

·光电器件与材料·

LD泵浦Cr:YAG被动调Q内腔式SrWO₄锁模拉曼激光器实验研究

贾海旭

(北京东方锐镭科技有限公司, 北京 100015)

摘要:采用LD泵浦Cr:YAG被动调Q的内腔式SrWO₄锁模拉曼激光器获得了稳定的、调制深度100%的调Q锁模拉曼脉冲。在泵浦功率5.2 W时,获得了968 mW的平均输出功率,泵浦光到拉曼光的转换效率为18.6%,调Q脉冲重复率51 kHz,脉冲宽度7 ns,这是目前为止报道的内腔式SrWO₄拉曼激光器所获得的最大的转换效率,并对实验中出现的拉曼自锁模现象进行了分析。最后,对实验中基频光与拉曼光出现的偏振状态进行了相关研究,给出合理的解释。

关键词:激光器;内腔式锁模拉曼激光器;受激拉曼散射;钨酸锶(SrWO₄)晶体;Cr:YAG被动调Q;偏振

中图分类号:TN248.1

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-06-0040-05

Experiment Research on Laser-diode-pumped Cr:YAG Passively Q-switched Intracavity SrWO₄ Mode-locked Raman Laser

JIA Hai-xu

(Beijing Oriental Sharp Laser Technology co., ltd, Beijing 100015)

Abstract: A laser-diode-pumped Cr:YAG passively Q-switched intracavity SrWO₄ mode-locked Raman laser is used to obtain stable Q-switched mode-locked Raman pulse of 100% modulation depth. An average output power of 968 mW is obtained when the incident pump power is 5.2 W, the conversion efficiency of pump to Raman laser is 18.6%. The Q-switched pulses with repetition rate of 51 kHz and pulse width of 7 ns is obtained. To our knowledge, this is the most efficient at present. And the forming reason of mode-locked Raman laser pulse in the experiment is analyzed. The polarization mechanism is researched and reasonable explanations are analyzed.

Key words: laser; intracavity mode-locked Raman laser; stimulated Raman scattering (SRS); strontium tungstate (SrWO₄) crystal; Cr: YAG passively Q-switched; polarization

受激拉曼散射(stimulated raman scattering, 简记为SRS)是最重要的变频技术之一,近年来,随着晶体拉曼材料生长技术的发展,出现了很多性能优良的拉曼晶体。常见拉曼介质包括钒酸盐^[1]、碘酸盐^[2]、硝酸盐^[3]和钨酸盐^[4-6]等。其中,SrWO₄晶体是一种性能优良的拉曼晶体,它属于四方晶系,白钨矿结构,拉曼增益系数可达5.0 cm/GW,可大尺寸生长,是一种极具潜力的拉曼晶体,在最近几年得到了广泛的理论和实验研究。

LD泵浦内腔式拉曼激光器因具有小型化、紧凑

化、腔型简单、低成本化等优点,一直是人们研究的热点。拉曼激光器谐振腔中插入薄片饱和吸收体构成被动调Q锁模拉曼激光器,可获得时域上的超短脉冲,因此,近年来关于被动调Q锁模拉曼激光器的理论与实验研究越来越引起人们的重视。2007年,Ding S H等人采用行波法对内腔式拉曼激光器的时间特性进行了详细的理论分析,并对内腔式拉曼激光器的锁模形成机制进行了讨论,为内腔式锁模拉曼激光器提供了理论依据^[7];2012年,北京交通大学的Peng J Y等人报导的Cr:YAG被动调Q

的Nd:GdVO₄自锁模拉曼激光器,在泵浦功率10 W时,获得了1 173 nm拉曼光平均最大输出功率105 mW,锁模脉冲的脉冲重复率为0.9 GHz^[8];2013年,Ding S H等人报导的全固态端面泵浦Cr:YAG被动调Q内腔式SrWO₄锁模拉曼激光器,在泵浦功率6.3 W情况下,获得了12.7%的泵浦光到拉曼光的转换效率,并观察到了调Q拉曼脉冲的锁模现象^[9]。现阶段,这种简单价廉的Cr:YAG被动调Q内腔式锁模拉曼激光器是锁模拉曼激光器的发展方向。

1 实验装置

实验装置如图1所示。腔型结构为平凹直腔,几何腔长约为8 cm。泵浦源为中心波长808 nm的光纤耦合激光二极管激光器,光纤芯径400 μm,数值孔径0.22,耦合效率约为95%。 M_1 为曲率半径150 mm平凹镜; M_2 为输出耦合镜;激光晶体为Nd:YAG晶体,掺杂浓度为1 at.%,晶体尺寸为 $\Phi 4 \times 10$ mm³,前后端均镀有对1 064 nm的减反膜,入射面还镀有对808 nm的增透膜;拉曼晶体为一个尺寸7×7×50 mm³的SrWO₄晶体,双端镀有在1 064 nm和1 180 nm处的减反膜($R < 1\%$);饱和吸收体为Cr:YAG晶体,晶体双端镀有在1 064 nm和1 180 nm处的减反膜($R < 0.2\%$)。实验中Cr:YAG晶体紧靠输出镜 M_2 ,以利用此处较小的腔模,从而使被动调Q高效运转。实验中采用水冷方式进行温控,温度控制在23 ℃。平均输出功率用功率计测量(ophir laserstar)。快速响应的PIN光电管探测连接Agilent数字示波器(DSO7104A,1 GHz带宽,4 G Sa/s),用来显示和观察激光脉冲的时间特性。

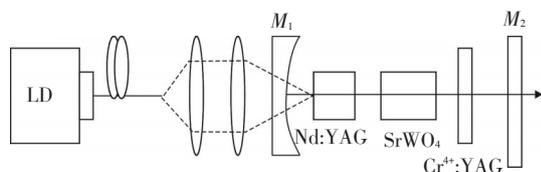


图1 LD泵浦Cr:YAG被动调Q内腔式SrWO₄拉曼激光器实验装置图

2 实验结果

实验中采用SrWO₄拉曼激光器实验装置,在采用两块Cr:YAG晶体,其初始透过率分别为89%和

92%两种饱和吸收体,反射率为90%@1 178 nm与80%@1 178 nm的两种输出镜进行实验。当 $T_0=92\%$,输出镜反射率80%的情况下,在泵浦功率5.2 W时,获得了968 mW的平均输出功率,泵浦光到拉曼光的光光转换效率为18.6%,调Q脉冲重复率51 kHz,脉宽为7 ns。这也是目前为止报道的内腔式SrWO₄拉曼激光器所获得的最大的转换效率。拉曼光输出功率随泵浦功率的变化曲线如图2。

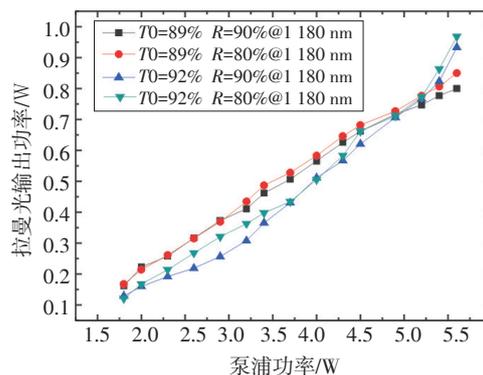
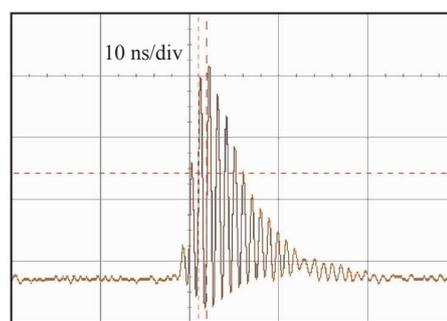
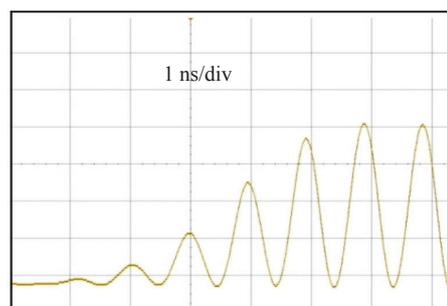


图2 拉曼光输出功率随泵浦功率的变化

在实验中,以上四种组合情况下,都观察到了稳定的锁模现象,且随着泵浦功率的变化,锁模比较稳定。实验测得锁模脉冲周期1 ns左右,锁模脉冲宽度400 ps,调制深度100%,如图3a所示。



(a) 脉冲图形



(b) 锁模脉冲图形

图3 当 $T_0=92\%$, $OC=80\%$ @1 178 nm时,泵浦功率5.2 W情况下,拉曼光脉冲特性

锁模情况明显优于现有报道其他被动调Q锁模拉曼激光器。由于实验中使用的示波器和探测器具有响应时间的限制,锁模脉冲的脉宽测定结果需要修正。根据参考文献[10]中的方法进行修正,锁模脉冲脉宽可估算为小于200 ps。

如图4a所示,实验中1 064 nm调Q基频光的脉冲图形比较光滑,没有出现脉冲调制现象,这便排除了在实验条件下,基频光调Q脉冲调制的发生;如图4b所示,脉冲图形中基频光部分比较平滑,拉曼光部分出现锁模调制,因此可以相信受激拉曼散射是产生锁模调制的原因。

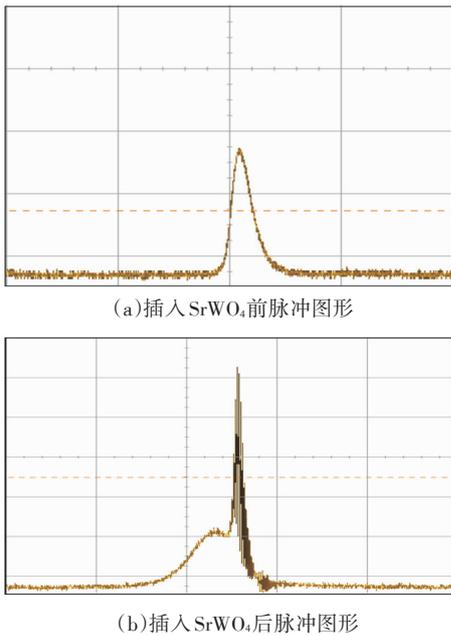
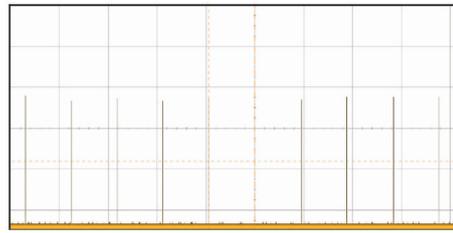


图4 当 $T_0=89\%$, $OC=90\%$ @1 064 nm时,插入SrWO₄晶体前后,泵浦功率5.2 W情况下,基频光的调Q脉冲特性

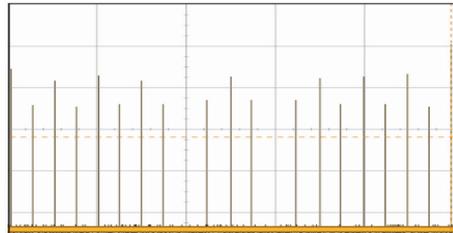
3 偏振状态分析

实验中对于运转于激光器中的基频光(1 064 nm)与拉曼光(1 180 nm)的偏振状态进行系统的研究与分析,以期可以通过调节实验条件,选择合适的偏振状态,达到理想的实验结果。

Nd:YAG晶体是各向同性晶体,连续的1 064 nm的基频光为椭偏光,随着泵浦功率的增加,输出激光的偏振度有明显的升高,这是随着泵浦功率的增加,晶体内的各模式的竞争情况出现变化导致的结果。当插入Cr:YAG晶体进行调Q后,偏振状况将变的较为复杂。实验结果如图5~图6所示。

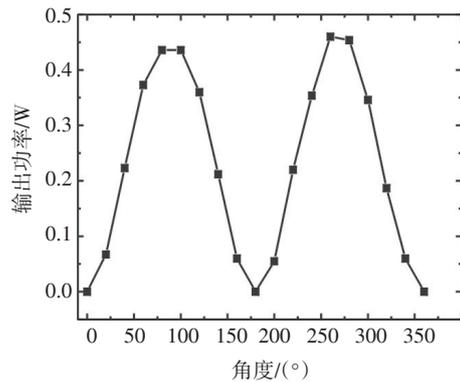


(a)泵浦功率3.4 W时,输出脉冲的脉冲序列

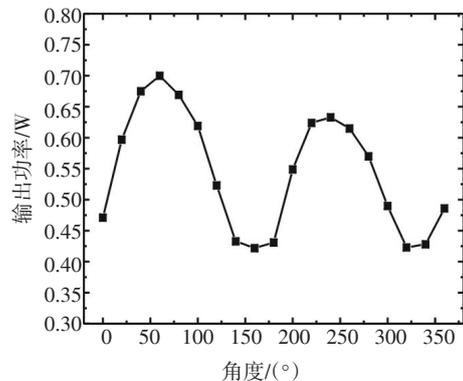


(b)泵浦功率5.2 W时,输出脉冲的脉冲序列

图5 $T_0=85\%$,输出脉冲的脉冲序列



(a)泵浦功率3.4 W时,输出功率随着偏振棱镜转动角度的变化



(b)泵浦功率5.2 W时,输出功率随着偏振棱镜转动角度的变化

图6 $T_0=85\%$,输出功率随着偏振棱镜转动角度的变化

从图5a可以看出,当饱和吸收体初始透过率 $T_0=85\%$,泵浦功率为3.4 W时,输出脉冲的脉冲序列稳定,且为一组脉冲序列。从图5b可以看出,在泵浦功率为5.2 W的时候,输出脉冲的脉冲序列是由

一高一低两组脉冲序列组成,经实验测量,这两组脉冲的偏振方向是相互垂直的。从图6a可以看出,当饱和吸收体初始透过率 $T_0=85%$,泵浦功率为3.4 W时,输出光为线偏振光;由图6b可以看出,随着泵浦功率增加到5.2 W,输出光偏振性改变,变为偏振度约为0.3左右的椭偏光。图7为当饱和吸收体初始透过率 $T_0=85%$,泵浦功率3.4 W时,将饱和吸收体沿光轴顺时针转动40°前后,输出激光偏振性的变化,可以看出,输出激光仍为线偏振光,但偏振方向随着晶体的转动方向也转动了40°左右。

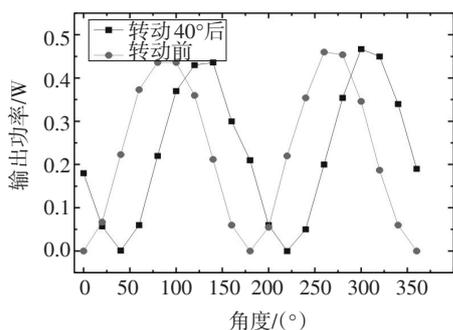


图7 $T_0=85%$,泵浦功率3.4 W时,Cr:YAG晶体沿光轴方向转动40°前后,输出功率随着偏振棱镜转动角度的变化

之所以出现上述情况,可以认为,实验中采用了初始透过率 $T_0=85%$ 的饱和吸收体,初始透过率比较小,提升了脉冲产生阈值。前面已经测得实验中的脉冲序列是由一高一矮两组脉冲组成,这两组脉冲是相互垂直的,并且它们之间具有一定的阈值差,当泵浦功率约为3.4 W,属于泵浦比较低的情况,这时,泵浦达到了其中一组脉冲的阈值,但是没有达到另一组脉冲的阈值,且对于单一组脉冲而言,它是具有线性偏振性的,因而实验中会测得偏振情况,且偏振方向随着晶体的转动而转动;当增加泵浦功率至5.2 W时,两组脉冲都达到阈值,得以产生输出,因而测得的结果是两组脉冲叠加之后的结果,因而输出光偏振性改变,变为偏振度约为0.3左右的椭偏光,在实验中当转动偏振棱镜,可以通过示波器清晰的观察到两组脉冲的交替变化的情况,也可以证实两组脉冲是相互垂直的。

在上面实验的基础上插入了拉曼晶体SrWO₄晶体,需要注意的是,输出镜M2为两种平镜,分别为基频光输出镜(#5, $R=90\% @ 1\ 178\ \text{nm}$)和拉曼镜光输出镜(#31, $HR @ 1\ 064\ \text{nm}, R=80\% @ 1\ 178\ \text{nm}$)。实

验结果如图8所示。

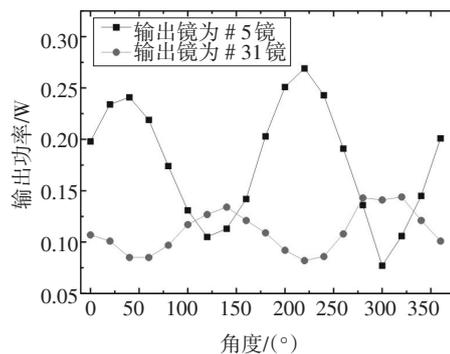


图8 $T_0=89%$,泵浦功率为2.3 W时,输出功率随着偏振棱镜转动角度的变化

从图8可以看出,输出的基频光为偏振度0.53左右的椭偏光,输出的拉曼光为偏振度为0.27左右的椭偏光。且从图中发现,基频光的最大值部分对应着拉曼光方向的最小值位置。对于这种现象是这样理解的:由于实验中采用的饱和吸收体 $T_0=89%$,所以虽然泵浦功率仅为2.3 W,但是已经出现了前面提到的一高一矮两组脉冲同时起振的情况。当插入SrWO₄晶体,能量高那组“高”脉冲首先与SrWO₄晶体发生作用被消耗的较多,所以基频光部分主要存在的是“矮”脉冲的那部分,拉曼光部分主要是由“高”脉冲那部分产生,因而偏振方向也与其相同,所以会出现图中所示的现象。

4 结论

实验采用结构简单的平凹直行腔,实现了LD泵浦Cr:YAG被动调Q内腔式SrWO₄锁模拉曼激光的稳定高效的运行,当吸收体Cr:YAG初始透过率 $T_0=92%$,输出镜反射率80%的情况下,在泵浦功率5.2 W时,获得了968 mW的平均输出功率,泵浦光到拉曼光的光光转换效率为18.6%,调Q脉冲重复率51 kHz,脉宽为7 ns,这也是目前为止报道的内腔式SrWO₄拉曼激光器所获得的最大的转换效率。实验证明了LD泵浦Cr:YAG被动调Q内腔式SrWO₄锁模拉曼激光器这种成本低、腔型简单的锁模拉曼激光器具有良好的被动锁模效应,实验测得锁模脉冲重复率1.1 GHz,脉冲宽度小于200 ps,锁模脉冲稳定,调制深度100%。最后,实验研究并分析了锁模拉曼激光器中基频光与拉曼光的偏振状态与影响因素,以期可以实现偏振状态的调节,为将来进行

腔内和频或倍频等非线性过程的有效运行提供基础。

参考文献

- [1] Chen Y F. Efficient 1521 nm Nd:GdVO₄ Raman laser[J]. Opt. Lett., 2004, 29(22):2632-2634.
- [2] Pask H M, Piper J A. Diode-pumped LiIO₃ intracavity Raman lasers[J]. Quantum Electron., 2000, 36(8):949-955.
- [3] Murray J T, Powell R C, Pevghambarian N, et al. Generation of 1.5 mm radiation through intracavity solid-state Raman shifting in Ba(NO₃)₂ nonlinear crystals[J]. Opt. Lett., 1995, 20(9):1017-1019.
- [4] Huang J H, Lin J P, Su R B, et al. Short pulse eye-safe laser with a stimulated Raman scattering self-conversion based on a Nd:KGW crystal[J]. Opt. Lett., 2007, 32(9):1096-1098.
- [5] ZANG Jing-cun, XIE Li-yan, LI Xiao, et al. Investigating of SRS and luminescence of ZnWO₄ crystals[J]. Acta Phys.

sin, 2007, 56(5):2689-2692.

- [6] Chen Y, Su K, Zhang H, et al. Efficient diode-pumped actively Q-switched Nd:YAG/BaWO₄ intracavity Raman laser[J]. Opt. Lett., 2005, 30(24):3335-3337.
- [7] DING Shuang-hong, ZHANG Xing-yu, WANG Qing-pu, et al. Temporal properties of the solid-state intracavity Raman laser using the traveling-wave method[J]. Phys. Rev. A, 2007, 76(5):053830.
- [8] PENG Ji-ying, ZHENG Yi, ZHENG Kai, et al. Passively Q-switched mode locking in a compact Nd:GdVO₄/Cr:YAG self-Raman laser[J]. Opt. Commun., 2012, 285(24):5334-5336.
- [9] LAN Rui-jun, DING Shuang-hong, WANG Mei-qin, et al. A compact passively Q-switched SrWO₄ Raman laser with mode-locked modulation[J]. Laser Phys. Lett., 2013, 10(2):025801.
- [10] ZHANG Gang. Study on all-solid-state doubly Q-switched and mode-locked laser characteristics and laser stability [D]. Jinan: Shandong University, 2012:23-26.

(上接第39页)

750 mJ、重复频率 40 Hz、脉冲宽度 5.5 ns、激光发散角约 2.5 mrad 的 1 064 nm 激光稳定输出;当注入单脉冲能量 230 mJ、重复频率 100 Hz 的 1 064 nm 激光时,得到的 532 nm 波长激光的单脉冲能量 106 mJ,非线性转换效率可达 46%,脉冲宽度约 9 ns、激光发散角约 2 mrad,且同轴输出指向稳定。为星载、机载、舰载激光测距/照射、激光雷达和激光环境监测等领域的应用提供了一定的参考价值。

参考文献

- [1] He J L, Du J, Sun J, et al. High-efficiency single-and dual-wavelength Nd:GdVO₄ lasers pumped by a fiber-coupled diode[J]. App. Phys. B:Lasers Opt., 2004(79):301-304.
- [2] 韩磊,王加贤,张峻诚,等. LD泵浦 Nd:YAG 复合腔双波长激光器[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2010, 31(2):153-156.
- [3] 林燕凤,张戈,朱海永,等. Nd:YAG 调 Q 激光器双波长振荡机理分析[J]. 物理学报, 2009, 58(6):3909-3914.
- [4] 黄德修,舒学文,文韬,等. 一种新颖的多波长环形腔掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2001, A28(4):313-316.
- [5] ZHANG Ling, WEI Zhi-yi, FENG Bao-hua. Simultaneous dual-wavelength Q-switched Nd:YAG laser operating at

1.06 μm and 946 nm [J]. Opt. Commun., 2006, 264:51-54.

- [6] Ganikhanov Feruz, Carrasco Silvia, Sunney X. Broadly tunable dual-Wavelength light source for coherent anti-stokes Raman scattering microscopy [J]. Opt. Lett., 2006, 31(9):1292-1294.
- [7] Creelya C M, Singha G P, Petrov D. Dual wavelength optical tweezers for confocal Raman spectroscopy [J]. Opt. Commun., 2005, 245:465-470.
- [8] 程勇 卢常勇 刘旭,等. 双波长自由切换输出固体激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(9):2299-2302.
- [9] 林文雄,沈鸿元,曾瑞荣,等. 双波长 Nd:YAG 脉冲激光器的实验研究[J]. 中国激光, 1994, 21(2):89-91.
- [10] LUO Guo-zhen, ZHU Shi-ning, HE Jing-liang, et al. All-solid-state blue and red dual wavelength laser based on PPLT optical superlattice[J]. Chin. J. Laser, 2002, 29:142-144.
- [11] LIAO Jun, HE Jing-liang, LIU Hui, et al. Simultaneous generation of red, green, and blue quasi-continuous-wave coherent radiation based on multiple quasi-phase-matched interactions from a single, aperiodically-poled LiTaO₃[J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 2003(82):1-3.
- [12] 王猛,朱相帮,毛小杰,等. 双波长激光器的实验研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(2):126-127.