-光纤型激光放大器

发展能够实现近单模工作的大模场光纤结构和材料是高功率光纤激光器的重要技术核心之一。我们于2006年提出了大模场倏逝波可承载单模高功率激光的原理方案,有望使单模模场尺度突破百微米量级。按理论设计,光纤芯径应在亚微米量级,此时光纤模场主要以倏逝波的形式扩展到光纤包层中(等效模场尺度可达百微米以上)。与传统光纤激光不同,大模场倏逝波光纤由包层掺杂提供增益,而微纳光纤芯径仅起到导引模场和保证单模工作的作用。

为判断上述方案的原理可行性,采用染料溶液模拟增益包层,在实验上成功演示和验证了倏逝波模场的激发和放大,实验装置如图1所示。将普通光纤拉锥至芯径 $10\ \mu\text{m}$ 左右,作为导引模场的微纳光纤(限于条件,纤芯偏粗),以染料DCM溶液作为光纤的增益包层,并封装于内径 $1\ \text{mm}$ 的毛细管中。染料溶剂使用乙二醇、苯甲醇或其混合物,染料浓度约为 $1.6\times 10^{-3}\ \text{mol/L}$,毛细管两端使用硅胶封装。信号源采用连续半导体激光(波长 $635\ \text{nm}$),并从光纤端面耦合进入光纤。纳秒调Q的Nd:YAG激光系统(Continuum surelite)输出的绿光作为抽运光源,脉宽 $5\ \text{ns}$,重复频率 $10\ \text{Hz}$,光束直径 $5\ \text{mm}$ 左右。抽运光经柱透镜聚焦后从毛细管侧面抽运。光纤输出的放大激光经双色镜片($532\ \text{nm}$ 高反, $635\ \text{nm}$ 高透)后,由光电二极管(PIN)接收,至示波器显示。

甲醇(折射率1.54)的混合溶液作为溶剂,将包层折射率调整至1.45左右,从而减小光纤数值孔径,增大增强光纤倏逝波。在相同抽运能量的情况下,信号光的脉冲式放大明显增强(约4.5倍),如图2所示。由于染料的发射截面大,从光纤输出的脉冲光中还含有一定的放大自发辐射(ASE)成分。不论是信号光还是ASE光,实验证实了都可以激发为倏逝波模场并被光纤纤芯导引输出,为基于倏逝波耦合机制实现光纤激光振荡提供了物理基础。作为旁证,浙江大学童利民教授和复旦大学徐雷教授合作,报道了基于倏逝波激发的染料-光纤型激光振荡实验结果,本文则实现了激光放大,二者均表明倏逝波确实可以承载和放大激光,为探索和发展新颖的高功率光纤激光器提供了物理基础。放大激光的模式控制问题将在进一步的实验中研究。

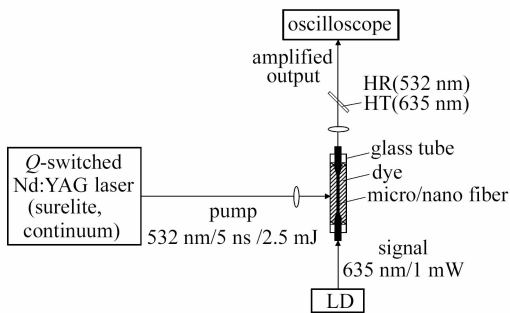


图1 实验布局示意图

Fig. 1 Schematic layout of the experimental setup

对基于倏逝波激发的染料-光纤型激光放大器的放大能力进行了测量和分析,并采用不同染料溶剂来优化增益包层的折射率,以调节倏逝波模场的尺度。在使用乙二醇作溶剂时(折射率1.43),仅观察到微弱的信号光脉冲式放大(增益仅1.1倍)。其主要原因是倏逝波模场占的比例过小(约0.2%)。针对光纤纤芯折射率为1.46左右,使用乙二醇和苯

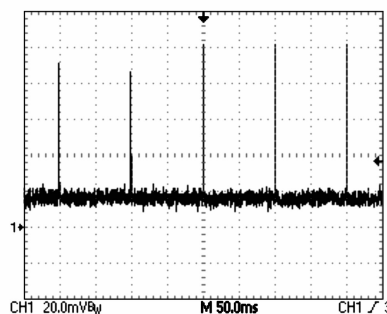


图2 脉冲抽运光和连续信号光注入情况下,信号光脉冲式放大的示波器显示

Fig. 2 Oscilloscope display of the signal amplification under pulsed laser pumping. The noisy background ($\sim 1\ \text{div.}$) shows the input continuous wave, while the vertical lines ($\sim 4\sim 5\ \text{div.}$) show the amplified pulsed signals

致谢 感谢上海交通大学陈险峰教授和复旦大学吴嘉达教授对本实验给予的支持和帮助。

¹ 湖南大学计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082
² 湖南大学微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082
³ 复旦大学光科学与工程系, 上海 200433
 赵楚军^{1,2} 钱列加³ 袁鹏³ 文双春^{1,2} 范滇元^{1,2}
 收稿日期:2008-05-07;收到修改稿日期:2008-05-19