

端面抽运 Nd:YAP/YVO₄ 被动调 Q 1.2 μm 拉曼激光

张立^{1,2}, 朱海永^{1*}, 孙瑛璐², 段延敏², 齐子钦¹, 阮秀凯¹, 程梦瑶²

(1. 温州大学 电气与电子工程学院, 浙江 温州 325035;

2. 温州大学 数理学院, 浙江 温州 325035)

摘要:报道了半导体激光端面抽运 Nd:YAP 晶体产生的 1080 nm 基频光驱动纯 YVO₄ 晶体的被动调 Q 拉曼激光特性。利用初始透过率 85% 的 Cr⁴⁺:YAG/YAG 复合晶体作为可饱和吸收体,以 a 切 YVO₄ 晶体的 890 cm⁻¹ 拉曼频移为研究对象,研究了一阶斯托克斯光的输出功率和脉冲特性。在抽运功率为 9.87 W 时,获得了平均输出功率 0.76 W 的 1195 nm 一阶斯托克斯光,转化效率为 7.7%。脉冲重复频率从阈值附近约 3.7 kHz 持续增加至 33.5 kHz。最高抽运功率下,脉冲宽度为 1.5 ns,对应最大单脉冲能量为 22.8 μJ,最高峰值功率为 15.2 kW。

关键词:被动调 Q; 拉曼激光; YVO₄ 晶体; Cr⁴⁺:YAG/YAG 复合晶体

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Diode-end-pumped passively Q-switched Nd:YAP/YVO₄ Raman laser at 1.2 μm

ZHANG Li^{1,2}, ZHU Hai-Yong^{1*}, SUN Ying-Lu², DUAN Yan-Min², QI Zi-Qin¹, RUAN Xiu-Kai¹, CHENG Meng-Yao²

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;

2. College of Mathematics and Physics, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: The output characteristics of passively Q-switched YVO₄ Raman laser derived by a diode end-pumped Nd:YAP laser at 1080 nm was investigated. A Cr⁴⁺:YAG/YAG composite crystal with an initial transmittance of 85% was used as saturable absorber. The first-Stokes wave output power and pulse characteristics based on a-cut YVO₄ crystal with the Raman shift of 890 cm⁻¹ were studied. Under an incident pump power of 9.87 W, the average output power of 0.76 W and conversion efficiency of 7.7% were obtained for the first-Stokes wave. The pulse repetition frequency rose from 3.7 to 33.5 kHz as the incident pump power increased from threshold to 9.87 W. The pulse width was about 1.5 ns at the maximum incident pump power. Therefore, the corresponding maximum single pulse energy and peak power were 22.8 μJ and 15.2 kW, respectively.

Key words: passively Q-switched, Raman laser, YVO₄ crystal, Cr⁴⁺:YAG/YAG composite crystal

PACS: 42.55. Xi, 42.55. Ye, 42.60. Gd

引言

受激拉曼散射(SRS)是一种产生新型激光波长的高效非线性频率变换技术。随着近些年固体激光技术的迅速发展,很多材料被发现可作为固体拉

曼增益介质。其中钒酸盐晶体 VO₄³⁻ 离子基团的 A_{1g} 振动模对应较窄的拉曼谱宽和较强的拉曼增益受到广泛关注。YVO₄ 晶体作为最具有代表性的钒酸盐晶体之一,具备较成熟的生长技术而被广泛运用于固体拉曼变频领域。2001年, Kaminskii 等人首先

收稿日期: 2019-12-30, 修回日期: 2020-04-17

Received date: 2019-12-30, Revised date: 2020-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(61505147), 浙江省自然科学基金(LY19F050012), 温州市公益性科技计划项目(G20180013)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61505147), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LY19F050012), the Public welfare projects of Wenzhou city (G20180013).

作者简介(Biography): 张立(1994-), 男, 湖北安陆人, 硕士研究生, 主要研究新型固体激光器. E-mail: zl735564281@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: hyzhu.opt@gmail.com

发现了YVO₄晶体是一种优秀的拉曼晶体,并对其拉曼光谱分析表明其在1 μm波长激光激发时对应的最强拉曼频移为890 cm⁻¹,拉曼增益系数大于4.5 cm/GM^[1]。钕离子掺杂的Nd:YVO₄因同时具有较大的受激吸收和受激发射截面,所以也是优秀的自拉曼晶体^[2-4]。2004年中国台湾国立交通大学Chen等人首次报道了由半导体激光(LD)端面抽运的被动调Q Nd:YVO₄自拉曼激光输出^[5]。基于c切Nd:YVO₄的自拉曼获得了波长为1178.6 nm的一阶斯托克斯光输出,对应的最大平均输出功率为125 mW,从抽运光到拉曼光的转换效率为6.3%。近些年,基于Nd:YVO₄晶体的自拉曼激光已有较多报道^[6-9]。自拉曼结构可以使激光系统更加紧凑高效,但其调整灵活度较差,拉曼输出波长比较固定。此外,自拉曼激光系统中,增益介质叠加了激光产生和拉曼过程的热沉积,有更严重的热效应。相比较而言,将激光晶体和拉曼晶体分开的分离结构拉曼激光系统可以对腔内激光和拉曼光进行针对性优化^[10-12]。还可有效避免自拉曼激光系统在高功率抽运时自拉曼晶体上严重的热效应,提高了激光系统稳定性。此外,通过激光晶体和拉曼晶体的灵活组合可丰富激光器的拉曼输出波长。目前常见的用于LD抽运的掺Nd³⁺激光晶体(如Nd:YAG和Nd:YVO₄)对应1.0 μm波段⁴F_{3/2}到⁴I_{11/2}能级间最强跃迁的发射波长较多的集中在1.06 μm,基于YVO₄晶体的890 cm⁻¹拉曼频移得到一阶斯托克斯光波长为1.18 μm^[13-15]。而Nd:YAP晶体对应⁴F_{3/2}到⁴I_{11/2}能级间最强跃迁的发射波长为1080 nm^[16],通过890 cm⁻¹拉曼频移可使一阶斯托克斯光波长拓展到1.2 μm。天津大学的Liu等人近期报道了一种LD端面抽运双激光晶体的主动调Q YVO₄单腔拉曼激光系统,以Nd:YAP晶体和Nd:YAG晶体产生的波长为1079 nm和1064 nm的激光作为基频光,结合YVO₄中890 cm⁻¹拉曼频移获得了1195 nm和1176 nm的双波长激光输出^[17]。1.2 μm一阶斯托克斯光还可进一步结合二阶非线性倍频获得在眼科医学、激光美容、激光显示和生物光子学等领域具有重要应用的600 nm附近波长的橙光^[18-19]。

Nd:YAP晶体相比于Nd:YVO₄等掺钕钒酸盐晶体具有更长的上能级荧光寿命,这一特性使其适用于产生高单脉冲能量和高峰值功率的调Q激光系统中。相对于主动调Q,被动调Q仅需在腔内插入对振荡激光具有可饱和吸收特性的材料,无需外部驱

动控制,具有结构简单、低成本、易操作的优点^[20-22]。本文研究了以Cr⁴⁺:YAG/YAG复合晶体作为可饱和吸收体,LD端面抽运Nd:YAP晶体产生的1080 nm激光作为基频光驱动纯YVO₄晶体的被动调Q拉曼激光特性。基于a切YVO₄晶体中890 cm⁻¹拉曼频移获得了1195 nm波长的一阶斯托克斯光输出。在抽运功率为9.87 W时,获得了0.76 W的平均输出功率,相应的光-光转化效率为7.7%。其中脉冲宽度为1.5 ns,重复频率为33.5 kHz。

1 实验装置设计

由YVO₄的拉曼光谱可知,其X(ZZ)X几何配置下的振动模对应较窄的拉曼谱宽和最强的拉曼增益,所以我们选用沿晶轴a轴切割(a切)的YVO₄晶体作为拉曼增益介质,研究基于其最强拉曼频移890 cm⁻¹的一阶斯托克斯激光输出特性。结合选择Nd:YAP晶体中⁴F_{3/2}到⁴I_{11/2}能级间最强跃迁发射的1080 nm激光作为基频光,以实现1.2 μm波段的一阶斯托克斯光输出。由于Nd:YAP晶体为正交晶系晶体,其光学各向异性特性决定了其产生的基频光是偏振光。为了满足YVO₄晶体的X(ZZ)X拉曼几何配置,Nd:YAP对应的基频光偏振方向设置为平行于YVO₄的光轴方向。为实现结构紧凑的调Q拉曼激光输出,选用可饱和吸收体调制的被动调Q技术。Cr⁴⁺:YAG晶体作为一种优秀的可饱和吸收体材料,具有基态吸收截面大、饱和光强小、损伤阈值高、物化性能稳定等优点,且在0.9~1.2 μm波段具有较宽的吸收带,所以十分适合用作钕离子掺杂增益介质固体激光器的Q开关材料。

LD端面抽运的Nd:YAP/YVO₄被动调Q拉曼激光实验装置如图1所示。实验中激光晶体选用沿晶轴b轴切割的截面直径为3.6 mm,长度为5.8 mm的圆柱型Nd:YAP晶体。被动调Q晶体(PQS)为

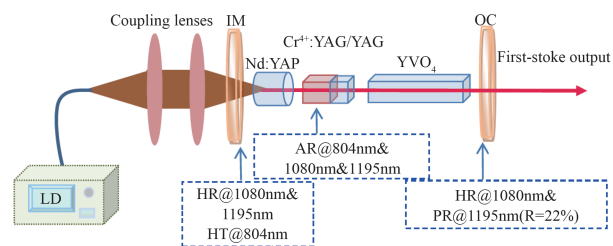


图1 LD端面抽运Nd:YAP/YVO₄被动调Q拉曼激光实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of the LD end-pumped passively Q-switched Nd:YAP/YVO₄ Raman laser

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}/\text{YAG}$ 复合晶体,在尺寸为 $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$,初始透过率 $T_0=85\%$ 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体右端面键合了一个尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的未掺杂 YAG 晶体以帮助其从端面散热。拉曼增益介质为尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的 a 切 YVO_4 晶体。实验中所用的激光晶体、拉曼晶体、可饱和吸收体的两端面都镀有对基频光 1080 nm 和一阶斯托克斯光 1195 nm 的增透膜,并分别用铝箔紧密包裹并置于水冷铜块进行散热,晶体表面温度控制在 20°C 左右。抽运光源是中心波长为 804 nm 的光纤耦合半导体激光器(光纤的数值孔径为 0.22 ,芯径为 $200 \mu\text{m}$)。光纤输出的抽运光经一对焦距分别为 50 mm 和 80 mm 的色散补偿透镜组成的耦合系统后聚焦成束腰直径约为 $320 \mu\text{m}$ 的光斑,再入射到 $\text{Nd}:\text{YAP}$ 晶体中。为使抽运光更充分的入射到激光晶体中, $\text{Nd}:\text{YAP}$ 晶体两端面镀的介质膜同时对 804 nm 增透射。输入镜 IM 为平面镜,镀对抽运光高透 ($T>90\%$),对基频光高反 ($R>99.9\%$) 和一阶斯托克斯光高反 ($R>99.9\%$) 的介质膜。输出镜 OC 为曲率半径为 200 mm 的平凹镜,镀对基频光高反 ($R>99.9\%$) 和一阶斯托克斯光部分反射 ($R=22\%$) 的介质膜。由输入镜 IM 和输出镜 OC 构成基频光和一阶斯托克斯光共同的平凹腔结构振荡腔,腔内光路中的晶体元件相邻紧凑放置,总腔长为 6.4 cm 。根据实验中采用的腔结构,在设定热透镜焦距为 200 mm 的情况下,理论计算激光晶体上的基模光斑直径约为 $304 \mu\text{m}$,可较好的与抽运光斑匹配。 YVO_4 晶体不同位置的基模光斑直径在 295 到 $303 \mu\text{m}$ 之间。

2 实验结果与讨论

基于以上拉曼实验装置,对 LD 端面抽运 $\text{Nd}:\text{YAP}/\text{YVO}_4$ 被动调 Q 拉曼激光的输出特性进行了研究。对激光系统进行优化后,用分辨率为 0.05 nm 的光栅单色仪(ZOLIX,型号 Omni- $\lambda 500$)对输出激光光谱进行扫描测量,得到图 2 扫描范围为 $1050 \text{ nm}-1250 \text{ nm}$ 的谱线。在抽运功率为 9.87 W 时,仅探测到由 1079.5 nm 经过 890 cm^{-1} 频移得到的波长为 1194.5 nm 的一阶斯托克斯光,拉曼线宽约为 0.3 nm 。进一步测量了一阶斯托克斯光的输出功率,在基频光阈值附近就观察到有一阶斯托克斯光输出。图 3 给出了一阶斯托克斯光的平均输出功率随入射抽运功率的变化关系。拉曼阈值为 2.47 W ,拉曼光的平均输出功率随入射抽运功率呈近似线性增加。在抽运功率达到 9.87 W 时,获得了

0.76 W 的平均输出功率,对应的斜效率和光光转换效率分别为 9.8% 和 7.7% 。

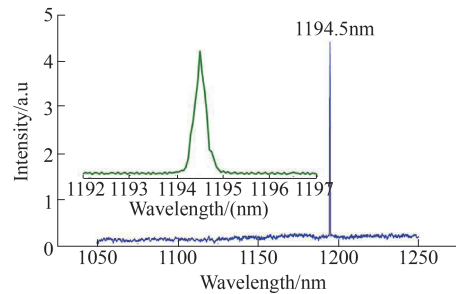


图 2 测量的拉曼激光输出光谱

Fig. 2 The measured laser output spectra

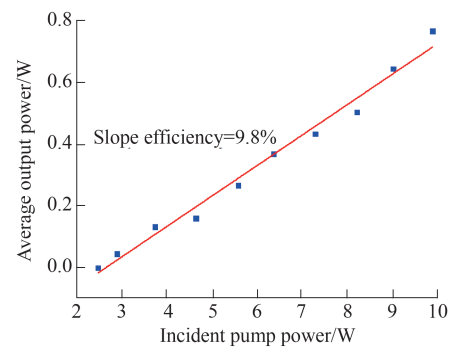


图 3 一阶斯托克斯光的平均输出功率随入射抽运功率的变化关系

Fig. 3 The average output power of the first-Stokes light versus incident pump power

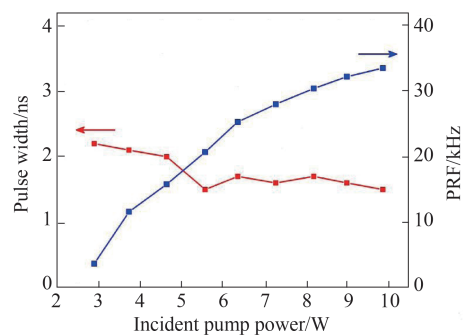


图 4 一阶斯托克斯光的脉冲宽度和脉冲重复频率随入射抽运功率的变化曲线图

Fig. 4 The pulse width and pulse repetition frequency (PRF) of the first-Stokes light versus incident pump power

进一步对被动调 Q 一阶斯托克斯光的脉冲特性进行了研究。用 5 GHz 自由空间铟砷化镓探测器来接收激光输出的脉冲信号,由带宽 500 MHz 泰克数字示波器(型号 DPO3052B)记录了 1195 nm 一阶斯托克斯光的脉冲波形和序列。图 4 给出了一阶斯托克斯光的脉冲宽度和脉冲重复频率 (PRF) 随入射抽

运功率的变化关系。抽运功率从拉曼阈值附近上升到9.87 W的过程中,一阶斯托克斯光的脉冲宽度在2.2~1.5 ns范围内小幅度波动。脉冲重复频率从阈值附近约3.7 kHz开始持续增加,在最高9.87 W抽运功率时达到33.5 kHz。脉冲重复频率随着入射抽运功率的增大而逐渐增加主要是因为入射抽运功率的升高加快了激光晶体上能级粒子数的积累速率,使腔内基频光子密度达到可饱和吸收体饱和光强的速度加快,因此减小了Cr⁴⁺:YAG被“漂白”的间隔,增大了脉冲重复频率。在被动调Q激光系统中,当抽运功率较低时,可饱和吸收体需要更长的吸收时间才能达到饱和,使得在阈值附近就可获得较高的峰值功率,降低了拉曼激光阈值^[23]。在抽运功率为9.87 W时,单脉冲能量和峰值功率可通过计算得到分别为22.8 μJ和15.2 kW。

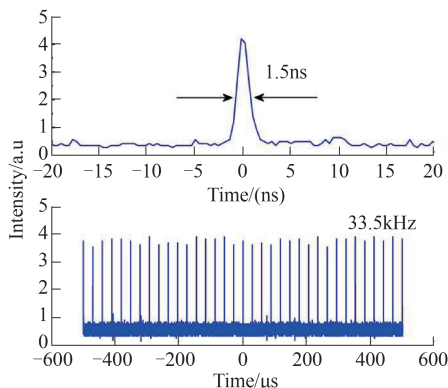


图5 在9.87 W入射抽运功率下一阶斯托克斯光的脉冲波形和序列

Fig. 5 The temporal pulse profiles and pulse trains of the first-Stokes light measured under an incident pump power of 9.87 W

图5给出了在抽运功率为9.87 W时测量到的一阶斯托克斯光的脉冲波形和脉冲序列。最高输出功率0.76 W时,对应测量到的脉冲重复频率为33.5 kHz,脉冲宽度为1.5 ns。脉冲波形形状较为对称。由于输出镜对一阶斯托克斯光反射率较小,增大了腔内损耗,光子寿命较短,产生巨脉冲后腔内光强衰减得快,所以脉冲下降沿较小,脉冲形状比较对称。刘永纳等对被动调Q拉曼光的这种脉冲波形形状作出了相应解释^[24]。从脉冲序列图可以看出,脉冲间隔比较均匀,脉冲幅度呈现小幅波动,对应的脉冲峰值不稳定性小于10%。考虑到拉曼脉冲宽度和脉冲重复频率等参数主要与可饱和吸收体的初始透过率 T_0 和输出镜OC对拉曼光的反射

率相关,减小 T_0 或者减小OC对拉曼光的反射率有利于进一步压缩脉冲宽度。同时由于腔内损耗增大,达到阈值的时间增加,脉冲间隔变大,脉冲重复频率会减少。根据对脉冲宽度等输出性能参数的不同要求,可以对应选择合适的可饱和吸收体初始透过率 T_0 和输出镜OC。

3 结论

对半导体激光端面抽运Nd:YAP/YVO₄被动调Q拉曼激光实验进行了研究。采用Cr⁴⁺:YAG/YAG复合晶体作为可饱和吸收体,以Nd:YAP晶体产生的1080 nm激光作为基频光,实现了基于a切纯YVO₄中890 cm⁻¹拉曼频移获得1195 nm波长的一阶斯托克斯光输出。实验中对被动调Q的一阶斯托克斯光的平均输出功率、光谱和脉冲等输出特性进行了测量和分析。在抽运功率为9.87 W时,获得了0.76 W的平均输出功率,对应的光-光转化效率为7.7%。脉冲宽度在2.2~1.5 ns范围内变化,脉冲重复频率从阈值附近约3.7 kHz持续增加到33.5 kHz。在最高平均输出功率0.76 W时,对应的脉冲宽度和重复频率分别为1.5 ns和33.5 kHz,所以对应最大单脉冲能量和峰值功率分别为22.8 μJ和15.2 kW。实验结果表明,被动调Q的Nd:YAP/YVO₄组合的拉曼可实现结构紧凑、高效的1.2 μm波段激光输出。

References

- [1] Kmainkii A A, Ueda K I, Eichler H J, *et al.* Tetragonal vanadates YVO₄ and GdVO₄— new efficient $\chi^{(3)}$ -materials for Raman lasers [J]. *Opt Communication*, 2001, **194**(1-3): 201-206.
- [2] Chen Y F, Pan Y Y, Liu Y C, *et al.* Efficient high-power continuous-wave lasers at green-lime-yellow wavelengths by using a Nd:YVO₄ self-Raman crystal [J]. *OPTICS EXPRESS*, 2019, **27**(3): 2029-2035.
- [3] Zhu H Y, Duan Y M, Zhang G, *et al.* Yellow-light generation of 5.7 W by intracavity doubling self-Raman laser of YVO₄/Nd:YVO₄ composite [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(18): 2763-2765.
- [4] Liu J, Ding X, Jiang P B, *et al.* High-performance second-Stokes generation of a Nd:YVO₄/YVO₄ Raman laser based on a folded coupled cavity [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(8): 10171-10178.
- [5] Chen Y F. Efficient subnanosecond diode-pumped passively Q-switched Nd:YVO₄ self-stimulated Raman laser [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(11):1251-1253.
- [6] Guo J H, Zhu H Y, Duan Y M, *et al.* Cascaded c-cut Nd:YVO₄ self-Raman laser operation with a single 259 cm⁻¹ shift [J], *Journal of Optics*, 2017, **19**(3): 035501.
- [7] Chen Y F, Liu Y C, Pan Y Y, *et al.* Efficient high-power

- dual-wavelength lime-green Nd:YVO₄ lasers [J]. *OPTICS LETTERS*, 2019, **44**(6): 1323-1326.
- [8] Zhu H Y, Guo J H, Duan Y M, *et al.* Efficient 1.7 μm light source based on KTA-OPO derived by Nd:YVO₄ self-Raman laser [J]. *Opt. Lett.*, 2018, **43**: 345-348.
- [9] Lin H Y, Huang X H, Sun D, *et al.* Compact efficient Cr:YAG passively Q-switched c-cut Nd:YVO₄ self-Raman laser [J]. *Journal of Optical Technology*, 2016, **83**(10): 590-592.
- [10] Chen S M, Cheng M Y, Zhu H Y, *et al.* Orange, yellow and green emissions generated in Q-switched Nd:YALO₃/YVO₄ Raman laser [J]. *Journal of Luminescence*, 2019, **214**:116555.
- [11] Zuo Z Y, Dai S B, Yin H, *et al.* Multi-watt simultaneous orthogonally polarized dual-wavelength pulse generation of an intracavity Nd:YLF/YVO₄ Raman laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, **11**(1): 1-8.
- [12] Zhou Q Q, Shi S C, Chen S M, *et al.* First-Stokes wavelengths at 1175.8 and 1177.1 nm generated in a diode end-pumped Nd:YVO₄/LuVO₄ Raman laser [J], *Chinese Physics Letters*, 2018, **36**:014205.
- [13] Wei L J, Chen M T, Zhu S Q, *et al.* A passively Q-switched YVO₄ Raman laser with orthogonally polarized emission at 1175.4 nm and 1165.2 nm [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, **15**(12): 125001.
- [14] Jiang P B, Ding X, Li B, *et al.* 9.80-W and 0.54-mJ actively Q-switched Nd:YAG/Nd:YVO₄ hybrid gain intracavity Raman laser at 1176 nm [J]. *Optics Express*, 2017, **25**(4): 3387-3393.
- [15] Liu J, Ding X, Jiang P B, *et al.* 10.3-W actively Q-switched Nd:YVO₄/YVO₄ folded coupled-cavity Raman laser at 1176 nm [J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(12): 3154-3158.
- [16] Duan Y M, Zhu H Y, Zhang Y C, *et al.* RbTiOPO₄ cascaded Raman operation with multiple Raman frequency shifts derived by Q-switched Nd:YAlO₃ laser [J], *Scientific Reports*, 2016, **6**: 33852.
- [17] Liu Y, Sheng Q, Zhong K, *et al.* Dual-wavelength intracavity Raman laser driven by a coaxially pumped dual-crystal fundamental laser [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(20): 27797.
- [18] Mao T W, Duan Y M, Chen S M, *et al.* Yellow and orange light selectable output generated by Nd:YAP/YVO₄/LBO Raman laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, **31**(13): 1112-1115.
- [19] Duan Y M, Sun Y L, Zhu H Y, *et al.* YVO₄ cascaded Raman laser for five-visible-wavelength switchable emission [J]. *Optics Letters*, 2020, **45**: 2564-2567.
- [20] Wang B L, Yu H H, Zhang H J. Passively Q-switched 1.33 μm Nd:LuYSGG laser with V³⁺:YAG as the saturable absorber [J]. *Laser Physics Letters*, 2019, **16**(1): 015801.
- [21] Jiang W, Li Z, Zhu S Q, *et al.* YVO₄ Raman laser pumped by a passively Q-switched Yb:YAG laser [J]. *OPTICS EXPRESS*, 2017, **25**(13): 14033-14042.
- [22] Lin H Y, Liu H, Huang X H, *et al.* Continuous-wave and passively Q-switched Nd:YVO₄ laser at 1085 nm [J]. *OPTICAL ENGINEERING*, 2017, **56**(11): 116118.
- [23] Duan Y M, Zhang J, Zhu H Y, *et al.* Compact passively Q-switched RbTiOPO₄ cascaded Raman operation [J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(19): 4550-4553.
- [24] LIU Yong-Na, JIANG Fei-Hong, WANG Shu-Mei, *et al.* LD-pumped passively Q-switched c-cut Nd:YVO₄ Self-Raman laser with Cr⁴⁺:YAG [J]. *Chinese Journal Of Lasers*, (刘永纳, 江飞虹, 王淑梅, 等. LD抽运 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q c-cut Nd:YVO₄ 自拉曼激光器. *中国激光*), 2012, **39**(7): 0702004.