

# KTP倍频Nd:YVO<sub>4</sub>/GdVO<sub>4</sub>级联拉曼激光器研究

侯宇, 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10日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘要

以c切Nd:YVO<sub>4</sub>为自拉曼晶体, c切Nd:GdVO<sub>4</sub>作为拉曼晶体, KTP腔内倍频, 采用声光调Q, 实现基于两种拉曼晶体共有的259 cm<sup>-1</sup>次级频移的脉冲二阶斯托克斯光1129 nm激光的有效振荡和腔内倍频, 首次获得有效564 nm黄绿脉冲激光输出。在5.83 W的入射泵浦功率下, 脉冲重复率为10 kHz时, 564 nm激光最高平均输出功率226 mW, 脉冲宽度为5.7 ns。

## 关键词

倍频, Nd:GdVO<sub>4</sub>, KTP, 拉曼激光器

# Research on KTP Frequency-Doubled Nd:YVO<sub>4</sub>/GdVO<sub>4</sub> Cascaded Raman Laser

Yu Hou, Shutao Li\*

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

Received: Apr. 10<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 24<sup>th</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Based on a c-cut Nd:YVO<sub>4</sub> as the self-Raman crystal and a c-cut Nd:GdVO<sub>4</sub> as the Raman crystal, second-Stokes light at 1129 nm corresponding to the secondary Raman shift of 259 cm<sup>-1</sup> generated and was intracavity frequency-doubled with a KTP crystal, and effective output of 564 nm yellow-green pulsed laser was achieved from an acousto-optic Q-switched resonator for the first time, to the best of our knowledge. At an incident pump power of 5.83 W and a pulse repetition rate of

\*通讯作者。

**10 kHz, the highest average output power of the 564 nm laser reached 226 mW, with a pulse width of 5.7 ns.**

## Keywords

Frequency Doubling, Nd:GdVO<sub>4</sub>, 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

近三十年来随着晶体技术的进步, 晶体中的受激拉曼散射成为固体激光器产生新波长的重要途径, 受到了广泛的关注[1]。在固体拉曼激光器中, 腔内倍频和和频拉曼激光器成为拓展可见激光光谱的研究热点[2]-[6], 具有低阈值, 高效率和高光束质量等优点。

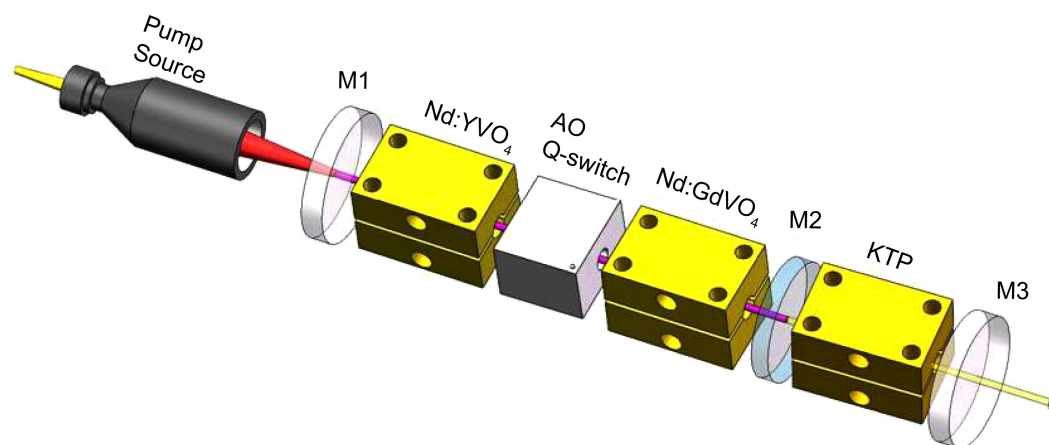
Nd:YVO<sub>4</sub>晶体和 Nd:GdVO<sub>4</sub>晶体, 都具有受激发射截面大、吸收带宽比较宽和吸收系数高等优点, 是优良的固体激光增益介质。2001年 A. A. Kaminskii 等人研究发现 YVO<sub>4</sub>和 GdVO<sub>4</sub>都具有良好的拉曼增益特性, 并预测 Nd:YVO<sub>4</sub>和 Nd:GdVO<sub>4</sub>是优良的自拉曼材料[1]。2004年台湾 Y. F. Chen 报道了 Nd:YVO<sub>4</sub>自拉曼激光器的研究。首次实现了从 1064 nm 的二极管泵浦主动 Q Nd:YVO<sub>4</sub>激光器到 1176 nm 的 Stokes 发射的高效自拉曼频率转换[7]。同年 Y. F. Chen 报道了关于 Nd:GdVO<sub>4</sub>自拉曼激光器的一系列研究[8]。此后, 一系列对 Nd:YVO<sub>4</sub>和 Nd:GdVO<sub>4</sub>自拉曼激光器的实验研究被报道, 包括直接输出一阶或者二阶斯托克斯光[9]以及通过腔内倍频、和频产生新波长的可见光激光[5] [10] [11]。2012年 Hongbin Shen 等人以 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体作为自拉曼晶体, Nd:GdVO<sub>4</sub>晶体作为拉曼介质, 提出了一种利用两个拉曼晶体的拉曼频移实现波长分离的双波长操作的方法并且观测到 1524 nm 激光和 1522 nm 激光同步输出[12]。2013年实现了 GdVO<sub>4</sub>的 882 cm<sup>-1</sup>主频移和 YVO<sub>4</sub>的主频移 890 cm<sup>-1</sup>对应的 1175 nm 和 1174 nm 一阶斯托克斯光的同步脉冲振荡[13]。2021年主动调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>/GdVO<sub>4</sub>拉曼激光器利用两个晶体中共有的 259 cm<sup>-1</sup>频移产生二阶斯托克斯光 1129 nm [9]。

磷酸钛氧钾(KTP)是一种优良的非线性晶体, 具有非线性系数大、不潮解以及匹配角度随温度变化小的优点, 广泛应用于倍频[13] [14] [15]、和频[16] [17]及参量振荡[18]等频率变化过程。同 LBO 相比它具有大的二类有效非线性系数、匹配角度随着温度变化小、不潮解等优点。2023年, Wenting Lou 等人报道了被动调 Q LBO 和频混合多频移同步振荡 Nd:YVO<sub>4</sub>/GdVO<sub>4</sub>拉曼激光器, 其 882/890 cm<sup>-1</sup>主频移对应产生 1176 nm 和 1177 nm 的一阶 Stokes 光, 与两个晶体中共有的 259 cm<sup>-1</sup>次级拉曼频移对应的一阶 Stokes 光进行和频, 实现了 568 nm 激光的有效输出[5]。LBO 晶体在 568 nm 和 564 nm 相互重叠且相互干扰, 因此产生 564 nm 黄绿光选择 KTP 晶体作为倍频晶体。本文利用两种晶体中共有的 259 cm<sup>-1</sup>次级频移产生二阶斯托克斯光 1129 nm 激光, 使用 KTP 晶体对 1129 nm 激光进行腔内倍频, 产生 564 nm 黄绿光的有效输出。

本文利用 KTP 对 c 切 Nd:YVO<sub>4</sub>/GdVO<sub>4</sub>共有的次级频移 259 cm<sup>-1</sup>产生二阶斯托克斯光 1129 nm 进行腔内倍频, 获得 564 nm 脉冲激光的有效输出。在 5.83 W 的入射泵浦功率下, 脉冲重复率为 10 kHz 时, 564 nm 激光最高平均输出功率 226 mW, 脉冲宽度为 5.7 ns。

## 2. 实验装置

图 1 显示了 KTP 倍频 Nd:YVO<sub>4</sub>/GdVO<sub>4</sub> 级联拉曼激光器的实验装置。使用 808 nm 的 40 W 半导体激光器作为泵浦光源, 该激光器的核心直径为 400 μm, 数值孔径(NA)为 0.22。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, 使得成像放大率为 1:1 耦合率为 97%。激光腔为凹平腔结构。图中各器件分别为泵浦源 LD, 输入镜 M1, 自拉曼介质与拉曼介质 c 切 Nd:YVO<sub>4</sub>/GdVO<sub>4</sub> (实验中晶体的参数如表 1 所示), 平面镜 M2, 非线性倍频晶体 KTP, 输出镜 M3 (实验中镜片的参数如表 2 所示)。



**Figure 1.** KTP frequency-doubled Nd:YVO<sub>4</sub>/GdVO<sub>4</sub> cascaded Raman laser device diagram

**图 1.** KTP 倍频 Nd:YVO<sub>4</sub>/GdVO<sub>4</sub> 级联拉曼激光器装置图

**Table 1.** The parameters of the crystals used in the experiment

**表 1.** 实验中所用晶体的参数

晶体	尺寸	掺杂浓度	镀膜
Nd:YVO <sub>4</sub> 晶体(c 切)	3 mm × 3 mm × 20 mm	0.3-at. %	AR@1060~1180 nm (R < 0.5%) HT@入射面 808 nm (T > 97%)
声光调 Q 晶体	30 mm	-	-
Nd:GdVO <sub>4</sub> 晶体(c 切)	3 mm × 3 mm × 15 mm	0.3-at. %	HT@输入面 808 nm (T > 95%) AR@1060~1180 nm (R < 0.5%)

**Table 2.** The parameters of the lenses used in the experiment

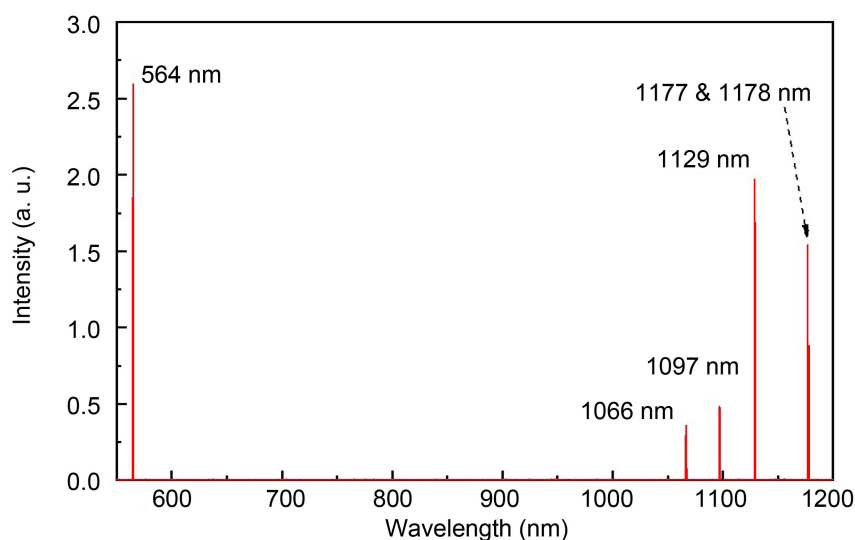
**表 2.** 实验中所用镜片的参数

腔镜	曲率半径	镀膜
M1	1000 mm	HR1060 nm~1180 nm@ (R > 99.8%) 808 nm@ (T > 97%)
M2	平镜	HR1060 nm~1180 nm@ (R < 0.2%) 右 HR@564 nm (R > 93%)
M3	输出镜	HR@1066 nm (R = 99.9%) HR@1097 nm (R = 99.7%) HT@1129 nm (T = 96.4%) HR@1177 和 1178 nm (R = 93.2%)

所有晶体均包覆铝箔, 置于水冷铜块内, 水温 18°C。激光的平均输出功率用 F150A 功率计(OPHIR 公司)测定, 主动调 Q 拉曼激光器的输出光谱通过光谱分析仪(Yokogawa AQ 6373, 350~1200 nm)测定。

### 3. 实验结果与讨论

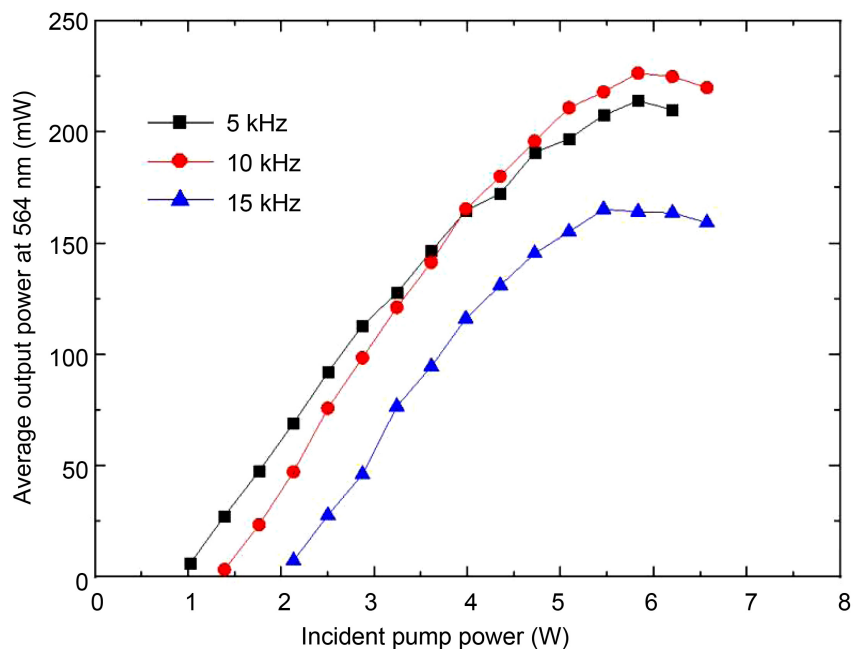
利用横河 AQ6373 (350~1200 nm)光谱分析仪对基于 KTP 倍频 Nd:YVO<sub>4</sub>/GdVO<sub>4</sub> 259 cm<sup>-1</sup> 频移级联拉曼激光器进行测量。得到如图 2 所示的输出光谱, 主要的输出波长有 564 nm、1066 nm、1097 nm、1129 nm、1177 nm 和 1178 nm, 其中输出波长为 1066 nm 的激光是 c 切 Nd:YVO<sub>4</sub> 产生的基频光, 1177 nm 激光是一阶斯托克斯光对应于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体 882 cm<sup>-1</sup> 主频移; 1178 nm 激光是一阶斯托克斯光对应于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 890 cm<sup>-1</sup> 主频移。1097 nm 的激光是由两个晶体共有的 259 cm<sup>-1</sup> 频移所产生的一阶斯托克斯光, 1129 nm 激光是 259 cm<sup>-1</sup> 频移的二阶斯托克斯光。1129 nm 激光经过 KTP 晶体倍频产生 564 nm 黄绿光。在 Nd:YVO<sub>4</sub> 自拉曼晶体和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 拉曼晶体中, 259 cm<sup>-1</sup> 次级频移的拉曼增益系数约为其主频移(GdVO<sub>4</sub> 882 cm<sup>-1</sup>, YVO<sub>4</sub> 890 cm<sup>-1</sup>)的一半, 因此该 1097 nm 激光的总增益与 1177 nm 和 1178 nm 激光非常接近。由于凹平腔结构与热透镜导致 Nd:GdVO<sub>4</sub> 中的光束半径明显小于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中的光束半径, Nd:GdVO<sub>4</sub> 中的激光功率密度明显大于 Nd:YVO<sub>4</sub> 中的激光功率密度, 其对拉曼激光增益的影响超过了两种拉曼晶体长度差异的影响, 因此 GdVO<sub>4</sub> 主频移 882 cm<sup>-1</sup> 对应的 1177 nm 斯托克斯光的增益大于 YVO<sub>4</sub> 主频移 890 cm<sup>-1</sup> 对应的 1178 nm 斯托克斯光, 所以 1178 nm 激光的强度低于 1177 nm 激光。此外, 由于 1097 nm 处的透过率明显低于 1177 nm 和 1178 nm 处, 1097 nm 光的振荡阈值远低于其他两者, 因此基频激光向 1097 nm 激光的转换占据主要地位, 1097 nm 激光的腔内功率密度远高于 1177 nm 和 1178 nm 激光。随着泵浦功率的增加, 当 1097 nm 激光足够强时, 会产生 1129 nm 的二阶斯托克斯光。得益于适当的输出镜透过率, 此时 1129 nm 输出功率比 1177 nm 和 1178 nm 激光高。KTP 晶体通过二阶斯托克斯 1129 nm 激光倍频产生 564 nm 黄绿光。



**Figure 2.** KTP frequency-doubled Nd:YVO<sub>4</sub>/GdVO<sub>4</sub> cascaded Raman laser spectrum  
**图 2.** KTP 倍频 Nd:YVO<sub>4</sub>/GdVO<sub>4</sub> 级联拉曼激光器光谱图

如图 3 所示重复频率在 5 kHz、10 kHz、15 kHz 时 564 nm 光输出功率随入射泵浦功率的变化。5 kHz、10 kHz 和 15 kHz 脉冲重复频率下的 564 nm 激光的入射泵浦功率阈值分别为 1.02 W、1.39 W 和 2.13 W。在三种脉冲重复频率下的 564 nm 激光输出功率都是呈现上升趋势达到一定值开始下降, 这是由于晶体中

热效应和 KTP 晶体走离角的影响: 随着功率升高到一定程度, 热透镜效应增大,  $\text{GdVO}_4$  中的光束半径变小, 1177 nm 激光在三种一阶斯托克斯光的竞争中会取得优势而压制 1178 nm 和 1097 nm 激光, 同时由于 KTP 晶体中走离角的影响, 越来越小的光束半径会导致倍频效率不再提升甚至下降。5 kHz、10 kHz 和 15 kHz 下的 564 nm 激光最大平均输出功率分别为 214 mW、226 mW 和 165 mW。脉冲重复率的升高对提高泵浦光到基频 1066 nm 激光的效率, 因为脉冲间隔时间的降低会降低消耗在自发辐射中的反转粒子数所占的比例。同时, 808 nm 泵浦功率到 1066 nm 激光到 1097 nm 激光到 1129 nm 激光再到 564 nm 激光的转化效率与单脉冲峰值功率密切相关, 脉冲重复率高, 单脉冲峰值功率就低。脉冲重复率为 5 kHz 时, 脉冲间隔时间远大于  $\text{Nd:YVO}_4$  的上能级寿命, 因此自发辐射消耗的反转粒子数较多, 而 10 kHz 时自发辐射消耗的反转粒子数显著变少, 虽然由于单个脉冲积累的反转粒子数较少导致 10 kHz 的 1066 nm 激光  $\rightarrow$  1097 nm 激光  $\rightarrow$  1129 nm 激光  $\rightarrow$  564 nm 激光整个转换过程的转换效率相对于 5 kHz 时低, 但其 808 nm  $\rightarrow$  1066 nm 高得多的转换效率使得 10 kHz 时的 564 nm 激光输出随着泵浦功率提高超过了 5 kHz 时。而脉冲重复率为 15 kHz 时, 与 10 kHz 时相比, 其 808 nm  $\rightarrow$  1066 nm 的转换效率提高不显著, 而其 1066 nm 激光  $\rightarrow$  1097 nm 激光  $\rightarrow$  1129 nm 激光  $\rightarrow$  564 nm 激光继续明显降低, 因而 15 kHz 下的 564 nm 激光输出功率难以超越 5 kHz 和 10 kHz 时。在三种脉冲重复率下, 由于热效应导致的腔内光束半径轴向分布引起的三种频移对应的斯托克斯光的竞争变化及走离角和热损耗的影响, 输入泵浦功率接近 6 W 时, 输出功率不再增加。

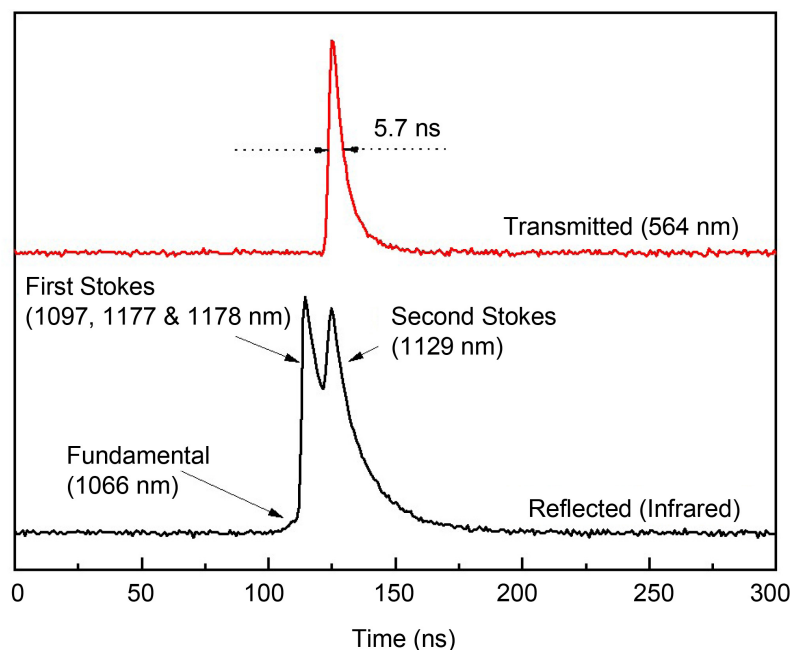


**Figure 3.** The graph showing the average output variation of the 564 nm frequency-doubled light with increasing incident pump power at repetition frequencies of 5 kHz, 10 kHz and 15 kHz

**图 3.** 重复频率在 5 kHz、10 kHz、15 kHz 时随入射泵浦增加 564 nm 倍频光的平均输出变化图

输出脉冲的时间分布如图 4 所示, 在 PRF 为 5 kHz 时, 入射泵浦功率为 5.83 W 的波形图。用数字荧光示波器(TektronixMDO3054)实现激光脉冲波形的采集。采用一分光镜片(具体透射参数  $T_{564} = 97\%$ ,  $T_{1066} = 0.1\%$ ,  $T_{1097} = 0.2\%$ ,  $T_{1129} = 0.4\%$ ,  $T_{1177} = 0.4\%$ ,  $T_{1178} = 0.4\%$ )对激光器出射激光分光, 得到的反射和透射

激光的典型脉冲波形图。反射光是由两个脉冲波峰组成的, 第一个峰属于一阶斯托克斯光 1097 nm 激光、1177 nm 激光和 1178 nm 激光, 第二峰属于二阶斯托克斯光 1129 nm 激光。透射光基本只含有 564 nm 激光的脉冲波峰, 脉冲宽度为 5.7 ns。



**Figure 4.** The waveform graph at an incident pump power of 5.83 W with a pulse repetition frequency (PRF) of 5 kHz

**图 4.** PRF 为 5 kHz 时入射泵浦功率为 5.83 W 时的波形图

#### 4. 结论

以 c 切 Nd:YVO<sub>4</sub> 为自拉曼晶体, c 切 Nd:GdVO<sub>4</sub> 作为拉曼晶体, KTP 腔内倍频, 采用声光调 Q, 基于两种拉曼晶体共有的 259 cm<sup>-1</sup> 次级频移产生二阶斯托克斯光 1129 nm 激光的有效振荡, 利用 KTP 晶体对 1129 nm 激光在腔内进行倍频, 首次获得有效 564 nm 黄绿脉冲激光输出。在 5.83 W 的入射泵浦功率下, 脉冲重复率为 10 kHz 时, 564 nm 激光最高平均输出功率 226 mW, 脉冲宽度为 5.7 ns。

#### 基金项目

吉林省科技发展计划(20240101306JC)。

#### 参考文献

- [1] Kaminskii, A.A., Ueda, K., Murai, T., *et al.* (2001) Tetragonal Vanadates YVO<sub>4</sub> and GdVO<sub>4</sub>—New Efficient X<sup>(3)</sup>-Active Crystals for Raman Laser Converters. *Laser Physics*, **11**, 1124-1133.
- [2] Pask, H.M. (2005) Continuous-Wave, All-Solid-State, Intracavity Raman Laser. *Optics Letters*, **30**, 2454-2456. <https://doi.org/10.1364/OL.30.002454>
- [3] Li, Y., Huang, X., Mao, W., *et al.* (2023) Compact 589 nm Yellow Source Generated by Frequency-Doubling of Passively Q-Switched Nd:YVO<sub>4</sub> Raman Laser. *Microwave and Optical Technology Letters*, **65**, 1122-1126. <https://doi.org/10.1002/mop.33196>
- [4] Chen, H., Hu, W., Wei, X., *et al.* (2023) High Beam Quality Yellow Laser at 588 nm by an Intracavity Frequency-Doubled Composite Nd:YVO<sub>4</sub> Raman Laser. *Optics Express*, **31**, 8494-8502. <https://doi.org/10.1364/OE.478600>
- [5] Lou, W., Li, S., Liu, J., *et al.* (2023) 568 nm Diode-Pumped Passively Q-Switched Intracavity LBO Sum-Frequency-



- Mixed Multi-Shift Nd:YVO<sub>4</sub>/GdVO<sub>4</sub> Raman Laser. *Optics Communications*, **2023**, Article ID: 129690. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2023.129690>
- [6] Su, F., Zhang, X., *et al.* (2015) Diode-Pumped Intracavity Yellow-Green Raman Laser at 560 nm with Sum-Frequency-Generation. *Optics & Laser Technology*, **66**, 122-124. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.08.003>
- [7] Chen, Y.F. (2004) Compact Efficient All-Solid-State Eye-Safe Laser with Self-Frequency Raman Conversion in a Nd:YVO<sub>4</sub> Crystal. *Optics Letters*, **29**, 2172-2174. <https://doi.org/10.1364/OL.29.002172>
- [8] Chen, Y.F. (2004) High-Power Diode-Pumped Actively Q-Switched Nd:YVO<sub>4</sub> Self-Raman Laser: Influence of Dopant Concentration. *Optics Letters*, **29**, 1915-1917. <https://doi.org/10.1364/OL.29.001915>
- [9] Li, S., Tang, R., Jin, G., *et al.* (2021) Actively Q-Switched Intracavity Nd:YVO<sub>4</sub>/GdVO<sub>4</sub> Raman Laser Operating with Multiple Raman Shifts of 259,882 and 890 cm<sup>-1</sup>. *Applied Physics B*, **127**, Article No. 16. <https://doi.org/10.1007/s00340-020-07551-z>
- [10] Gao, J., Zhang, L., Sun, H., *et al.* (2014) High-Power Continuous-Wave Yellow-Green Laser at 558 nm under In-Band Pump. *Optics Communications*, **319**, 110-112. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.01.007>
- [11] Yao, W., Gao, J., Zhang, L., *et al.* (2015) Continuous-Wave Yellow-Green Laser at 0.56 μM Based on Frequency Doubling of a Diode-End-Pumped Ceramic Nd:YAG Laser. *Applied Optics*, **54**, 5817-5821. <https://doi.org/10.1364/AO.54.005817>
- [12] Shen, H., Wang, Q., Zhang, X., *et al.* (2012) Simultaneous Dual-Wavelength Operation of Nd:YVO<sub>4</sub> Self-Raman Laser at 1524 nm and Undoped GdVO<sub>4</sub> Raman Laser at 1522 nm. *Optics Letters*, **37**, 4113-4115. <https://doi.org/10.1364/OL.37.004113>
- [13] Shen, H.B., *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>
- [14] Shen, H.B., Wang, Q.P., Zhang, Y.X., *et al.* (2013) A Frequency-Doubled Nd:YAG/KTP Laser at 561 nm with Diode Side-Pumping. *Laser Physics*, **23**, Article ID: 035402. <https://doi.org/10.1088/1054-660X/23/3/035402>
- [15] Li, X., Shen, X. and Li, G. (2015) Cyclic Variation of Output Energy with Ambient Temperature Changes in Intracavity KTP Frequency-Doubling Laser. *Optik*, **126**, 279-282. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.08.165>
- [16] Shen, H., Wang, Q., Zhang, X., *et al.* (2013) Intracavity Frequency-Doubled Nd:YAG/KLu (WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Raman Laser at 589 nm: A Potential Source for Sodium D<sub>2</sub> Resonance Radiation. *Optics & Laser Technology*, **45**, 142-146. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.07.013>
- [17] Lan, R., Cheng, H. and Yang, G. (2015) Continuous Wave Yb:YCOB Cyan Lasers with KTP as the Sum-Frequency Converter. *Optics Communications*, **357**, 169-171. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.09.008>
- [18] Lu, Y., Zhang, J., *et al.* (2014) Orthogonally Polarized Dual-Wavelength Nd:YAlO<sub>3</sub> Laser at 1341 and 1339 nm and Sum-Frequency Mixing for an Emission at 670 nm. *Applied Optics*, **53**, 5141-5146. <https://doi.org/10.1364/AO.53.005141>