

LD 抽运 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 内腔式 PbWO_4 锁模拉曼激光器实验研究

贾海旭 丁双红 刘佳佳 丁 泽

(烟台大学光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264005)

摘要 采用激光二极管(LD)抽运 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 内腔式 PbWO_4 锁模拉曼激光器获得了稳定的、调制深度为 100% 的调 Q 锁模拉曼脉冲。抽运功率为 6.3 W 时,获得的锁模拉曼激光输出功率为 582 mW,抽运光到一阶斯托克斯光的转换效率为 9.24%,斜效率为 10.6%,调 Q 脉冲重复频率为 41.3 kHz,脉宽为 6 ns,锁模脉冲重复频率为 1.1 GHz,锁模脉冲宽度小于 207 ps。

关键词 激光器;内腔式锁模拉曼激光器;受激拉曼散射;钨酸铅(PbWO_4)晶体; $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1002007

Laser-Diode-Pumped $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ Passively Q-Switched Intracavity PbWO_4 Mode-Locked Raman Laser

Jia Haixu Ding Shuanghong Liu Jiajia Ding Ze

(School of Photo-Electronic Information Science and Technology, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)

Abstract A laser-diode-pumped $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ passively Q-switched intracavity PbWO_4 mode-locked Raman laser is demonstrated. Stable and Q-switched mode-locked laser output of modulation depth 100% is realized. A maximum average output power of 582 mW is obtained when the incident pump power is 6.3 W corresponding to an overall pump light-first-order Stokes conversion efficiency of 9.24% and a slope efficiency of 10.6%. The Q-switched pulse with repetition rate of 41.3 kHz and pulse width of 6 ns is obtained. The width of the mode-locked pulse is estimated to be less than 207 ps with 1.1 GHz the repetition rate of 1.1 GHz.

Key words lasers; intracavity mode-locked Raman laser; stimulated Raman scattering; lead tungstate (PbWO_4) crystal; $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ passively Q-switched

OCIS codes 140.3480;140.3550;140.3540;140.4050;290.5910

1 引 言

受激拉曼散射(SRS)是最重要的变频技术之一,散射光的光谱可遍及紫外到近红外的范围。以晶体作为拉曼介质的固体拉曼激光器具有结构紧凑、效率高、稳定性好等特点。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,固体拉曼激光器也因此成为当前的一个研究热点。常见拉曼介质包括钒酸盐^[1-3]、碘酸盐^[4]、硝酸盐^[5]和钨酸盐^[6-8]等。其中, PbWO_4 晶体是一种性能优良的拉曼晶体,大尺寸、光学性能优良的人

工生长 PbWO_4 晶体采用提拉法很容易获得,且价格低廉,因而具有很好的实用价值^[9-13]。目前,已经实现了主动调 Q 外腔式 PbWO_4 晶体拉曼激光的输出^[14]和 PbWO_4 晶体内腔式连续光输出^[10]。

本文采用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体进行被动调 Q。首先,被动调 Q 具有结构简单、紧凑、成本低等优点,而且 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体具有较宽的吸收带与良好的饱和吸收特性,光化学性质稳定,饱和光强低,无退化现象,热导性好,损伤阈值高,在 0.9~1.2 μm 具有可饱和吸收特性、大的吸收截面、良好的导热性能

收稿日期: 2014-05-26; 收到修改稿日期: 2014-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(10974168)、烟台大学研究生科技创新基金(YJSY201413)

作者简介: 贾海旭(1987-),男,硕士研究生,主要从事固体拉曼激光器等方面的研究。E-mail: jiahaixu@163.com

导师简介: 丁双红(1970-),女,博士,教授,主要从事激光物理及技术等方面的研究。E-mail: shding@ytu.edu.cn

(通信联系人)

和机械性能,非常适合作为简单实用、长寿命、全固化的被动调 Q 激光器的饱和吸收体^[15-18];其次,拉曼激光器谐振腔中插入薄片饱和吸收体可构成被动调 Q 锁模拉曼激光器,获得时域上的超短脉冲,而锁模产生的超短激光脉冲具有脉冲宽度窄,峰值功率高,光谱宽等优点,不仅在国防、核聚变、激光测量、激光雷达、精细加工等领域具有巨大的经济价值,而且有利于非线性效应的转化,对提高和频或倍频等非线性过程的转化效率有重要的意义。

正是基于超短激光脉冲的重要应用价值与被动调 Q 锁模拉曼激光器结构紧凑、腔型简单与低成本的特点,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 等^[19]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;2012 年, Peng 等^[20]报导的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 的 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 自锁模拉曼激光器,在抽运功率为 10 W 时,获得了 1173 nm 一阶斯托克斯光平均最大输出功率 105mW,锁模脉冲的脉冲重复频率为 0.9GHz;2013 年,本课题组报导的全固态端面抽运 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 内腔式 SrWO_4 锁模拉曼激光器,在抽运功率为 6.3 W 时,抽运光到一阶斯托克斯光的转换效率为 12.7%,并观察到了调 Q 拉曼脉冲的锁模现象^[21]。现阶段,如何利用这种简单价廉的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 内腔式锁模拉曼激光器优化锁模调制,提高输出功率是锁模拉曼激光器的发展方向。采用行波法对内腔式拉曼激光器腔内基频光和散射光形成过程进行数值模拟,结果发现内腔式拉曼激光器的锁模现象受拉曼介质的声子寿命影响明显,声子寿命越短,锁模效果越明显^[19]。 PbWO_4 晶体声子寿命仅为 2.47 ps,短于 SrWO_4 (3.55 ps)、 KGW (5 ps)、 BaWO_4 (6.6 ps)、 $\text{Gd}:\text{VO}_4$ (3.5 ps) 等拉曼晶体的声子寿命,因而预测 PbWO_4 晶体更有利于一阶斯托克斯光的锁模。

实验采用结构简单的平凹腔,当吸收体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透射率 $T_0 = 92\%$, 输出镜在 1178nm 处的反射率为 80%, 抽运功率为 6.3 W 时, 获得了 582 mW 的输出功率, 抽运光到一阶斯托克斯光的转换效率为 9.24%, 斜效率为 10.6%, 调 Q 脉冲包络重复频率为 41.3 kHz, 脉宽为 6 ns, 锁模脉冲重复频率为 1.1 GHz, 脉冲宽度小于 207 ps, 锁模脉冲稳定, 调制深度为 100%。实验表明了激光二极管 (LD) 抽运 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 内腔式

PbWO_4 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, 具有很大的实用潜能。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示, 腔型结构为平凹腔, 谐振腔总几何腔长约为 8 cm。抽运源为一台中心波长为 808 nm 的光纤耦合激光二极管激光器, 其最大输出功率为 30 W, 光纤芯径为 400 μm , 数值孔径为 0.22, 抽运激光通过聚焦透镜耦合进, 激光晶体, 耦合效率约为 95%。 M_1 为曲率半径, 为 150 mm 的平凹镜, 双面镀有膜层, 平面镀膜对 808 nm 高透 (透射率 $T > 90\%$); 曲面镀膜对 1064 nm (反射率 $R > 99.8\%$) 和 1180 nm ($R > 99.5\%$) 高反, 对 808 nm 高透 ($T > 90\%$); M_2 为实验中使用的两种不同的输出耦合镜, 它们均为平镜且镀有膜层, 在 1064 nm 处反射率为 99.8%, 在 1178 nm 处的反射率分别为 80% 和 90%; 激光晶体为 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 晶体, 掺杂浓度为 1% (原子数分数), 晶体尺寸为 $\Phi 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 前后端均镀有针对 1064 nm 的减反膜, 入射面还镀有针对 808 nm 的增透膜; 拉曼晶体为尺寸为 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的 PbWO_4 晶体, 双端镀有在 1064 nm 和 1178 nm 处的减反膜 ($R < 1\%$); 饱和吸收体为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体, 晶体两端镀有在 1064 nm 和 1178 nm 处的减反膜 ($R < 0.2\%$), 实验中应用了两块 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体, 其初始透射率分别为 89% 和 92%, 尺寸分别为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 1.9 \text{ mm}$ 和 $\Phi 10 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$ 。实验中 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 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。为了有利于晶体的散热, $\text{Nd}:\text{YAG}$ 晶体、 PbWO_4 晶体与 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体均用铝箔包裹, 将 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 晶体和 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体置于水冷的铜块中, PbWO_4 晶体置于水冷的铝

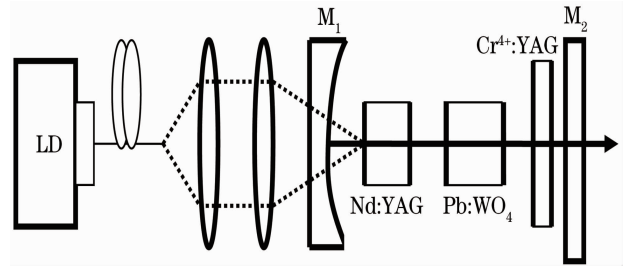


图 1 LD 抽运 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 内腔式 PbWO_4 锁模拉曼激光器实验装置图

Fig.1 Configuration of the laser diode-pumped $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ passively Q-switched intracavity PbWO_4 mode-locked Raman laser

块中,水温控制在 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 。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 bandwidth, 4G Sa/s),用来显示和观察激光脉冲的时间特性。

3 实验结果与分析

3.1 基频光输出特性

首先实验了被动调 Q 基频激光在两个不同的输出镜(1064nm 处, $R_1=90\%$, $R_2=80\%$)下的运行情

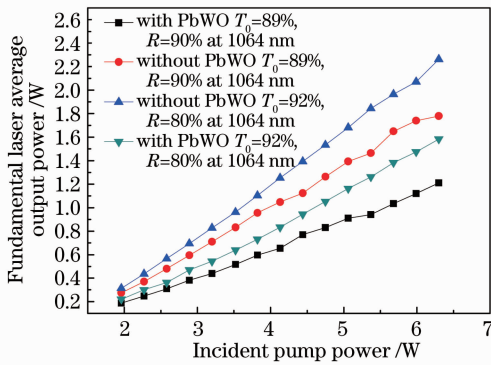


图 2 基频光平均输出功率随抽运功率的变化

Fig. 2 Average output power versus incident pump power

况。如图 2 所示,对比了在 $T_0=89\%$ 、输出镜在 1064nm 处, $R_1=90\%$, 与 $T_0=92\%$ 、输出镜在 1064nm 处 $R_2=80\%$ 两种情况下,插入 PbWO_4 晶体前后的输出功率情况,抽运功率最高为 6.3 W 。图 2 中拟合斜效率分别为 45% 、 35.9% 、 32% 、 23.5% 。结果说明了饱和吸收体初始透射率较大时容易产生大功率;在 $T_0=92\%$ 、输出镜在 1064nm 处, $R_2=80\%$, 不插入 PbWO_4 晶体的情况下获得了最大的斜效率,这说明 PbWO_4 晶体明显地吸收损耗。

当饱和吸收体初始透射率 $T_0=89\%$ 时,未插入 PbWO_4 晶体前,时间特性稳定,如图 3(a)所示,调 Q 脉冲平滑,如图 3(b)所示;插入 PbWO_4 晶体后,脉冲下降沿有一个尖锐的峰,如图 3(d)所示,这表明受激拉曼散射已经发生,而在饱和吸收体初始透射率 $T_0=92\%$ 时并没有发现类似的情况,这是因为饱和吸收体初始透射率较小时会有较大的脉冲能量和峰值功率,有利于达到拉曼阈值。而实验中测得, $T_0=92\%$ 时比 $T_0=89\%$ 时的输出功率更高,这是因为饱和吸收体初始透射率较大时会有较大的脉冲重复频率,因而总的功率反而增加。所以实验中为了得到优化的结果,需要综合考虑,而不是一味地增加或减小饱和吸收体的初始透射率。

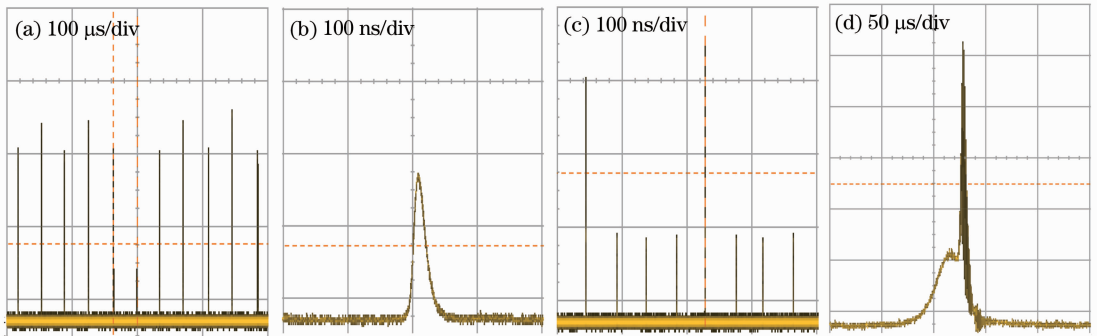


图 3 1064nm 处, $T_0=89\%$, $R=90\%$ 时,抽运功率为 6.3 W 的情况下,插入 PbWO_4 晶体前后基频光的调 Q 脉冲特性。

(a)插入 PbWO_4 前,脉冲序列;(b)插入 PbWO_4 前,脉冲图形;(c)插入 PbWO_4 后,脉冲序列;(d)插入 PbWO_4 后,脉冲图形

Fig. 3 Typical first-order Stokes light pulse train and single pulse shape at a pump power of 6.3 W when $T_0=89\%$, $R=90\%$ at 1064nm . (a) Pulse train before insert of PbWO_4 ; (b) pulse shape before insert of PbWO_4 ; (c) pulse train after insert of PbWO_4 ; (d) pulse shape after insert of PbWO_4

3.2 一阶斯托克斯光输出特性

将输出镜更换为在 1178nm 处反射率分别为 90% 和 80% 的一阶斯托克斯光输出镜,以便一阶斯托克斯光输出,实验装置其余部分保持不变。图 4 所示为不同情况下一阶斯托克斯光功率输出情况。在 $T_0=92\%$ 、输出镜反射率为 80% 的情况下,抽运功率为 6.3 W 时,获得了 582mW 的平均输出功率,抽运光到一阶斯托克斯光的光-光转换效率为 9.24% ,斜

效率为 10.6% ,调 Q 脉冲重复频率为 41.3 kHz ,脉宽为 6 ns 。

另外,在实验中,以上 4 种组合情况下都观察到了稳定的锁模现象,且随着抽运功率的变化,锁模比较稳定。实验测得锁模脉冲周期约为 1 ns ,锁模脉冲宽度为 400 ps ,调制深度为 100% ,如图 5 所示,锁模情况明显优于已经报道的其他被动调 Q 锁模拉曼激光器^[20-21]。从图 3(b)可以看出, 1064nm 调

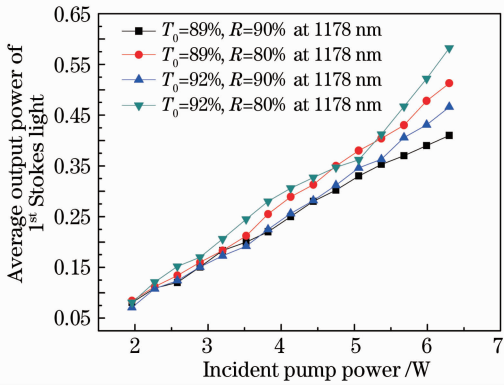


图 4 一阶斯托克斯光输出功率随抽运功率的变化

Fig. 4 Average output power of first-order Stokes light versus incident pump power

Q 基频光的脉冲图形比较光滑,没有出现脉冲调制现象,排除了本文实验条件下基频光调 Q 脉冲调制的发生;从图 3(d)可以看出,脉冲图形基频光部分比较平滑,一阶斯托克斯光部分出现锁模调制,因此我们有理由相信受激拉曼散射是产生锁模调制的原因。

对内腔式拉曼激光器的数值计算及分析表明,激光介质的横向弛豫时间越短,腔长越长,拉曼介质的

声子寿命越短,则一阶斯托克斯光的锁模效果越明显^[19]。实验中使用 PbWO₄ 晶体的声子寿命仅为 2.47 ps,小于 SrWO₄ (3.55 ps)、Gd:VO₄ (3.5 ps)等拉曼晶体的声子寿命,晶体尺寸大小为 7 mm × 7 mm × 50 mm,使得激光器具有较长的腔长。这些都有利于锁模效果。

锁模脉冲的周期约为 1 ns,内腔式拉曼激光器发生锁模有两种方式^[19]。一种是由散射光和抽运光之间的竞争耦合导致的一阶斯托克斯光的弛豫振荡,对于前向散射来说,锁模小脉冲的周期与增益长度有关^[22];另一种是一阶斯托克斯光的自锁模^[23],即一阶斯托克斯光强度随抽运光强呈非线性增长,首先超过 SRS 阈值的尖峰有较大的拉曼增益,往返经过拉曼介质后形成脉冲波形,即锁模脉冲间隔为光在谐振腔的往返时间。实验中的锁模现象属于第二种。锁模脉冲间隔约为 1 ns,则谐振腔光学长度的两倍与光速的比值 $2L'/c$,即该实验条件下光在腔内往返时间也约为 1 ns。其中,谐振腔的光学长度 L' 等于腔内各个元件的长度乘以相应的折射率代数和,即 $L' = l_1 \times n_1 + l_2 \times n_2 + l_3 \times n_3 + (l - l_1 - l_2 - l_3)$,计算中所需的物理量及其数值如表 1 所示。

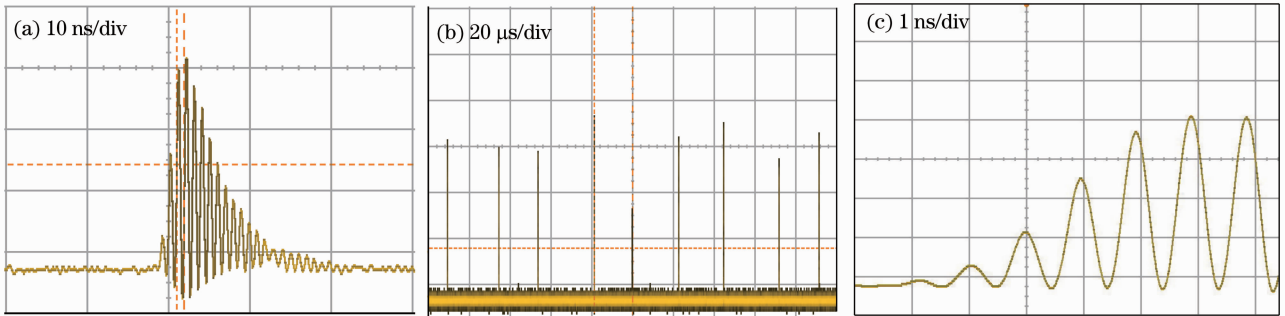


图 5 1178 nm 处, $T_0 = 92\%$, $R = 80\%$ 时,抽运功率为 6.3 W 情况下,一阶斯托克斯光脉冲特性。(a) 脉冲图形; (b) 脉冲序列; (c) 锁模脉冲图形

Fig. 5 First-order Stokes light pulse train and single pulse shape at a pump power of 6.3 W when $T_0 = 92\%$, $R = 80\%$ at 1178 nm.

(a) Pulse shape; (b) pulse train; (c) mode-locked pulse shape

表 1 计算光在腔内往返时间的相关物理量及其数值

Table 1 Parameters used to calculate transit time in the cavity

Parameters	Values
Length of the cavity l / mm	80
Length of Nd:YAG l_1 / mm	10
Length of PbWO ₄ l_2 / mm	50
Length of Cr ⁴⁺ :YAG l_3 / mm	1.3
Velocity of light c / (m/s)	3×10^8
Refractive index of Nd:YAG n_1	1.82
Refractive index of PbWO ₄ n_2	2.2
Refractive index of Cr ⁴⁺ :YAG n_3	1.81

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。对于实际脉冲宽度值,可以利用测量脉冲上升时间 t_{measure} ,实际脉冲上升时间 t_{real} ,探测器上升时间 t_{probe} ,示波器上升时间 $t_{\text{oscilloscope}}$ 之间的关系进行估算^[24],计算公式为

$$t_{\text{measure}} = \sqrt{t_{\text{real}}^2 + t_{\text{probe}}^2 + t_{\text{oscilloscope}}^2}$$

实验中使用的示波器为 1 GHz 带宽,根据 $t_{\text{oscilloscope}} \times W$ 为 0.35~0.4,式中 W 为示波器带宽,得到 $t_{\text{oscilloscope}} \approx 350$ ps。实验中测得的 $t_{\text{measure}} = 400$ ps,

实验中使用的探测器 $t_{\text{probe}} = 100 \text{ ps}$, 估算得实际的脉冲上升时间约为 165 ps 。根据上升时间的定义, 考虑到锁模脉冲波形的对称性, 假设实际锁模脉宽约为上升时间的 1.25 倍^[25], 因此, 锁模脉冲脉宽估算值小于 207 ps 。

图 6 所示为在不同饱和吸收体与不同输出镜情况下, 一阶斯托克斯光脉冲的脉宽、重复频率、脉冲能量和峰值功率随抽运功率的变化。对比发现, 当 $T_0 = 89\%$ 时, 一阶斯托克斯光脉冲具有较高的单脉冲能量, 但是脉冲重复频率比较低, 因而总输出功率

并不理想。当 $T_0 = 92\%$ 时, 输出镜反射率为 80% 时比反射率为 90% 时的效率更高, 这可能是因为 80% 时输出镜将腔内产生的一阶斯托克斯光有效地输出到腔外, 而反射率为 90% 时输出镜使腔内聚集了过多的一阶斯托克斯光, 从而抑制了基频光到一阶斯托克斯光的转化, 今后的实验中可以考虑使用反射率更低的输出镜。另外, 实验中产生的基频光具有偏振性, 其偏振性与饱和吸收体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体饱和吸收各向异性有关, 参考文献^[18, 26-28]中也有相关研究。

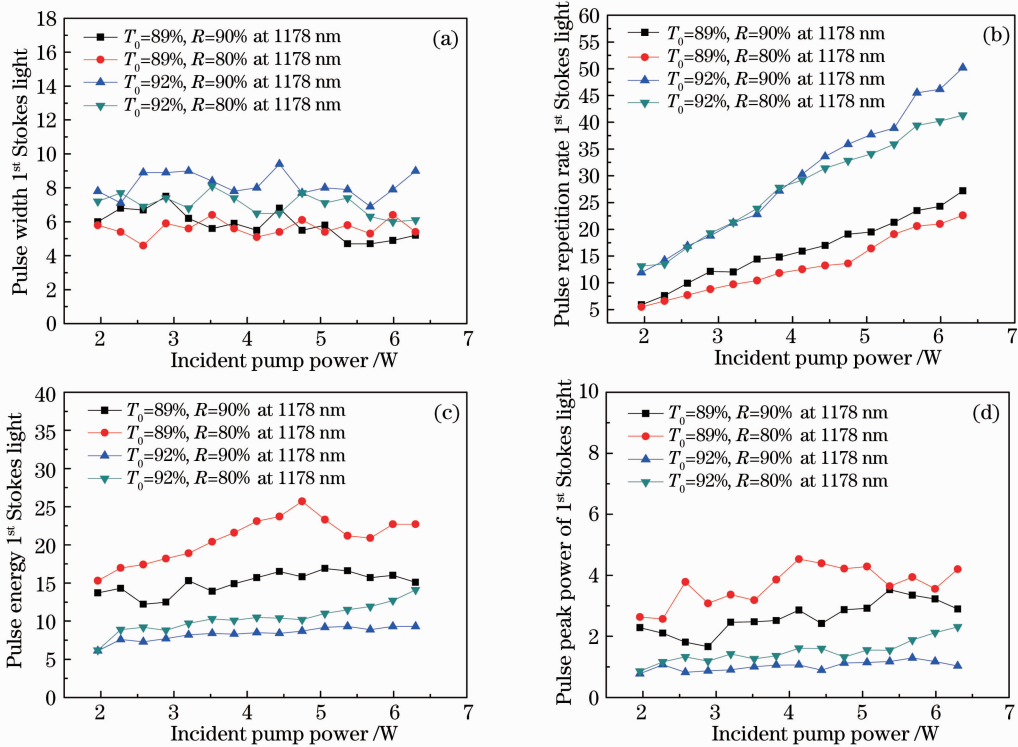


图 6 一阶斯托克斯光脉冲特性随抽运功率的变化。(a)脉宽;(b)脉冲重复频率;(c)脉冲能量;(d)峰值功率

Fig. 6 Pulse characteristics of first-order Stokes light versus incident pump power. (a) Pulse width; (b) pulse repetition rate; (c) pulse energy; (d) pulse peak power

最后,适当增加谐振腔的腔长至 10 cm ,也得到了高达 397 mW 的输出功率,锁模拉曼脉冲调制稳定。加长的谐振腔有利于调制锁模^[19],但是,长的腔长不利于 SRS 过程,影响锁模拉曼脉冲的输出。因此为了得到理想的结果,需要综合考虑各个因素。腔长是以后进行腔内非线性过程的重要研究因素之一。

4 结 论

实现了 LD 抽运 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 腔内式 PbWO_4 锁模拉曼激光的稳定有效运行,在抽运功率为 6.3 W 时获得了 582 mW 的输出功率,转换效率高达 9.24% ,斜效率为 10.6% ,调 Q 脉冲重复频率

为 41.3 kHz ,脉宽为 6 ns ,并且被动调 Q 锁模调制现象稳定,锁模脉冲重复频率为 1.1 GHz ,脉冲宽度小于 207 ps 。预期进一步优化调整输出镜的反射率、谐振腔长以及腔内光线偏振态之间关系可有效提升一阶斯托克斯光转换效率,并且此项工作为将来进行腔内和频或倍频等非线性过程,实现 560 nm 处的黄绿光运行提供了基础。

参 考 文 献

- 1 Y F Chen. Efficient 1521 nm Nd:GdVO₄ Raman laser[J]. Opt Lett, 2004, 29(22): 2632-2634.
- 2 Duan Yanmin, Zhu Haiyong, Feng Zhengrong, et al.. Laser diode end-pumped Nd:YVO₄ self-Raman laser at 559 nm with sum-frequency mixing[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5):

0502002.
段延敏,朱海永,凤正荣,等. 半导体激光端面抽运 Nd:YVO₄ 自拉曼和频 559 nm 激光[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502002.
- 3 Liu Yongna, Jiang Feihong, Wang Shumei, *et al.*. LD-pumped passively Q-switched c-cut Nd:YVO₄ self-Raman laser with Cr:YAG[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0702004.
刘永纳,江飞虹,王淑梅,等. LD 抽运 Cr:YAG 被动调 Q c-cut Nd:YVO₄ 自拉曼激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0702004.
- 4 H M Pask, J A Piper. Diode-pumped LiIO₃ intracavity Raman lasers[J]. Quantum Electron, 2000, 36(8): 949–955.
- 5 J T Murray, R C Powell, N Pevghambarian, *et al.*. Generation of 1.5 μm radiation through intracavity solid-state Raman shifting in Ba(NO₃)₂ nonlinear crystals[J]. Opt Lett, 1995, 20(9): 1017–1019.
- 6 J H Huang, J P Lin, R B Su, *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.
- 7 Zang Jingcun, Xie Liyan, Li Xiao, *et al.*. Investigating of SRS and luminescence of ZnWO₄ crystals[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(5): 2689–2692.
臧竞存,谢丽艳,李 晓,等. 钨酸锌晶体的受激拉曼散射和光致发光研究[J]. 物理学报, 2007, 56(5): 2689–2692.
- 8 Y Chen, K Su, H Zhang, *et al.*. Efficient diode-pumped actively Q-switched Nd:YAG/BaWO₄ intracavity Raman laser[J]. Opt Lett, 2005, 30(24): 3335–3337.
- 9 A A Kaminskii, H J Eichler, K Ueda, *et al.*. Properties of Nd³⁺-doped and undoped tetragonal PbWO₄, NaY(WO₄)₂, CaWO₄, and undoped monoclinic ZnWO₄ and CdWO₄ as laser-active and stimulated Raman scattering-active crystals[J]. Appl Opt, 1999, 38(21): 4533–4547.
- 10 V A Orlovich, V N Burakevich, A S Grabtchikov, *et al.*. Continous-wave intracavity Raman generation in PbWO₄ crystal in the Nd:YVO₄ laser[J]. Laser Phys Lett, 2006, 3(2): 71–74.
- 11 G M A Gad, H J Eichler, A A Kaminskii, *et al.*. Highly efficient 1.3-μm second-Stokes PbWO₄ Raman[J]. Opt Lett, 2003, 28(6): 426–428.
- 12 J Findeisen, H J Eichler, A A Kaminskii, *et al.*. Efficient picosecond PbWO₄ and two-wavelength KG(WO₄)₂ Raman lasers in the IR and visible[J]. Quantum Electron, 1999, 35(2): 173–178.
- 13 W Chen, Y Inagawa, T Omatsu, *et al.*. Diode-pumped self-stimulating, passively Q-switched Nd³⁺:PbWO₄ Raman laser[J]. Opt Commun, 2001, 194(4): 401–407.
- 14 Xi Kun, Ding Shuanghong, Zhang Jun, *et al.*. External resonator PbWO₄ Raman laser excited by 1064 nm nanosecond laser pulses[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0914003.
奚 坤,丁双红,张 骏,等. 1064 nm 纳秒脉冲激发的外腔式 PbWO₄ 拉曼激光器[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0914003.
- 15 Y Shimony, Z Burshtein, Y Kalisky, *et al.*. Cr⁴⁺:YAG as passive Q-switch and Brewster plate in a pulsed Nd:YAG laser[J]. Quantum Electron, 1995, 31(10): 1738–1741.
- 16 Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu, *et al.*. Theoretical and experimental Study of Cr⁴⁺:YAG Q-switching characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(9): 1180–1185.
张行愚,赵圣之,王青圃,等. Cr⁴⁺:YAG 调 Q 特性的理论和实验研究[J]. 光学学报, 1998, 18(9): 1180–1185.
- 17 X Yin, J Meng, J Zu, *et al.*. Semiconductor saturable-absorber mirror passively Q-switched Yb:YAG microchip laser[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(8): 081402.
- 18 Y F Ma, X Yu, F K Tittel, *et al.*. Output properties of diode-pumped passively Q-switched 1.06 μm Nd:GdVO₄ laser using a [100]-cut Cr⁴⁺:YAG crystal[J]. Appl Phys B, 2012, 107(2): 339–342.
- 19 S Ding, X Zhang, Q Wang, *et al.*. Temporal properties of the solid-state intracavity Raman laser using the traveling-wave method[J]. Phys Rev A, 2007, 76(5): 053830.
- 20 J Peng, Y Zheng, K Zheng, *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.
- 21 R Lan, S Ding, M Wang, *et al.*. A compact passively Q-switched SrWO₄ Raman laser with mode-locked modulation[J]. Laser Phys Lett, 2013, 10(2): 025801.
- 22 I P Cjrostov, I V Tomov. Growth of Raman-Stokes waves in focused pump beams[J]. Quantum Electron, 1985, 17(3): 207–213.
- 23 H Ogilvy, H M Pask, J A Piper, *et al.*. Efficient frequency extension of a diode-side-pumped Nd:YAG laser by intracavity SRS in crystalline materials[J]. Opt Commun, 2004, 242(4–6): 575–579.
- 24 K Yang, S Zhao, J 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.
- 25 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.
张 刚. 全固态双调 Q 锁模激光特性和激光稳定特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2012. 23–26.
- 26 Dong Jun, Deng Peizhen, Zhang Yinghua, *et al.*. LD pumped Cr⁴⁺,Nd³⁺:YAG with self-Q-switched laser output of 1.4 W[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(6): 484–486.
董 俊,邓佩珍,张影华,等. LD 抽运 Cr⁴⁺,Nd³⁺:YAG 晶体获得 1.4 W 自调 Q 激光输出[J]. 中国激光, 2001, 28(6): 484–486.
- 27 Zheng Quan, Jiang Yaoliang, Qian Longsheng, *et al.*. Research on the polarization of a LD-pumped Nd:YAG/Cr:YAG laser[J]. Laser • Infrared, 2002, 32(4): 248–249.
郑 权,姜耀亮,钱龙生. LD 泵浦 Nd:YAG/Cr:YAG 激光偏振特性的研究[J]. 激光与红外, 2002, 32(4): 248–249.
- 28 Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu, *et al.*. Passively Q-switched self-frequency-doubled Nd³⁺:GdCa₄O(BO₃)₃ laser[J]. Opt Soc Am B, 2001, 18(6): 770–779.