

基于复合腔结构的被动调 Q 拉曼自锁模激光器

白云涛^{1,2}, 丁欣^{1,2*}, 蒋国鑫^{1,2}, 雷鹏^{1,2}, 孙冰^{1,2}, 李腾腾^{1,2}, 张兴瑞^{1,2}, 李翔翔^{1,2},
吴亮^{1,2}, 张贵忠^{1,2}, 姚建铨^{1,2}

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 天津 300072;

²天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 介绍了一种基于复合腔结构的 Nd:YVO₄-YVO₄-Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 内腔拉曼自锁模激光器。利用复合腔结构中基频光谱腔与拉曼光谱腔相互独立的优点,通过实验验证了受激拉曼散射(SRS)自锁模效应的存在;同时通过合理地控制拉曼光谱腔的腔长,优化了基频光与拉曼光的模式匹配,大幅提高了拉曼调 Q 锁模激光的输出功率及转换效率,在 17.15 W 808 nm 二极管(LD)泵浦功率下获得了调制深度为 100%、平均功率为 1.23 W 的 1176 nm 拉曼调 Q 锁模激光输出,光-光转换效率为 7.17%,相比于直腔结构提升 50%以上。锁模脉冲宽度为 125.8 ps,脉冲重复频率为 942.9 MHz,调 Q 包络重复频率约为 70 kHz,脉宽为 4.25 ns。将拉曼腔前腔镜的曲率半径由 100 mm 增加至 150 mm,对应的拉曼腔长由 120 mm 增加至 180 mm,在相同泵浦功率下获得了调制深度为 100%、平均功率为 1.19 W 的 1176 nm 拉曼调 Q 锁模激光输出,转换效率为 6.94%,脉冲重复频率降低至 675.6 MHz。这些结果说明了该复合腔结构具备在保证输出功率及转换效率的同时,对 1176 nm 锁模激光的重复频率进行主动调控的能力。

关键词 激光器; 全固态激光器; 拉曼激光器; 被动调 Q 锁模激光器; 复合腔结构; 受激拉曼散射自锁模

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1901003

1 引言

调 Q 锁模激光器可以实现一系列具有调 Q 包络的高重复频率锁模脉冲输出,在激光遥感、自适应光学等领域具有较大的应用价值^[1-2]。此外,具有较高峰值功率的脉冲序列经过单脉冲选择器及放大器选单再放大后,能够实现高功率、高重复频率、高稳定性的超短脉冲激光输出,这在惯性约束聚变(ICF)、激光加工等方面也具有十分重要的应用^[3-4]。因此,为了实现能够满足各项应用需求的锁模脉冲激光,高性能调 Q 锁模激光种子源的获取是关键。受激拉曼散射(SRS)由于具有光束净化及脉宽压缩效应,能够极大地改善激光的光束质量、压缩脉冲宽度,一直被视为实现高性能激光输出的潜在技术途径^[5]。随着近年来 SRS 自锁模现象的发

现,基于 SRS 自锁模效应的调 Q 锁模激光器以其结构简单紧凑、峰值功率高、光束质量好等优势,逐渐受到研究者的关注,具有十分重要的研究价值。

SRS 自锁模效应目前主要被发现于调 Q 拉曼激光器中^[6-7]。2010 年,Lisinetzkii 等^[8]首先对脉冲激光泵浦的外腔级联拉曼自锁模激光器的机理进行分析,并指出实现多阶拉曼自锁模输出的主要原因是腔内共循环斯托克斯光的“同步泵浦”。2017 年,澳大利亚的 Spence^[9-10]在此基础上进一步对内腔拉曼调 Q 自锁模激光器的机理进行分析,同时指出两种情况下的锁模斯托克斯场均产生于腔内共循环“前驱场”的强噪声。强噪声在“前驱场”中不断被放大,逐渐产生一个具有单一主导脉冲的斯托克斯场,通过对其进行周期性调制实现锁模输出。在纳秒脉

收稿日期: 2021-06-16; 修回日期: 2021-07-18; 录用日期: 2021-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(11674242,11674243)

通信作者: *dingxin@tju.edu.cn

冲激光器中,由于随机模式拍频加剧,“前驱场”中强噪声的产生更为容易,然而这种模式拍频加剧的条件目前尚未被明确。

国内方面,山东大学^[11-14]、北京交通大学^[15-19]、深圳大学^[20-22]及烟台大学^[23-24]等均对拉曼自锁模激光器开展了研究,但其中关于 SRS 自锁模机理的研究与探讨相对较少。2007 年,山东大学 Ding 等^[11]曾采用行波法对内腔拉曼调 Q 激光器的时间特性进行了理论研究,并对内腔拉曼调 Q 激光器的锁模机制进行了一定的分析与讨论。关于拉曼自锁模激光器的实验报道相对较多,2012 年 Shen 等^[12]报道了二极管(LD)侧面泵浦的 Nd:YAG-BaWO₄ 主动调 Q 拉曼锁模激光器,分别实现了一阶及二阶拉曼调 Q 锁模激光输出,并将二阶斯托克斯的皮秒脉冲的产生归因于一阶斯托克斯光的“同步泵浦”。2012 年,北京交通大学彭继迎等^[16]采用端面泵浦 V 型腔结构的 Nd:YVO₄/Cr⁴⁺:YAG 自拉曼调 Q 锁模激光器,在 10 W 的泵浦功率条件下得到最大平均功率为 123 mW、重复频率为 1 GHz 的 1176 nm 拉曼光输出。然而由于实验未能排除 1064 nm 激光利用 Cr⁴⁺:YAG 晶体先锁模再“同步泵浦”产生拉曼锁模激光的可能,因此难以证明 SRS 自锁模效应的存在。2013 年,深圳大学的 Huang 等^[20]报道了一种 LD 端面泵浦的声光调 Q 自拉曼自锁模 YVO₄-Nd:YVO₄-YVO₄ 激光器,得到 1.83 W 的 1175.9 nm 拉曼调 Q 锁模激光输出,最短锁模脉冲宽度为 23.57 ps。文章指出,激光晶体的克尔透镜效应和拉曼晶体的可饱和增益对斯托克斯光脉冲进行了一定的选择,从而实现了自锁模。然而这种解释一定程度上弱化了 SRS 在锁模过程中的重要作用,具有一定的局限性。2014 年,烟台大学贾海旭等^[23]报道了一台 Nd:YAG/PbWO₄/Cr⁴⁺:YAG 内腔拉曼被动调 Q 锁模激光器,当泵浦功率为 6.3 W 时得到 582 mW 的 1178 nm 拉曼调 Q 锁模激光输出,锁模脉冲重复频率为 1.1 GHz,脉冲宽度小于 207 ps。通过对比腔内插入拉曼晶体前后的脉冲波形,发现 SRS 过程是产生锁模激光的主要原因。

通过对目前国内外拉曼自锁模激光器研究现状的梳理,可以发现:1) SRS 自锁模现象的机理较为复杂,目前国内外研究人员对相关理论的研究较少,缺乏足够的理论支持;2) 虽然已有部分实验可以证明 SRS 自锁模现象的存在,但其仍存在一定争议;3) 多数关于 SRS 自锁模现象的解释还有待验证,例

如,多篇报道中将 SRS 自锁模现象的产生归因于基频光或低阶斯托克斯光的“同步泵浦”,但由于目前拉曼自锁模激光器多采用直腔结构,该解释尚未得到进一步实验验证;4) 拉曼锁模激光的转换效率还有待进一步提升。对此,本文提出了一种基于复合腔结构的 Nd:YVO₄-YVO₄-Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 内腔拉曼自锁模激光器。利用复合腔结构中基频光谐振腔与拉曼光谐振腔相互独立的优势:一方面对基频光及拉曼光输出同时进行观测,更有利于探究二者在 SRS 自锁模过程中的相互影响,验证 SRS 自锁模现象的存在;另一方面,可以在保持基频光谐振腔不变的情况下,通过合理控制拉曼光谐振腔的腔长,优化基频光与拉曼光的模式匹配,进一步提高拉曼锁模的转换效率。

2 实验装置

基于复合腔结构的 LD 端面泵浦 Nd:YVO₄-YVO₄-Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 内腔拉曼自锁模激光器示意图如图 1 所示,泵浦源为 nLight 公司生产的光纤耦合连续输出 LD 阵列,25 °C 时输出光的中心波长为 808.2 nm,线宽为 2 nm,可通过控制温度进行调谐,光谱宽度约为 2 nm,最大输出功率为 50 W,传能光纤纤芯直径为 400 μm,数值孔径 NA 为 0.22。泵浦光经光纤尾纤输出后通过一个 1:1 的耦合器聚焦入射到激光晶体上,耦合效率为 95%,其焦点处光斑半径约为 200 μm。激光晶体采用 a-cut 的 Nd:YVO₄ 晶体,掺杂浓度(原子数分数)为 0.3%,尺寸为 3 mm×3 mm×20 mm,前后端面均镀有 808 nm、1064 nm 及 1176 nm 高透膜系(透过率 T>99%)。可饱和吸收体为 Cr⁴⁺:YAG 晶体,晶体尺寸为 4 mm×4 mm×3 mm,小信号透过率

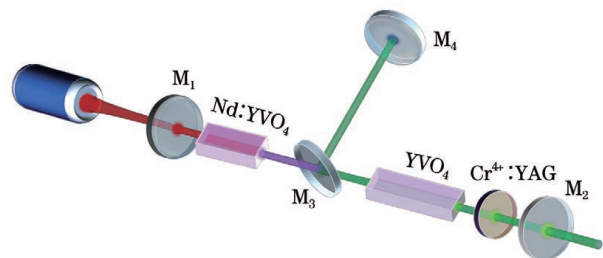


图 1 基于复合腔结构的 Nd:YVO₄-YVO₄-Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 内腔拉曼自锁模激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of Nd:YVO₄-YVO₄-Cr⁴⁺:YAG passively Q-switched intracavity self-mode-locked Raman laser based on compound cavity structure

$T_0=80\%$, 前后端面均镀有 1064 nm 高透膜 ($T>99\%$)。拉曼晶体为 a -cut 的 YVO_4 晶体, 尺寸为 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 30\text{ mm}$, 其 c 轴方向与 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体保持一致。同时为避免标准具效应, 将晶体两端通光面切成 1° 的劈形, 并镀 1064 nm 和 1176 nm 高透膜 ($T>99.5\%$)。所有晶体表面均包裹一层铝箔并将其置于铜制热沉内, 通过去离子水对热沉进行冷却, 水温控制在 15°C 。1064 nm 基频光谱谐振腔由平凹镜 M_1 与平面镜 M_2 组成, 1176 nm L 型拉曼腔由平面镜 M_2 、 45° 分光镜 M_3 及平凹镜 M_4 组成。 M_1 平凹镜的曲率半径为 150 mm, 其表面镀 808 nm 高透 ($T>99\%$), 1064 nm 及 1176 nm 高反 (反射率 $R>99\%$) 膜系。 M_2 为拉曼输出镜, 镀有 1064 nm 高反, 1176 nm $T=5\%$ 膜系。 M_3 为 45° 分光镜, 镀有 45° 1176 nm 高反 ($R>99\%$), 1064 nm 高透 ($T>99\%$) 膜系。 M_4 为平凹镜, 其曲率半径为 100 mm, 镀有 1176 nm 高反 ($R>99\%$) 膜系。 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体左端面与 M_1 镜的距离为 5 mm, 右端面与 YVO_4 晶体的距离为 44 mm, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体左端面与 YVO_4 晶体的距离为 5 mm, 右端面与 M_2 镜的距离为 3 mm。

3 实验结果与讨论

首先将 M_3 、 M_4 镜撤去, 在保证其他元件不变的情况下, 搭建直腔结构 1176 nm 拉曼调 Q 自锁模激光器。使用 Molectron EPM1000 功率计测试得到不同输出镜透过率下, 1176 nm 调 Q 锁模激光的输出功率随 LD 泵浦功率变化的曲线, 如图 2 所示。当 LD 泵浦功率为 17.15 W 时, 在 $T=2\%$ 及 $T=5\%$ 输出透过率下, 分别得到最大功率为 0.535 W

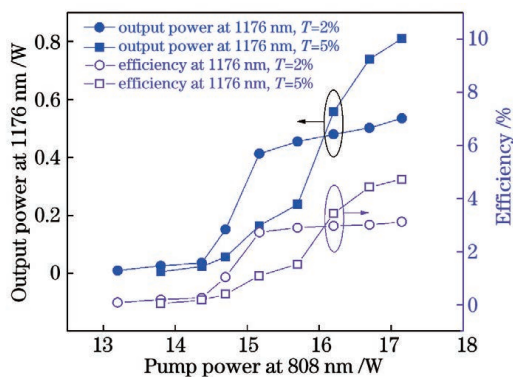


图 2 输出镜透过率 T 为 2% 和 5% 时, 1176 nm 调 Q 锁模激光输出功率随泵浦功率的变化曲线

Fig. 2 Output power of Q-switched mode-locked 1176 nm laser varying with pump power for $T=2\%$ and $T=5\%$

及 0.81 W 的 1176 nm 调 Q 锁模激光输出, 对应的光-光转换效率分别为 3.12% 和 4.72%。使用 $T=5\%$ 输出镜时, 1176 nm 调 Q 锁模激光的阈值为 13.8 W。将其更换为 $T=2\%$ 的输出镜, 1176 nm 调 Q 锁模激光阈值降为 13.2 W, 但其最大输出功率及转换效率均有所降低, 且此时激光器的阈值依然偏高。将输出镜透过率增大至 $T=10\%$, 精细调节谐振腔后没有发现 1176 nm 调 Q 锁模激光输出, 说明此时谐振腔内的损耗过大, 导致腔内拉曼光难以起振。因而根据以上实验结果, 后续复合腔结构拉曼自锁模激光器将选择 1176 nm $T=5\%$ 的输出镜进行实验。

当 1176 nm 调 Q 锁模激光的最大输出功率 P_{stokes} 为 0.81 W 时, 使用高速 InGaAs 光电探测器 (脉宽光电 PD12D) 及示波器 (Agilent DSO9254A) 对调 Q 锁模波形进行测量, 结果如图 3 所示。从图中可以看出, 输出的调 Q 锁模脉冲的调制深度基本达到了 100%, 调 Q 包络脉宽约为 3.8 ns, 重复频率约为 70 kHz, 锁模脉冲的重复频率为 885.4 MHz, 该重复频率与谐振腔的光学腔长 ($\sim 170\text{ mm}$) 对应的重复频率基本相符, 这证明该脉冲确实为锁模脉冲。受示波器和探测器的响应时间限制, 示波器上显示的锁模脉冲的脉宽与实际锁模脉冲的脉宽有一定出入, 因此在传输线带宽与探测器带宽相互匹配的情况下, 对得到的锁模脉冲宽度进行修正^[25]:

$$\tau_{\text{real}} = \sqrt{\tau_{\text{measure}}^2 - \tau_{\text{probe}}^2 - \tau_{\text{oscilloscope}}^2}, \quad (1)$$

式中: τ_{real} 为实际脉冲的上升时间; τ_{measure} 为测量得到的脉冲上升时间; τ_{probe} 为实验中所使用的探测器的上升时间 (18 ps); $\tau_{\text{oscilloscope}}$ 为所使用的示波器的上升时间, 其计算公式为

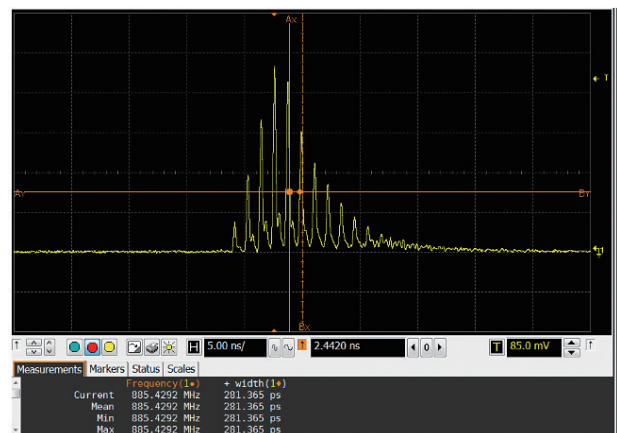


图 3 1176 nm 调 Q 锁模激光脉冲波形图 ($P_{\text{stokes}}=0.81\text{ W}$)

Fig. 3 Pulse waveform of 1176 nm Q-switched mode-locked output laser ($P_{\text{stokes}}=0.81\text{ W}$)

$$\tau_{\text{oscilloscope}} \times B_w = 0.35 \sim 0.4, \quad (2)$$

式中: B_w 为示波器的带宽。根据所用示波器的带宽(2.5 GHz), 得到 $\tau_{\text{oscilloscope}} = 140 \text{ ps}$ 。由于锁模脉冲宽度近似等于其上升时间的 1.25 倍^[25], 可得 $\tau_{\text{measure}} = 225.1 \text{ ps}$, 将上述参数代入(1)式, 计算得到 1176 nm 调 Q 锁模脉冲宽度为 219.16 ps, 实际脉冲宽度应小于该值。

上述直腔结构 1176 nm 拉曼调 Q 自锁模激光器的转换效率相对较低, 这是由于基频光及拉曼光的模式匹配相对较差。但由于此时基频光及拉曼光共用一个谐振腔, 因此难以通过调整谐振腔改善二者间的模式匹配。为了解决这一问题, 搭建了基于 L 型复合腔结构的 1176 nm 拉曼调 Q 自锁模激光器, 其结构如图 1 所示。首先选择 M_4 镜的曲率半径 $R = 100 \text{ mm}$, 为了寻找基频光与拉曼光的最佳模式匹配点, 固定基频光腔长不变, 改变 M_4 与 M_3 镜之间的距离, 对不同拉曼腔腔长下的 1176 nm 拉曼调 Q 锁模激光输出功率进行测量, 结果如图 4(a) 所示。当拉曼谐振腔总长度为 120 mm 时, 1176 nm 调 Q 锁模激光的阈值为 12.2 W, 在 17.15 W 入射泵浦功率下获得最大功率为 1.23 W 的 1176 nm 调

Q 锁模激光输出, 光-光转换效率为 7.17%。相比于直腔结构, 该腔长下的复合腔结构阈值更低, 最高输出功率及光-光转换效率均有较大提升。当 L 型拉曼腔腔长分别为 100, 110, 130 mm 时, 获得的最高调 Q 锁模激光功率分别为 0.533, 0.645, 0.9 W, 对应的转换效率分别为 3.20%, 3.76%, 5.24%。当 M_4 镜的曲率半径为 $R = 150 \text{ mm}$, 重复上述实验, 得到不同拉曼腔长(L_R)下的拉曼锁模的最大输出功率及转换效率如图 4(b) 所示。当拉曼腔长为 180 mm 时, 1176 nm 调 Q 锁模激光的最高输出功率及转换效率(最高输出功率为 1.19 W, 最高转换效率为 6.94%)与曲率半径 $R = 100 \text{ mm}$ 、拉曼腔长为 120 mm 时基本相同(最高输出功率为 1.23 W, 最高转换效率为 7.17%), 说明这两种情况下的拉曼光在 YVO_4 晶体处的光斑大小基本相同, 均能与基频光光斑形成良好的匹配。同时, 这两种情况下的最大输出功率及转换效率随拉曼腔腔长变化的趋势基本一致, 但 $R = 150 \text{ mm}$ 时拉曼腔腔长的调整范围更大(120~180 mm)。这是由于 150 mm 曲率半径的平凹镜对拉曼光的聚焦效果相对较弱, 因此拉曼晶体处的拉曼光光斑大小随腔长的变化相对不明显。

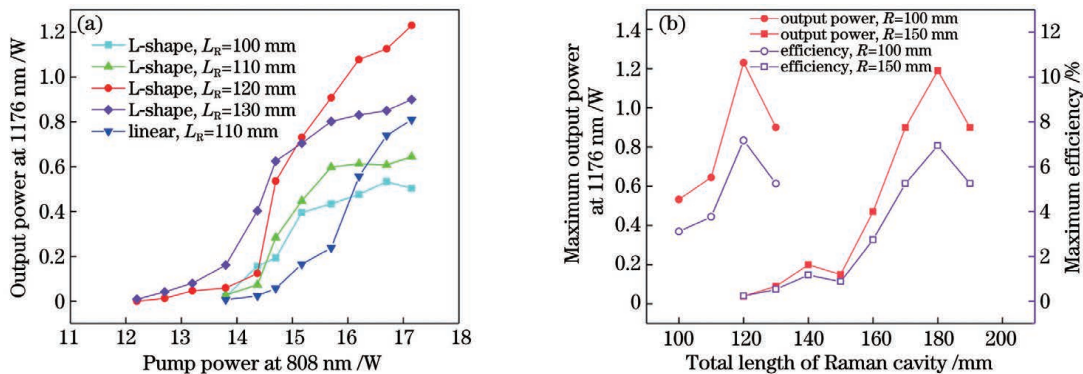


图 4 不同拉曼腔腔长和不同曲率下 1176 nm 调 Q 锁模激光输出功率。(a) 不同拉曼腔腔长下, 1176 nm 调 Q 锁模激光输出功率随泵浦功率的变化曲线($R = 100 \text{ mm}$); (b) 不同曲率下, 1176 nm 最大输出功率和最高转换效率随拉曼腔腔长的变化曲线

Fig. 4 Output power of Q-switched mode-locked 1176 nm laser at different Raman cavity length and different curvature. (a) Output power of Q-switched mode-locked 1176 nm laser varying with pump power at different length of Raman cavity ($R = 100 \text{ mm}$); (b) maximum output power of Q-switched mode-locked 1176 nm Raman laser and maximum efficiency varying with length of Raman cavity at different curvature

图 5 给出了最大入射泵浦功率下, 不同拉曼腔腔长对应的 1176 nm 调 Q 锁模激光的脉冲波形($R = 100 \text{ mm}$)。当谐振腔腔长依次为 100, 110, 120, 130 mm 时, 对应的锁模脉冲重复频率分别为 1.080, 1.004, 942.9, 880.1 MHz; 计算得到的实际锁模脉冲宽度分别为 145.8, 130.7, 125.8, 142.8 ps。随着拉曼光与基频光模式匹配的改善,

1176 nm 调 Q 锁模脉冲的调制深度不断增加, 当拉曼腔腔长为 120 mm 和 130 mm 时, 调 Q 锁模脉冲的调制深度可达 100%。

当拉曼腔腔长为 120 mm 时, 在 M_4 镜后分别测量了阈值附近及最大泵浦功率下, 剩余 1064 nm 脉冲激光的波形, 如图 6 所示。由于 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体本身可以作为被动锁模元件, 因此在产生拉曼激

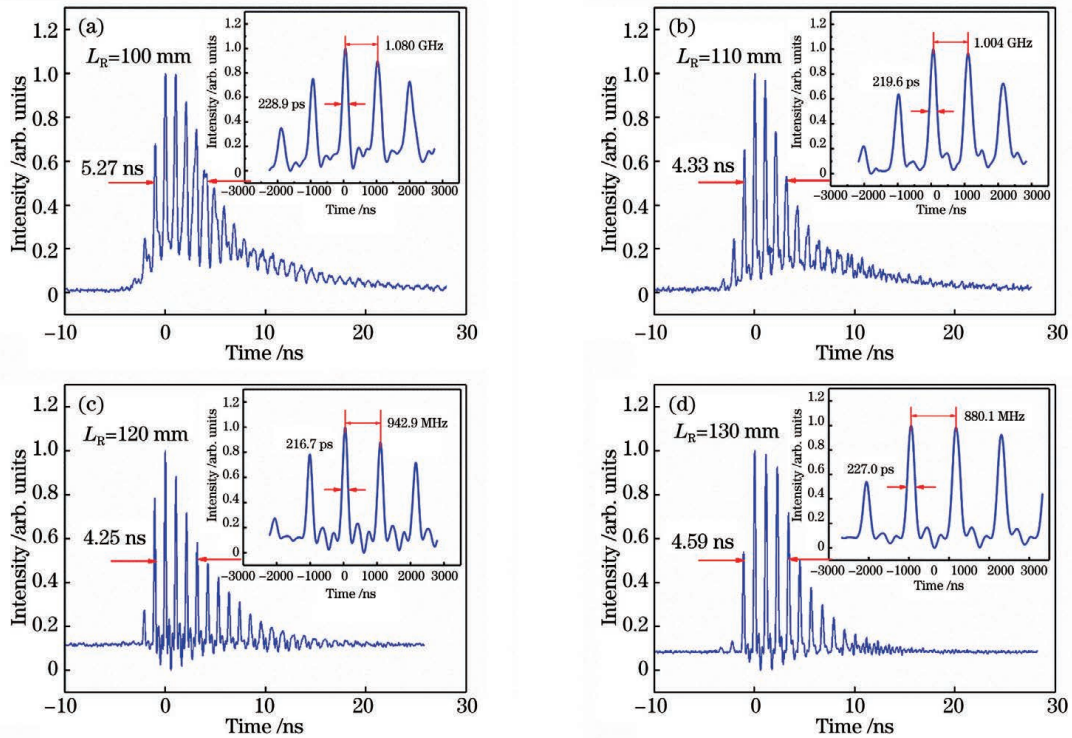


图 5 不同拉曼腔长下,1176 nm 调 Q 锁模激光脉冲波形对比图($R=100$ mm)。(a) $L_R=100$ mm;(b) $L_R=110$ mm;(c) $L_R=120$ mm;(d) $L_R=130$ mm

Fig. 5 Comparison of 1176 nm Q-switched mode-locked pulse waveforms with different length of Raman cavity ($R=100$ mm). (a) $L_R=100$ mm; (b) $L_R=110$ mm; (c) $L_R=120$ mm; (d) $L_R=130$ mm

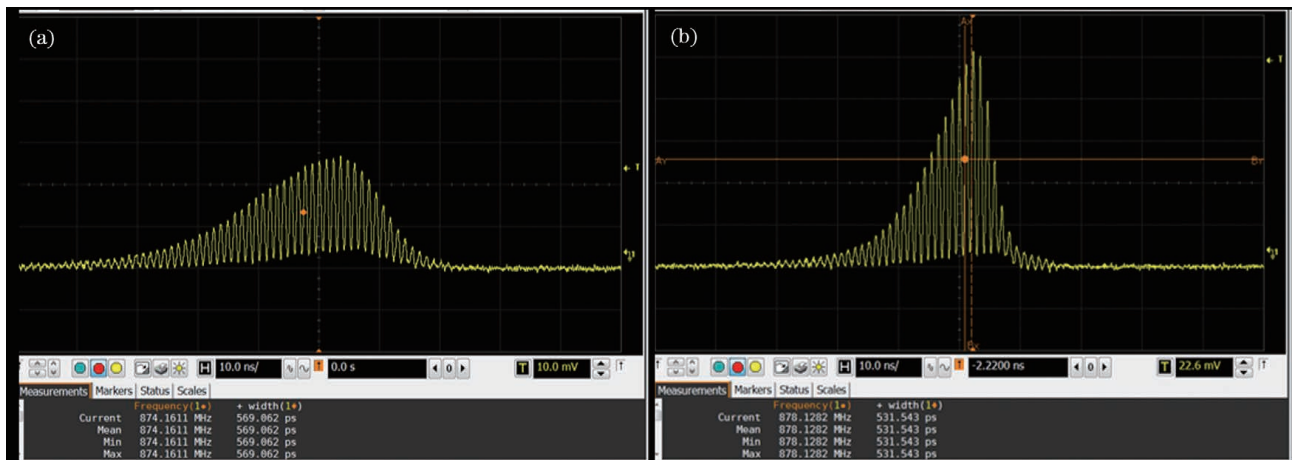


图 6 剩余 1064 nm 调 Q 锁模激光脉冲波形图。(a) 阈值附近;(b) $P_{\text{stokes}}=1.23$ W

Fig. 6 Pulse waveforms of residual 1064 nm Q-switched mode-locked laser. (a) Near the threshold; (b) $P_{\text{stokes}}=1.23$ W

光之前便已经观察到了 1064 nm 调 Q 锁模输出,其锁模脉冲重复频率为 874 MHz 左右,脉冲宽度约为 500 ps。随着泵浦功率的不断提高,当腔内基频光功率密度超过阈值时,开始产生 1176 nm 调 Q 锁模激光,同时 1064 nm 基频光开始不断被消耗,因而剩余的 1064 nm 调 Q 锁模激光表现出“前沿缓、后沿陡”的包络形状。需要说明的是,通过对比剩余 1064 nm 调 Q 锁模脉冲及 1176 nm 调 Q 锁模脉冲

可以发现,二者的脉冲重复频率并不相同,且仅与各自谐振腔长有关。这与文献[8,26]的实验结果有所不同,充分说明了 1176 nm 调 Q 锁模激光产生并不依赖于 1064 nm 调 Q 锁模激光的“同步泵浦”,因而无需控制二者的光学腔长一致,以实现时域上的匹配,同时也排除了利用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体对 1064 nm 激光先锁模再“同步泵浦”产生 1176 nm 调 Q 锁模激光的可能,从而证明了 SRS 自锁模现象

的存在。此外,根据不同 M_1 曲率半径下 1176 nm 调 Q 锁模最大输出功率的测量结果(图 4),可以发现 1176 nm 调 Q 锁模的输出功率主要依赖拉曼光与基频光空间上的模式匹配。即使基频光谐振腔与拉曼光谐振腔的腔长相差较大,只要保证其空间模式匹配良好,依旧可实现高功率的 1176 nm 调 Q 锁模激光输出,且其几乎不受到时域上是否为“同步泵浦”的影响。

根据上述复合腔结构拉曼自锁模激光器的实验结果,得出几点结论:1) $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体虽然可以作为被动锁模元件实现 1064 nm 调 Q 锁模激光输出,但 1176 nm 调 Q 锁模激光的产生原因并不在于 1064 nm 激光为锁模激光,而是 SRS 过程使得 1176 nm 拉曼光实现了锁模;2) 与主动调 Q 拉曼自锁模过程类似, $\text{Nd}:\text{YVO}_4-\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 激光器所产生的 1064 nm 脉冲激光,仅起到为 1176 nm 拉曼光提供增益的作用^[9]。当 1064 nm 脉冲激光功率密度超过阈值时,1176 nm 拉曼光开

始从强弱不同的初始噪声中不断被放大。此时某个强噪声由于在放大过程中具有较高的拉曼增益,因此产生了一个强度较大的斯托克斯脉冲。该脉冲经过周期性的调制,最终实现了 1176 nm 带有调 Q 包络的锁模激光输出^[9-11],当拉曼光与基频光模式匹配达到最佳时,获得的 1176 nm 调 Q 锁模激光输出功率最高;3) 由于 SRS 过程的脉宽压缩效应,1176 nm 调 Q 锁模的脉冲宽度(~ 140 ps)小于 1064 nm 调 Q 锁模的脉冲宽度(~ 500 ps);4) 拉曼自锁模的转换效率主要取决于基频光与拉曼光在空间上的模式匹配,而复合腔结构将基频光谐振腔与拉曼光谐振腔分离,可以更好地保证基频光与拉曼光的模式匹配,大大提高转换效率。如果选用增益系数更大、长度更长的拉曼晶体,1176 nm 拉曼调 Q 锁模激光的输出功率有望得到进一步提升。同时还可以通过适当改变腔镜曲率半径,调整拉曼谐振腔的最佳长度,从而实现 1176 nm 调 Q 锁模脉冲重复频率的主动调控[图 7(a)]。

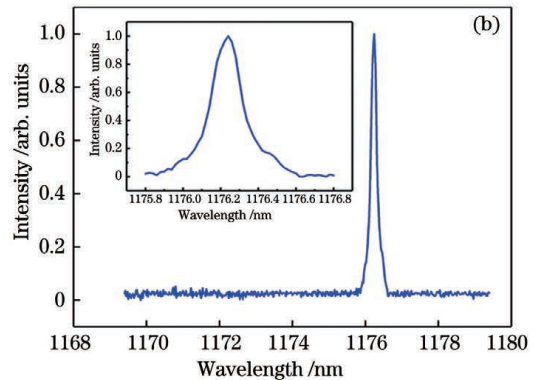


图 7 1176 nm 调 Q 锁模激光脉冲波形图和激光光谱图。(a) $P_{\text{stokes}} = 1.19$ W; (b) $P_{\text{stokes}} = 1.23$ W

Fig. 7 Pulse waveform and spectrum of 1176 nm Q-switched mode-locked laser. (a) $P_{\text{stokes}} = 1.19$ W; (b) $P_{\text{stokes}} = 1.23$ W

使用光谱仪(Yokogawa AQ6370D)采集了最高输出功率下的 1176 nm 拉曼光光谱图,结果如图 7(b)所示,中心波长为 1176.2 nm,其线宽为 0.2 nm。采用刀口法对最大泵浦功率下的输出光光束质量进行了测量,并用光斑相机(Ophir Pyrocam III)采集远场光斑图,将测量的水平方向及垂直方向的光斑半径 w 平方后,经过抛物线拟合的曲线如图 8 所示。从远场光斑图可以看出,得益于 SRS 的光束净化效应,输出光的光斑较为均匀,且水平方向与垂直方向的光束质量因子 M_x^2 和 M_y^2 分别为 1.39 和 1.42。

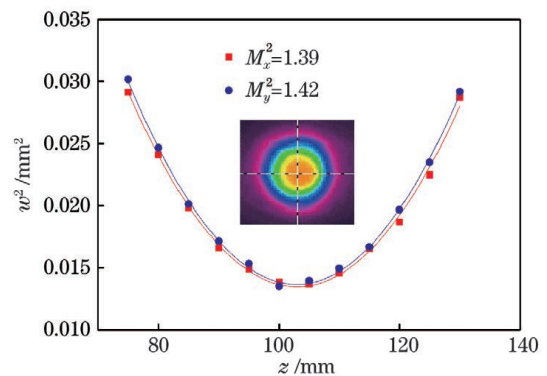


图 8 1176 nm 调 Q 锁模激光光斑和光束质量 ($P_{\text{stokes}} = 1.23$ W)

Fig. 8 Spot profile and beam quality of 1176 nm Q-switched mode-locked laser ($P_{\text{stokes}} = 1.23$ W)

4 结 论

实验研究了一种基于复合腔结构的 Nd:

$\text{YVO}_4-\text{YVO}_4-\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 腔拉曼自锁

模激光器。所得实验结果充分说明了 1176 nm 调 Q 锁模激光产生并不依赖于 1064 nm 调 Q 锁模激光时域上的“同步泵浦”，排除了 1064 nm 激光利用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体先锁模再“同步泵浦”产生 1176 nm 调 Q 锁模激光的可能，从而证明了 SRS 自锁模现象的存在，为 SRS 自锁模机理的研究提供了有力的实验依据。此外，在保持基频光谐振腔不变的情况下，通过合理地控制拉曼光谐振腔的腔长，优化了基频光与拉曼光的模式匹配。在 17.15 W 808 nm LD 泵浦功率下，获得了调制深度为 100%、平均功率为 1.23 W 的 1176 nm 拉曼调 Q 锁模激光输出，光-光转换效率为 7.17%，相比于直腔结构提升超过 50%。锁模脉冲宽度为 125.8 ps，脉冲重复频率为 942.9 MHz，调 Q 包络重复频率约为 70 kHz，脉宽为 4.25 ns。如果选用增益系数更大、长度更长的拉曼晶体，1176 nm 拉曼调 Q 锁模激光的输出功率有望得到进一步提升。将拉曼腔前腔镜的曲率半径由 100 mm 增加至 150 mm，对应拉曼腔长由 120 mm 增加至 180 mm，在相同泵浦功率下获得了调制深度为 100%、平均功率为 1.19 W 的 1176 nm 拉曼调 Q 锁模激光输出，转换效率为 6.94%，脉冲重复频率降低至 675.6 MHz。这说明了该复合腔结构还具备在保证输出功率及转换效率的同时，对 1176 nm 锁模激光的重复频率进行主动调控的能力。

参 考 文 献

- [1] Lu Y H, Huang Y F, Zhang L, et al. Research progress of sodium guide star lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(7): 071406.
鲁燕华, 黄园芳, 张雷, 等. 钠导星激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(7): 071406.
- [2] Zhang H K, Chen X F, Wang P J, et al. Laser diode-pumped self-mode-locking laser with a self Q-switched $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}$ laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 738-742.
张海鹏, 陈秀峰, 王培吉, 等. 激光二极管抽运 $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 自锁模自调 Q 激光器[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 738-742.
- [3] Zhuang D K, Li Q, Zhou C P, et al. Applications of the Q-switched and mode-locked YLF laser in ICF driver[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2001, 38(8): 1-6.
庄大奎, 立群, 周翠萍, 等. 调 Q 锁模 YLF 激光器在 ICF 中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2001, 38(8): 1-6.
- [4] Nebel A, Herrmann T, Henrich B, et al. Fast micromachining using picosecond lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5706: 87-98.
- [5] Antipov S, Sabella A, Williams R J, et al. 1.2 kW quasi-steady-state diamond Raman laser pumped by an $M^2=15$ beam[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2506-2509.
- [6] Pask H M, Piper J A. Diode-pumped LiIO_3 intracavity Raman lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(8): 949-955.
- [7] Su K W, Chang Y T, Chen Y F. Power scale-up of the diode-pumped actively Q-switched $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ Raman laser with an undoped YVO_4 crystal as a Raman shifter[J]. *Applied Physics B*, 2007, 88(1): 47-50.
- [8] Lisinetskii V A, Busko D N, Chulkov R V, et al. Self-mode locking at multiple Stokes generation in the Raman laser[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(7): 1454-1458.
- [9] Spence D J. Spectral effects of stimulated Raman scattering in crystals [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2017, 51: 1-45.
- [10] Spence D J, Mildren R P. Mode locking using stimulated Raman scattering [J]. *Optics Express*, 2007, 15(13): 8170-8175.
- [11] Ding S H, Zhang X Y, Wang Q P, et al. Temporal properties of the solid-state intracavity Raman laser using the traveling-wave method[J]. *Physical Review A*, 2007, 76(5): 053830.
- [12] Shen H B, Wang Q P, Zhang X Y, et al. 1st-Stokes and 2nd-Stokes dual-wavelength operation and mode-locking modulation in diode-side-pumped $\text{Nd}:\text{YAG}/\text{BaWO}_4$ Raman laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 17823-17832.
- [13] Shen H B, Wang Q P, Hu W G, et al. Compact high repetition-rate actively Q-switched and mode-locked eye-safe $\text{Nd}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{BaWO}_4$ Raman laser[J]. *Optics Communications*, 2013, 311: 177-179.
- [14] Zhang Y G. The studies of novel passively mode-locked lasers and phenomenon of self mode locking in Raman lasers [D]. Jinan: Shandong University, 2014: 87-91.
张远耕. 新型被动锁模激光器和拉曼激光器中的自锁模现象的研究[D]. 济南: 山东大学, 2014: 87-91.
- [15] Peng J Y, Zheng Y, Zheng K, et al. Compact Q-switched and mode-locked $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4/\text{Cr}^{4+}$ self-Raman laser [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(21): 5126-5129.
- [16] Peng J Y, Zheng Y. Passively Q-switched mode locking in self-Raman $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(5): 1097-1099.

- 彭继迎, 郑义. Nd:YVO₄ 自激拉曼激光器调 Q 锁模特性[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(5): 1097-1099.
- [17] Li Z H, Peng J Y, Zheng Y. CW mode-locked self-Raman 1.17 μm Nd:GdVO₄ laser with a novel long cavity[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 58: 39-42.
- [18] Li Z H, Peng J Y, Yao J Q, et al. Efficient self-stimulated Raman scattering with simultaneously self-mode-locking in a diode-pumped Nd:GdVO₄ laser[J]. Applied Optics, 2016, 55(32): 9000-9005.
- [19] Li Z H, Peng J Y, Yao J Q, et al. The characteristics of Kerr lens mode-locked Nd:YVO₄ laser with a symmetrical z-shaped cavity[J]. Journal of Modern Optics, 2017, 64(13): 1302-1306.
- [20] Huang G X, Yu Y Q, Xie X H, et al. Diode-pumped simultaneously Q-switched and mode-locked YVO₄/Nd:YVO₄/YVO₄ crystal self-Raman first-Stokes laser[J]. Optics Express, 2013, 21(17): 19723-19731.
- [21] Du C L, Huang G X, Yu Y Q, 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(12): 125003.
- [22] Wang D D, Du C L, Ren X K, et al. Study on Q-switched and mode-locked third-Stokes self-Raman laser[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(1): 42-46.
- 王冬冬, 杜晨林, 任席奎, 等. 自拉曼三阶斯托克斯调 Q 锁模激光特性研究[J]. 激光与红外, 2017, 47(1): 42-46.
- [23] Jia H X, Ding S H, Liu J J, et al. Laser-diode-pumped Cr⁴⁺:YAG passively Q-switched intracavity PbWO₄ mode-locked Raman laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(10): 1002007.
- 贾海旭, 丁双红, 刘佳佳, 等. LD 抽运 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 内腔式 PbWO₄ 锁模拉曼激光器实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1002007.
- [24] Jia H X. Experiment research on laser-diode-pumped Cr:YAG passively Q-switched intracavity SrWO₄ mode-locked Raman laser[J]. Electro-Optic Technology Application, 2015, 30(6): 40-44.
- 贾海旭. LD 泵浦 Cr:YAG 被动调 Q 内腔式 SrWO₄ 锁模拉曼激光器实验研究[J]. 光电技术应用, 2015, 30(6): 40-44.
- [25] Yang K J, Zhao S Z, He J L, et al. Diode-pumped passively Q-switched and mode-locked Nd:GdVO₄ laser at 1.34 μm with V:YAG saturable absorber [J]. Optics Express, 2008, 16(25): 20176-20185.
- [26] Weitz M, Theobald C, Wallenstein R, et al. Passively mode-locked picosecond Nd:YVO₄ self-Raman laser[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(9): 091122.

Passively Q-switched Nd:YVO₄-YVO₄-Cr⁴⁺:YAG Self-Mode-Locked Raman Laser Based on Composite Cavity

Bai Yuntao^{1,2}, Ding Xin^{1,2*}, Jiang Guoxin^{1,2}, Lei Peng^{1,2}, Sun Bing^{1,2}, Li Tengpeng^{1,2}, Zhang Xingrui^{1,2}, Li Xiangxiang^{1,2}, Wu Liang^{1,2}, Zhang Guizhong^{1,2}, Yao Jianquan^{1,2}

¹Institute of Laser and Opto-Electronics, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract

Objective High-performance Q-switched mode-locked lasers can achieve high pulse-repetition-frequency (PRF) ultrashort pulse sequences with nanosecond-pulse envelopes, which are of great importance in applications such as laser remote sensing, adaptive optics, and inertial confinement fusion. Because of the clean-up effect, stimulated Raman scattering (SRS) has been regarded as a potential technical approach to achieve high-performance laser output. In particular, with the discovery of the SRS self-mode-locking phenomenon in recent years, Q-switched self-mode-locked Raman lasers with compact structure, high peak power, and high beam quality have gradually been favored by researchers. However, the mechanism of the SRS self-mode-locking phenomenon is relatively complicated, and there are few theoretical studies at present. Although some experiments have reported the SRS self-mode-locking phenomenon with corresponding explanations, most of them have yet to be verified and improved. In addition, the conversion efficiency of self-mode-locked Raman lasers needs to be further improved. Therefore, to

solve the above problems, an elaborate folding coupled cavity design was employed. Taking advantage of the folding coupled cavity, the fundamental and Raman cavities can be adjusted independently. Hence, the SRS self-mode-locking effect can be verified clearly according to the experimental results, and the mode matching between the fundamental and Raman waves can also be optimized by adjusting the length of the Raman cavity to improve the conversion efficiency of SRS.

Methods A schematic diagram of the Nd:YVO₄-YVO₄-Cr⁴⁺:YAG passively Q-switched intracavity self-mode-locked Raman laser based on a folding coupled cavity is shown in Fig. 2. The fundamental resonator consisted of M₁, M₂, a Nd:YVO₄ crystal, and a Cr⁴⁺:YAG crystal. A common L-shaped Raman cavity (designated by mirror path M₂-M₃-M₄) was adopted for the mode matching between the fundamental and Stokes waves. The radius of curvature of M₁ was 150 mm, and the output coupler (OC) M₂ was a flat mirror. The pump source was a fiber-coupled LD emitting at 808.2 nm with a maximum output power of 50 W. A 1:1 multilens coupler was used to focus the pump light into an α -cut 0.3% Nd:YVO₄ crystal with a radius of $\approx 200 \mu\text{m}$ near the incident facet of the laser gain medium, and the dimensions of the Nd:YVO₄ crystal were 3 mm \times 3 mm \times 20 mm. A 4 mm \times 4 mm \times 3 mm Cr⁴⁺:YAG crystal with 80% initial transmittance at 1064 nm was employed and placed as closely as possible to the OC. An α -cut 4 mm \times 4 mm \times 30 mm YVO₄ crystal was used as the Raman crystal, which was 1° wedged on both facets. All the components were coated according to our requirements. The length of the fundamental cavity composed of M₁ and M₂ was fixed at 110 mm. By adjusting the ROC of M₄ and the length of the L-shaped Raman cavity, optimization of mode matching between the fundamental and Stokes waves can be achieved effectively.

Results and Discussions The linear cavity Nd:YVO₄-YVO₄-Cr⁴⁺:YAG passively Q-switched intracavity self-mode-locked Raman laser was first studied. When the transmittance of the OC was 5%, a maximum output power of 0.81 W was obtained at 1176 nm under a pump power of 17.15 W, with an optical-optical efficiency of 4.72% (Fig. 2). The corresponding PRF and pulse width were 885.4 MHz and ≈ 219.16 ps, respectively (Fig. 3). After that, a 45° dichroic mirror M₃ was inserted into the cavity to construct an L-shaped folded Raman cavity with M₄ and M₂ (OC). When the radius of curvature (ROC) of M₄ was 100 mm and the length of the Raman cavity was 120 mm, a maximum power of 1.23 W with 1176 nm Q-switched mode-locked output was obtained under the pump power of 17.15 W, which was an improvement of over 50% compared with the linear cavity [Fig. 4(a)]. The PRF and pulse width of the mode-locked output were 942.9 MHz and ≈ 125.8 ps, respectively (Fig. 5). The linewidth was 0.2 nm, and the beam quality factors M_x^2 and M_y^2 were 1.39 and 1.42, respectively (Figs. 7 and 8). Replacing the ROC of M₄ with 150 mm and increasing the length of the Raman cavity to 180 mm, a maximum power of 1.19 W at 1176 nm Q-switched mode-locked output was obtained at the pump power of 17.15 W, with a conversion efficiency of 6.94% [Fig. 4(b)], and the PRF was reduced to 675.6 MHz (Fig. 7).

Conclusions A passively Q-switched Nd:YVO₄-YVO₄-Cr⁴⁺:YAG self-mode-locked Raman laser based on a composite cavity was demonstrated. Taking advantage of the folded-coupled cavity, the length and mirrors of the fundamental and Raman cavities can both be adjusted independently. Hence, the SRS self-mode-locking effect has been clearly obtained in a simple manner according to the experimental results, and the mode matching between the fundamental and Raman waves can be optimized by adjusting the length of the Raman cavity. In this way, the output power and conversion efficiency of the Q-switched mode-locked Raman output can be greatly improved. In addition, the folding coupled cavity structure was proved to control the PRF of the 1176 nm mode-locked output actively by adjusting the length of the Raman cavity together with the ROC of the mirror, without a reduction of output power and efficiency.

Key words lasers; all-solid-state laser; Raman laser; passively Q-switched mode-locked laser; composite cavity; stimulated Raman scattering self-mode-locking

OCIS codes 140.3550; 140.3540; 140.4050; 190.5650