

## 低频移拉曼模式多阶级联的 1.7 $\mu\text{m}$ 激光器

鲍玉朔, 黄海涛\*, 陈海伟, 王 飞, 李子涵

(江苏师范大学物理与电子工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 基于固体介质的拉曼频率变换是产生新波段激光的有效技术方案。利用 1572 nm KTP 光参量振荡器腔内泵浦 KGW 晶体, 实现了 1616 nm (2 阶)、1638 nm (3 阶)、1662 nm (4 阶)、1686 nm (5 阶)、1711 nm (6 阶) 拉曼激光输出, 其中 1711 nm 占据主导地位。激光器最大总平均输出功率为 1.13 W, 最小脉冲宽度为 20 ns。该多阶级联拉曼变频对应的单阶平均拉曼频移为  $86\text{ cm}^{-1}$ , 与文献报道的 KGW 晶体低频拉曼模式相吻合。采用 1572 nm KTP 光参量振荡器作为拉曼激光器的腔内泵浦源有两个优势, 一方面可以有效拓展拉曼变频的输出波长, 另一方面可以基于光参量振荡器的脉冲窄化特性为后续多阶拉曼转换提供高强度的泵浦光。通过引入多阶级联拉曼变频的方案, 为有效利用固体介质非常规低频移拉曼模式提供了新思路。

**关键词:** 级联非线性频率变换; KGW 晶体; 多阶受激拉曼散射; 1.7  $\mu\text{m}$

**中图分类号:** O437 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210507

## 1.7 $\mu\text{m}$ laser with a low frequency shifted Raman mode cascade connection

Bao Yushuo, Huang Haitao\*, Chen Haiwei, Wang Fei, Li Zihan

(School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Raman frequency conversion based on a solid medium is an effective technical scheme to generate new wavelength laser. 1572 nm KTP optical parametric oscillator was used to pump the KGW crystal intracavity, and Raman laser output at 1616 nm (2nd-order), 1638 nm (3rd-order), 1662 nm (4th-order), 1686 nm (5th-order) and 1711 nm (6th-order) was realized, among which 1711 nm is dominant. The maximum total average output power of the laser is 1.13 W, the minimum pulse width is 20 ns. The single-order average Raman frequency shift corresponding to the multiorder cascade Raman frequency conversion is  $86\text{ cm}^{-1}$ , which is consistent with the low-frequency Raman mode of the KGW crystal reported in the literature. Using a 1572 nm KTP optical parametric oscillator as the intracavity pump source of the Raman laser has two advantages: On the one hand, it can effectively expand the output wavelength of Raman frequency conversion; on the other hand, it can provide high-intensity pump light for subsequent multiorder Raman conversion based on the pulse narrowing characteristics of the optical parametric oscillator. By introducing the multi-order Raman frequency conversion scheme, a new idea is provided for the effective use of the unconventional low-frequency shift Raman mode of a solid medium.

**Key words:** cascade nonlinear frequency conversion; KGW crystal; multi-order stimulated Raman scattering; 1.7  $\mu\text{m}$

收稿日期:2021-07-28; 修订日期:2021-09-22

基金项目:国家自然科学基金(61875077)

作者简介:鲍玉朔,男,硕士生,主要从事固体激光技术等方面的研究。

导师(通讯作者)简介:黄海涛,男,副教授,博士,主要从事固体激光技术等方面的研究。

## 0 引言

1.7  $\mu\text{m}$  波段处于水的弱吸收区、脂肪和胶原蛋白的吸收峰及 C-H 共价键的吸收峰,因此该波段激光光源在光学相干层析成像、气体监测、有机玻璃焊接等领域应用潜力巨大<sup>[1-3]</sup>。在中红外激光技术领域,1.7  $\mu\text{m}$  波段激光器还可作为掺镱激光器抽运源,产生 4.2~4.7  $\mu\text{m}$  波段激光<sup>[4]</sup>。

目前 1.7  $\mu\text{m}$  波段激光直接产生方案包括掺铈光纤激光器、掺铋光纤激光器及半导体激光器等<sup>[5-7]</sup>。非线性频率转换是产生新波段激光的有效技术方案<sup>[8-9]</sup>,受激拉曼散射(SRS)是非线性光学领域中重要的机制之一,属于光学三阶非线性范畴。相对于气体、液体拉曼介质,固体介质具有拉曼增益系数大、热导率高、稳定性好、易于与全固态激光技术结合等优势,因此全固态拉曼激光器研究与应用广受关注<sup>[10-11]</sup>。目前利用拉曼变频将成熟的 1  $\mu\text{m}$  波段激光拓展至更长波长范围的研究已取得重要进展<sup>[12-13]</sup>。利用更长波段激光泵浦固体拉曼介质则是直接获得新波段激光的重要手段。要获得目标波段拉曼激光输出,传统的方法是利用具有高频拉曼频移的拉曼晶体实现一阶拉曼转换。另外的思路则是利用一些拉曼晶体中的高增益低频移拉曼模式构建多阶次级联拉曼转换。目前具有高增益低频移的代表性晶体为  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  (KGW) 和  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  (KYW),相应的拉曼频移分别为  $89\text{ cm}^{-1}$  和  $87\text{ cm}^{-1}$ <sup>[14-15]</sup>。相对于传统高频拉曼频移(如  $760\text{ cm}^{-1}$  和  $900\text{ cm}^{-1}$ ),这两种晶体相关低频拉曼频移具有更高的拉曼增益系数,如 KYW 在  $87\text{ cm}^{-1}$  和  $905\text{ cm}^{-1}$  两个模式的拉曼增益系数分别为  $9.2\text{ cm/GW}$  和  $3.6\text{ cm/GW}$ (@1064 nm)<sup>[15]</sup>。

低频移拉曼模式的利用受限于输出镜膜系的设计。低频拉曼频移意味着泵浦波和拉曼波之间的波长差小,因此输出镜对泵浦光高反与拉曼变频光部分透射的功能很难同时实现。引入多阶次低频移拉曼模式级联方案,可以将腔镜对泵浦光与拉曼光的反射率差扩大到可实际操作的程度,从而克服这一瓶颈。文中提出了基于 KGW 低频移拉曼模式的多阶次级联 1.7  $\mu\text{m}$  拉曼激光器。利用 1572 nm  $\text{KTiOPO}_4$ (KTP) 光参量振荡器(OPO)腔内泵浦 KGW 晶体,实现了基于低频移拉曼模式的六阶级联拉曼激光器。具体过程如下:KTP OPO 产生的 1572 nm 信号光经 KGW 晶体

实现拉曼频率变换,相应的输出波长为 1616 nm、1638 nm、1662 nm、1686 nm 和 1711 nm,最大总平均输出功率为 1.13 W。通过引入多阶级联拉曼变频的方案,可以有效利用 KGW 晶体非常规低频移拉曼模式具有更大拉曼增益系数的特性,同时多阶次过程还可以避开腔镜镀膜的难题。采用 1572 nm KTP OPO 作为拉曼激光器的腔内泵浦源,一方面可以有效拓展拉曼变频的输出波长,另一方面可以基于 OPO 的脉冲窄化特性为后续多阶拉曼转换提供高强度的泵浦光。方案中采用的非线性光学晶体无需特殊的设计和制备过程,抗损伤阈值高,所选的基频波光源为成熟的 1064 nm 激光,便于该波段激光器的推广和实际应用。

## 1 实验装置

实验装置如图 1 所示,M1 与 M3 构成 1064 nm 基频波谐振腔,腔长为 215 mm,M2 与 M3 构成光学参量振荡及拉曼频率变换的谐振腔,腔长为 60 mm。M1 镜的曲率半径为 1000 mm,且表面镀有高反射膜  $\text{HR}@1064\text{ nm}$  ( $R>99.8\%$ )。所用的 AO Q 开关(QSG40,四川压电与声光技术研究所)在两个透光表面上镀 1064 nm 增透膜。

Nd:YAG 采用商业化模块(OLD9D32,东方强光),由三组 LD 巴条环绕 Nd:YAG 棒组成,其中 Nd:YAG 棒的直径为 3 mm,长度为 65 mm,Nd<sup>3+</sup>离子掺杂浓度为 1.1%,LD 的中心泵浦波长为 808 nm。中间镜 M2 在面向 Nd:YAG 模块的一面镀有 1064 nm 减反膜,另一面镀膜参数为  $\text{HR}@1500\sim 1700\text{ nm}$  ( $R>99.8\%$ ),同时对 1064 nm 高透( $T>98\%$ )。x 轴切割的 KTP 晶体尺寸为 4 mm×4 mm×25 mm,两个 4 mm×4 mm 通光面镀制 1064 nm 增透膜;Np 方向切割的 KGW 晶体尺寸为 4 mm×4 mm×15 mm,两个 4 mm×4 mm 通光面镀膜参数为  $\text{AR}@1064\text{ nm} \& 1500\sim 1600\text{ nm}$ 。输出耦合镜 M3 镀膜参数为  $\text{HR}@1500\sim 1650\text{ nm} \& 1064\text{ nm}$  ( $R>99.5\%$ ),同时在 1680~1750 nm 波段具有部分透射功能,相应透过率曲线如图 2 所示,其在 1064 nm、1572 nm、1594 nm、1616 nm、1638 nm、1662 nm、1686 nm 及 1711 nm 透过率分别为 0.009%、0.009%、0.003%、0.008%、0.009%、0.10%、1.35% 和 13.1%。

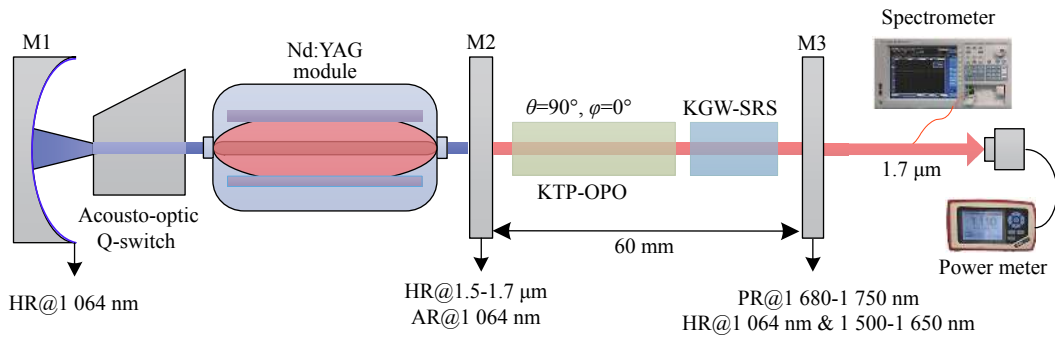


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

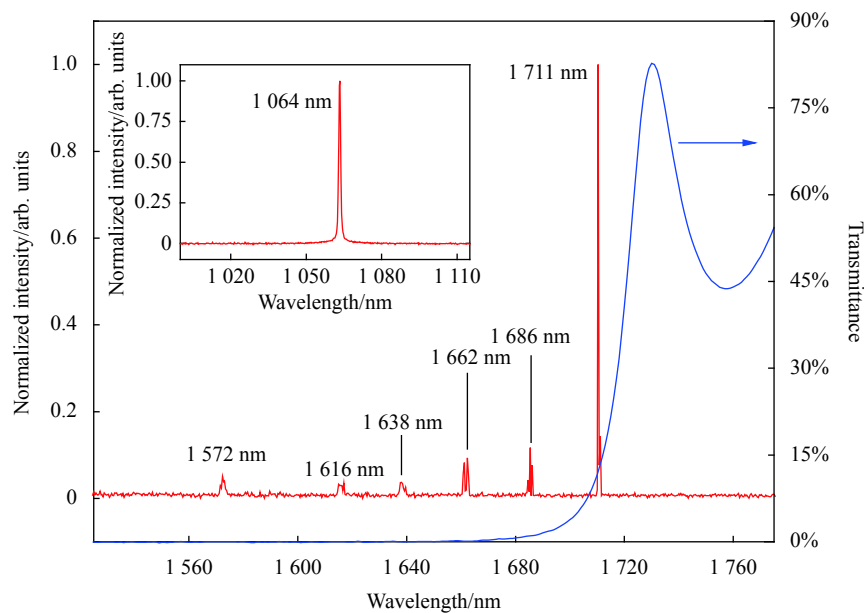


图 2 输出光谱及输出镜透过率曲线

Fig.2 Output spectrum and transmission curve of output mirror

## 2 实验结果和讨论

实验发现在声光 Q 开光的重复频率为 5.5 kHz 时,该拉曼激光器具有最佳输出功率,然后利用光谱仪 (AQ6376, Yokogawa) 测量了该激光器的输出光谱,测量结果如图 2 所示。可以看到,除较弱的 1572 nm KTP OPO 信号光外,分别在 1616 nm (2 阶)、1638 nm (3 阶)、1662 nm (4 阶)、1686 nm (5 阶)、1711 nm (6 阶) 处观察到多条谱线,其中 1711 nm 占据主导。输出光谱未观察到一阶拉曼光 (1594 nm) 信号,这应该是由输出镜在 1594 nm 具有更高的反射率所致。由于光谱仪 (AQ6376, Yokogawa) 可探测光谱范围在 1200~2400 nm,同时使用另一台光谱仪 (HR4000,

Ocean Optics) 在 1000~1100 nm 波段进行了测量,测量光谱做插图置于图 2 中,结果显示只检测到了基频波 1064 nm 激光。为进一步估算输出激光中基频光 1064 nm 所占的功率大小,实验中在最大泵浦功率下测量了 M1 镜端出射的功率,数值仅为几个毫瓦。输出镜 M3 和 M1 镜对基频波 1064 nm 具有相同的反射率,因此 M3 镜端总的输出功率中 1064 nm 功率也应为几个毫瓦,基本可以忽略。由实际输出光谱可知,该多阶级联拉曼变频对应的单阶平均拉曼频移为  $86\text{ cm}^{-1}$ ,与参考文献报道的 KGW 晶体  $82\text{ cm}^{-1}$ [16]、 $84\text{ cm}^{-1}$ [17] 及  $89\text{ cm}^{-1}$ [14] 等低频移拉曼模式基本一致。输出光谱表明了基于低频移拉曼模式多阶级联拉曼变频的方案的可性,为有效利用固体介质非常规

低频移拉曼模式提供了新思路。

图 3 为拉曼光的脉冲宽度以及总平均输出功率的变化曲线, 相应声光重复频率为 5.5 kHz。因实验室条件所限, 未对输出光束进行分光。图 3 展示的平均输出功率是各阶拉曼光的总平均输出功率。相应脉冲参数通过数字示波器 (DSO-S104A, Keysight) 和光电探测器 (DET10D2, Thorlabs) 测量。随着 LD 泵浦功率的增加, 总平均功率随之增加, 同时脉冲宽度大幅减小。在 LD 泵浦功率为 188 W 时, 获得的最大平均输出功率为 1.13 W, 最小脉冲宽度为 20 ns。图 3 插图所示为最高输出功率下的输出光束的三维强度分布。由于各阶拉曼光的偏振态相同且波长差很小, 可通过光谱图中相对光强所占的比例估算各个波长的输出功率, 在最大平均输出功率下, 1572 nm (KTP OPO 信号)、1616 nm (2 阶)、1638 nm (3 阶)、1662 nm (4 阶)、1686 nm (5 阶) 和 1711 nm (6 阶) 处的功率分别为 0.04 W、0.03 W、0.03 W、0.07 W、0.09 W 和 0.85 W。图 4 为 20 ns 的脉冲宽度的波形图及相应的

脉冲序列图。

相对于单一频率变换方案, 该级联变频方案的突出优势是可以获得更加丰富的新波段激光输出。而相对于基于多周期结构的准相位匹配材料的级联变频方案, 该方案利用具有高损伤阈值的体块晶体, 避免了复杂的微结构制备过程, 性价比更高。

### 3 结 论

文中报道了一种基于 KGW 晶体低频移拉曼模式的多级联的 1.7  $\mu\text{m}$  拉曼激光器。利用 KTP OPO 作为腔内激发源, 同时在多阶拉曼波长间建立良好的谐振条件, 成功实现了高达 6 阶的拉曼频率转换。KTP OPO 产生的 1572 nm 信号光经 KGW 晶体实现拉曼频率变换, 相应的输出波长为 1616 nm (2 阶)、1638 nm (3 阶)、1662 nm (4 阶)、1686 nm (5 阶) 和 1711 nm (6 阶), 总的最大平均输出功率为 1.13 W, 最小脉冲宽度为 20 ns, 相应的最大峰值脉冲功率为 10.3 kW。与利用高频拉曼频移模式实现单次拉曼转换的传统方案相比, 文中提出的多级联的拉曼变频方案可以有效利用常规晶体的非常规低频拉曼模式, 通过控制阶次等效提供新的拉曼频移。对于多波长激光有效输出的潜能, 需要借助速率方程对于多阶次拉曼变频进行理论研究, 优化输出镜的膜系设计, 从而有效产生多个密集波长序列, 满足多组分气体监测等更多的应用场景需求。

### 参考文献:

- [1] Li Y, Murthy R S, Zhu Y, et al. 1.7-micron optical coherence tomography angiography for characterization of skin lesions—A feasibility study [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2021, 40(9): 2507-2512.
- [2] Wagner G A, Plusquellic D F. Ground-based, integrated path differential absorption LIDAR measurement of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and H<sub>2</sub>O near 1.6  $\mu\text{m}$  [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6292-6310.
- [3] Mingareev I, Weirauch F, Olowinsky A, et al. Welding of polymers using a 2  $\mu\text{m}$  thulium fiber laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2095-2099.
- [4] Qu Chongbing, Kang Minqiang, Xiang Xiangjun, et al. Theoretical study of 4.3  $\mu\text{m}$  dual-wavelength pumped By:InF<sub>3</sub> high-energy mid-infrared fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0801003. (in Chinese)

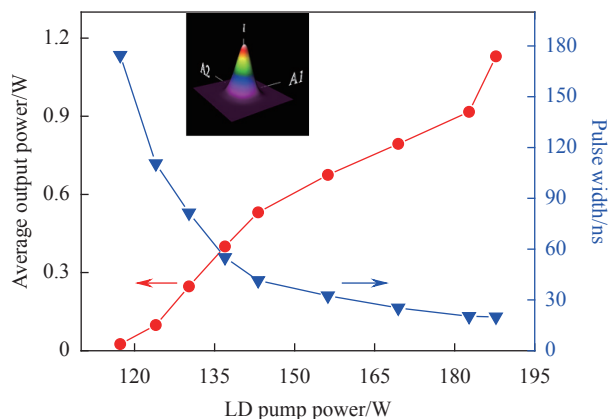


图 3 脉冲宽度、总平均输出功率与 LD 泵浦功率的关系

Fig.3 Dependence of pulse width and total average output power on the LD pump power

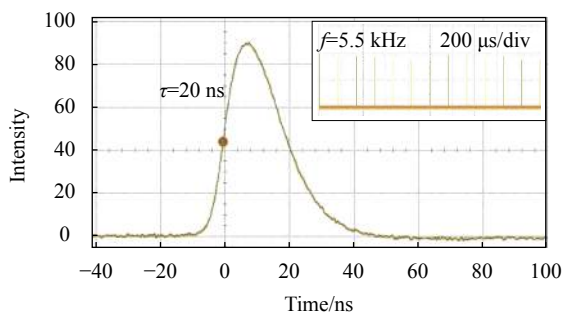


图 4 KGW 对应的单脉冲和相应的脉冲序列

Fig.4 Single pulse and corresponding pulse trains of the KGW

- [5] Chen S, Chen Y, Liu K, et al. W-type normal dispersion thulium-doped fiber-based high-energy all-fiber femtosecond laser at 1.7  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics letters*, 2021, 46(15): 3637-3640.
- [6] Khagai A, Melkumov M, Riumkin K, et al. NALM-based bismuth-doped fiber laser at 1.7  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1127-1130.
- [7] Sun JunJie, Chen Yi, Zhang Kuo, et al. Efficient continuous wave and acousto-optical Q-switched Tm: Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser pumped by the laser diode at 1.7  $\mu\text{m}$  [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 116: 103771.
- [8] Chen Bingyan, Yu Yongji, Wu Chunting, et al. High efficiency mid-infrared 3.8  $\mu\text{m}$  MgO: PPLN optical parametric oscillator pumped by narrow linewidth 1064 nm fiber laser [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 361-367. (in Chinese)
- [9] Wang Lan, Jin Guangyong, Dong Yuan, et al. Double pumped compound cavity 501 nm cyan laser with tunable injection power ratio [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 329-335. (in Chinese)
- [10] Zhang Fang, Wang Zhengping, Xu Xinzhen. Anisotropy of stimulated Raman scattering in SrWO<sub>4</sub> crystal [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 39-43. (in Chinese)
- [11] Hu Dawei, Wang Zhengping, Zhang Huaijin, et al. External resonator YVO<sub>4</sub> crystal Raman laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(5): 975-979. (in Chinese)
- [12] Zhang Jing, Duan Yanmin, Zhang Dong, et al. Acousto-optic Q-switched intracavity Nd: YAG/RTP cascaded Raman laser characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0606006. (in Chinese)
- [13] Wang Ximei, Chen Simeng, Shi Shencheng, et al. Study on the performance of cascaded Nd: GdVO<sub>4</sub> self-Raman laser at 1309 nm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 1105002. (in Chinese)
- [14] Ferreira M S, Wetter N U. Yb: KGW self-Raman laser with 89 cm<sup>-1</sup> Stokes shift and more than 32% diode-to-Stokes optical efficiency [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 121: 105835.
- [15] Sarang S, Williams R J, Lux O, et al. High-gain 87 cm<sup>-1</sup> Raman line of KYW and its impact on continuous-wave Raman laser operation [J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21463-21473.
- [16] Wang Yingwei, Cheng Haobo, Zhu Zhongli, et al. Structure and vibration spectrum of laser crystal Yb: KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2005(6): 17-22. (in Chinese)
- [17] Parrotta D C, Lubeigt W, Kemp A J, et al. Continuous-wave Raman laser pumped within a semiconductor disk laser cavity [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1083-1085.