

二极管泵浦Cr⁴⁺:YAG调Q腔内C切Nd:GdVO₄/KTP拉曼激光器

管园明, 李述涛

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年1月24日; 录用日期: 2024年2月22日; 发布日期: 2024年2月29日

摘要

研究了二极管泵浦Cr⁴⁺:YAG调Q腔内c切Nd:GdVO₄/KTP拉曼激光器。以c切Nd:GdVO₄作为激光增益介质, 以KTP作为拉曼晶体, 以T₀为80%与89%的两块Cr⁴⁺:YAG分别作为可饱和吸收体, 获得了高效的1097 nm拉曼激光输出。当使用T₀为89%的Cr⁴⁺:YAG且泵浦功率为6.42 W时, 在1097 nm处获得481 mW的最大平均输出功率。

关键词

二极管泵浦, Nd:GdVO₄, KTP, 拉曼激光器

Diode Pumped Cr⁴⁺: YAG Q-Switched Intracavity C-Cut Nd:GdVO₄/KTP Raman Laser

Yuanming Guan, Shutao Li

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

Received: Jan. 24th, 2024; accepted: Feb. 22nd, 2024; published: Feb. 29th, 2024

Abstract

A diode pumped Cr⁴⁺:YAG Q-switched intracavity c-cut Nd:GdVO₄/KTP Raman laser was experimentally studied. Efficient 1097 nm Raman laser output was achieved by using a c-cut Nd:GdVO₄ as the laser gain medium, and a KTP as the Raman crystal. Two pieces of Cr⁴⁺:YAG with T₀ of 80% and 89% were employed, respectively when using Cr⁴⁺:YAG with a T₀ of 89% and a pump power of 6.42

W, the maximum average output power of 481 mW was obtained at 1097 nm.

Keywords

Diode Pumped, Nd:GdVO₄, 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

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]。

c切Nd:GdVO₄作为一种优良的被动调Q激光增益介质,具有吸收系数大、热导率高等优点。同时,GdVO₄还具有好的拉曼增益,是优异的自拉曼晶体之一[4] [5]。磷酸钛氧钾(KTiOPO₄,KTP)作为一种优秀的非线性光学晶体材料,基于其损伤阈值高、非线性系数大、导热性能好、光学均匀性好、光谱传输范围宽等优点,在倍频、和频、差频等方面已经得到广泛研究与应用,同时KTP还是性能优良的拉曼晶体。1980年G. A. Massey等人首次在KTP中进行了拉曼散射研究,其研究结果显示KTP最显著的拉曼频移分别在270 cm⁻¹和690 cm⁻¹附近[6]。

2011年Huang等人报道了一种二极管泵浦被动调Q Nd:YAG/KTP拉曼激光器,并且在KTP晶体中实现了受激拉曼散射(SRS)和光学参量振荡(OPO),该激光器在8.6W的入射泵浦功率下,在1096 nm和1572 nm处获得最大平均功率分别为1.1 W和0.36 W,对应的最小脉冲宽度分别为2.8 ns和1.1 ns [7]。2013年,苏富芳等人报道了一种二极管端面泵浦1096 nm主动调Q Nd:YAG/KTP拉曼激光器,该激光器在30 kHz的脉冲重复率、入射泵浦功率为11.75 W时,平均输出功率为1.97 W,相应的抽运光-斯托克斯光转换效率为16.8% [8]。

与主动调Q激光器相比,被动调Q激光器具有控制简单、价格低廉、所占体积小、不需要外加驱动设备、易操作等优势。本文进行了激光二极管泵浦Cr⁴⁺:YAG调Q内腔式Nd:GdVO₄/KTP拉曼激光器的实验研究,采用两块初始透过率不同的Cr⁴⁺:YAG,分别得出了不同的拉曼光输出情况。

2. 实验装置

被动调Q Nd:GdVO₄/KTP拉曼激光器实验装置如图1所示,以40 W光纤耦合激光二极管作为泵浦源,纤芯直径为400 μm,数值孔径为0.22,使用1:1放大比的聚焦耦合透镜系统使泵浦光汇入到Nd:GdVO₄晶体。输入镜M1为曲率半径为300 mm的凹面镜,镀膜对1064和1178 nm高反(R > 99.5%),在凹侧面镀808 nm抗反射膜(T > 97%),在平面侧镀抗反射膜(R < 0.2%)。以3 × 3 × 18 mm³,Nd掺杂浓度为0.3%的Nd:GdVO₄作为激光增益介质,在1065~1176 nm处镀抗反射膜(R < 0.2% @ 1064 nm, R < 0.5% @ 1065~1176 nm)。采用4 × 4 × 30 mm³的KTP晶体作为拉曼晶体,在晶体两侧分别进行抗反射涂层(R < 0.2% @ 1064 nm, R < 0.5% @ 1065~1176 nm)。分别采用初始透过率(T₀)为89%与80%的两块4 × 4 × 2.3 mm³

的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作为 Q 开关, 晶体两侧在 1065 nm 处进行 AR 涂层 ($R < 0.2\%$)。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%

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 $16^{\circ}\text{C}\sim 18^{\circ}\text{C}$ 。经过计算, 谐振腔整体长度约为 100 mm 左右。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。

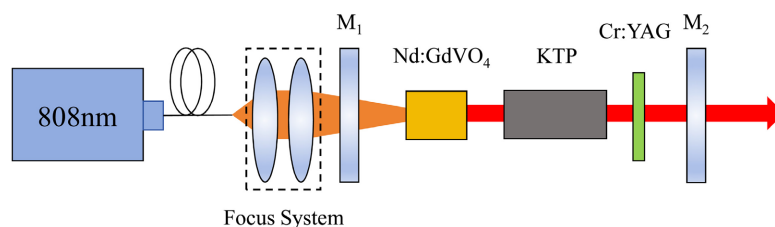


Figure 1. Experimental setup diagram of passive Q-switched Nd:GdVO₄/KTP Raman laser

图 1. 被动调 Q Nd:GdVO₄/KTP 拉曼激光器实验装置图

3. 实验结果与讨论

图 2 显示了当入射泵浦功率为 6.93 W 时拉曼激光器的输出光谱图, 输出谱线由三条激光谱线组成: 1065 nm、1097 nm 和 1130 nm。其中 1065 nm 为基频光, 1097 nm 与 1130 nm 为基于 KTP 中 267 cm^{-1} 拉曼频移的一阶、二阶斯托克斯光。没有观察到基于 GdVO_4 中 882 cm^{-1} 拉曼频移的斯托克斯光。

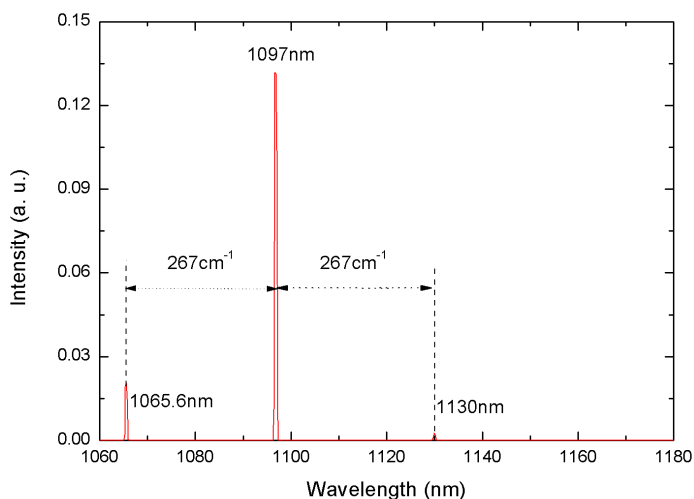


Figure 2. The output spectrum of a Raman laser with an incident pump power of 6.93 W

图 2. 入射泵浦功率为 6.93 W 时拉曼激光器的输出光谱

由图 2 可知 1097 nm 一阶斯托克斯光占据输出的绝对优势, 1130 nm 二阶斯托克斯光输出微弱, 可忽略不计。图 3 显示了 1097 nm 拉曼光的平均输出功率与泵浦功率的关系, 当 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的初始透射率分别为 0.80 和 0.89 时, 对应的拉曼光输出阈值分别为 3.99 W 和 2.43 W, 当泵浦功率为 6.62 W 和 6.42 W 时得到了对应的峰值平均输出功率分别为 441 mW 与 481 mW, 转换效率分别为 6.7% 和 7.5%, 但随着泵浦功率的继续增大, 其平均输出功率开始下降, 主要原因是由于激光介质受到热效应的影响, 基频光光束质量差与斯托克斯光的热损耗严重, 从而导致基频光到斯托克斯光的转换效率变低。从中还可以观察到更大的初始透过率有着更小的输出阈值的也有着更小的斜效率。图 4 显示了 1097 nm 拉曼光的脉冲重复频率与泵浦功率的关系, 当 T_0 分别为 0.80 和 0.89 且泵浦功率为 6.62 W 时, 得到了对应的最大脉冲重复频率为 22.5 kHz 与 12.7 kHz, 随着 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的初始透射率增大, 脉冲重复频率增加, 且随着泵浦功率的增大而增加, 与平均输出功率不同的是, 脉冲重复频率并没有出现下降的趋势。通过被动调 Q 拉曼激光器的平均输出功率和脉冲重复率可以得到输出的单脉冲能量, 图 5 显示了当 T_0 分别为 0.80 和 0.89 时 1097 nm 拉曼光的脉冲能量随泵浦功率的变化, 可以看出当 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透过率为定值时, 对应的脉冲能量变化幅度较小, 上下浮动最大约为 10 μJ 。当泵浦功率为初始值时, 泵浦功率的增加导致 KTP 晶体中的激光光束半径减小, 并且 KTP 中的激光强度增加, 因此从基频光到斯托克斯光的转换效率增加, 1097 nm 的脉冲额能量增加。在 $T_0 = 0.80$ 与泵浦功率为 4.78 W 的条件下获得了最大的脉冲能量为 37.91 μJ 的拉曼光, 当泵浦功率为定值时, 脉冲能量与 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的初始透射率的值成反比关系。

图 6 显示了当 T_0 分别为 0.80 和 0.89 时, 输出的拉曼激光的脉冲宽度与泵浦功率的关系。由图 6 可以看出当 T_0 为定值时, 脉冲宽度随泵浦功率的增大变化较小, 增减范围在 2 ns 以内, 当泵浦功率为定值时, 脉冲宽度与 T_0 的值成正比, 更小的初始透过率能获得更窄的脉冲宽度, 分别在泵浦功率为 5.18 W 和 6.62 W 时获得了对应的脉冲宽度最小值 12.3 ns 与 14.4 ns。

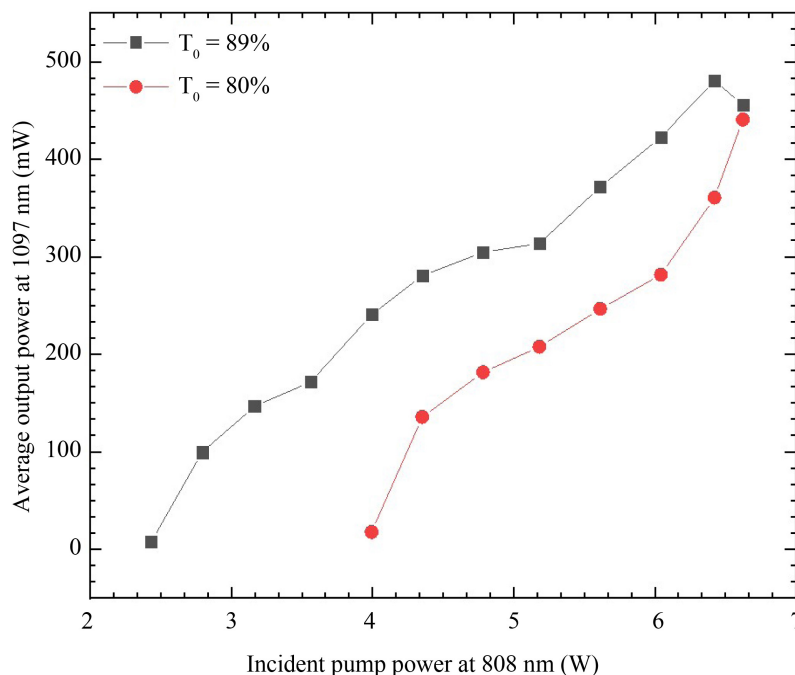


Figure 3. Variation of 1097 nm average output power with the incident pump power when T_0 were 0.80 and 0.89

图 3. T_0 分别为 0.80 和 0.89 时, 1097 nm 波长光的平均输出功率随入射泵浦功率的变化

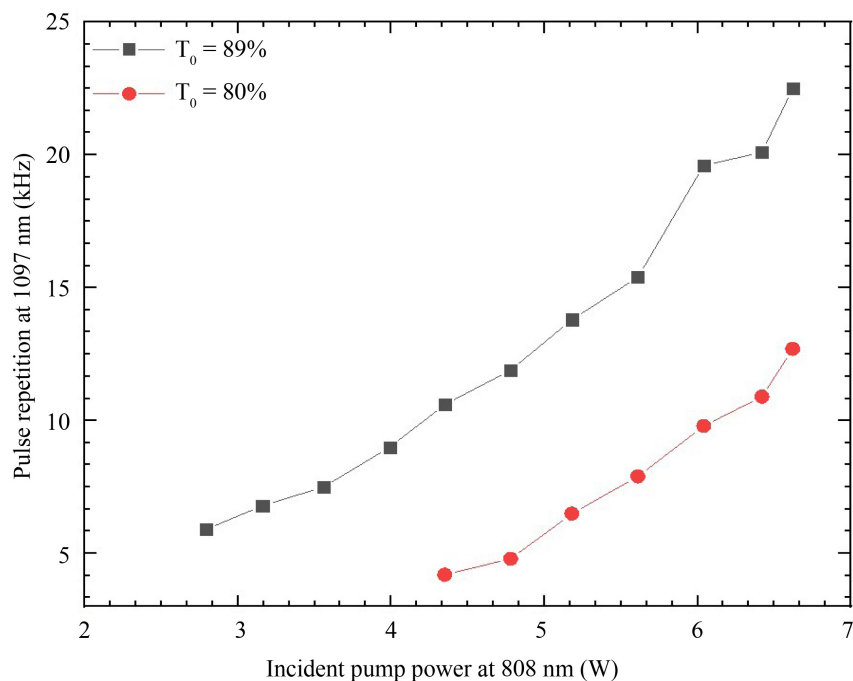


Figure 4. Variation of 1097 nm pulse repetition frequency with the incident pump power when T_0 were 0.80 and 0.89

图 4. T_0 分别为 0.80 和 0.89 时, 1097 nm 波长光的脉冲重复频率随入射泵浦功率的变化

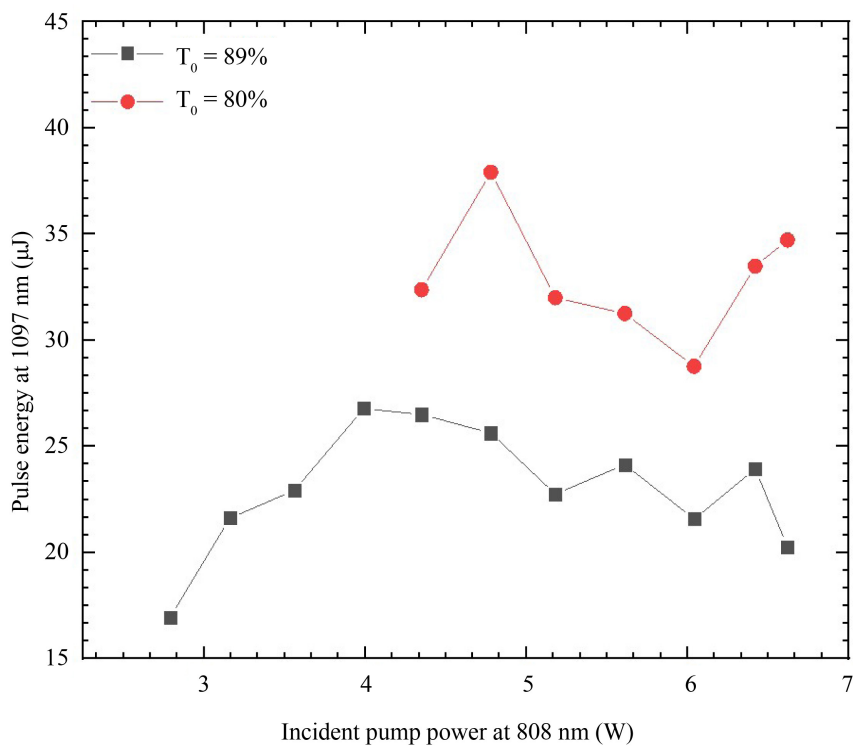


Figure 5. Variation of 1097 nm pulse energy with the incident pump power when T_0 were 0.80 and 0.89

图 5. T_0 分别为 0.80 和 0.89 时, 1097 nm 波长光的脉冲能量随入射泵浦功率的变化

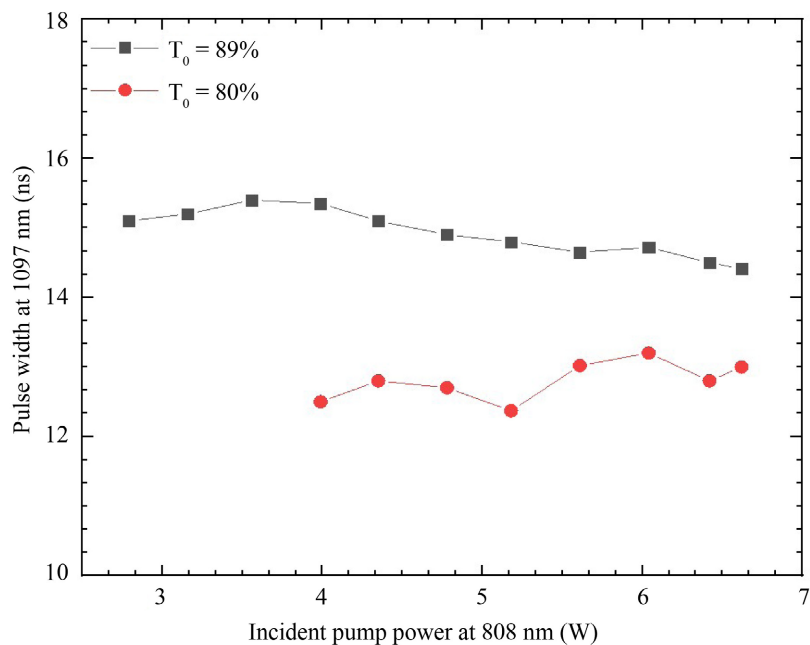


Figure 6. Variation of 1097 nm pulse width with the incident pump power when T_0 were 0.80 and 0.89

图 6. T_0 分别为 0.80 和 0.89 时, 1097 nm 波长光的脉冲宽度随入射泵浦功率的变化

通过数字荧光示波器(Tektronix MDO 3054, 500 MHz 带宽, 5×10^9 个样本/s)与 InGaAs 偏置探测器(Thorlabs DET10 C/M, 700~1800 nm)记录激光输出的激光脉冲波形。在 $T_0 = 89\%$, 入射泵浦功率为 4.78 W 时的典型示波器轨迹如图 7 所示, 此时脉冲宽度为 14.9 ns。

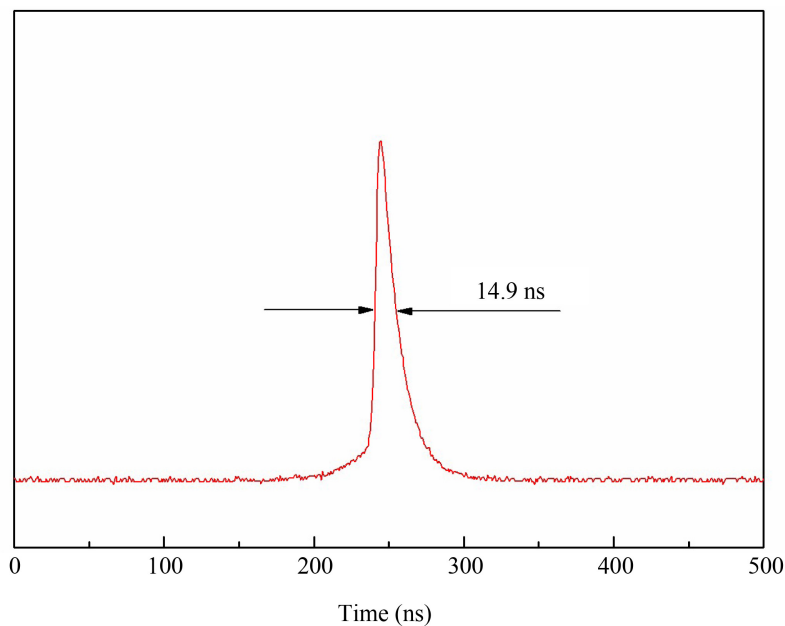


Figure 7. Typical oscilloscope trajectory of laser pulse when T_0 is 0.89 and the incident pump power is 4.78 W

图 7. 当 T_0 为 0.89 入射泵浦功率为 4.78 W 时激光脉冲典型示波器轨迹

4. 结论

研究二极管泵浦 Nd:GdVO₄/KTP 腔内被动调 Q 拉曼激光器的输出特性, 基于 KTP 晶体在 267 cm⁻¹ 处的拉曼频移, 获得了 1097、1130 nm 的一阶、二阶斯托克斯光输出; 当使用 T₀ 为 80% 的 Cr⁴⁺:YAG 时, 在 1097 nm 处获得了 441 mW 的最大平均输出功率, 且泵浦功率为 5.18 W 时获得了最小脉冲宽度为 12.3 ns; 当使用 T₀ 为 89% 的 Cr⁴⁺:YAG 时, 在 1097 nm 处获得了 481 mW 的最大平均输出功率, 且泵浦功率 6.62 W 时获最小脉宽为 14.4 ns, 对应的泵浦光 - 斯托克斯光的最大转换率为 7.5%, 斜效率为 12%。

基金项目

吉林省科技发展计划(YDZJ202101ZYTS031)。

参考文献

- [1] Jiang, P.B., Ding, X., Guo, J., Zhang, H.W., Qi, H.F., Shang, Y., Song, Z.Q., Wang, W.T., Wang, C., Liu, G.Q., Yao, C.M., Ni, J.S. and Yao, J.Q. (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 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] 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>
- [5] Li, S.T., Jin, G.Y. and Dong, Y. (2020) Simultaneous Three Raman Shift Passively Q-Switched Intracavity Raman Laser Based on the Overlapping Raman Shift of 259 cm⁻¹ in C-Cut GdVO₄ and YVO₄. *Applied Physics B*, **126**, 37-46. <https://doi.org/10.1007/s00340-020-7389-3>
- [6] Li, Y., Huang, X., Mao, W., et al. (2023) Compact 589 nm Yellow Source Generated by Frequency-Doubling of Passively Q-Switched Nd:YVO₄ Raman Laser. *Microwave and Optical Technology Letters*, **65**, 1122-1126. <https://doi.org/10.1002/mop.33196>
- [7] Huang, H.T., He, J.L., Liu, S.D., Yang, J.F. and Liu, F.Q. (2011) Efficient Generation of 1096 nm and 1572 nm by Simultaneous Stimulated Raman Scattering and Optical Parametric Oscillation in One KTiOPO₄ Crystal. *Applied Physics B*, **103**, 129-135. <https://doi.org/10.1007/s00340-010-4250-0>
- [8] Su, F.F., Zhang, X.Y., Wang, W., Cong, Z.H., Shi, M., Yang, X., Kong, W., Ma, L. and Wu, W. (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>