

半导体泵浦主动调Q Nd:YVO₄/YVO₄/KGW 双频移拉曼激光器

于善军, 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

实现了以c切Nd:YVO₄晶体作为激光增益介质, b切KGW和a切YVO₄为拉曼晶体的半导体泵浦主动调Q双频移同步振荡的拉曼激光器的高效运转, 得到YVO₄晶体在890 cm⁻¹处1178 nm和KGW晶体在901 cm⁻¹处1180 nm的一阶斯托克斯光的双波长同步脉冲输出, 当入射泵浦功率为8.37 w, 脉冲重复率为15 kHz时, 由1178和1180 nm光组成的拉曼激光平均输出最高为1.45 w。

关键词

主动调Q, Nd:YVO₄, YVO₄, KGW, 拉曼激光器

Diode-Pumped Actively Q-Switched Nd:YVO₄/YVO₄/KGW Dual-Shift Raman Laser

Shanjun Yu, 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

The efficient operation of a semiconductor-pumped actively Q-switched dual-frequency-shifted synchronous oscillation Raman laser was successfully demonstrated, employing a c-cut Nd:YVO₄ crystal as the laser gain medium in conjunction with b-cut KGW and a-cut YVO₄ crystals serving as Raman crystals. The synchronous dual wavelength pulse output of 1178 and 1180 nm first-order Stokes light corresponding to 890 cm⁻¹ Raman shift in YVO₄ and 901 cm⁻¹ Raman shift in KGW is obtained. When the incident pump power is 8.37 w and the PRF is 15 kHz, the average output Raman laser composed of 1178 and 1180 nm lines is 1.45 w.

文章引用: 于善军, 李述涛. 半导体泵浦主动调Q Nd:YVO₄/YVO₄/KGW 双频移拉曼激光器[J]. 应用物理, 2025, 15(4): 209-214. DOI: 10.12677/app.2025.154023

Keywords

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

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

固体拉曼激光器是利用晶体中的受激拉曼散射(SRS: Stimulated Raman Scattering)实现对固体激光转换输出的一种激光器[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。基于不同晶体的受激拉曼散射(SRS)的非线性光学过程成为获得多波长输出激光器的重要手段[2]-[4]。

Nd:YVO₄晶有非常多的优点: 1) 激光转换效率高, 2) 波长调谐范围宽, 3) 激光输出功率高, 4) 光束质量高, 5) 激光器结构简单等, 特别适合用于 LD 泵浦, 是应用最为广泛的激光晶体之一。2011 年, S.Z. Fan 等人报道了以 c-cut Nd:YVO₄晶体为泵浦源, 实验选用 880 nm 共振泵浦进行光纤耦合, 实现了主动调 Q 方式下 1097 nm 激光输出, 研究和比较了凹平面和平面振荡腔中的拉曼激光性能。在泵浦功率为 12.4 W, 重频为 50 kHz 时, 腔内 1097 nm 激光的最高平均输出功率为 1.45 W, 此时光 - 光转化率达到 11.7 % [5]。2017 年, Junhong Guo 等人报道了一种级联 c 切 Nd:YVO₄自拉曼激光器, 能够产生单次 259 cm⁻¹ 的拉曼频移[6]。他们采用了级联 c 切 Nd:YVO₄自拉曼操作, 并选择了适合的图层设计, 以抑制主拉曼频移为 890 cm⁻¹ 的斯托克斯振荡, 从而实现了单一拉曼频移为 259 cm⁻¹ 的级联振荡。在入射泵浦功率为 13.3 W 的情况下, 得到了输出波长为 1129 nm 的 0.81 W 激光输出。2021 年, 尤建村等人报道了一项关于 912 nm/1064 nm 同步双波长激光特性的研究[7], 该研究采用了 Nd:GdVO₄ 晶体和 Nd:YVO₄ 晶体作为激光增益介质, 在最大泵浦功率为 15 W 的情况下, 得到了最大输出功率为 0.65 W 的 912 nm 准三能级激光, 其斜效率约为 7%。

YVO₄晶体由于具有折射率大, 透过波段宽, 物理性质优良稳定性好等优点特性, 从而成为固体激光器领域应用最为普遍的拉曼晶体之一。2018 年, 李长明等人报道了一种 LD 侧面泵浦主动调 Q Nd:YAG/YVO₄内腔式拉曼激光器[8]。该激光器利用半导体侧面泵浦, Nd:YAG 激光介质, 采用长度为 40 mm 的 a 切 YVO₄晶体作为拉曼增益介质, 并通过声光调 Q 技术实现了高效的 1176 nm 拉曼激光输出。将入射泵浦功率调至 117.7 W, 脉冲重复率调至 15 kHz 的情况下, 获得 6.98 W 的 1176 nm 激光输出。2019 年 Yang Liu 等人从理论和实验上研究了一种基于同轴泵浦双晶体(Nd:YAG 和 b 切 Nd:YAP)结构的主动调 Q 双波长腔内拉曼激光器[9]。在 1176 nm 和 1195 nm 的稳定双波长斯托克斯输出, 随后从 a 切 YVO₄晶体的拉曼转换得到, 在重复频率为 10 kHz, 泵浦功率为 15.8 W 时, 可以获得 1.8 W 的拉曼激光输出。

在众多的拉曼晶体中, KGW 作为拉曼晶体具有很多优良性能, 同样有众多的实验研究报道。其突出优点是具有非常高的损伤阈值, 导热性好[10]。2023 年, 盛泉等人报道了一种高效率的连续波 Nd:YVO₄/KGW 内腔式拉曼激光器的研究成果[11]。当基频光的偏振方向与 KGW 晶体的 Nm 轴平行时, 获得了较高的 901 cm⁻¹ 拉曼频移增益。入射泵浦功率调至 36.6 W 的情况下, 获得了输出功率为 6.63 W 的连续斯托克斯光输出。2024 年, Wang Y 等人报道了含有声光调 Q 开关的 1342 nm Nd:YVO₄/KGW 内腔式拉曼激光器。泵浦功率为 64.5 W 时, 1496 nm 和 1527 nm 的一阶斯托克斯光的平均输出功率分别可

达 8.1 W 和 9.5 W, 脉冲重复率为 25 kHz, 光 - 光转换效率分别为 12.6% 和 14.7%。脉宽为 4.6 和 6.3 ns, 峰值功率分别约为 70 和 60 kW [12]。

本文中, 声光调 Q 内腔式拉曼激光器中采用 Nd:YVO₄ 作激光晶体, YVO₄ 和 KGW 作为拉曼增益介质, 实现 1178 nm 和 1180 nm 拉曼光的双频移同步振荡输出。当入射泵浦功率为 8.37 W, 脉冲重复率为 15 kHz 时, 由 1178 和 1180 nm 组成的拉曼光平均最高输出功率为 1.45 W。

2. 实验装置

如图 1 所示, 图 1 为主动调 Q Nd:YVO₄/YVO₄/KGW 双频移拉曼激光器的实验装置图。采用 40 W 光纤耦合 808 nm 半导体激光器作为泵浦源, 芯径为 400 μm, 数值孔径(NA)为 0.22。利用 1:1 的成像倍率和 97% 的耦合效率聚焦透镜系统, 将泵浦光重新成像到激光晶体上。输入镜 M1 曲率半径 3000 mm, 输出镜 M2 为平面镜, 在 1066 nm ($R > 99.8\%$) 处镀膜高反, 在 1066 nm ($R = 99.8\%$)、1178 nm ($R = 99.5\%$) 处镀膜部分透过。采用 $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}^3$ 0.3at%掺杂 c 切 Nd:YVO₄ 晶体作为激光增益介质, 采用 $3 \times 3 \times 30 \text{ mm}^3$ a 切 YVO₄ 晶体作为拉曼增益介质, 激光另一种拉曼增益介质为 $4 \times 4 \times 30 \text{ mm}^3$ KGW 晶体。在 1066 nm ($R < 0.2\%$) 和 1097~1180 nm ($R < 0.5\%$) 处对三种晶体的两侧进行了抗反射(AR)涂层。针对 Nd:YVO₄ 晶体的入射端面实施了 808 nm 波段抗反射镀膜工艺, 进行了热处理($R < 3\%$)。晶体组件采用铟箔包覆工艺进行气密性封装, 并集成于水冷式无氧铜热沉模块, 通过闭环热交换系统维持工作介质温度于 18.0 °C。在双拉曼晶体架构中插入声光调 Q 模块, 该器件工作于 41 MHz 中心频率, 匹配 20 W 射频驱动功率, 其光学界面均镀 1066 nm 增透膜系, 经分光光度计验证单面剩余反射率 $R < 0.002$ (0.2%)。谐振腔总几何长度优化为 130 mm。测量系统构建方面, 平均输出功率的计量采用以色列 OPHIR 公司 F150A 型功率计, 时域特性测量使用美国泰克公司 MDO3054 型混合域示波器, 光谱分析采用日本横河公司 AQ6373B 型高分辨率光谱仪, 工作波长范围(350~1200 nm)。

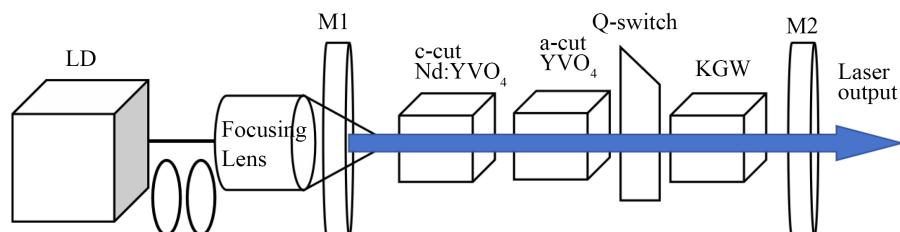


Figure 1. Experimental setup diagram of an active Q-switched Nd:YVO₄/YVO₄/KGW dual-frequency shift Raman laser
图 1. 主动调 Q Nd:YVO₄/YVO₄/KGW 双频移拉曼激光器的实验装置图

3. 实验结果与讨论

图 2 给出了主动调 Q Nd:YVO₄/YVO₄/KGW 内腔式双频移拉曼激光器的输出基频光的光谱图, 图中可以看出一个明显的光谱峰, 得到 1066.8 nm 的基频光输出正对应 c 切了 Nd:YVO₄ 基频光的中心波长。

图 3 为主动调 Q Nd:YVO₄/YVO₄/KGW 内腔式双频移拉曼激光器的精细光谱, 图中可以看出它由两个明显的光谱峰组成, 分别为 1178.6 和 1180.1 nm, 其中 1178.6 nm 拉曼光和 1180.1 nm 拉曼光强度相近, 1178.6 nm 光是一阶托克斯光, 对应于 YVO₄ 中 890 cm^{-1} 的拉曼频移, 1180.1 nm 拉曼光对应于 KGW 中的 901 cm^{-1} 的拉曼频移, 两个输出光谱之间的差异是由于两个波长的斯托克斯光的拉曼增益系数不同, 输出镜的透射率不同, 随着泵浦功率的增加 1180 nm 拉曼光比 1178 nm 拉曼光先达到阈值。

本实验通过图 4 揭示了脉冲重复频率(PRF)在 5 kHz、10 kHz 及 15 kHz 参数条件下, 拉曼激光平均

输出功率的演化规律。实验测得三种 PRF 对应的入射泵浦功率阈值分别为 0.63 W (5 kHz)、1.06 W (10 kHz) 及 1.49 W (15 kHz)。值得注意的是, 由于 KGW 晶体在 901 cm^{-1} 拉曼频移对应的 1180 nm 具有相对较低的透射系数, 而 YVO₄ 晶体在 890 cm^{-1} 频移对应的 1178 nm 拉曼光透射系数较高, 导致 1180 nm 斯托克斯光的激发阈值显著低于 1178 nm。这一特性使得在泵浦功率梯度增加过程中, 1180 nm 拉曼光优先达到振荡条件并形成有效输出。进一步分析表明, 热透镜效应引发的非线性光学响应是阈值 - 频率关系偏离线性增长的关键因素。当泵浦功率增强时, KGW 晶体内部产生的热梯度场导致光束束腰半径压缩, 显著提升局域功率密度, 从而增强受激拉曼散射增益。实验数据进一步表明, 当泵浦功率超过阈值后, 输出功率呈现典型三段式演变: 初始线性增长阶段、过渡饱和阶段及热致衰减阶段。具体而言, 在 PRF = 5 kHz、泵浦功率 7.51 W 时获得最大输出功率 958 mW; PRF = 10 kHz、7.94 W 时提升至 1.23 W; PRF = 15 kHz、8.37 W 时达到峰值 1.45 W。

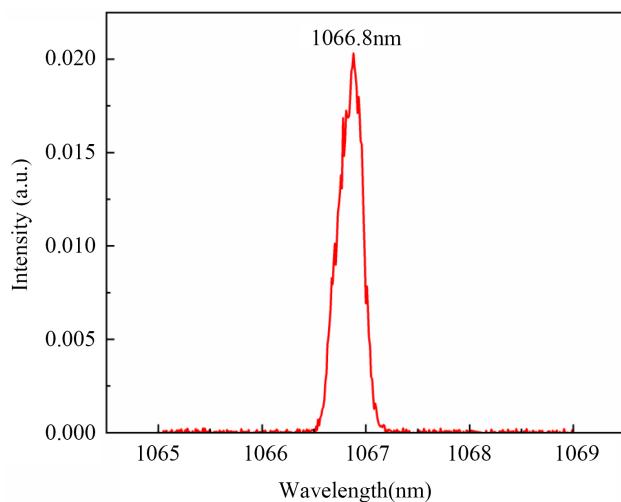


Figure 2. Active Q-switched Nd:YVO₄/YVO₄/KGW dual-frequency shifted Raman laser output fundamental light spectrum
图 2. 主动调 Q Nd:YVO₄/YVO₄/KGW 双频移拉曼激光器输出基频光光谱图

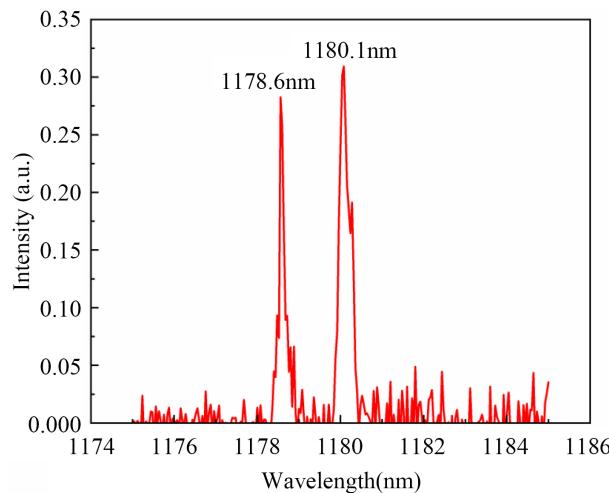


Figure 3. Output Raman spectra of actively Q-switched Nd:YVO₄/YVO₄/KGW dual-frequency shifted Raman lasers
图 3. 主动调 Q Nd:YVO₄/YVO₄/KGW 双频移拉曼激光器输出拉曼光光谱图

本实验在脉冲重复频率 15 kHz 条件下, 采用分光光学元件 F 对激光器输出光束进行分光处理, 通过

图 5 所示, 分别获取反射与透射光路的典型脉冲波形特征。实验观测数据显示, 两个光路的脉冲序列均呈现单一主峰结构, 未检测到次生脉冲的时域调制现象。通过光谱分析确认, 该分光镜的光学镀膜特性表现为: 对基频 1066 nm 波段具有高反射率($R > 99\%$), 而对 1178 nm 与 1180 nm 斯托克斯波长则保持高透射率($T > 95\%$), 可以看出, 基频光脉冲波形与拉曼光脉冲波形具有明显不同, 基频光的上升沿较缓, 下降沿陡峭, 而拉曼光上升沿陡峭, 下降沿较缓, 这充分说明了受激拉曼散射作为一种三阶非线性效应, 其受基频光功率密度的影响以及发射过程的剧烈, 基频光向拉曼光转化的快速。1178 nm 和 1180 nm 激光的脉宽是 19.45 ns。

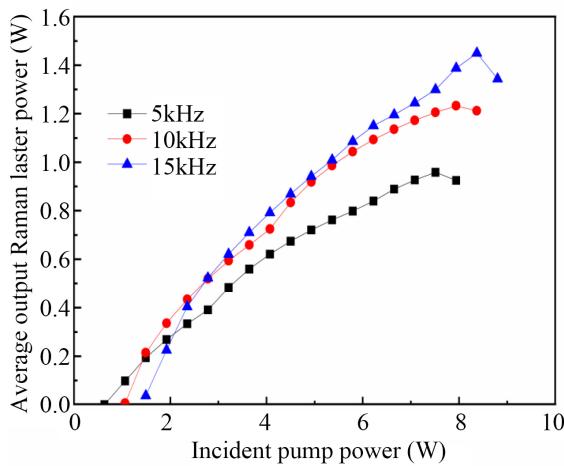


Figure 4. The variation of Raman laser output power with pump power
图 4. 拉曼激光输出功率随泵浦功率的变化

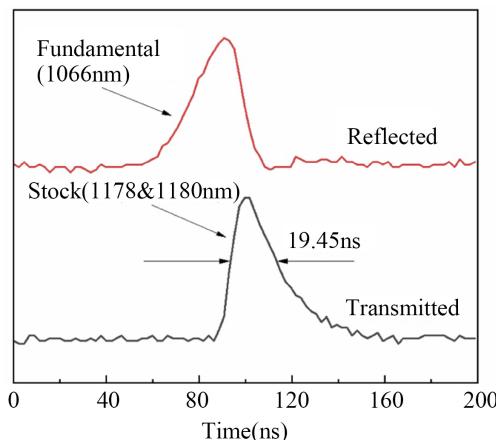


Figure 5. Typical pulse shape of the reflected and transmitted output laser at a repetition rate of 15 kHz
图 5. 重复频率为 15 kHz 时反射和透射输出激光的典型脉冲形状

4. 结论

采用 c 向切割的 Nd:YVO₄ 晶体作为激光增益介质, 配合 YVO₄ 晶体构成拉曼振荡腔, 通过其 890 cm⁻¹ 的拉曼频移特性, 成功激发出 1178 nm 的斯托克斯光。为构建双波长同步输出体系, 实验方案中引入 KGW 晶体作为二次拉曼介质, 利用其 901 cm⁻¹ 的特征频移量, 获得 1180 nm 的斯托克斯光, 从而实现了双波长脉冲的高效耦合输出。在入射泵浦功率为 8.37 W, 重复频率 15 kHz 时达到最大平均输出功率为 1.45 W。

基金项目

本吉林省自然科学基金(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., Mao, T., Zhang, L. and Chen, X. (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., Wang, J., Shen, J., Fan, H., 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., Zhang, B., Cai, Y., Ding, J., 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] Fan, S.Z., et al. (2011) 1097 nm Nd:YVO₄ Self-Raman Laser. *Optics Communications*, **284**, 1642-1644. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.11.050>
- [6] Guo, J., Zhu, H., Duan, Y., Xu, C., Ruan, X., Cui, G., et al. (2017) Cascaded C-Cut Nd:YVO₄ Self-Raman Laser Operation with a Single 259 cm⁻¹ Shift. *Journal of Optics*, **19**, Article ID: 035501. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/aa5781>
- [7] 尤建村, 闻军, 马业万. 912 nm/1064 nm 同步双波长激光特性研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(2):184-188.
- [8] 李长明, 李述涛, 黄凯等. LD 侧面泵浦主动调 Q Nd:YAG/YVO₄ 内腔式拉曼激光器[J]. 通信电源技术, 2018, 35(2): 58-59.
- [9] Liu, Y., Sheng, Q., Zhong, K., Shi, W., Ding, X., Qiao, H., et al. (2019) Dual-Wavelength Intracavity Raman Laser Driven by a Coaxially Pumped Dual-Crystal Fundamental Laser. *Optics Express*, **27**, 27797-27806. <https://doi.org/10.1364/oe.27.027797>
- [10] Černý, P., Jelínková, H., Zverev, P.G. and Basiev, T.T. (2004) Solid State Lasers with Raman Frequency Conversion. *Progress in Quantum Electronics*, **28**, 113-143. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2003.09.003>
- [11] 盛泉, 耿婧施, 李锦辉, 等. 高效率连续波 Nd:YVO₄/KGW 内腔拉曼激光器[J]. 中国激光, 2024, 51(5): 19-23.
- [12] Wang, Y., Tan, W., Chen, P., Dai, S., Zhu, S., Yin, H., et al. (2024) High Average Power and High Repetition Rate Eye-Safe Raman Laser Driven by a Two-Crystal Nd:YVO₄ Laser. *Optics Letters*, **49**, 4270-4273. <https://doi.org/10.1364/ol.530327>