

二极管泵浦腔内KTP倍频Nd:YAG/YVO₄拉曼激光器

刘倬源, 李述涛

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年3月10日; 录用日期: 2025年4月9日; 发布日期: 2025年4月17日

摘 要

使用掺钕材料作为激光增益介质,再辅以腔内倍频技术,可以高效、稳定的获取多个波段的可见光输出,是全固态激光器的重要发展方向。本文使用Nd:YAG作为激光增益介质,使用YVO₄作为拉曼介质,再辅以KTP作为倍频介质,搭建了能够稳定输出588 nm黄光激光输出的腔内倍频声光调Q拉曼激光器。当脉冲重复率为10 kHz,泵浦功率为7.36 W时,得到了最高的输出功率为389 mW,此时从LD到黄光的光-光转换效率为5.3%。

关键词

拉曼激光器, 黄光, 非线性频率转换

Diode-Pumped Acousto-Optic Q-Switched Intracavity KTP Frequency-Double Nd:YAG/YVO₄ Raman Laser

Zhuoyuan Liu, Shutao Li

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

Received: Mar. 10th, 2025; accepted: Apr. 9th, 2025; published: Apr. 17th, 2025

Abstract

Using neodymium-doped materials as laser gain media, combined with intracavity frequency-doubling technology, enables efficient and stable visible light output across multiple wavelength bands, making it a key development direction for all-solid-state lasers. In this study, an intracavity

frequency-doubled acousto-optic Q-switched Raman laser was constructed using Nd:YAG as the laser gain medium, YVO₄ as the Raman medium, and KTP as the frequency-doubling medium, achieving stable yellow laser output at 588 nm. At a pulse repetition frequency of 10 kHz and a pump power of 7.36 W, the highest output power of 389 mW was obtained, with an optical-to-optical conversion efficiency of 5.3% from the LD to the yellow light.

Keywords

Raman Laser, Yellow Light, Nonlinear Frequency Conversion

Copyright © 2025 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

晶体的受激拉曼散射效应(SRS)可以改变固体拉曼激光器的输出光谱,是拓展激光光谱范围的有效方法,在激光雷达、医疗仪器、激光遥感、激光全息等领域具有广泛的应用[1][2],对非线性光学的发展起到积极作用。固体激光器的输出波段通常由拉曼增益介质固有的拉曼频移以及泵浦激光所决定,其中最常见拉曼晶体有 LiIO₃、BaNO₃、钽酸盐、钨酸盐、钼酸盐等,它们的拉曼光谱显示出强的拉曼峰,是实现紧凑型高效拉曼激光器的优良介质[3]。

YVO₄的拉曼频移为 890~900 cm⁻¹,在近红外波段(如 1064 nm 泵浦)可产生 1180~1190 nm 一阶 Stokes 光,经倍频后输出 590~595 nm 黄光。YVO₄的拉曼增益系数达 4.5 cm/GW (@1064 nm),显著高于硝酸钽(Ba(NO₃)₂, ~3 cm/GW),接近金刚石(~10 cm/GW),高增益系数允许在较低泵浦功率下实现 Stokes 光激发,提升系统效率。YVO₄的热导率为 5.2 W/mK,是硝酸钽(1.2 W/mK)的 4 倍以上,可显著抑制热透镜效应,适合高重复频率(>10 kHz)和连续波(CW)运行。各向异性热膨胀可通过晶体切向优化匹配谐振腔热变形,提升长期稳定性。其次 YVO₄晶体与 KTP 晶体具有很好的兼容性,其折射率与 KTP (和 LBO 的折射率梯度匹配,降低倍频界面的反射损耗,可以将拉曼光到倍频光的转换效率至少提升到高于 30%。此外 YVO₄的抗激光损伤阈值达 15 GW/cm² (10 ns 脉宽),优于硝酸钽(8 GW/cm²),适合高能量脉冲激光系统,且在空气中不易潮解,长期使用无表面雾化现象,维护成本低于易潮解晶体(如 Ba(NO₃)₂)。总而言之,YVO₄凭借高增益系数、高热导率、较宽的光谱调谐能力及能够与其他晶体更好的匹配,成为黄绿光拉曼激光器的优良介质之一,尤其适用于中等功率(10~50 W)且要求长期稳定性的工业与医疗场景。但是其局限性在于拉曼频移固定,需结合级联拉曼或外腔调谐技术扩展绿光(550 nm)覆盖范围。

2019 年, ZY Zuo 等人提出了一种腔内 Nd:YLF/YVO₄拉曼激光器[4]。2020 年 B Sun 等人提出了一种主动调 Q 全固态 YVO₄拉曼激光器,该激光器使用 885 nm 侧泵浦 Nd:YAG 激光器输出基频光,并输出黄色输出。通过 KTP 晶体对斯托克斯波进行腔内倍频,在 233 W 的二极管泵浦功率下,获得了波长为 588 nm、脉冲重复频率为 10 kHz 的 13.7 W 黄色输出[5]。此外,单脉冲能量为 1.37 mJ,脉冲宽度为 12.5 ns,对应峰值功率为 110 kW。2022 年, PQ Zhang 等人提出了一种窄线宽被动调 Q 腔内 YVO₄拉曼激光器用于产生 589.16 nm 的黄光激光,倍频拉曼激光器在 589.16 nm 处产生了 330 mW 的平均输出功率,线宽接近 0.01 nm [6]。2024 年, H Zhao 等人提出了一种 1.7 μm 高功率窄线宽纳秒脉冲内腔晶体拉曼激光器[7]。

由此可见 YVO₄是良好的拉曼晶体,而且在固体激光领域应用广泛[8],晶体的生长技术成熟、质量

稳定、价格低廉。其高拉曼增益系数与优异的热管理性能, 可在中高功率泵浦下实现高效 Stokes 光转换(如 1064 nm $\rightarrow$ 1180 nm)并显著抑制热透镜效应; 其自拉曼特性支持与 Nd^{3+} 等稀土离子共掺杂, 形成紧凑型自拉曼激光器, 结合温度调谐(± 2.5 nm)灵活输出黄绿光(590~595 nm), 同时凭借自身高抗损伤阈值(15 GW/cm^2)和化学稳定性, 成为工业加工、医疗设备及科研级激光器的理想选择。如果和 KTP 晶体搭配构成腔内倍频拉曼激光器, 可以获得高效且廉价的黄光激光光源。

本章中, 进行了腔内 KTP 倍频 Nd:YAG/a-cut YVO₄ 拉曼激光器的实验研究, 获得了高效率的黄光输出, 从 LD 到黄光的光-光转换效率为 5.3%。

2. 实验装置

LD 端面泵浦主动调 Q Nd:YAG/YVO₄/KTP 腔内倍频拉曼激光器的整体结构方案如图 1 所示。谐振腔采用平凹腔的结构且水平工作, 最终获得拉曼光输出。泵浦是光纤耦合的 LD, 输出波长是 808 nm, 纤芯直径是 400 μm , 数值孔径是 0.22, 最大输出功率是 30 W。输入镜 M1 的曲率半径是 3000 nm, 镀膜对 808 nm 的光高透($T=97\%$), 对 1000 nm~1180 nm 波段的光高反, 输出镜 M2 为平面镜, 对 1064 nm 的基频光高反($R=99.9\%$), 对 1176 nm 的拉曼光反射率为 93%, 对 588 nm 黄光的透过率为 91.7%。平面镜 M2 输出镜, 镀膜参数如表 1 所示。

Table 1. Reflectivity of output mirrors with different spectral lines

表 1. 不同谱线的输出反射镜反射率

	1066 nm	1097 nm	1130 nm	1176 nm
M2	99.67%	81.78%	33.44%	41.13%

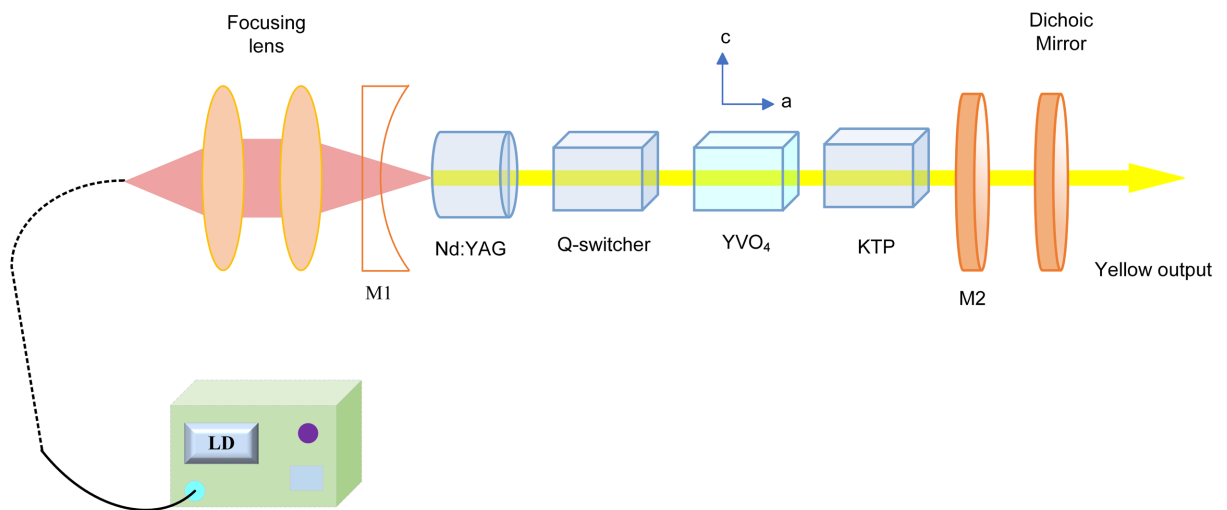


Figure 1. The overall structural scheme of LD end pumped active QNd: YAG/YVO₄/KTP intracavity frequency doubling Raman laser

图 1. LD 端面泵浦主动调 QNd:YAG/YVO₄/KTP 腔内倍频拉曼激光器的整体结构方案

Nd:YAG 晶体的直径为 4 mm, 长度为 5 mm, 掺 Nd 浓度为 1-at.%, 两个端面镀膜对 1000 nm~1200 nm 波长高透, 其中一端镀膜对 808 nm 高透。拉曼晶体为 a-cut 的 YVO₄ 晶体, 晶体尺寸为 3 $\times$ 3 $\times$ 30 mm³, 两个端面镀膜对 1000 nm~1200 nm 波段高透, 其中一端镀有 808 nm 增透膜。倍频晶体为 KTP 晶体, 尺寸为 3 $\times$ 3 $\times$ 8 mm³, 两个端面镀有对 1000 nm~1200 nm 和 585 nm~595 nm 波段范围高透, 晶体沿($\varphi = 0^\circ$,

$\theta = 68.7^\circ$)切割, 稍微调节就可以满足 1176 nm 波长倍频的匹配角($\varphi = 0^\circ, \theta = 69.2^\circ$)。Nd:YAG、Nd:YVO₄ 和 KTP 晶体用铝箔包裹并放置在带有水冷装置的铜块内, 循环水温度控制在 18℃。为取得最佳的倍频效果, YVO₄ 的 c 轴与 KTP 晶体的 a-c 平面成 45° 夹角。声光 Q 晶体调制频率为 41 MHz, 最大调制功率 15 W, 激光腔长为 110 mm。在腔外用一滤波片滤掉 1064 nm 和 1176 nm 激光。黄光的平均功率由功率计 F150A (OPHIR 公司) 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。

3. 实验结果与讨论

图 2 显示了主动调腔内倍频 Nd:YAG/YVO₄ 拉曼激光器的输出 588 nm 黄光的光谱图, 图 3 显示了该激光器的输出光谱图, 输出谱线由三条激光谱线组成: 588.6 nm、1064.2 nm 和 1177.2 nm。其中 1066.2 nm 为基频光, 1177.2 nm 为基于 YVO₄ 的一阶 Stokes 光, 588.6 nm 是激光器的输出波长。

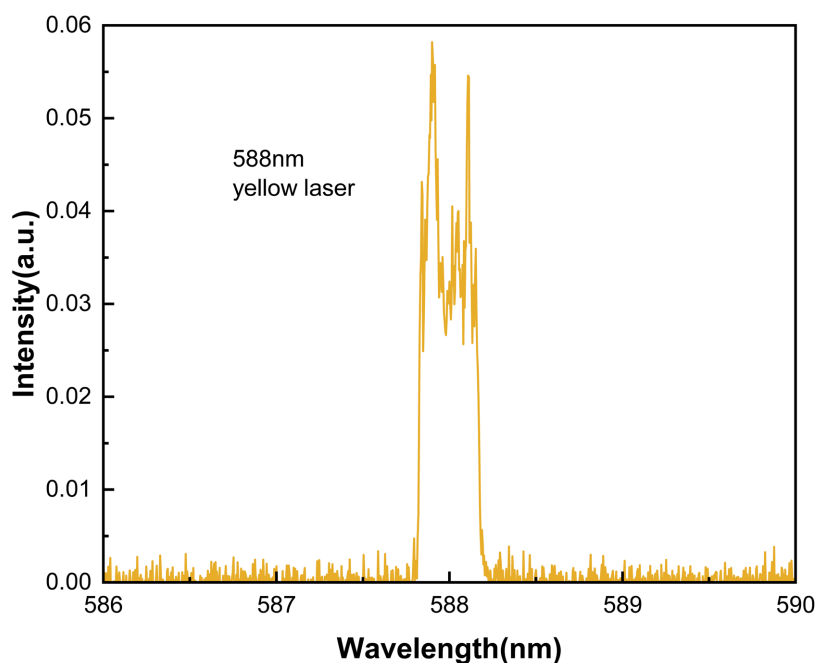


Figure 2. Laser output yellow spectrum

图 2. 激光器输出黄光光谱

由图 3 可知 588 nm 的黄色激光占据输出绝对优势, 1064 nm 的基频光输出微弱, 可忽略不计。图 4 给出了当脉冲重复率分别为 5、10 和 15 kHz 时黄光平均功率与输入泵浦功率之间的关系。可以看出, 588 nm 激光的泵浦功率阈值随脉冲重复率的增加而减小, 脉冲重复率 5、10 和 15 kHz 时产生黄光的阈值泵浦功率分别 2.39 W、3.56 W 和 3.99 W。当泵浦功率较小时, 脉冲重复率为 5 kHz 时的黄光功率高于 10 和 15 kHz 时的功率。输入泵浦功率达到 4.78 W 左右时, 脉冲重复率 5 kHz 下的黄光功率的增长变缓。这是由于基频光的峰值功率密度过高, 产生的别的非线性效应(例如自聚焦现象)削弱了基频光向拉曼光的转换效率, 从而导致整个激光器的输出增长变缓。为防止腔内基频激光峰值功率过高导致晶体损坏, 脉冲重复率为 15 kHz 时, 输入泵浦功率到 7.83 W 不再增加, 此时黄光平均功率为 332 mW。当脉冲重复率为 10 kHz, 泵浦功率为 7.36 W 时, 得到了最高的输出功率为 389 mW, 此时从 LD 到黄光的光-光转换效率为 5.3%。最大功率出现在 10 kHz 的脉冲重复率, 为 389 mW。

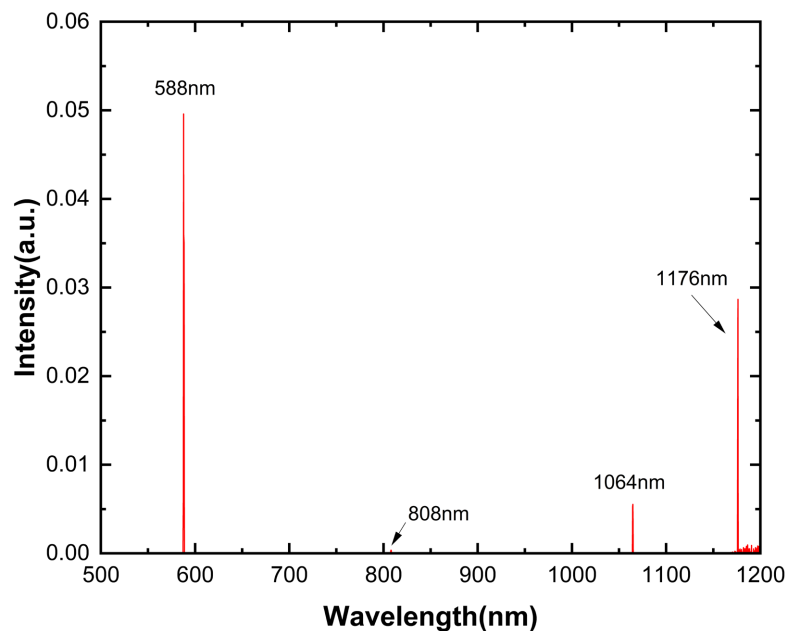


Figure 3. The output spectrum of the laser

图 3. 激光器的输出光谱图

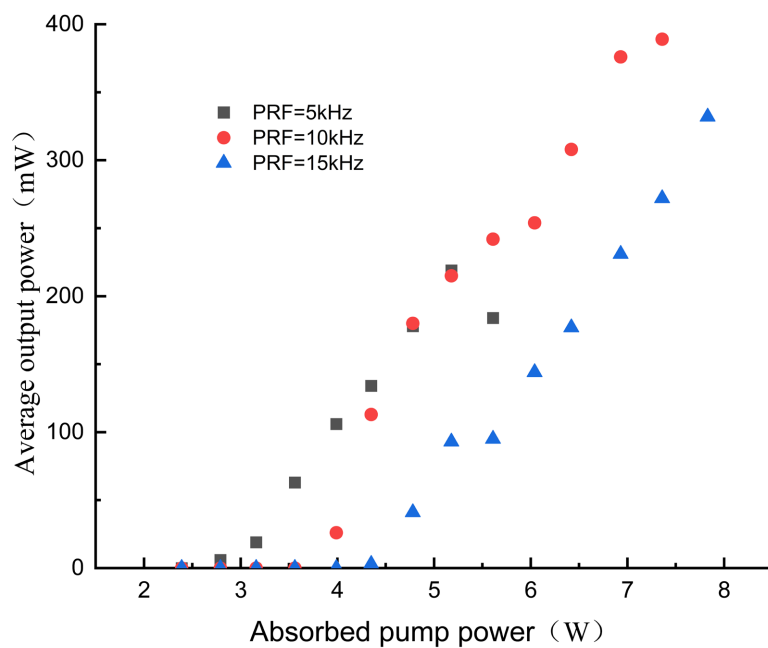


Figure 4. Schematic diagram of the relationship between the average power of a 588 nm laser and the input pump power at pulse repetition rates of 5, 10, and 15 kHz

图 4. 脉冲重复率分别为 5、10、15 kHz 时, 588 nm 光激光平均功率与输入泵浦功率之间的关系示意图

图 5 给出了脉冲重复率分别为 5、10 和 15 kHz 时, 588 nm 黄光激光的脉冲能量与泵浦功率之间的关系。最大的脉冲能量值 $43.6 \mu\text{J}$ 出现在脉冲重复率为 5 kHz, 输入泵浦功率为 5.18 W 的情况下。在脉冲重复率为 10 kHz, 泵浦功率为 7.36 W 时, 最高的输出功率为 389 mW 的情况下, 脉冲能量值为 $38.9 \mu\text{J}$, 可以看出激光器整体输出稳定。

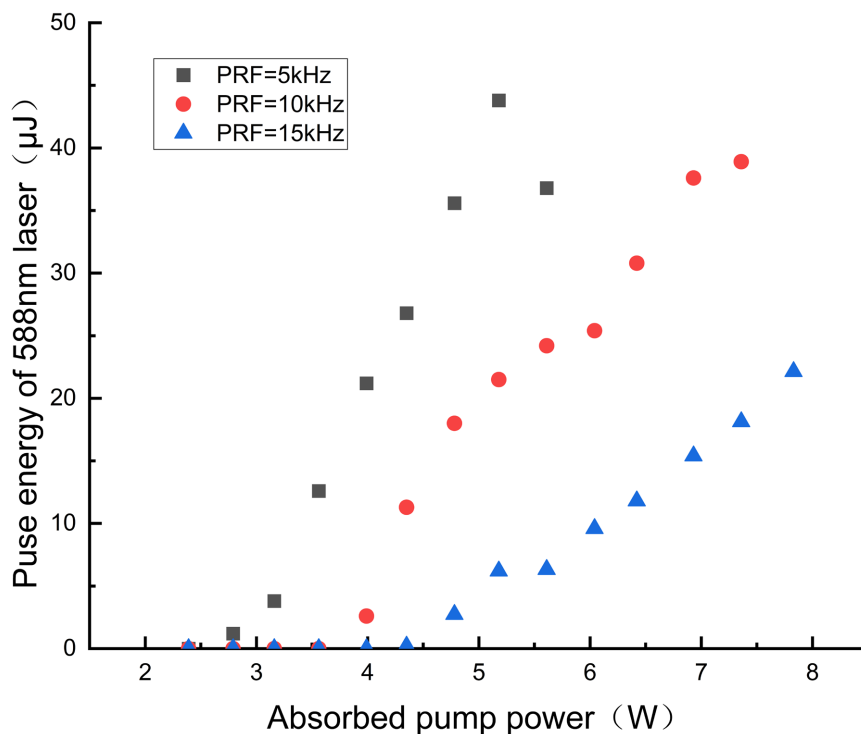


Figure 5. Schematic diagram of the relationship between the energy of 588 nm laser pulses and the input pump power at pulse repetition rates of 5, 10, and 15 kHz

图 5. 脉冲重复率分别为 5、10、15 kHz 时, 588 nm 光激光脉冲能量与输入泵浦功率之间的关系示意图

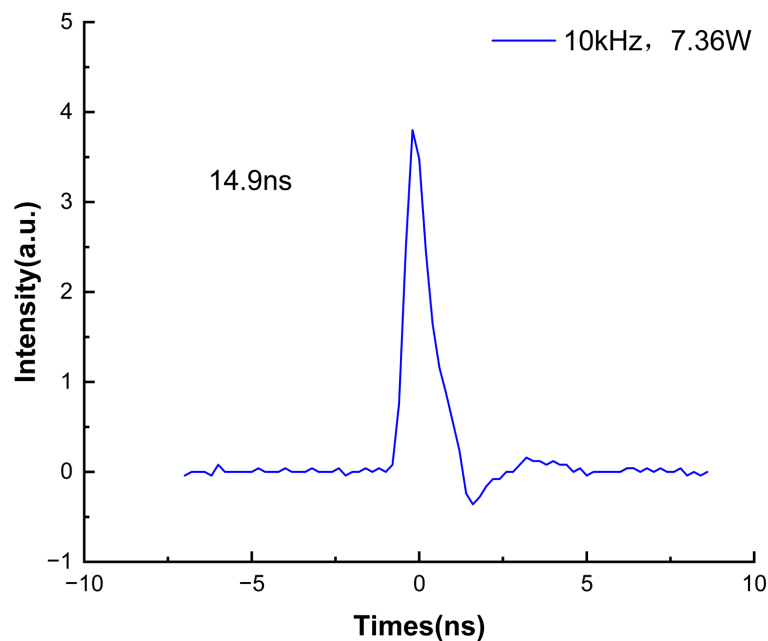


Figure 6. The waveform of 588 nm yellow light with a pulse repetition rate of 10 kHz and an input power of 7.36 W

图 6. 脉冲重复率为 10 kHz, 输入功率为 7.36 W 时的 588 nm 黄光的波形图

图 6 给出了在 588 nm 黄光激光器输出功率最大时, 也就是当脉冲重复率为 10 kHz, 泵浦功率为 7.36 W 时, 所得到的最小脉宽的波形图, 可以看出此时的脉宽为 14.9 ns。

4. 结论

本章对主动调 Q 腔内倍频 Nd:YAG/YVO₄/KTP 拉曼激光器的激光输出特性进行了详细讨论, 并适当地分析了实验结果与理论模拟进行对比后的结果, 将在下章与另一组实验放到一起进行综合讨论。简而言之, 主动调 Q 腔内倍频 Nd:YAG/YVO₄/KTP 拉曼激光器能够持续的、稳定的输出 588 nm 黄色激光, 实验中输入镜的曲率半径为 3000 nm, 当脉冲重复率为 10 kHz, 泵浦功率为 7.36 W 时, 得到了最高的输出功率为 389 mW, 此时从 LD 到黄光的光 - 光转换效率为 5.3%。

基金项目

吉林省科技发展计划(20240101306JC)。

参考文献

- [1] Jiang, P., Ding, X., Guo, J., Zhang, H., Qi, H., Shang, Y., *et al.* (2024) Research Progress of Crystalline Raman Yellow Lasers. *Optics & Laser Technology*, **169**, Article ID: 110072. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110072>
- [2] Zhao, H., Dai, S., Zhu, S., Yin, H., Li, Z. and Chen, Z. (2021) Multifunctional Optical Crystals for All-Solid-State Raman Lasers. *Crystals*, **11**, Article No. 114. <https://doi.org/10.3390/cryst11020114>
- [3] Piper, J.A. and Pask, H.M. (2007) Crystalline Raman Lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **13**, 692-704. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2007.897175>
- [4] Zuo, Z., Dai, S., Yin, H., Zhu, S., Li, Z., Chen, Z., *et al.* (2019) Multi-Watt Simultaneous Orthogonally Polarized Dual-Wavelength Pulse Generation of an Intracavity Nd:YLF/YVO₄ Raman Laser. *IEEE Photonics Journal*, **11**, 1-8. <https://doi.org/10.1109/jphot.2019.2896224>
- [5] Sun, B., Ding, X., Jiang, P., Bai, Y., Yu, X., Liu, Y., *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>
- [6] Zhang, P., Qiu, H., Qiao, H. and Shi, Y. (2022) A Narrow-Linewidth Passively Q-Switched Intracavity YVO₄ Raman Laser at 589.16 nm. *Journal of Russian Laser Research*, **43**, 249-253. <https://doi.org/10.1007/s10946-022-10046-1>
- [7] Zhao, H., Dai, S., Ouyang, K., Zhu, S., Yin, H., Li, Z., *et al.* (2024) High-Power and Narrow-Linewidth Nanosecond Pulsed Intracavity Crystalline Raman Laser Operating at 1.7 μm . *Optics Express*, **32**, 20852-20861. <https://doi.org/10.1364/oe.527203>
- [8] Zhong, J. and Zhang, T. (2024) Continuous-Wave and Cavity-Dumped 1064 nm Nd:YVO₄ Laser Based on the Magneto-optical Effect. *IET Optoelectronics*, **19**, e12133. <https://doi.org/10.1049/ote2.12133>