文章编号:1001-5078(2017)01-0042-05

·激光器技术·

自拉曼三阶斯托克斯调Q锁模激光特性研究

王冬冬,杜晨林,任席奎,李春波,梁德志 (深圳大学光电工程学院,深圳市激光工程重点实验室,广东深圳 518060)

摘 要:报道了一种结构简单紧凑的输出波长为 1487 nm 的三阶斯托克斯调 Q 锁模(Simultaneously Q-switched and mode-locked (QML))自拉曼固体激光器。采用光纤耦合输出的大功率 半导体激光器单端泵浦掺 Nd 原子浓度为 0.3 at. % 的 Nd:YVO₄ 复合晶体,在重复频率(pulse repetition rate (PRF))为 25 kHz,泵浦功率为 24 W 时,输出的波长为 1487 nm,获得的最大平 均输出功率为 588 mW,锁模脉宽为 21.09 ps,单脉冲能量为 8.23 μJ,峰值功率达到 390 kW。 关键词:三阶斯托克斯;调 Q 锁模;自拉曼; Nd:YVO₄ 复合晶体 中图分类号:TN 248.1;O437.3 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.01.008

Study on Q-switched and mode-locked third-Stokes self-Raman laser

WAND Dong-dong, DU Chen-lin, REN Xi-kui, LI Chun-bo, LIANG De-zhi

(College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: A simple, compact third-Stokes self-Raman Q-switched and mode-locked solid laser is demonstrated. The 0.3 at. % Nd-doped Nd : YVO_4 crystal is pumped by a fiber-coupled laser-diode. The wavelength of 1487 nm, the average power of 0.588 mW, peak power of 390 kW, single pulse energy of 8.23 μ J and pulse width of 21.09 ps ns are achieved at the PRF of 25 kHz and pump power of 24W.

Key words: third-Stokes; Q-switched and mode-locked; self-Raman; Nd : YVO4 composite crystal

1 引 言

受激拉曼散射是一种实用而有效的激光频率变换的方法。近些年来,人们广泛采用拉曼介质材料 来产生多种红外波长的激光。这些拉曼介质包括: Nd:YVO₄、Nd:GdVO₄、BaWO₄和 SrWO₄等^[1-9]。

2000年, H. M. Pask 等^[10]人在研究 LD 泵浦 Li-IO₃ 激光器时,发现了一阶拉曼激光有调 Q 锁模现 象。2007年, Y. F. Chen 等^[11]人在实验中,也观察 到一阶拉曼激光有调 Q 锁模现象。2008年, K. J. Yang 等人^[12]报道了基于 Nd: GdVO₄ 晶体的 1.34 μm 的调 Q 锁模激光器,获得了 460 ps 的锁模 脉冲输出。2012 年,Q. P. Wang 等^[4]人报道了一、二 阶斯托克斯拉曼激光同时运转并实现锁模输出的激 光器,二阶拉曼锁模脉冲宽度为 31 ps。2013 年, C. L. Du 等^[9]人报道了一台 Nd:YVO₄ 的自拉曼 1176 nm 调 Q 锁模激光器,获得 23 ps 的一阶拉曼调 Q 锁模脉冲输出。2014 年,C. L. Du 等^[8]人报道了 基于 Nd:YVO₄ 晶体的自拉曼 1313 nm 调 Q 锁模激 光器,获得 5.7 ps 的二阶拉曼调 Q 锁模脉冲输出。 受激拉曼散射作为一个非线性频率转换过程,同时

基金项目:深圳市科技计划基础研究项目(No. JCYJ20140509172609175)资助。

作者简介:王冬冬(1991-),女,硕士研究生,主要从事固体自拉曼激光器的研究。E-mail:1256523564@qq.com

通讯作者:杜晨林(1976-),男,教授,主要研究方向为新型激光晶体,非线性光学晶体及其激光和频率变换器件。Email:cldu@ szu. edu. cn

收稿日期:2016-05-06;修订日期:2016-06-14

对拉曼光的锁模起了重要作用,提高了拉曼光的锁 模效果。

本文通过半导体激光器(LD)端面泵浦 Nd:YVO₄复合晶体实现了三阶斯托克斯自拉曼调 Q锁模激光器的运转,且在泵浦功率为24W,Q开 关重复频率为25kHz时,获得了最大输出功率为 588mW的波长为1487nm的三阶斯托克斯拉曼锁 模激光输出,相应的光 - 光转换效率为2.45%,此 时的锁模脉冲的脉冲宽度为21.09ps,相应的谱线 宽度为0.379nm,输出的最高脉冲的峰值功率为 390kW。

2 实验装置

实验装置如图1所示。所使用的泵浦源是一台 光纤耦合输出的大功率半导体激光器(LD),工作波 长稳定在 808 nm,采用端面泵浦和声光调 Q 的方 式,激光谐振腔采用平 - 凹腔结构。泵浦源的耦合 输出光纤的数值孔径和纤芯直径分别为 0.22 和 400 μm。泵浦光经过1:0.5 的聚焦系统后,在激光 晶体内部聚焦成直径约为 200 μm 的光斑。M1 和 M2 分别为泵浦镜和输出镜。输出镜 M2 曲率半径 是 250 mm。 泵 浦 镜 和 输 出 镜 表 面 都 镀 有 对 1064 nm、1176 nm 和 1314 nm 的高反膜,其反射率 高达 99.9%。另外,泵浦镜镀有对 1487 nm 的反射 率为90%的反射膜,以及对808 nm的透过率为 99%的高透膜。而输出镜表面则镀有对 1487 nm 的 反射率为50%的反射膜。为了方便研究腔长可变 的调Q锁模三阶拉曼激光器的输出特性,输出镜 M2 放置在可以水平移动的平移台上。





激光工作物质是沿 a 方向切割的 YVO₄/ Nd:YVO₄/YVO₄复合晶体,其尺寸为3 mm×3 mm× (2+10+18)mm。Nd:YVO₄复合晶体中间部分所 掺杂的 Nd 原子浓度为 0.3 at.%,长度为10 mm, 两端为纯的 YVO₄ 晶体,靠近泵浦源一端长度为 2 mm,另一端长度为 18 mm。为了提高转换效率, 复合晶体前后两端面都镀有对 808 nm、1176 nm、 1314 nm 和 1487 nm 的增透膜,对 1487 nm 的透过率 为95%。Nd:YVO₄复合晶体对 808 nm 的泵浦光 的吸收效率为 95%。且把激光晶体包裹在铟箔 中,并将其放置在紫铜块内,同时用水温保持在 20℃左右的循环水对紫铜块进行冷却,这样做可 以带走激光晶体在大功率泵浦下产生的热量,从 而可以有效减轻激光晶体中的热效应。声光Q开 关(AOS)通光长度约为 35 nm,用水温保持在 20℃左右的循环水进行冷却。为了减小反射损 耗,声光Q开关的前后两端面都镀有对1064 nm 和 1176 nm 的增透膜。同时,使腔内各个元件的 间隔保持1~2 nm。

3 实验分析及结果

首先,使得腔镜 M1 和 M2 的距离保持在 105 mm,调节光路中各个元器件的角度,使得三阶 拉曼激光的输出功率最大。

如图 2 所示,给出了在不同调 Q 重复频率下, 三阶斯托克斯拉曼激光的平均输出功率随泵浦功率 变化的关系图。在实验过程中,Q 开关的重复频率 分别为 15 kHz、25 kHz 和 35 kHz 时,三阶斯托克斯 拉曼激光的泵浦阈值均为 8 W。由图 2 可见,在不 同的调 Q 重复频率下,获得的最大输出功率分别为 450 mW、588 mW 和 543 mW,其相应的光 - 光转换 效率分别为 1.86%、2.45% 和 2.26%。可以看出, 当调 Q 重复频率分别为 15 kHz、25 kHz 和 35 kHz 时,三阶斯托克斯拉曼激光的输出功率都随着泵浦 功率的增加而增加,然后趋于饱和。同时为了保护 激光晶体表面的镀膜,泵浦功率不再往上增大。只



要拉曼光出现,激光器都是处于调Q锁模运转,而 且锁模调制深度与调Q重复频率或者泵浦功率无 关,一直保持100%。

为了更好地测出激光脉冲的细节,选用一台 带宽为8 GHz 的数字示波器(Agilent DSA90804A) 和一个高速 InGaAs 光电探测器 (New Focus Model 1014,上升时间只有9 ps)。在泵浦功率为 24 W, Q开关重复频率为25 kHz时,测得的三阶斯托克 斯拉曼光的输出脉冲图像如图 3 所示。由图 3 可 见,输出脉冲的锁模深度达到100%,包络宽度为 3.2 ns, Q 脉冲包络内各个子脉冲的间距为 1.016 ns, 相对应的锁模脉冲的重复频率约为984.25 MHz。 由 30 mm 长的 π 偏振输出的激光晶体($n_{e1.487}$ um = 2.00095)和35 mm 声光 Q 开关石英晶体(n_{el.487 um} = 1.5326),引入的附加光程为48.67 mm,腔镜 M1 和 M2 的距离为 105 mm,因此光学腔长为105 mm + 48.67 mm = 153.67 mm。理论计算的锁模脉冲间 隔和相对应的锁模脉冲的重复频率分别为1.02 ns 和980.39 MHz。考虑到各种测量误差以及激光晶 体由于热效应对激光晶体折射率的影响,理论计 算的数据与实际测得的数据是一致的。



图 3 在泵浦功率为 24 W,Q 开关重复频率为 25 kHz 时, 三阶斯托克斯自拉曼调 Q 锁模激光器的脉冲包络图 Fig. 3 The typical trains of QML third-Stokes self-Raman pulse at the incident pump power of 24W and the PRF of 25 kHz

图4给出了在588 mW的1487 nm锁模激光输 出时,三阶斯托克斯自拉曼调Q锁模激光器的脉冲 宽度图。数字示波器上显示三阶拉曼锁模脉冲宽度 为109.5 ps。但示波器和探测器的响应时间会影响 真实的脉冲宽度,由此可以推算,三阶拉曼锁模真实 的脉冲宽度是小于109.5 ps。文献给出了估计锁模 脉冲宽度的公式^[13]:

$$t_{\text{measure}}^2 = t_{\text{real}}^2 + t_{\text{probe}}^2 + t_{\text{oscilloscope}}^2$$
(1)

式中, t_{measure} 指实验测得锁模脉冲的上升时间; t_{real} 指锁模脉冲真实的上升时间; t_{probe} 指光电探测器的 上升时间; $t_{\text{oscilloscope}}$ 指示波器的上升时间,可以由 $t_{\text{oscilloscope}} \times BW = 0.35 ~ 0.4$ 给出,而 BW 是指示波 器的带宽。实验中所使用的数字示波器的带宽是 8 GHz,相对应的上升时间约为 46.88 ps。由图 4 可 以得到锁模脉冲的上升时间为 50.63 ps,实验中使 用的高速 InGaAs 光电探测器的上升时间为 9 ps。 根据相关参数和数值,利用公式(1)可以估算得到 锁模脉冲真实的上升时间为 16.87 ps。根据上升时 间的定义(0.1~0.9 V)并考虑到锁模脉冲的对称 性,可以估算脉冲宽度为其上升时间的 1.25 倍^[13]。 于是,可以进一步算出锁模脉冲的真实宽度约为 21.09 ps。图 3 的调 Q 包络里有 7 个锁模脉冲,而 且强度最强的那个脉冲约占 Q 包络总能量的 35%。 由此可得最大单脉冲能量和最高峰值功率分别为 8.23 μ J 和 390 kW。



图 4 在泵浦功率为 24 W,Q 开关重复频率为 25 kHz 时, 三阶斯托克斯自拉曼调 Q 锁模激光的脉冲图 Fig. 4 The typical profile of the third-Stokes QML pulse at the incident pump power of 24 W and the PRF of 25 kHz

图 5 给出了在 588 mW 的 1487 nm 锁模激光输 出时,三阶斯托克斯自拉曼调 Q 锁模激光器的输出 光谱 图。由图 5 可知,光谱的中心波长为 1487.7 nm,光谱的半高宽为 0.379 nm,可以计算出 相应的带宽为 51.37 GHz,相应的时间带宽积($\Delta \tau \times \Delta \nu$)约为 1.08,和傅里叶极限 0.44 相差有点大,原 因是因为示波器的精度不够,测出来的锁模脉冲的 真实宽度偏大。

在泵 浦 功 率 为 16 W,Q 开关 重复 频 率 为 35 kHz, 三阶斯托克斯拉曼激光器锁模稳定运行, 三 阶斯托克斯拉曼激光输出脉冲的锁模深度达到 100%时,我们通过一台光栅单色仪把激光输出的基 频光(1064 nm)、一阶斯托克斯拉曼激光(1176 nm)、 二阶斯托克斯拉曼激光(1313 nm)和三阶斯托克 斯拉曼激光(1487 nm)分开,同时用快速光电探测 器探测并连接到示波器上观察。观察图 6 可有, 在三阶斯托克斯拉曼激光达到 100% 锁模输出时, 二阶斯托克斯拉曼激光和基频光都存在锁模现 象,但是,二阶斯托克斯拉曼激光的锁模深度仅为 30% 左右,基频光的锁模深度仅为 5% 左右。这说 明了从基频光到拉曼光的转换过程中产生的非线 性转换效应,在锁模过程中发挥了积极的促进作 用,使得最后输出的三阶斯托克斯拉曼激光锁模 脉冲锁模深度达到了 100%。



图 5 在泵浦功率为 24 W,Q 开关重复频率为 25 kHz 时, 三阶 Stokes 拉曼光的输出光谱

Fig. 5 The linewidth of the QML third-Stokes self-Raman laser at the incident pump power of 24 W and the PRF of 25 kHz



图 6 在泵浦功率为 16 W,Q 开关重复 频率为 35 kHz 时输出脉冲图像 Fig. 6 Output pulse at the incident pump power of 16 W and the PRF of 35 kHz

采用 YOKOGAWA 公司的 AQ6370B 光谱分析仪测 量三阶斯托克斯调 Q 锁模自拉曼激光器的输出光谱。

图7出了在三阶斯托克斯拉曼激光在最大功率 588 mW 输出时,光谱分析仪测得的激光输出光谱 特性。从左往右依次是 1064.7 nm、1175.9 nm,、 1313.6 nm、1487.6 nm,且第四条谱线的强度远远超 过前三条谱线。经过计算可知,1064.7 nm、 1175.9 nm、1313.6 nm 和 1487.6 nm 四条谱线的波 数间距是 890 cm⁻¹,对应于 VO₄³⁻离子团完全对称 模的频率。由此可知,1175.9 nm、1313.6 nm 和 1487.6 nm 分别为基频光 1064.7 nm 的一阶拉曼激 光、二阶拉曼激光和三阶拉曼激光。



图 7 泵浦功率为 24 W,Q 开关重复频率为 25 kHz 时, 激光器的输出光谱

Fig. 7 Optical spectrum of the laser at the incident pump power of 24 W and the PRF of 25 kHz

4 结 语

本文研究了一种结构简单紧凑的调 Q 锁模三 阶斯托克斯自拉曼激光器,其输出波长为 1487 nm。 在泵浦功率为 24 W 和 Q 开关重复频率为 25 kHz 时,获得了最大输出功率 588 mW 的三阶斯托克斯 拉曼调 Q 锁模 1487 nm 的激光输出,相应的光 - 光 转换效率为 2.45%。锁模脉冲的脉冲宽度、最大单 脉冲能量和最高峰值功率分别为 21.09 ps、8.23 μJ 和 390 kW。研究结果表明受激拉曼散射转换过程 对拉曼光的锁模发挥了积极的促进作用,增强了拉 曼光的锁模效果。

参考文献:

- [1] Y M Duan, H Y Zhu, G Zhang, et al. Efficient 559. 6 nm light produced by sum-frequency generation of diode-endpumped Nd : YAG/SrWO₄ Raman laser [J]. Laser Physics Letters, 2010, 7:491 - 494.
- [2] Chen Lin Du, Li Zhang, Yong Qin Yu, et al. 3.1 W diode-end-pumped composite Nd : YVO₄ self-Raman laser at 1176 nm [J]. Applied Physics B, 2010, 101 (4): 743 - 746.
- Shuanghong Ding, Meiqin Wang, Shiwu Wang, et al. Investigation on LD end-pumped passively Q-switched c-cut Nd : YVO₄ self-Raman laser [J]. Optics Express, 2013, 21:13052-13061.
- [4] Hongbin Shen, Qingpu Wang, Xingyu Zhang, et al. 1st-Stokes and 2nd-Stokes dual-wavelength operation and mode-locking modulation in diode-side-pumped Nd : YAG/BaWO₄ Raman laser [J]. Optics Express, 2012, 20

(16):17823 - 17832.

- X H Chen, P Li, X Y Zhang, et al. Eye-safe raman laser at 1532 nm with BaWO₄ crystal [J]. Laser Physics, 2011, 21 (12):2040 - 2044.
- [6] Weidong Chen, Yong Wei, Chenghui Huang, et al. Second-Stokes YVO₄ / Nd : YVO₄ / YVO₄ self-frequency Raman laser [J]. Optics Letters, 2012, 37 (11): 1968 1970.
- [7] Chen Lin Du, Xiao Hua Xie, Yu Feng Zhang, et al.
 YVO₄/Nd : YVO₄/YVO₄ self-Raman laser at 1764 nm
 [J]. Applied Physics B,2014,116:569 574.
- [8] Chen Lin Du, Guo Xi Huang, Yong Qin Yu, et al. Q-switched mode-locking of second-Stokes pulses in a diode-pumped YVO₄/Nd : YVO₄/YVO₄ self-Raman laser [J]. Laser Physics, 2014, 24, 125003;1-5.
- [9] Guo Xi Huang, Yong Qin Yu, Xiao Hua Xie, et al. Diodepumped simultaneously Q-switched and mode-locked

$$\label{eq:VO4} \begin{split} &YVO_4/Nd\ :\ YVO_4/YVO_4\ crystal\ self-Raman\ first-Stokes\\ &laser[\ J\].\ Optics\ Express\ ,2013\ ,21\ (17)\ ;19723\ -19731\ . \end{split}$$

- [10] H M Pask, J A Piper. Diode-pumped LiIO₃ Intracavity Raman Lasers [J]. IEEE J. Quantum Electron., 2000, 36 (8):949-955.
- [11] K W Su, Y T Chang, Y F Chen. Power scale-up of the diode-pumped actively Q-switched Nd : YVO₄ Raman laser with an undoped YVO₄ crystal as a Raman shifter [J]. Appl. Phys. B,2007,88(1):47 - 50.
- [12] K J Yang, S Z Zhao, J L He, et al. Diode-pumped passively Q-switched and mode-locked Nd : GdVO₄ laser at 1.34 μm with V: YAG saturable absorber [J]. Opt. Express, 2008,16(25):20176-20185.
- [13] K Yang, S Zhao, J He, et al. Diode-pumped passively Q-switched and mode-locked Nd : GdVO₄ laser at 1.34 microm with V:YAG saturable absorber [J]. Opt. Express, 2008,16(25):20176-20185.