

主动调 Q 内腔式 Nd:YAG/m-LaVO₄拉曼激光器

白如雪^{1,2**}, 林海枫¹, 张莉珍¹, 陈玮冬¹, 林州斌¹, 张戈^{1*}

¹中国科学院福建物质结构研究所光电材料化学与物理重点实验室, 福建 福州 350002;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 实验研究了具有单斜独居石结构的钒酸镧(m-LaVO₄)晶体的室温拉曼光谱,报道了基于 m-LaVO₄ 晶体作为拉曼增益介质的主动调 Q 内腔式脉冲拉曼激光器。受激拉曼变频实验以波长为 808 nm 的光纤耦合半导体激光器(LD)作为抽运激发光源,Nd:YAG 晶体为产生基频激光的增益介质,融石英声光调 Q 器为主动调 Q 元件,采用紧凑的法布里-珀罗两镜平凹谐振腔可有效地产生波长为 1170.9 nm 的一阶斯托克斯脉冲激光。当注入抽运功率为 6.51 W,脉冲重复频率为 30 kHz 时,实验产生的一阶斯托克斯脉冲激光的最高平均功率为 767 mW,相应的脉冲宽度为 13.8 ns,单脉冲能量为 25.6 μJ,峰值功率为 1.85 kW。

关键词 激光器;拉曼激光器;主动调 Q 激光器;m-LaVO₄ 晶体;全固态激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0901003

Actively Q-Switched Intracavity Nd:YAG/m-LaVO₄ Raman Laser

Bai Ruxue^{1,2**}, Lin Haifeng¹, Zhang Lizhen¹, Chen Weidong¹, Lin Zhoubin¹, Zhang Ge^{1*}

¹Key Laboratory of Optoelectronic Materials Chemistry and Physics, Fujian Institute of Research on Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract We investigate the room-temperature Raman spectrum of monoclinic monazite-type LaVO₄ (m-LaVO₄) crystal and report a diode end-pumped intracavity actively Q-switched m-LaVO₄ Raman laser. In this experiment, a fiber-coupled diode laser (LD) with a wavelength of 808 nm is used as a pumping excitation source, a Nd:YAG crystal is used as a gain medium for generating a fundamental-frequency laser, and a quartz-acoustic-acoustic Q-switch is used as an active Q-switched component. A compact Fabry-Perot cavity composed by two Fabry-Perot mirrors produces a first-order Stokes pulsed laser with a wavelength of 1170.9 nm. When the input pump power is 6.51 W and the pulse repetition frequency is 30 kHz, the experiment produces the first-order Stokes laser with a maximum average power of 767 mW, the corresponding pulse width of 13.8 ns, the single pulse energy of 25.6 μJ and the peak power of 1.85 kW.

Key words lasers; Raman lasers; actively Q-switched lasers; m-LaVO₄ crystal; solid-state lasers

OCIS codes 140.3480; 140.3550; 140.3540

1 引 言

基于材料三阶非线性效应的受激拉曼散射(SRS)作为一种有效的非线性频率变换技术已被广泛应用于扩展全固态激光器的工作光谱范围^[1-4],尤其是扩展那些难以直接获得激光振荡的光谱区^[5]。2000 年以前常用的晶体拉曼介质主要是硝酸盐[Ba(NO₃)₂]^[3]、碘酸盐(LiIO₃)^[6]以及钨酸盐[KGd

(WO₄)₂]^[7]等。2001 年俄罗斯科学家 Kaminskii 等^[8]在具有四方锆石结构(D_{4h}¹⁹-tetragonal zircon-type)的钒酸钇(t-YVO₄)和钒酸钆(t-GdVO₄)晶体中发现了有效的受激拉曼散射效应并实验测量了这两种钒酸盐晶体的稳态拉曼增益系数。此后基于 t-YVO₄ 和 t-GdVO₄ 晶体的全固态拉曼变频激光器的研究得到飞速发展,其光谱覆盖范围由可见光区扩展至中红外光谱区^[9-13]。由于 t-YVO₄ 和 t-

收稿日期: 2018-04-03; 修回日期: 2018-04-11; 录用日期: 2018-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(61575199,61775217,11404332)

* E-mail: zhg@fjirsm.ac.cn; ** E-mail: 1187584129@qq.com

GdVO₄ 晶体是适合三价钕离子(Nd³⁺)掺杂的优质激光基质材料,因此稀土离子掺杂的 Nd³⁺:YVO₄ 和 Nd³⁺:GdVO₄ 激光晶体同时又成为性能优异的自拉曼增益晶体^[14-16],被应用于全固态激光器,以获得黄、橙色激光发射(550~600 nm),并成功应用于眼科治疗^[17-20]。

目前对新型钒酸盐拉曼晶体的探索大多基于四方锆石结构的 REVO₄,这里 RE 代表钇(Y)、钆(Gd)和镱(Lu),例如 LuVO₄^[19]、Lu_xGd_{1-x}VO₄^[21]及 Y_xGd_{1-x}VO₄^[22]等。2014 年俄罗斯科学家 Kaminskii 等^[23]报道了一种新颖的具有高稳态拉曼增益系数的钒酸镧晶体(LaVO₄)。钒酸镧是一种具有单斜独居石结构的单轴晶体(m-LaVO₄)。它的空间群为 C_{2h}⁵-C2₁/c(No. 14)。目前所有关于单斜钒酸镧(m-LaVO₄)晶体拉曼激光变频性能的研究主要集中于使用脉冲宽度为皮秒(ps)或飞秒(fs)量级的超短脉冲激光腔外抽运 m-LaVO₄ 晶体^[24-26],迄今为止,在使用 m-LaVO₄ 晶体的全固态激光器中开展内腔式拉曼激光变频实验的相关报道甚少。本文使用 m-LaVO₄ 晶体作为内腔式脉冲拉曼激光振荡器的拉曼增益介质,使用主动调 Q 的 Nd:YAG 晶体激光器作为基频光源,构建结构紧凑的直线型法布里-珀罗拉曼平凹谐振腔,获得了有效的一阶斯托克斯脉冲激光振荡。

2 m-LaVO₄ 晶体的拉曼光谱性能研究

表 1 列举了几种常见的钒酸盐拉曼晶体在室温下由 1 μm 波长激发的稳态拉曼增益系数。从表中可知:m-LaVO₄ 晶体的稳态拉曼增益系数为 G_R ≥ 4.8 cm/GW,高于其他四方锆石结构的 REVO₄ 晶体。因此 m-LaVO₄ 晶体有望在全固态拉曼变频激光器中获得重要应用。

表 1 室温稳态拉曼增益系数(1-μm 激发)

Table 1 Steady-state Raman gain coefficients at room temperature pumping at 1 μm

Crystal	G _R at 1 μm / (cm · GW ⁻¹)	Ref.
t-YVO ₄ ^[8]	≥4.5	[8]
t-GdVO ₄ ^[8]	≥4.5	[8]
t-LuVO ₄ ^[24]	≥3.2	[26]
m-LaVO ₄ ^[23]	≥4.8	[23]

本实验使用的是由中国科学院福建物质结构研究所采用提拉法生长的 m-LaVO₄ 晶体。晶体的生长方法与 Nd:LaVO₄ 晶体的生长方法类似,具体可见参考文献^[27]。本实验关于 m-LaVO₄ 晶体的拉

曼光谱性能的研究主要是在室温条件下使用 532 nm 的连续激光激发 m-LaVO₄ 晶体并使用 Horiba 公司的紫外可见红外显微共焦拉曼光谱仪(Labram HR800 Evolution)测量其室温拉曼光谱,实验测量的拉曼光谱数据如图 1 所示。

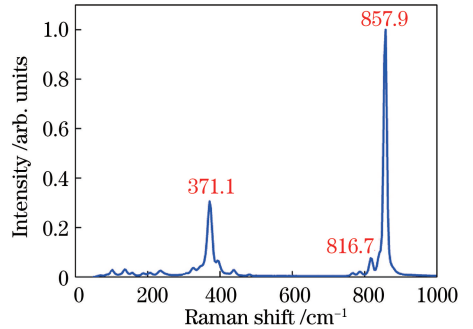


图 1 m-LaVO₄ 晶体的室温拉曼光谱

Fig. 1 Room temperature Raman spectrum of m-LaVO₄ crystal

拉曼光谱测量过程采用后向拉曼散射模式,拉曼光谱仪的光谱分辨率小于等于 0.65 cm⁻¹。由 m-LaVO₄ 的晶体结构可知,组成 m-LaVO₄ 晶体原胞的 24 个原子拥有 72 个振动自由度 Γ₇₂。这些自由度可由 C_{2h} 点群的不可简化中心布里渊区表示,即

$$\Gamma_{72} = 18A_g + 18B_g + 18A_u + 18B_u, \quad (1)$$

式中有 36 个拉曼增益模,即 Γ₃₆ = 18A_g + 18B_g。从图 1 可以看出,其中较强的拉曼频移 ω_{SRS1} = 857.9 cm⁻¹来自 V—O 键的对称伸缩振动 A_g(ν₁);而其中较弱的拉曼频移 ω_{SRS2} = 371.1 cm⁻¹来自 m-LaVO₄ 晶体的钒酸根离子(VO₄³⁻)四面体内部的对称伸缩振动 B_g/A_g(ν₄)^[28]。由于晶体的稳态拉曼增益直接正比于拉曼光谱的峰值强度^[29],因此可以预测将 m-LaVO₄ 晶体作为全固态激光器的拉曼增益介质时,产生的一阶斯托克斯频移的主要贡献将来自于较强的斯托克斯频移 ω_{SRS1} = 857.9 cm⁻¹。

3 实验装置

主动调 Q 内腔式 Nd:YAG/m-LaVO₄ 脉冲拉曼激光器的实验装置如图 2 所示。实验使用钕离子(Nd³⁺)掺杂分数为 1%、长度为 10 mm 的 Nd:YAG 晶体(3 mm × 3 mm × 10 mm)作为基频激光的增益介质;古奇休斯古公司(GOOCH & HOUSEGO)生产的融石英声光调 Q 器(AOM)作为腔内主动调 Q 元件(融石英晶体前后表面镀有光

学增透膜,镀膜参数为 AR@1000~1200 nm,反射率 $R < 0.1\%$)以及长度为 10 mm 的 m-LaVO₄ 晶体为拉曼增益介质 (m-LaVO₄ 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 10 mm, 晶体前后端面仅抛光未镀增透膜)。

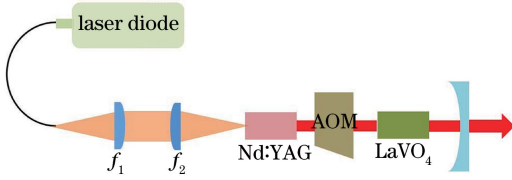


图 2 主动调 Q 内腔式 Nd:YAG/m-LaVO₄ 拉曼激光器的实验装置

Fig. 2 Experimental configuration of actively Q-switched Nd:YAG/m-LaVO₄ Raman laser

拉曼变频激光实验采用波长为 808 nm 的光纤耦合半导体激光器作为 Nd:YAG 晶体的抽运光源产生基频光。光纤的数值孔径为 $NA = 0.22$, 芯径为 200 μm 。抽运光被焦距为 $f_1 = 15$ mm 的非球面透镜准直后再被焦距为 $f_2 = 25$ mm 的球面透镜聚焦到 Nd:YAG 晶体内部。抽运光在晶体内部的焦平面的光束直径约为 333 μm , 实验测量并计算得到此时抽运光的共焦参数, 即 15 mm。本实验采用紧凑的两镜法布里-珀罗平凹谐振腔设计。其中抽运注入镜直接镀膜在 Nd:YAG 晶体上以减少光学元件的插入损耗, 其镀膜参数为抽运波长高透 (HT@800~900 nm, 透射率 $T > 98\%$) 且基频光与一阶斯托克斯光高反 (HR@1000~1200 nm, $R > 99.9\%$)。输出耦合镜是曲率半径 $\rho_{oc} = 200$ mm 的平凹光学镜片, 其镀膜参数为基频光高反 (HR@1000~1100 nm, $R > 99.9\%$) 以及一阶斯托克斯激光部分透过 (PR@1100~1200 nm, $T = 15\%$)。谐振腔的物理总腔长为 65 mm, 基频光与一阶斯托克斯激光共享相同的物理腔长。实验过程中激光晶体和拉曼晶体分别包裹铝箔后放入冷却铜块进行散热, 铜块由半导体温控仪控温并维持在 293 K。

4 实验结果与分析

实验过程中, Nd:YAG 晶体受到半导体抽运光激发, 通过融石英声光调 Q 器的损耗调制, 首先在谐振腔内产生波长为 1064 nm 的基频脉冲激光振荡。由于谐振腔镜的镀膜参数对基频激光的反射率大于 99.9%, 即谐振腔对基频激光而言是低损高 Q 腔。当在基频光的高 Q 腔内放置 m-LaVO₄ 晶体时, 基频激光能够在较低的抽运功率下通过

m-LaVO₄ 晶体的非线性受激拉曼散射效应产生一阶斯托克斯脉冲激光。产生的一阶斯托克斯激光在法布里-珀罗谐振腔内谐振增强, 最终获得有效的一阶斯托克斯脉冲激光输出。

图 3 为实验测量的主动调 Q 内腔式 Nd:YAG/m-LaVO₄ 脉冲拉曼激光器在脉冲重复率为 30 kHz 时的功率曲线。当半导体激光器的抽运功率为 6.51 W, 融石英声光调 Q 器运转在 30 kHz 的损耗调制频率时, Nd:YAG/m-LaVO₄ 拉曼激光器产生最高的一阶斯托克斯脉冲激光的平均输出功率为 767 mW。相应的半导体激光到一阶斯托克斯激光的光光转换效率为 11.8%。从实验结果可知, 由于 m-LaVO₄ 晶体未镀增透膜, 晶体前后端面由于菲涅耳表面反射产生了 14% 的额外损耗, 因此导致产生的一阶斯托克斯脉冲激光具有较高的抽运阈值 (3.67 W)。

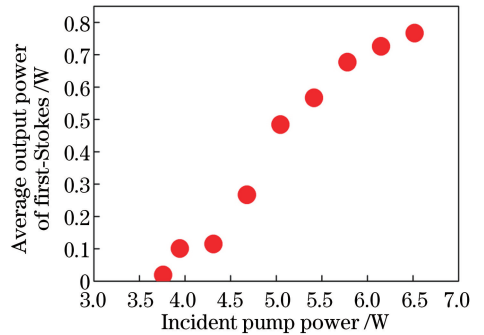


图 3 主动调 Q 内腔式 Nd:YAG/m-LaVO₄ 拉曼激光器的功率曲线

Fig. 3 Power scaling characteristic of actively Q-switched Nd:YAG/m-LaVO₄ Raman laser

图 4 为使用 Zolix Monochromator Spectrograph 光栅光谱仪 (model Omni- λ 500, 分辨率大于等于 0.07 nm) 在最大平均输出功率下测量

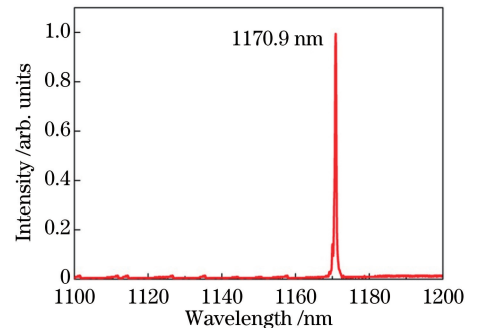


图 4 主动调 Q 内腔式 Nd:YAG/m-LaVO₄ 拉曼激光器的一阶斯托克斯脉冲激光发射谱

Fig. 4 First-Stokes laser spectrum of actively Q-switched Nd:YAG/m-LaVO₄ Raman laser

的主动调 Q 内腔式 Nd:YAG/m-LaVO₄ 拉曼激光器一阶斯托克斯脉冲激光的发射光谱。由图 4 可知,一阶斯托克斯激光的中心波长为 1170.9 nm,是 1064 nm 基频激光由 m-LaVO₄ 晶体的频移量 $\omega_{\text{SRSI}} = 857.9 \text{ cm}^{-1}$ 所产生的非线性拉曼频移。在整个实验抽运功率范围内没有观测到其他波长的斯托克斯激光分量。由图 2 的室温拉曼光谱数据可知, m-LaVO₄ 晶体的 $\omega_{\text{SRSI}} = 857.9 \text{ cm}^{-1}$ 斯托克斯频移分量具有较高的拉曼增益,因此基于此频移分量的一阶斯托克斯激光有更低的阈值,在一定抽运功率范围内主动调 Q 内腔式 Nd:YAG/m-LaVO₄ 脉冲拉曼激光器产生的一阶斯托克斯激光将主要来自于该拉曼频移分量的贡献。

图 5 为使用光电探测器 (ET-3500, >12.5 GHz) 与数字示波器 (Agilent DOS6102A, 1 GHz) 实验测量得到的主动调 Q 内腔式 Nd:YAG/m-LaVO₄ 拉曼激光器一阶斯托克斯脉冲激光的时间波形数据。实验观测可知,一阶斯托克斯激光的单脉冲半峰全宽随着平均输出功率的增加而减小。图 5 (a) 为在最大平均输出功率下测量得到的波长为 1170.9 nm 的一阶斯托克斯激光的单脉冲波形图。当抽运功率为 6.51 W, 脉冲重复率为 30 kHz 时,一阶斯托克斯激光的最短脉冲宽度 τ 为 13.8 ns。由此可以计算出实验获得的一阶斯托克斯脉冲激光的最大单脉冲能量为 25.6 μJ , 相应的最高脉冲峰值功率为 1.85 kW。图 5 (b) 为实验测量 2 s 时间范围内的一阶斯托克斯激光的脉冲序列。实验结果表明,主动调 Q 内腔式 Nd:YAG /

m-LaVO₄ 拉曼激光器产生的一阶斯托克斯脉冲激光具有较好的脉冲稳定性。此外,通过测量输出耦合镜对 1064 nm 的基频漏光 (<5 mW) 可以观测到明显的由拉曼变频导致的脉冲压缩现象^[30]。由示波器在最高输出功率下测量的结果可知,当基频光的脉冲半峰全宽为 50 ns 时,产生的一阶斯托克斯激光的脉冲半峰全宽为 13.8 ns。实验测量的脉冲半峰全宽的波动小于 20%, 脉冲序列不稳定性小于 10%。

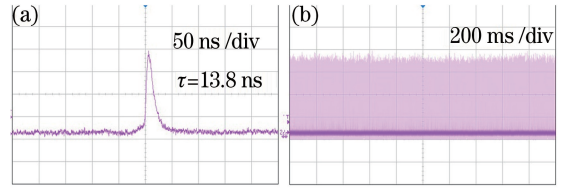


图 5 一阶斯托克斯脉冲激光的时域波形。
(a) 单脉冲时间波形; (b) 2 s 时间尺度的脉冲序列

Fig. 5 Temporal traces for first-Stokes laser.

- (a) Temporal trace of single pulse;
- (b) pulse train with time span of 2 s

通过测量拉曼变频过程的基频漏光与一阶斯托克斯激光的光束质量因子可以观测到明显的拉曼光束净化现象,即拉曼变频后产生的一阶斯托克斯激光的光束质量明显优于基频光的光束质量^[31]。图 6 为实验测量的基频光与一阶斯托克斯激光的光束质量因子。在最高输出功率下测量得到基频光的光束质量因子 $M_{x,F}^2 \times M_{y,F}^2 = 1.75 \times 1.68$, 此时产生的一阶斯托克斯激光具有近高斯分布的光束质量因子 $M_{x,S}^2 \times M_{y,S}^2 = 1.15 \times 1.17$ 。

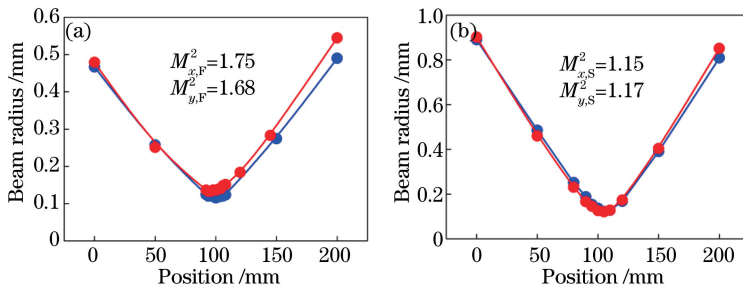


图 6 测量的激光光束质量因子 (M^2)。 (a) 基波; (b) 一阶斯托克斯激光

Fig. 6 Results of beam quality factor (M^2). (a) Fundamental beam; (b) first-Stokes beam

实验在脉冲重复率为 30 kHz 的条件下获得了较为稳定的一阶斯托克斯激光振荡。但是随着实验过程进一步降低声光调 Q 器的损耗调制频率 (<30 kHz), 在 m-LaVO₄ 晶体内部出现了光学损伤。因此实验并未在其他脉冲重复率下继续优化一阶斯托克斯脉冲激光的输出性能。出现光学损伤的

主要原因可能来自于 m-LaVO₄ 晶体较低的热导 ($\kappa < 3.3 \text{ W/mK}$)^[23] 以及由实验用的 m-LaVO₄ 晶体内部质量不均匀导致的弱吸收损耗。虽然在低于 30 kHz 脉冲重复率下 m-LaVO₄ 晶体出现了光学损伤,但此次基于 m-LaVO₄ 晶体的内腔式拉曼变频实验结果表明,在优化晶体质量后 m-LaVO₄ 有

望成为一种极具应用前景的高增益拉曼变频晶体。

5 结 论

开展了基于 $m\text{-LaVO}_4$ 晶体的室温拉曼光谱性能的研究和相应的主动调 Q 内腔式拉曼激光变频的性能研究。主动调 Q 内腔式 $m\text{-LaVO}_4$ 拉曼激光器使用 Nd:YAG 晶体作为基频激光的增益介质, 石英声光调 Q 器作为腔内主动调 Q 元件, 在抽运功率为 6.51 W、调 Q 器运转在 30 kHz 损耗调制频率时, 获得了最高平均功率为 767 mW、波长为 1170.9 nm 的一阶斯托克斯脉冲激光。产生的一阶斯托克斯激光的主要贡献来自于较强的拉曼频移 $\omega_{\text{SRSL}} = 857.9 \text{ cm}^{-1}$ 。此时产生最短的一阶斯托克斯的脉冲宽度为 13.8 ns, 相应的单脉冲能量为 25.6 μJ , 峰值功率为 1.85 kW。在基于 $m\text{-LaVO}_4$ 晶体的拉曼变频实验过程中, 观测到了明显的拉曼变频导致的脉冲压缩现象和拉曼光束净化现象。进一步优化 $m\text{-LaVO}_4$ 的晶体质量并使用镀增透膜的晶体, 有望进一步优化一阶斯托克斯脉冲激光的平均输出功率和脉冲能量。实验结果表明, $m\text{-LaVO}_4$ 晶体是一种极具应用前景的高增益拉曼变频晶体, 配合不同增益光谱的激光晶体和二阶非线性晶体, 能够有效地扩展全固态激光器的发射光谱范围(从可见光到中红外光谱区)。

参 考 文 献

- [1] Feng Y, Jiang H W, Zhang L. Advances in high power Raman fiber laser technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201005.
冯衍, 姜华卫, 张磊. 高功率拉曼光纤激光器技术研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201005.
- [2] Xu H, Dai S X, Zhang P Q, *et al.* Research progress in chalcogenide glass Raman fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 030004.
徐航, 戴世勋, 张培晴, 等. 硫系拉曼光纤激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 030004.
- [3] Pask H M. The design and operation of solid-state Raman lasers[J]. Progress in Quantum Electronics, 2003, 27(1): 3-56.
- [4] Wang P, Ma T, Slipchenko M N, *et al.* High-speed intravascular photoacoustic imaging of lipid-laden atherosclerotic plaque enabled by a 2-kHz barium nitrite Raman laser[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6889.
- [5] Pask H M, Dekker P, Mildren R P, *et al.* Wavelength-versatile visible and UV sources based on

- crystalline Raman lasers [J]. Progress in Quantum Electronics, 2008, 32(3/4): 121-158.
- [6] Pask H M, Myers S, Piper J A, *et al.* High average power, all-solid-state external resonator Raman laser [J]. Optics Letters, 2003, 28(6): 435-437.
- [7] Pask H M, Piper J A. Efficient all-solid-state yellow laser source producing 1.2 W average power [J]. Optics Letters, 1999, 24(21): 1490-1492.
- [8] Kaminskii A A, Ueda K I, Eichler H J, *et al.* Tetragonal vanadates YVO_4 and GdVO_4 : new efficient $\chi^{(3)}$ -materials for Raman lasers [J]. Optics Communications, 2001, 194(1/2/3): 201-206.
- [9] Mildren R P, Pask H M, Ogilvy H, *et al.* Discretely tunable, all-solid-state laser in the green, yellow, and red [J]. Optics Letters, 2005, 30(12): 1500-1502.
- [10] Shen H B, Wang Q P, Zhang X Y, *et al.* Simultaneous dual-wavelength operation of Nd:YVO₄ self-Raman laser at 1524 nm and undoped GdVO₄ Raman laser at 1522 nm [J]. Optics Letters, 2012, 37(19): 4113-4115.
- [11] Su K W, Chang Y T, Chen Y F. Efficient high-peak-power diode-pumped actively Q-switched Nd:YAG/YVO₄ intracavity Raman laser [J]. Applied Optics, 2008, 47(35): 6675-6679.
- [12] Jiang W, Zhu S Q, Chen W D, *et al.* Q-switched Yb:YAG/YVO₄ Raman laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(10): 1080-1083.
- [13] Jiang W, Zhu S Q, Chen X Z, *et al.* Compact passively Q-switched Raman laser at 1176 nm and yellow laser at 588 nm using Nd³⁺:YAG/Cr⁴⁺:YAG composite crystal [J]. Applied Optics, 2014, 53(7): 1328-1332.
- [14] Cheng P, Zhao J Q, Xu F, *et al.* Diode-pumped mid-infrared YVO₄ Raman laser at 2418 nm [J]. Applied Physics B, 2017, 124(1): 5.
- [15] Chen Y F. High-power diode-pumped actively Q-switched Nd:YVO₄ self-Raman laser: influence of dopant concentration [J]. Optics Letters, 2004, 29(16): 1915-1917.
- [16] Chen Y F. Efficient 1521-nm Nd:GdVO₄ Raman laser [J]. Optics Letters, 2004, 29(22): 2632-2634.
- [17] Kisel V E, Troshin A E, Tolstik N A, *et al.* Q-switched Yb³⁺:YVO₄ laser with Raman self-conversion [J]. Applied Physics B, 2005, 80(4/5): 471-473.
- [18] Lee A J, Spence D J, Piper J A, *et al.* A wavelength-versatile, continuous-wave, self-Raman solid-state laser operating in the visible [J]. Optics Express, 2010, 18(19): 20013-20018.
- [19] Lee A J, Pask H M, Spence D J, *et al.* Efficient 5.3 W CW laser at 559 nm by intracavity frequency

- summation of fundamental and first-Stokes wavelengths in a self-Raman Nd:GdVO₄ laser [J]. Optics Letters, 2010, 35(5): 682-684.
- [20] Mota A D, Rossi G, Ortega T A, *et al.* Strategies to run an ophthalmological CW self-Raman laser in micro-second pulsed laser regime[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference, 2011: CA_P33.
- [21] Ortega T A, Mota A D, Rossi G, *et al.* Very compact and high-power CW self-Raman laser for ophthalmological applications [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7578: 757822.
- [22] Kaminskii A A, Rhee H, Eichler H J, *et al.* New $\chi^{(3)}$ -nonlinear-laser manifestations in tetragonal LuVO₄ crystal: more than sesqui-octave Raman-induced Stokes and anti-Stokes comb generation and cascaded self-frequency “tripling” [J]. Applied Physics B, 2008, 93(4): 865-872.
- [23] Kaminskii A A, Yu H, Zhang H, *et al.* Monoclinic m-LaVO₄: a novel high Raman gain SRS-active crystal[J]. Laser Physics, 2014, 24(12): 125803.
- [24] Yoneda H, Yu H, Zhang H, *et al.* Raman-induced impulsive Stokes lasing in novel SRS-active monoclinic m-LaVO₄ crystal [J]. Physica Status Solidi (RRL) - Rapid Research Letters, 2014, 9(1): 72-76.
- [25] Kaminskii A A. Femtosecond SRS-generation of coherent optical phonons in vanadate crystals m-LaVO₄ and t-GdVO₄ (SRS-phononics of the crystals) [J]. Doklady Physics, 2016, 61(5): 207-210.
- [26] Kaminskii A A, Lux O, Rhee H, *et al.* New manifestations of $\chi^{(3)}$ -nonlinear laser interactions in tetragonal LuVO₄ and YbVO₄ crystals attractive for SRS-converters and self-Raman lasers [J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(12): 879-887.
- [27] Zhang L Z, Hu Z S, Lin Z B, *et al.* Growth and spectral properties of Nd³⁺:LaVO₄ crystal [J]. Journal of Crystal Growth, 2004, 260 (3/4): 460-463.
- [28] Miller S A, Caspers H H, Rast H E. Lattice vibrations of yttrium vanadate[J]. Physical Review, 1968, 168(3): 964-969.
- [29] Basiev T T, Sobol A A, Zverev P G, *et al.* Raman spectroscopy of crystals for stimulated Raman scattering[J]. Optical Materials, 1999, 11(4): 307-314.
- [30] Nakashima T, Nakazawa M, Nishi K, *et al.* Effect of stimulated Raman scattering on pulse-compression characteristics[J]. Optics Letters, 1987, 12 (6): 404-406.
- [31] Reintjes J, Lehmberg R H, Chang R S F, *et al.* Beam cleanup with stimulated Raman scattering in the intensity-averaging regime [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1986, 3(10): 1048.