

主动调Q Nd:YVO₄/KTP双波长同步脉冲拉曼激光器

齐佳莹, 李述涛*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年4月9日; 录用日期: 2024年5月23日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

实现了以a切Nd:YVO₄晶体为自拉曼介质, 以KTP晶体为另一种拉曼介质的二极管泵浦声光调Q双波长同步振荡拉曼激光器的高效运转, 获得了1096 nm和1176 nm激光的同步脉冲输出, 分别对应KTP晶体的267 cm⁻¹频移和YVO₄晶体的890 cm⁻¹位移的一阶斯托克斯光, 脉冲重复频率为10、20和30 kHz。当入射泵浦功率为9.16 W, PRF为30 kHz时, 由1096和1176 nm光源组成的拉曼激光平均输出最高为1.26 W, 其中含1096 nm激光1.05 W, 1176 nm激光0.21 W。

关键词

主动调Q, Nd:YVO₄, KTP, 拉曼激光器

Active Q-Switched Nd:YVO₄/KTP Dual-Wavelength Synchronized Pulse Raman Laser

Jiaying Qi, Shutao Li*

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Apr. 9th, 2024; accepted: May 23rd, 2024; published: May 31st, 2024

Abstract

Efficient operation of a diode-pumped acousto-optically Q-switched dual-wavelength synchronized oscillating Raman laser was achieved by utilizing an a-cut Nd:YVO₄ crystal as the self-Raman

*通讯作者。

medium and a KTP crystal as the other Raman medium. Synchronized pulse outputs at 1096 nm and 1176 nm, corresponding to the first-order Stokes light with a Raman shift of 267 cm^{-1} in the KTP crystal and a Raman shift of 890 cm^{-1} in the YVO_4 crystal, were obtained at pulse repetition frequencies of 10 kHz, 20 kHz, and 30 kHz. At an incident pump power of 9.16 W and a pulse repetition frequency of 30 kHz, the highest average output power of the Raman laser, consisting of 1096 nm and 1176 nm sources, reached 1.26 W, with 0.83 W for the 1096 nm laser and 0.43 W for the 1176 nm laser.

Keywords

Active Q-Switching, Nd:YVO₄, KTP, Raman Laser

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

固体拉曼激光器是一种实用且有效的激光器件,成为扩大固体激光器的光谱覆盖范围的重要手段[1]。以晶体作为拉曼介质的固体拉曼激光器可以生成较高的脉冲能量,稳定性好。基于受激拉曼散射(SRS)的非线性光学过程,获得双波长拉曼激光器的重要手段[2] [3] [4]。

Nd:YVO₄晶体具有受激发射面大、吸收带宽比较宽、吸收系数高及线偏振输出等优点,特别适合于LD泵浦,从而成为固体激光器领域应用最为广泛的激光晶体之一。2012年报道了a切Nd:YVO₄晶体用作自拉曼晶体和a切Nd:GdVO₄晶体作为另一个拉曼介质,同时脉冲振荡在1522 nm和1524 nm对应的拉曼的 882 cm^{-1} 和 890 cm^{-1} [5]。2013年,采用同样的方法,同时获得了1175 nm和1176 nm的双波长脉冲拉曼激光器[6]。用双波长连续波Nd:YVO₄激光器工作在1064.3 nm和1066.7 nm,泵浦功率为7.25 W,最大输出功率为1140 mW,光-光转换效率为15.7%,双波长线的谱线宽度分别为1.1 nm和1.2 nm [7]。该激光系统结构简单,结构紧凑,效率高。

磷酸钛钾(KTP)晶体是一种非线性光学材料,由于其具有高的二阶非线性系数、不潮解等优点,被广泛应用于和频[8] [9] [10]、倍频[11] [12] [13]和光参量振荡器[14] [15]。1980年G. A. Massey等人发现了KTP的拉曼效应,证明了KTP是一个可以有效刺激拉曼散射的介质,同时具有 270 cm^{-1} 和 692 cm^{-1} 拉曼频移,其中KTP在 270 cm^{-1} 时拉曼增益最强[16]。2006年Valdas Pasiskevicius等人报道了在KTP中观察到了高效的皮秒级声子SRS [17]。2013年苏富芳等人研究了1096 nm波长下LD腔内主动Q开关Nd:YAG/KTP拉曼激光器的特性。在脉冲重复频率为30 kHz的情况下,入射泵功率为11.75 W,平均功率为1.97 W [18]。这一结果表明,KTP晶体是一种很有前景的拉曼介质。

与被动调Q相比主动调Q的转换效率更高,2004年Y. F. Chen报道了二极管泵浦被动调Q Nd:GdVO₄激光器在2.0 W的入射泵浦功率下,自拉曼激光器在1175.6 nm波长下产生稳定的750 ps脉冲,在22 kHz脉冲重复频率下脉冲能量为6.3 μJ [19]。同年,Y. F. Chen报道了高效1521 nm Nd:GdVO₄拉曼激光器,在20 kHz的重复频率下,1521 nm的平均输出功率为1.18 W,对应的光-光转换效率为8.7% [20]。

本文中,声光调Q内腔式拉曼激光器中采用Nd:YVO₄作为自拉曼晶体,KTP作为拉曼晶体,实现1096 nm和1176 nm激光的同步振荡。当入射泵浦功率为9.16 W,PRF为30 kHz时,由1096和1176 nm光源组成的拉曼激光平均最高输出功率为1.26 W,其中含1096 nm激光0.83 W,1176 nm激光0.43 W。

2. 实验装置

图1 实验中选取 808 nm 波段的半导体激光器作为泵浦源, 其数值孔径(NA)为 0.22, 最大功率为 40 W, 光纤直径为 400 μm 。使用聚焦透镜系统将泵浦光的焦点聚集在激光晶体上。聚焦透镜组选用两个同样焦距的镜片, 使得耦合比为 1:1。采取凹平腔结构, 输入镜 M1 选择 3000 mm 曲率半径的凹面镜。平面一端在 808 nm ($R > 0.2\%$)处涂有高透膜(HT), 凹面一端在 1065~1178 nm ($R > 99.8\%$)处涂有高反膜(HR), 在 808 nm 处有高透膜(HT) ($T > 90\%$)。在 808 nm 处高透(HT) 808 nm ($T > 97\%$)。自拉曼介质采用 $3 \times 3 \times 15 \text{ mm}^3$ 0.3at.%掺杂 a 切的 Nd:YVO₄ 晶体。晶体两侧镀膜在 1064 nm~1176 nm 范围内增透($R < 0.2\% @ 1064 \text{ nm}$, $R < 0.5\% @ 1096 \sim 1176 \text{ nm}$), 且在 808 nm 高透($T > 97\%$)。另一个拉曼介质是尺寸为 $4 \times 4 \times 30 \text{ mm}^3$, 切割方向为 $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$ 的 KTP 晶体, 两侧镀膜在 1064~1178 nm 范围内增透($R < 0.2\% @ 1064 \text{ nm}$, $R < 0.5\% @ 1096 \text{ nm} \sim 1176 \text{ nm}$)。选取驱动功率 20 W, 中心频率 41 MHz 的声光 Q 开关(Gooch & Housego: I-QS041-1.5C10G-4-SO12), 两端在 1064 nm 处有增透膜($R < 0.2\%$)。谐振腔长为 105 mm。输出镜 M2 采用表 1 的镜面参数。

Table 1. Reflectivity of output mirrors for different spectral lines in M2 output mirror

表 1. M2 输出镜不同谱线的输出反射镜反射率

	1064 nm	1096 nm	1129 nm	1176 nm
M2	99.9%	95.4%	83.1%	70.5%

为了减少热效应对实验的影响, 晶体全部用铝箔包裹, 并将其放置在紫铜材质的晶体夹内, 将晶体夹与水冷压缩机通过装置连接起来, 控制水温在 18°C。平均输出功率用以色列 OPHIR 公司生产的 F150A 功率计测量。脉冲宽度和波形采用美国泰克公司 MDO3054 示波器记录。输出光谱采用日本横河公司的 AQ6373 光谱仪测量。

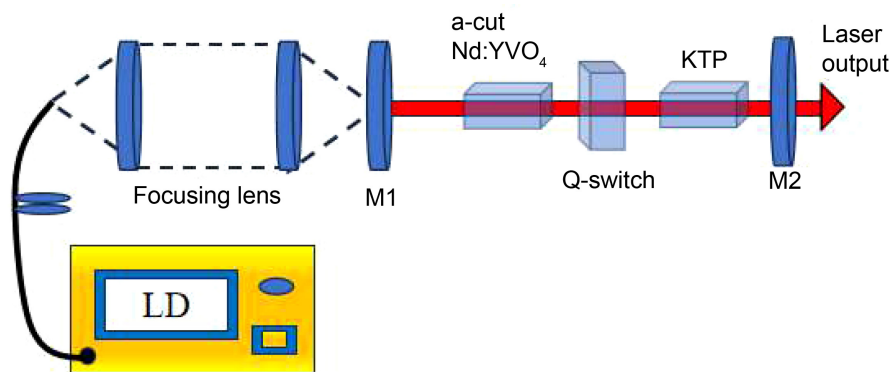


Figure 1. The experimental setup of the active Q-switched Nd:YVO₄/KTP dual-frequency Raman laser

图 1. 主动调 Q Nd:YVO₄/KTP 双频移拉曼激光器的实验装置

3. 实验结果与讨论

图 2 主动调 Q Nd:YVO₄/KTP 拉曼激光器的光谱激光输出光谱。在 30 kHz 重复频率时, 激光输出由 1064 nm、1096 nm 和 1176 nm 的三条激光组成。1176 nm 是一阶斯托克斯光, 对应于 Nd:YVO₄ 中 890 cm^{-1} 的拉曼频移。两个输出光谱之间的差异是由于输出镜的反射率不同, 1096 nm 激光和 1176 nm 激光之间的竞争。

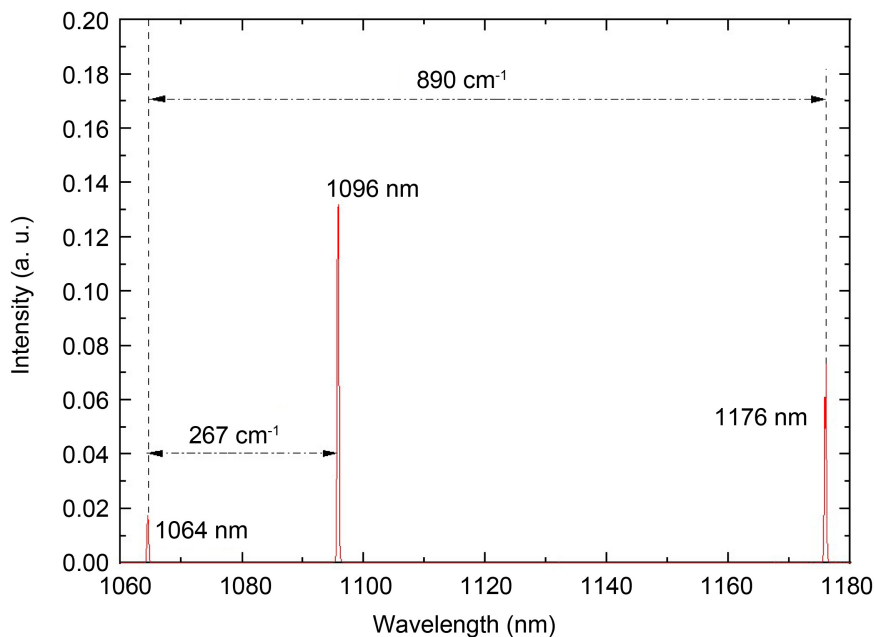


Figure 2. Spectrum of actively Q-switched Nd:YVO₄/KTP Raman laser

图 2. 主动调 Q a 切 Nd:YVO₄/KTP 拉曼激光器的光谱图

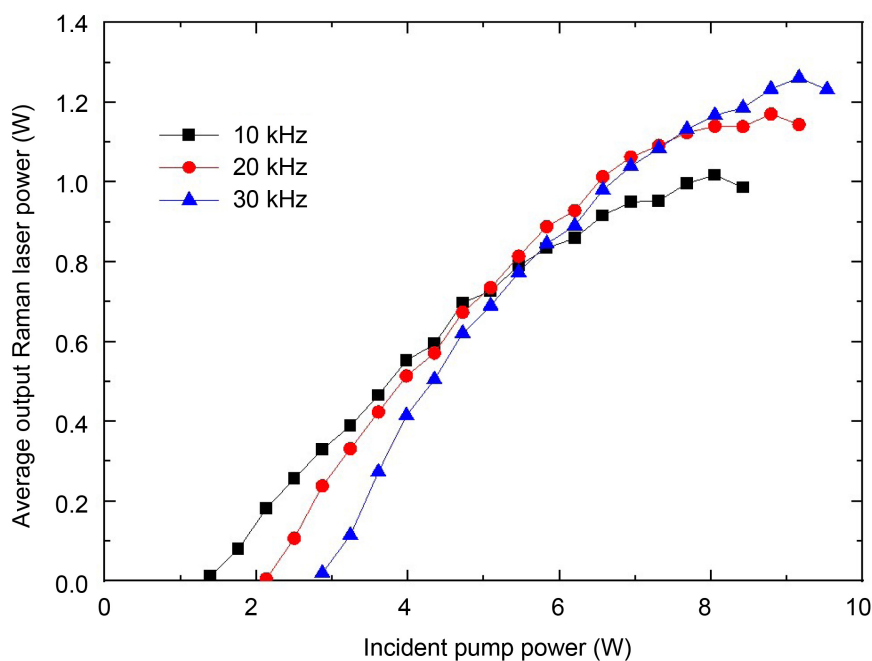


Figure 3. Relationship between output power and incident pump power of actively Q-switched a-cut Nd:YVO₄/KTP dual-frequency shifted Raman laser

图 3. 主动调 Q a 切 Nd:YVO₄/KTP 双频移拉曼激光器的输出功率与入射泵功率的关系

图 3 显示了在 10 kHz, 20 kHz 和 30 kHz 的脉冲重复频率(PRF)下拉曼激光平均输出功率的变化。当 PRF 为 10 kHz、20 kHz 和 30 kHz 时, 拉曼激光的入射泵浦功率阈值分别为 1.39 W、2.13 W 和 2.87 W。由于 KTP 的 267 cm⁻¹ 频移对应的 1096 nm 激光的输出透过率(4.6%)远小于 YVO₄ 的 890 cm⁻¹ 频移对应的

1176 nm 激光的输出透过率(29.5%), 1096 nm 激光的阈值明显小于 1176 nm 激光, 因此随着泵浦功率增长, 1096 nm 激光先于 1176 nm 激光出现。由于热透镜效应, 泵浦功率的增加会导致 KTP 晶体中的光束半径变小而有利于受激拉曼散射的发生, 因而三种脉冲重复率下的拉曼激光入射泵浦功率阈值不是随着 PRF 线性增长。当 PRF 为 10 kHz、20 kHz 和 30 kHz 时, 拉曼光的平均输出功率在一段泵浦功率范围内是上升的, 随着泵浦功率的进一步增加, 谐振腔内 Nd:YVO₄ 晶体中的热效应导致的热损耗的影响使得输出功率增长缓慢甚至下降。当入射泵浦在 10 kHz 下, 泵浦功率为 8.05 W 时, 最大平均输出功率为 1.017 W。当入射泵浦功率为 8.79 W 时(20 kHz), 最大平均输出功率为 1.170 W。当入射泵浦功率为 9.16 W 时(30 kHz), 获得 1.26 W 的最大平均输出功率, 经测量计算其中 1096 nm 为 0.83 W, 1176 nm 为 0.43 W。

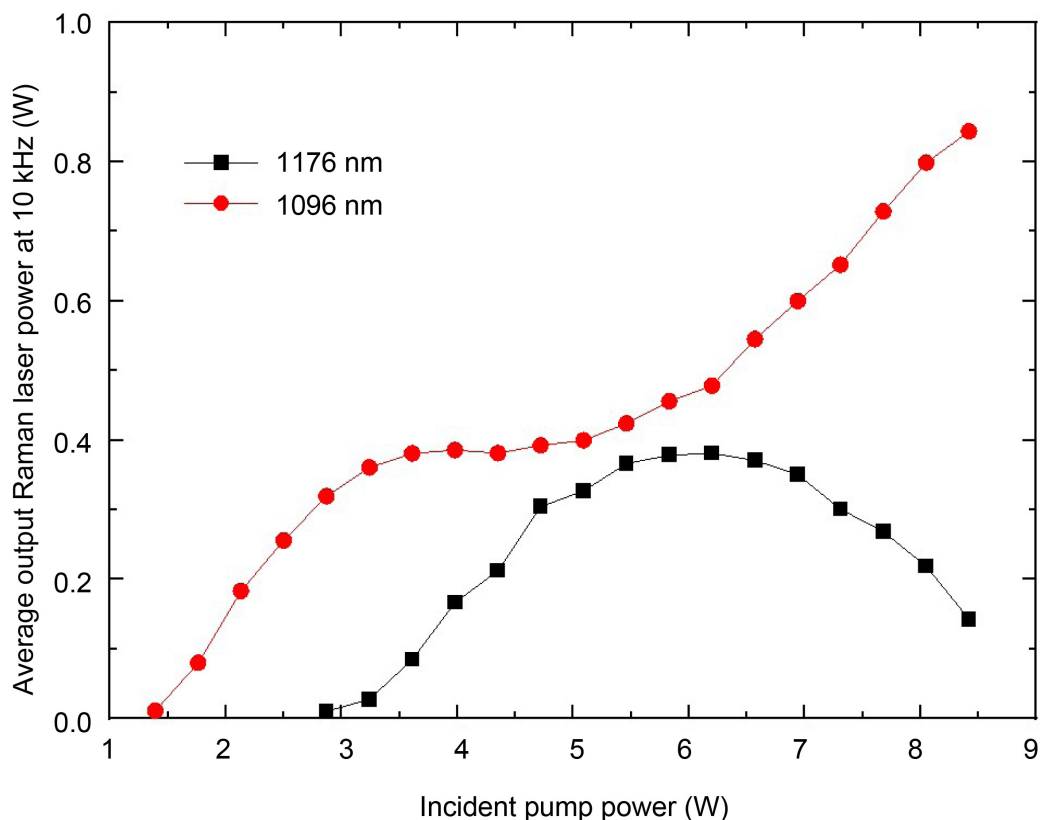


Figure 4. Relationship between average output power at 1176 nm and 1096 nm and incident pump power at a repetition frequency of 10 kHz

图 4. 重复频率为 10 kHz 时, 1176 nm 和 1096 nm 的平均输出功率与入射泵浦功率的关系

如图 4 所示, 重复频率为 10 kHz 时 1176 nm 和 1096 nm 的平均输出功率与入射泵浦功率的关系。1096 nm 的平均输出功率一直随泵浦功率增长, 呈现上升 → 变缓 → 上升的趋势, 1176 nm 光的平均输出功率呈现先上升再下降的趋势, 这是因为 1096 nm 激光由于其输出镜透过率比 1176 nm 激光小得多, 在泵浦功率较小时, 先于 1176 nm 激光达到阈值, 而当泵浦功率超过 1176 nm 的阈值后, 由于 1176 nm 光的竞争, 其增长变缓, 而后随着泵浦功率增长导致的热透镜作用的增强, KTP 晶体中的激光束横截面积变小, 1096 nm 激光的增益相对 1176 nm 激光变强, 从而 1176 nm 激光随着泵浦功率的增加而难以和 1096 nm 激光竞争。1176 nm 光在入射泵浦功率为 6.2 W 时达到最大值 0.38 W。由于谱线竞争的关系, 1176 nm 光平均功率上升的时候 1096 nm 光的平均功率上升较缓慢。

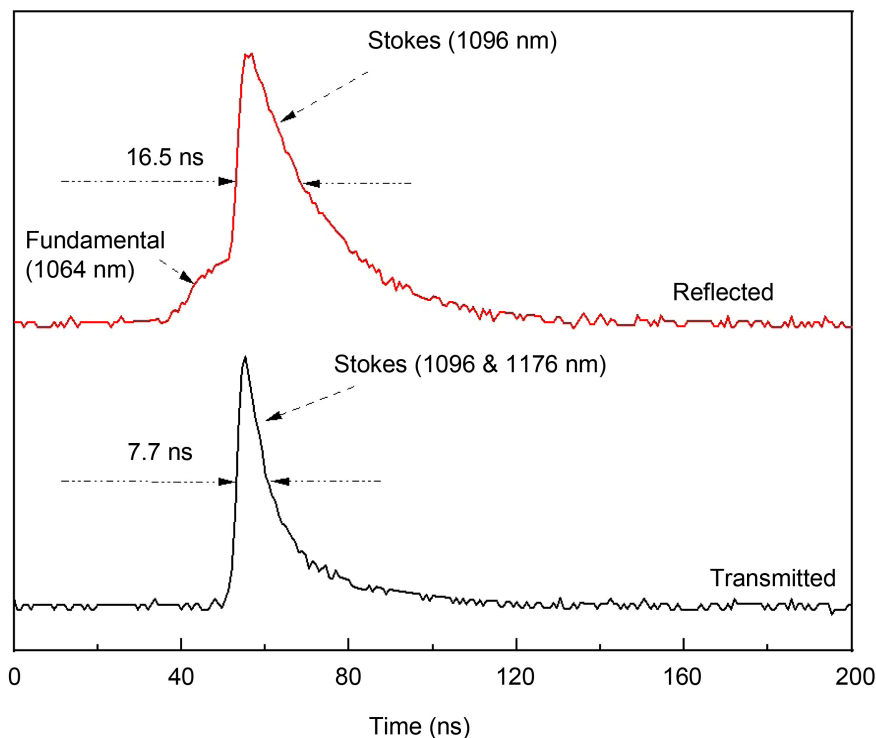


Figure 5. The typical pulse shapes of the reflected and transmitted output lasers at a repetition frequency of 30 kHz

图 5. 重复频率为 30 kHz 时反射和透射输出激光的典型脉冲形状

如图 5 重复频率为 30 kHz 时,采用一分光镜片 F (具体透射参数 $T_{1064} = 45\%$, $T_{1096} = 15\%$, $T_{1129} = 70\%$, $T_{1176} = 95\%$)对激光器出射激光分光,得到的反射和透射输出激光的典型脉冲波形图,没有观察到明显的第二脉冲。根据分光镜的镀膜参数,其对基频光 1064 nm 高反,对透射光 1096 nm 和 1176 nm 具有一定透过率,可知透射光只有斯托克斯光,没有基频光。可以看出,反射光脉冲波形与透射光脉冲波形具有明显不同,反射光的上升沿初始有一个明显的缓坡,此时基本为基频光输出,而后上升沿明显变陡,输出由基频光转换为拉曼光,这反应了输出镜的镀膜对基频光和拉曼光的透过率的极大差别以及受激拉曼散射造成的两种光转换的快速。透射光脉冲的上升沿比反射光的更陡峭,这是由于透射光中几乎没有 1064 nm 的光。1096 nm 激光脉宽是 16.5 ns,而 1096 nm 和 1176 nm 合成激光的脉宽是 7.7 ns,所以 1176 nm 激光的脉宽要小于 7.7 ns。

4. 结论

本文使用 a 切 Nd:YVO₄ 晶体作为自拉曼晶体,可以实现 890 cm⁻¹ 的频移,从而产生 1176 nm 的拉曼光, KTP 作为拉曼晶体利用其 267 cm⁻¹ 的频移产生 1096 nm 的拉曼光,从而实现双波长同步脉冲得有效输出。研究了主动调 Q Nd:YVO₄/KTP 双频移拉曼激光器的 Stokes 光束脉冲波形图和光谱图。在脉冲重复频率为在 10 kHz, 20 kHz 和 30 kHz 时拉曼激光平均输出功率的变化。当入射泵浦功率为 9.16 W 时,在 PRF 为 30 kHz 时,由 1176 nm 和 1096 nm 激光组成的拉曼激光平均输出功率最高为 1.26 W,其中含 1096 nm 激光 1.05 W, 1176 nm 激光 0.21 W。利用 KTP 中存在有效的三阶非线性的特点,使得两个拉曼晶体的拉曼频移实现双波同时振荡,将这一想法扩展到其它晶体和 KTP 晶体搭配也可以实现双波长拉曼激光器功率的有效输出。

基金项目

吉林省科技发展计划(20240101306JC)。

参考文献

- [1] Pask, H.M. (2003) The Design and Operation of Solid-State Raman Lasers. *Progress in Quantum Electronics*, **27**, 3-56. [https://doi.org/10.1016/S0079-6727\(02\)00017-4](https://doi.org/10.1016/S0079-6727(02)00017-4)
- [2] Duan, Y., Sun, Y., Zhu, H., *et al.* (2020) YVO₄ Cascaded Raman Laser for Five-Visible-Wavelength Switchable Emission. *Optics Letters*, **45**, 2564-2567. <https://doi.org/10.1364/OL.392566>
- [3] Fan, L., Wang, X., Zhao, X., *et al.* (2020) First-Stokes and Second-Stokes Multi-Wavelength Continuous-Wave Operation in Nd:YVO₄/BaWO₄ Raman Laser under In-Band Pumping. *Chinese Optics Letters*, **18**, Article ID: 111401. <https://doi.org/10.3788/COL202018.111401>
- [4] Chen, H., Cui, Y., Li, X., *et al.* (2023) High-Power Dual-Wavelength Intracavity Diamond Raman Laser. *Functional Diamond*, **3**, Article ID: 2282527. <https://doi.org/10.1080/26941112.2023.2282527>
- [5] Shen, H., Wang, Q., Zhang, X., *et al.* (2012) Simultaneous Dual-Wavelength Operation of Nd:YVO₄ Self-Raman Laser at 1524 nm and Undoped GdVO₄ Raman Laser at 1522 Nm. *Optics Letters*, **37**, 4113-4115. <https://doi.org/10.1364/OL.37.004113>
- [6] Shen, H., Wang, Q., Zhang, X., *et al.* (2013) Simultaneous Dual-Wavelength Operation of Nd-Doped Yttrium Orthovanadate Self-Raman Laser at 1175 Nm and Undoped Gadolinium Orthovanadate Raman Laser at 1174 nm. *Applied Physics Express*, **6**, Article ID: 042704. <https://doi.org/10.7567/APEX.6.042704>
- [7] Lin, H.Y., Copner, N., Sun, D., *et al.* (2016) Dual-Wavelength CW A-Cut Nd:YVO₄ Laser at 1064.3 and 1066.7 nm. *Optik*, **127**, 9073-9075. <https://doi.org/10.1016/j.jileo.2016.06.120>
- [8] Duan, Y.M., Zhang, G., Zhang, Y.J., *et al.* (2011) LD End-Pumped C-Cut Nd:YVO₄/KTP Self-Raman Laser at 560 nm. *Laser Physics*, **21**, 1859-1862. <https://doi.org/10.1134/S1054660X11190108>
- [9] Duan, Y., Yang, F., Zhu, H., *et al.* (2010) Continuous-Wave 560 nm Light Generated By Intracavity SrWO₄ Raman and KTP Sum-Frequency Mixing. *Optics Communications*, **283**, 5135-5138. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.07.042>
- [10] Gao, Z. H., *et al.* (2021) A Tunable Single-Frequency Green Laser Based on a Wedged Nd:YVO₄ Crystal and a KTP Crystal. *Laser Physics*, **31**, Article ID: 065002. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/abf9a0>
- [11] Zhuang, F.J., Zheng, Y.Q., Huang, C.H., *et al.* (2010) Efficient and Compact Intracavity-Frequency-Doubled YVO₄/Nd:YVO₄/KTP Laser through Analysis of the Interaction Length. *Optics Communications*, **283**, 3324-3327. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.04.061>
- [12] Sun, B., *et al.* (2020) 13.7-W 588-nm Yellow Laser Generation by Frequency Doubling of 885-nm Side-Pumped Nd:YAG-YVO₄ Intracavity Raman Laser. *IEEE Photonics Journal*, **12**, 1-7. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2020.2978024>
- [13] Sun, B., *et al.* (2020) High-Power High-Repetition-Rate Tunable Yellow Light Generation by an Intracavity-Frequency-Doubled Singly Resonant Optical Parametric Oscillator. *IEEE Photonics Journal*, **12**, 1-10. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2020.2994229>
- [14] Meng, X., Wang, Z., Tian, W., *et al.* (2021) High Average Power 200 Fs Mid-Infrared KTP Optical Parametric Oscillator Tunable from 2.61 to 3.84 μ m. *Applied Physics B*, **127**, Article No. 129. <https://doi.org/10.1007/s00340-021-07675-w>
- [15] Li, F., Zhong, K., Qiao, H., *et al.* (2021) A Wavelength-Agile Eye-Safe Optical Parametric Oscillator Based on an X-Cut KTP Crystal. *IEEE Photonics Journal*, **13**, 1-4. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3113305>
- [16] Massey, G.A., Loehr, T.M., Willis, L.J., *et al.* (1980) Raman and Electrooptic Properties of Potassium Titanate Phosphate. *Applied Optics*, **19**, 4136-4137. <https://doi.org/10.1364/AO.19.004136>
- [17] Pasiskevicius, V., Canalias, C. and Laurell, F. (2006) Highly Efficient Stimulated Raman Scattering of Picosecond Pulses in KTiOPO₄. *Applied Physics Letters*, **88**, Article ID: 041110. <https://doi.org/10.1063/1.2166683>
- [18] Su, F., Zhang, X., Wang, W., *et al.* (2013) High-Efficient Diode-Pumped Actively Q-Switched Nd: YAG/KTP Raman Laser at 1096 nm Wavelength. *Optics Communications*, **305**, 201-203. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.04.043>
- [19] Chen, Y.F. (2004) Compact Efficient Self-Frequency Raman Conversion in Diode-Pumped Passively Q-Switched Nd:GdVO₄ Laser. *Applied Physics B*, **78**, 685-687. <https://doi.org/10.1007/s00340-004-1515-5>
- [20] Chen, Y.F. (2004) Efficient 1521-nm Nd:GdVO₄ Raman Laser. *Optics Letters*, **29**, 2632-2634. <https://doi.org/10.1364/OL.29.002632>