

钒酸钇晶体皮秒拉曼放大器特性的研究

徐 洋 陈 檬 李政委 陈立元 杨 超 高晓强 李 港

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 报道了钒酸钇晶体(YVO_4)作为拉曼放大器时的性能。观察到拉曼放大器中的自净化作用对拉曼光光束质量的改善。通过改变抽运脉宽,在 3 组不同脉宽的抽运条件下,分别进行了拉曼放大实验。实验结果表明抽运脉宽越宽,越有利于拉曼种子光与抽运光之间的延时调节。通过改变拉曼种子光与拉曼抽运光两者的夹角,研究了其对拉曼放大器的影响。结果表明利用四波混频实现的拉曼放大对于角度的变化很敏感。最终分别在不同的入射光夹角情况下获得了正三阶和反三阶拉曼斯托克斯光,并与计算所得的谱线进行了对比。

关键词 非线性光学; 拉曼放大器; 皮秒受激拉曼散射; 四波混频

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1002005

Research of Picosecond Raman Amplifier in YVO_4 Crystal

Xu Yang Chen Meng Li Zhengwei Chen Liyuan Yang Chao

Gao Xiaoqiang Li Gang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract The performance of YVO_4 crystal as Raman amplifier is reported. The beam quality of Raman Stokes light is improved due to Raman “cleanup” in the amplification stage. Then, by changing the pump pulse width, the experiment is carried out in three different pulse width conditions. The experimental results show that the wider the pump pulse is, the more easily the pump-seed delay is adjusted. By changing the incident angle between seed and pump light, its influence on the performance of Raman amplifier is also studied. Raman amplifier based on four wave mixing (FWM) is very sensitive to the change of the incident angle. Third order Stokes and third order anti-Stokes Raman lights are obtained at different incident angles, and the spectral composition of all the Raman Stokes is identified to the calculated Raman Stokes spectral composition.

Key words nonlinear optics; Raman amplifier; picosecond stimulated Raman scattering; four wave mixing

OCIS codes 190.0190; 140.3550; 290.5910

1 引 言

拉曼频率变换是一种基于受激拉曼散射(SRS)的激光波长变换方法。拉曼散射光的波长范围可由紫外延伸至近红外,有效扩展了激光的光谱范围。众所周知,很多特定波长的激光有很强的实用价值,却无法直接从现有激光晶体中获取。拉曼激光器的出现使得激光波长应用范围得以大大展宽。拉曼激光具有很多优秀的特性,拉曼散射光的自净化作用能够有效改善光束质量,利用拉曼频率变换技术也

可以对脉冲进行压缩。因此,对于拉曼激光的研究尤为重要。

钒酸钇晶体(YVO_4)作为一种优秀的激光晶体,广泛应用于各种研究。2001年, Kaminskii 等^[1]首次报道了 YVO_4 优良的拉曼特性。此后, YVO_4 晶体渐渐变为重要的拉曼晶体之一。尤其在自拉曼激光器中, YVO_4 更是成为了人们研究的热点。2004年, Chen^[2-3]报道了关于激光二极管(LD)端面抽运的 Nd: YVO_4 晶体的自拉曼实验结果。实验表明采用

收稿日期: 2013-02-27; 收到修改稿日期: 2013-05-28

作者简介: 徐 洋(1985—),男,博士研究生,主要从事皮秒激光器和激光非线性频率变换等方面的研究。

E-mail: xu2yang2@gmail.com

导师简介: 李 港(1950—),男,博士,研究员,主要从事超短脉冲激光和非线性频率变换等方面的研究。

E-mail: lig@bjut.edu.cn

808 nm 光源抽运 Nd:YVO₄ 晶体可以产生 1.5 μm 的人眼安全波段的激光。随着全固态激光器和拉曼晶体的快速发展,近年来,人们渐渐从采用气体作为拉曼放大器,过渡为固体拉曼放大器。2001 年,雷博等^[4]采用甲烷气体进行了同轴宽带拉曼放大的实验,在 9 atm (1 atm=101325 Pa)的气压条件下获得了高达 21 倍的放大效果,并发现拉曼种子光的脉宽从 8 ns 被压缩至 5 ns。2008 年,Grigsby 等^[5]以 Ba(NO₃)₂ 晶体作为拉曼放大器,采用多通拉曼放大的方式获得了 4 mJ 大能量的一阶拉曼光。

本文采用非掺杂 YVO₄ 晶体作为拉曼晶体,重点研究了其作为拉曼放大器对于皮秒激光的放大性能。并讨论了不同皮秒脉宽,以及不同入射抽运光与拉曼种子光夹角对拉曼放大器性能的影响。当将抽运光与拉曼种子光间的延时,以及二者间夹角调至最佳,得到了三阶斯托克斯光与反三阶斯托克斯光。最后,对得到的所有斯托克斯光与计算所得的 YVO₄ 拉曼谱线进行对比。

2 实验装置

拉曼放大实验装置如图 1 所示。鉴于 YVO₄ 晶体在瞬态领域有良好的性能^[6-7],选用了两块沿 *c*

轴切割的非掺杂的 YVO₄ 晶体。一块长 25 mm 作为拉曼种子产生器,另一块长 30 mm 作为拉曼放大器。两块晶体一端镀有 526 nm 和 1053 nm 双增透膜(反射率 $R < 0.6\%$),另一端镀有 450~900 nm 宽带增透膜($R < 2\%$)。对 YVO₄ 晶体的激发配置为 $K // c_4$ 和 $E \perp c_4$,其中 K 为激光波矢方向,即激光传播方向; E 为激光偏振方向,实验中为水平偏振方向; c_4 为 YVO₄ 晶体的 c_4 轴。皮秒激光光源是自行研制的大能量低重频 Nd:YLF 皮秒激光器^[8]。激光器可输出重复频率为 10 Hz,单脉冲能量为 10 mJ 的 1053 nm 基频光。经过三硼酸锂(LBO)晶体倍频后,可获得光斑直径约为 1 mm,单脉冲能量为 5 mJ 的 526.5 nm 绿光。激光器输出的绿光被分束镜(BS),以 1:1 的分束比分成两束激光。一束用于直接激发一块 YVO₄ 晶体产生拉曼种子光,另一束从旁边绕过拉曼种子光产生器,经由反射镜与拉曼种子光会聚于另一块 YVO₄ 晶体中,对种子光进行放大。为保证放大光与种子光能同时在拉曼放大器中准确会聚,在光路中放置了一个可一维平移的延时台,该延时台的精度为 0.02 mm。通过延时台精确调节拉曼种子光与拉曼抽运光在时间域上的重合度,以研究其重合度对拉曼放大器的影响。

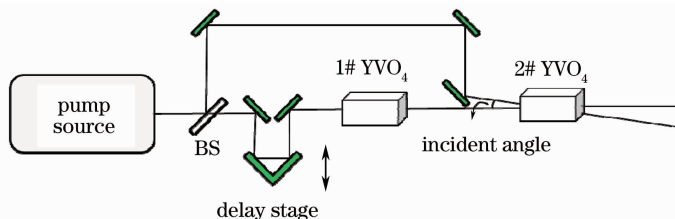


图 1 拉曼放大实验装置图

Fig. 1 Experimental configuration used for Raman amplification

拉曼放大过程与传统的激光放大过程有相似点,也有不同点,如图 2 所示。两者都是通过光与物质间的相互作用来实现种子光的放大。传统的激光放大过程是种子光经由受激辐射实现光的放大,而拉曼激光的放大过程是由种子光和抽运光通过受激拉曼散射而实现光的放大。两者最大的不同点主要

体现在时域方面:对于传统的激光放大过程,抽运光与放大光在时域上不需要精确同步。一般来说,只要种子光放大时,上能级粒子数未被完全消耗即可实现放大。而拉曼放大过程需要拉曼抽运光与拉曼种子光在时域上很好地重合才能实现对种子光的放大。

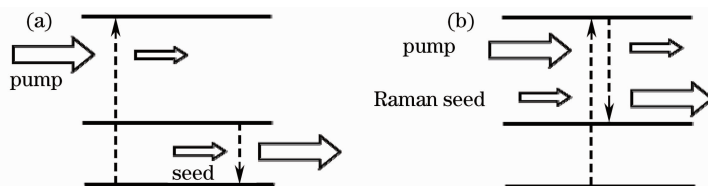


图 2 (a) 传统激光放大示意图和 (b) 拉曼激光放大示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of (a) traditional laser amplification and (b) Raman amplification

3 实验结果和讨论

在皮秒拉曼频率变换领域,脉冲的高峰值功率所引起的非线性效应,使得高光束质量的拉曼光很难获得。Grigsby 等^[5]曾提出当单通拉曼产生器输出能量超过 0.1 mJ 时,自聚焦和光斑成丝的现象开始显现。这些非线性效应会破坏拉曼光的高斯分布,并妨碍受激拉曼过程的进行,最终会使拉曼输出光呈现出很强的非轴向散射。而在单通纳秒拉曼实验中,拉曼输出光和抽运光同轴,光斑大小相似并重合在一起。皮秒拉曼散射光通过拉曼放大器后,由于拉曼自净化作用,光束质量能够得到有效改善,如图 3(a)、(b)所示。高光束质量的低阶斯托克斯光与拉曼抽运光通过四波混频(FWM)相互作用,便可生成高光束质量的高阶斯托克斯光,而避免非线性效应对拉曼光的影响。将激光器的输出能量提高至约 0.5 mJ 时,便可获得高阶斯托克斯拉曼光,如图 3(c)、(d)所示。

拉曼放大器基于四波混频对种子光进行放大,分别于不同的入射光夹角得到正三阶拉曼斯托克斯光与反三阶拉曼斯托克斯光。当入射光夹角为 1.67° 时,可获得正三阶拉曼斯托克斯光。当入射光夹角为 2.64° 时,可获得反三阶拉曼斯托克斯光。用光谱仪(USB 2000+型, Ocean Optics Ltd.)对各

表 1 YVO₄ 晶体受激拉曼斯托克斯散射光光谱组成

Table 1 Spectral composition of Stokes and anti-Stokes in YVO₄ crystal

Pump condition		Stokes and anti-Stokes light			Frequency of SRS-active crystal	
λ_p /nm	Pump geometry	Wavelength /nm	Line	FWM line attribution	vibration mode ω_v /cm ⁻¹	
526.5	K//C ₄	461.55	AS ₃	$\omega_p + 3\omega_v$	890.9	
		481.36	AS ₂	$\omega_p + 2\omega_v$	891.4	
		502.93	AS ₁	$\omega_p + \omega_v$	890.1	
			pump	ω_p		
		E⊥C ₄	552.43	S ₁	$\omega_p - \omega_v$	891.5
			581.02	S ₂	$\omega_p - 2\omega_v$	891.1
			612.70	S ₃	$\omega_p - 3\omega_v$	890.7

为了研究拉曼种子光和拉曼抽运光之间的延时对拉曼放大器的影响,将皮秒光源的脉宽从 10 ps 展宽至 30、60 ps,并分别进行拉曼放大的实验。实验结果如图 4 所示。在 Grigsby 等^[5]的实验中,先将谱线较宽的啁啾飞秒光展宽到 200 ps 后,再进行拉曼放大的实验。尽管抽运光脉宽较宽,但种子光与抽运光间的延时量仍需精确到 2.8 ps。认为种子光与抽运光间的延时量与拉曼晶体的瞬态拉曼谱线线宽的倒数相关。实验中,使用的是窄线宽(约 0.6 nm)的皮秒种子源。实验表明皮秒光源的

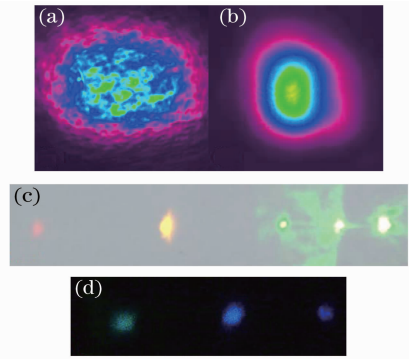


图 3 单通拉曼产生器的(a)一阶斯托克斯成丝光斑;(b)拉曼放大器的一阶斯托克斯高斯放大光斑;(c)三阶斯托克斯拉曼光斑;(d)反三阶斯托克斯拉曼光斑

Fig. 3 (a) Beam profiles of filamented first-order Raman light produced by single pass Raman generator; (b) amplified first order Stokes light produced by seed Raman amplification; (c) pictures of third-order Stokes Raman light and (d) third-order anti-Stokes Raman light

阶拉曼斯托克斯光进行光谱测量,并将其与计算所得的斯托克斯拉曼光进行光谱指认,如表 1 所示,其中 λ_p 为抽运光波长, ω_p 为抽运光频率, S 表示正斯托克斯光, AS 表示反斯托克斯光。可以看出各阶拉曼斯托克斯光的频移量间隔在 891 cm^{-1} 附近,与 YVO₄ 的拉曼散射实验测量值一致^[6-7]。

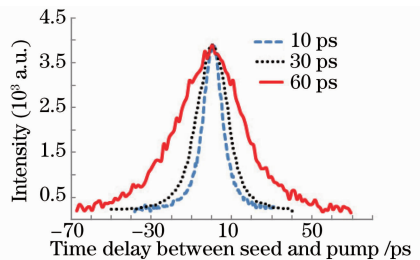


图 4 斯托克斯放大光输出能量(光强由光谱仪测量)随拉曼种子光与抽运光间延时量的变化
Fig. 4 Stokes pulse energy (measured by spectrometer) versus time delay between Raman seed and pump light

脉宽越宽,拉曼种子光和拉曼抽运光在时域上的可重合区域就越宽。反映在延时量与放大光光强曲线中,便是光源脉宽越宽,延时量曲线也越宽。Grigsby等^[5]的实验结果与本文的结果不一致,两个实验采用的光源不同是造成实验结果不同的主要原因。

对拉曼放大实验有重大影响的另一个因素是拉曼种子光与拉曼抽运光两者间的入射夹角,实验结

果如图5所示。拉曼放大器中拉曼种子光与拉曼抽运光通过四波混频相互作用,只有当种子光与拉曼抽运光满足相位匹配条件时,才能最佳地实现拉曼光的放大。从图5中的曲线也可看出,入射光间的夹角对放大效率的影响很大。无论是正三阶斯托克斯光,还是反三阶斯托克斯光,只要夹角的改变量超过 0.5° 就会使放大效率严重下降。

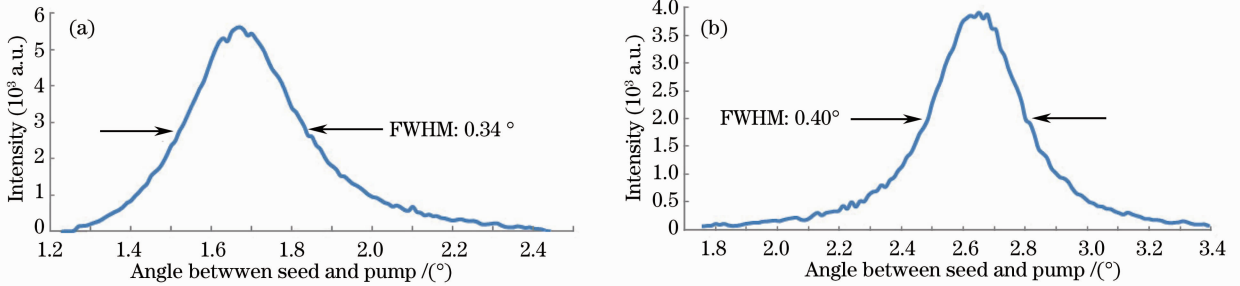


图5 斯托克斯放大光输出光强(光强由光谱仪测量)随拉曼种子光与抽运光入射夹角的变化。

(a) 正三阶斯托克斯拉曼光; (b) 反三阶斯托克斯拉曼光

Fig. 5 Stokes pulse energy (measured by spectrometer) versus incident angle between Raman seed and pump light.

(a) Third-order Stokes Raman light; (b) third-order anti-Stokes Raman light

4 结 论

采用拉曼产生器加拉曼放大器的方式,并利用拉曼光在拉曼放大器中的自净化作用,成功得到了高光束质量的高阶拉曼斯托克斯光。由于该 YVO_4 拉曼放大器基于相位匹配条件对皮秒拉曼种子光进行放大,故对种子光与抽运光两脉冲光同步和夹角的要求比较严格。尽管如此,仍该拉曼放大器提供了一种可行的获得多波长皮秒光源的方法。

参 考 文 献

- 1 A A Kaminskii, K Ueda, H J Eichler, *et al.*. Tetragonal vanadates YVO_4 and $GdVO_4$ —new efficient $\chi^{(3)}$ -materials for Raman lasers[J]. *Opt Commun*, 2001, 194(1-3): 201—206.
- 2 Y F Chen. High-power diode-pumped actively Q-switched Nd:YVO₄ self-Raman laser; influence of dopant concentration [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(16): 1915—1917.
- 3 Y F Chen. Compact efficient all-solid-state eye-safe laser with self-frequency Raman conversion in a Nd:YVO₄ crystal[J]. *Opt*

Lett, 2004, 29(18): 2172—2174.

- 4 Lei Bo, Lou Qihong, Dong Jingxing, *et al.*. Broadband Raman amplification with coaxial laser pumping[J]. *Chinese J Lasers*, 2001, 28(4): 289—292.
- 雷 博, 楼棋洪, 董景星, 等. 高功率同轴抽运宽带拉曼放大[J]. *中国激光*, 2001, 28(4): 289—292.
- 5 F B Grigsby, Peng Dong, M C Downer. Chirped-pulse Raman amplification for two-color, high-intensity laser experiments[J]. *J Opt Soc Am B*, 2008, 25(3): 346—350.
- 6 Hu Dawei. Property Research on Some Tunstate and Vanadate Raman Laser Crystals[D]. Jinan: Shandong University, 2007. 97—103.
- 胡大伟. 若干钨酸盐、钒酸盐激光拉曼晶体性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2007. 97—103.
- 7 P G Zverev, A Y Karasik, A A Sobol. Stimulated Raman scattering of picosecond pulses in $GdVO_4$ and YVO_4 crystals[C]. *Advanced Solid-State Photonics*, OSA Technical Digest, 2004, TuB10.
- 8 Q K Ai, M Chen, Y Xu, *et al.*. Picosecond Nd:YLF five-passes laser amplifier with 20 mJ pulse energy[J]. *Laser Phys*, 2012, 22(7): 1169—1172.

栏目编辑:张 腾