

LD抽运c-cut Nd:YVO₄/a-cut YVO₄/c-cut GdVO₄同步脉冲多波长拉曼激光器的研究

陈子涵, 李述涛

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年12月13日; 录用日期: 2026年1月7日; 发布日期: 2026年1月15日

摘要

本文报道了一种采用c-Nd:YVO₄为自拉曼晶体, a-YVO₄和c-GdVO₄作为拉曼晶体的声光调Q同步脉冲三波长复合拉曼激光器, 利用c切YVO₄和c切GdVO₄都有的有效259 cm⁻¹次级频移, 在腔内加入a切YVO₄提高1178 nm斯托克斯激光增益以实现高功率抽运下三种一阶斯托克斯光的增益相对平衡。采用声光调Q, 实现了1097 nm、1177 nm、1178 nm三个频移对应的一阶斯托克斯光同步脉冲三波长高峰值功率输出, 且无二阶斯托克斯光产生。当脉冲重复率为10 kHz, 入射泵浦功率为6.42 W时, 1097 nm, 1177 nm和1178 nm三波长同步脉冲激光平均功率为885 mW, 光 - 光转换效率为13.79%。

关键词

Nd:YVO₄, GdVO₄, 固体拉曼激光器

Study on Synchronously Pulsed Multi-Wavelength Diode-Pumped Raman Laser Based on c-cut Nd:YVO₄/a-cut YVO₄/c-cut GdVO₄

Zihan Chen, Shutao Li

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

Received: December 13, 2025; accepted: January 7, 2026; published: January 15, 2026

Abstract

This paper reports an actively Q-switched synchronous pulse three-wavelength composite Raman

laser using a c-Nd:YVO₄ as the self-Raman crystal, an a-YVO₄ and a c-GdVO₄ as the Raman crystals. By utilizing the common effective secondary Raman shift of 259 cm⁻¹ in c-cut YVO₄ and c-cut GdVO₄, and the relative balance of gain among the three first-order Stokes lines under high-power pumping conditions is achieved by introducing an a-cut YVO₄ crystal into the cavity to enhance the 1178 nm Stokes laser gain. The use of acousto-optic Q-switching enables the simultaneous pulse output of the first-Stokes light at 1097 nm, 1177 nm, and 1178 nm, achieving high peak power. At a pulse repetition frequency of 10 kHz and an incident pump power of 6.42 W, the maximum effective output power of the combined laser at 1097 nm, 1177 nm, and 1178 nm is 885 mW, and the optical-to-optical conversion efficiency was 13.79%.

Keywords

Nd:YVO₄, GdVO₄, Solid Raman Laser

Copyright © 2026 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

掺钕钒酸钇(Nd:YVO₄)和掺钕钒酸钇钆(Nd:GdVO₄)都属于四方晶系[1]，空间结构群为 D_{4h} ，结构特征是由[VO₄]构成的孤立四面体簇群[2]。光轴与四次对称轴 c 轴的方向一致，输出激光为线性偏振，避免了热致双折射对谐振腔稳定性的影响，尤其适合连续波和脉冲运转模式[3]，因此 Nd:YVO₄ 和 Nd:GdVO₄ 已被证明是用于制作全固态激光器优秀的激光工作物质[4]。

2004 年，Chen 等人首次报道了基于二极管泵浦主动调 Q Nd:YVO₄ 自拉曼激光器的 1525 nm 眼安全激光器。该研究利用 1342 nm 基频激光在 Nd:YVO₄ 晶体中通过自受激拉曼散射实现频率转换。在 13.5 W 泵浦功率下，于 20 kHz 重复频率下获得 1.2 W 平均输出功率，峰值功率超过 10 kW，光学转换效率达 8.9% [5]。同年，又报道了基于主动调 Q Nd:GdVO₄ 自拉曼转换的 1521 nm 眼安全激光器。采用低掺杂浓度(0.15 at.%)的晶体以减轻热效应，在 13.6 W 泵浦功率、20 kHz 重复频率下，获得 1.18 W 平均输出功率，转换效率为 8.7%。在 5 kHz 重复频率下，脉冲宽度窄于 5 ns，峰值功率超过 20 kW [6]。2010 年，Wang 等人研究了 a 切 Nd:YVO₄ 晶体在主动调 Q 自拉曼激光器中的性能。通过优化输出镜透射率，在 18 W 泵浦功率、30 kHz 重复频率下，实现了 1173.6 nm 的激光输出[7]。同年，他们又系统比较了平凹腔与凹凸腔在主动调 Q a 切 Nd:GdVO₄ 自拉曼激光器中的性能。采用凹凸腔在 18 W 泵浦下获得 2.26 W 的 1173 nm 输出[8]。2012 年，Shi 等人首次实现了基于 Cr:YAG 被动调 Q 的 a 切 Nd:YVO₄ 自拉曼激光器。在 10 W 泵浦功率下，于 66 kHz 重复频率下获得 347 mW 的 1176 nm 输出[9]。2011 年，Fan 等人首次报道了基于 c 切 Nd:YVO₄ 晶体中 259 cm⁻¹ 拉曼频移的 1097 nm 自拉曼激光器[10]。2012 年，Peng 等人首次报道了基于 Cr:YAG 被动调 Q 的 a 切 Nd:GdVO₄ 自拉曼激光器，成功获得 1173 nm 斯托克斯光输出[11]。2013 年，Wang 等人研究了 c 切 Nd:GdVO₄ 晶体在被动调 Q 自拉曼激光器中的高效转换。通过优化 Cr:YAG 初始透过率($T_0 = 91\%$)和输出镜反射率，在 4 W 泵浦功率下实现了 410 mW 的 1176 nm 输出[12]。2020 年，Sun 等人报道了一种基于分离结构的 Nd:YAP/YVO₄ 拉曼激光器，采用主动调 Q 方式实现 1195 nm 激光输出。实验中还观察到由 376 cm⁻¹ 小拉曼频移产生的弱 1125 nm 斯托克斯线[13]。2023 年，Duan 等人基于 c 切 Nd:YVO₄ 自拉曼晶体，利用级联拉曼频移(890 cm⁻¹ 与 259 cm⁻¹)实现了 1216 nm 红外激光及其倍频 608 nm 橙色激光的输出[14]。

Li 等人在同一个激光腔内组合 Nd:YVO₄ 和 GdVO₄ 两种拉曼晶体, 可以实现两种晶体的多频移的同步受激拉曼散射。在 2020 年, 他们设计了一种基于 c 切 Nd:GdVO₄ 和 Nd:YVO₄ 晶体的被动调 Q 拉曼激光器, 实现了 259、882 和 890 cm⁻¹ 三个拉曼位移的同时输出。其中 1128 nm (对应 259 cm⁻¹ 的第二斯托克斯光) 占主导。由于两晶体在 259 cm⁻¹ 处拉曼增益系数相近, 该波长可在两晶体中同时获得增益, 从而实现了有效的三波长振荡[15]。2021 年, 又接着报道了一种基于 c 切 Nd:YVO₄ 与 GdVO₄ 晶体的主动调 Q 拉曼激光器, 首次实现了三个拉曼位移(259、882 和 890 cm⁻¹)的同时振荡。该激光器在 20 kHz 脉冲重复频率下, 最高输出功率达到 1.31 W, 对应波长包括 1097、1129、1177 和 1178 nm, 而 1163 nm 激光仅在 10 kHz 下出现, 平均功率为 115 mW [16]。此两种利用 259 cm⁻¹ 次级频移的复合增益获得三种频移的一阶斯托克斯激光的三波长同步输出, 由于输出镜的镀膜不是优化设计, 导致 259 cm⁻¹ 次级频移的一阶斯托克斯激光腔内功率密度远高于主频移的一阶斯托克斯光功率密度, 容易产生二阶甚至三阶斯托克斯激光, 导致三种一阶斯托克斯激光输出只占总输出的一小部分。

针对这一问题, 本文在一个激光腔内集合 c 切 Nd:YVO₄、a 切 YVO₄ 与 c 切 GdVO₄, 利用 c 切 Nd:YVO₄ 和 c 切 GdVO₄ 两者都具有的有效 259 cm⁻¹ 次级拉曼频移, 实现了 259 cm⁻¹、882 cm⁻¹ 与 890 cm⁻¹ 三个频移所对应的一阶斯托克斯光对应各自输出透过率的合理增益匹配, 获得不产生二阶斯托克斯光的 1097 nm、1177 nm、1178 nm 激光的同步脉冲三波长高峰值功率输出。当脉冲重复率为 10 kHz, 入射泵浦功率为 6.42 W 时, 1097 nm, 1177 nm 和 1178 nm 共同组成的激光有效最高输出功率为 885 mW, 其光-光转换效率为 13.79%。

2. 实验装置与设计

实验 LD 抽运声光调 Q c-cut Nd:YVO₄/a-cut YVO₄/c-cut GdVO₄ 同步脉冲三波长拉曼激光器实验装置如图 1 所示。

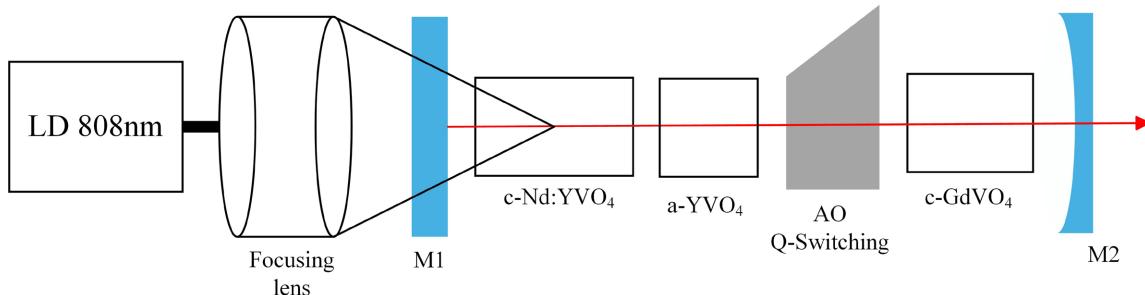


Figure 1. AO Q-switched c-cut Nd:YVO₄/a-cut YVO₄/c-cut GdVO₄ Raman laser experimental setup
图 1. 主动调 Q c-cut Nd:YVO₄/a-cut YVO₄/c-cut GdVO₄ 拉曼激光器实验装置图

本研究采用一台输出波长为 808 nm、最大功率为 40 W 的半导体激光器作为泵浦源。该泵浦激光器的纤芯直径为 400 μm, 数值孔径(NA)为 0.22, 通过一套聚焦透镜系统将泵浦光聚焦至 c-cut Nd:YVO₄ 自拉曼晶体中。该透镜组由两个焦距相同的透镜构成, 构成一个 1:1 成像光学结构, 对 808 nm 透过率为 97%。激光腔型采用平凹腔, 输入镜 M₁选用平面镜, 其镀膜在 1060~1180 nm 波段具有 HR ($R > 99.8\%$), 在 808 nm 波段具有 HT ($T > 97\%$); 输出镜 M₂选用 R = 500 mm 的凹面镜, 其镀膜在 1066.6 nm 处 HR ($R = 99.9\%$), 在 1097 nm ($R = 95.1\%$)、1128 nm ($R = 94.1\%$)、1177 nm ($R = 88.9\%$) 及 1178 nm ($R = 88.7\%$) 处为部分反射。实验采用 c 切 Nd:YVO₄ 作为自拉曼晶体, c 切的 GdVO₄ 和 a 切 YVO₄ 作为拉曼晶体, 晶体

参数如表 1 所示。晶体顺序按照 c 切 Nd:YVO₄、a 切 YVO₄、c 切 GdVO₄ 排列, 通过将 a 切 YVO₄ 置于增益介质后基频光强度最高的位置, 将 890 cm⁻¹ 频移的拉曼转换效率最大化。此结构为 1178 nm 斯托克斯线提供了优势, 使其能够与后面的 GdVO₄ 晶体更强的主频移 882 cm⁻¹ 相竞争, 从而实现所需的增益平衡与多波长同步输出。根据 Bai F. 等人分别测量了 c 切 YVO₄ 与 a 切 YVO₄ 的自发拉曼光谱。可以看到 a 切 YVO₄ 的光谱中, 890 cm⁻¹ 频移峰值最高, 259 cm⁻¹ 频移很小, 与 c 切 YVO₄ 相比可以忽略[17]。因此我们在腔内加入 a 切 YVO₄, 对 890 cm⁻¹ 频移进行有效增益补偿, 以实现 1097 nm、1177 nm、1178 nm 三个波长激光的接近平衡的高峰值功率同步输出而不产生 259 cm⁻¹ 次级频移的二阶斯托克斯 1129 nm 激光。

Table 1. Characteristics of the crystals used in the experiment**表 1. 实验晶体参数**

Name	Size	Doping concentration	Cavity mirror coating system
c-Nd:YVO ₄	3 × 3 × 15 mm	0.3-at.%	AR/AR@1075 nm + 1178 nm + 808 nm (R < 0.5%)
a-YVO ₄	3 × 3 × 3 mm	0.3-at.%	AR/AR@1064 nm + 1178 nm = 808 nm (R < 0.5%)
c-GdVO ₄	3 × 3 × 15 mm	0.4-at.%	HT@输入面 808 nm (T > 95%) AR@1060~1180 nm (R < 0.2%)

所有晶体侧面用钢箔包裹, 放置在 18°C 恒温水冷铜块中。声光调 Q 开关型号为(Gooch & Housego 公司型号: I-QS041-1.5C10G-4-SO12), 通光长度 35 mm, 该开关以 41 MHz 中心驱动频率及 20 W 射频功率驱动, 其每个光学表面对 1064 nm 波长均进行了增透膜处理, 其反射率 R < 0.2%。激光腔总长度为 11.5 cm。使用 F150A 功率计(OPHIR 公司)对激光的平均输出功率进行测量。

3. 实验结果与讨论

本实验研究了在泵浦波长为 808 nm, 不同脉冲重复率(PRF)下的拉曼激光功率输出。利用横河(AQ 6373 350~1200 nm)光谱分析仪, 研究了主动调 Q c-Nd:YVO₄/a-YVO₄/c-GdVO₄ 同步脉冲多波长拉曼激光器在 PRF 为 10 kHz, 入射泵浦功率为 6.42 W 时的光谱变化图。图 2(a)所示的光谱图中, 1066 nm 为 c 切 Nd:YVO₄ 的基频光, 1178 nm 为 Nd:YVO₄ 的主频移 890 cm⁻¹ 所对应的一阶斯托克斯光, 1177 nm 为 GdVO₄ 的主频移 882 cm⁻¹ 所对应的一阶斯托克斯光, 1097 nm 为两个晶体共有的次级频移 259 cm⁻¹ 所对应的一阶斯托克斯光, 1129 nm 为两个晶体共有的次级频移 259 cm⁻¹ 所对应的二阶斯托克斯光。当激光腔中只有 c 切 Nd:YVO₄ 和 c 切 GdVO₄ 时, 1177 nm、1178 nm 所对应的 882 cm⁻¹、890 cm⁻¹ 的拉曼增益系数基本相等, 而两种晶体中共有的次级频移 259 cm⁻¹ 的增益系数是 882 cm⁻¹ 和 890 cm⁻¹ 的一半, 在一定抽运功率下, 腔型配置以及热效应的作用下, 可使得 1097 nm 的总体增益和 1177 nm、1178 nm 基本相等, 而由于 1097 nm 波长处的透射率(T = 12.2%)明显小于 1177 nm 和 1178 nm 波长处的透过率(T = 30%), 1097 nm 的振荡阈值更小, 在竞争中优势太大, 在获得三个波长的一阶斯托克斯激光同步输出的同时, 会产生 1129 nm 二阶斯托克斯激光。如图 2(b)所示, 由于 a-YVO₄ 晶体中次级频移 259 cm⁻¹ 增益系数很小, 只有主频移 890 cm⁻¹ 对应的 1178 nm 激光能获得有效增益, 在腔内加入 3 mm 长的 a 切 YVO₄ 后, 当泵浦功率增长到一定区间, 由于热透镜和腔型配置的共同作用下的腔内轴向上光束半径分布而导致 1177 nm 和 1178 nm 增益大致相等的时候, 1097 nm 激光增益会略小于两者, 在合适的脉冲重复率下, 就能够实现 1097 nm、1177 nm、1178 nm 三个波长激光的接近平衡的高峰值功率同步输出而不产生 259 cm⁻¹ 次级频移的二阶斯托克斯 1129 nm 激光。

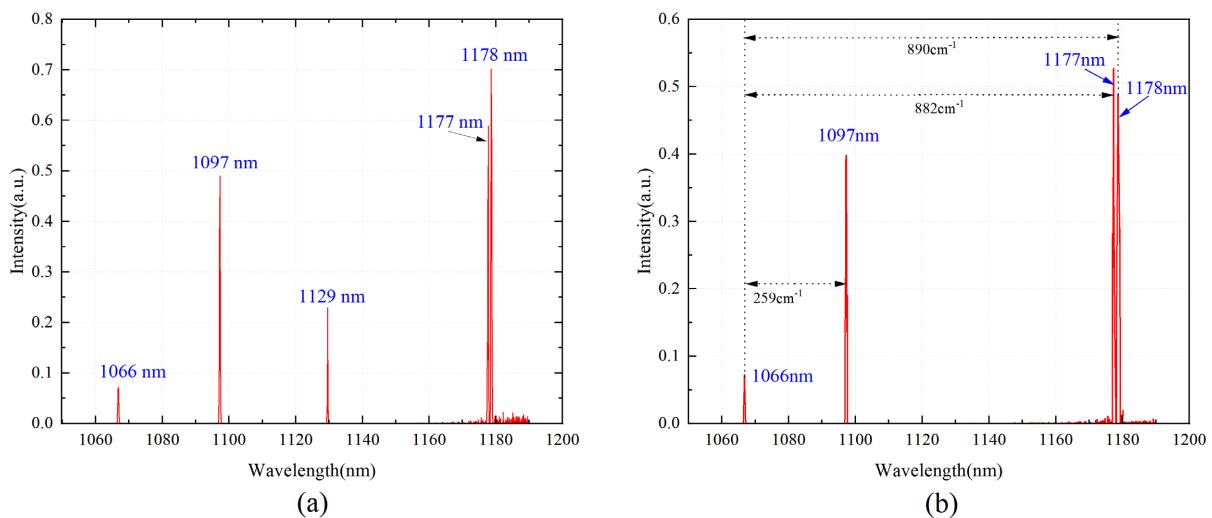


Figure 2. Output spectrum at the incident pump power of 6.42 W with the PRF of 10 kHz. (a) Spectral diagram without an a-cut YVO₄ crystal. (b) Spectral diagram with an a-cut YVO₄ crystal

图 2. 注入泵浦功率 6.42 W, 脉冲重复率 10 kHz 时的输出光谱。(a) 没有加入 a 切 YVO₄ 晶体时的光谱图。(b) 加入 a 切 YVO₄ 晶体时的光谱图

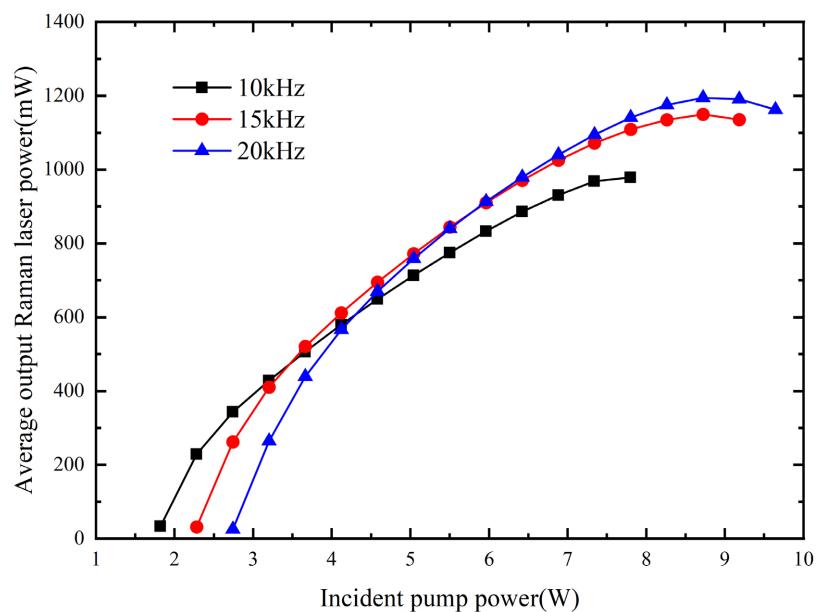


Figure 3. The variation of Raman laser output power with incident pump power
图 3. 拉曼激光输出功率随入射泵浦功率的变化

图 3 给出了在 10 kHz、15 kHz、20 kHz 的 PRF 下, 激光输出功率随入射泵浦功率的变化。由于较长的脉冲间隔周期所导致的上能级粒子数显著积累, 在较低泵浦功率条件下, 拉曼振荡率先在 PRF 为 10 kHz 时产生, 并且当入射泵浦功率达到 7.8 W 时激光输出功率达到最高值 978 mW, 从半导体 LD 激光到斯托克斯光的转换效率为 12.79%。当 PRF 提高至 15 kHz, 入射泵浦功率达到 9.18 W 时, 激光的最高输出功率达到 1135 mW, 其光 - 光转换效率为 12.36%; 当 PRF 提高至 20 kHz, 入射泵浦功率达到 9.64 W 时, 激光的最高输出功率达到 1162 mW, 光 - 光转换效率为 12.05%, 当泵浦功率继续增大时, 由于晶体的热效应以及热透镜效应的影响, 输出功率不再增大, 而是有减弱趋势。

热效应分析

设定入射泵浦功率和脉冲重复率, 激光腔内有 1066 nm 基频光和三种一阶斯托克斯光, 分别为主频移 890 cm^{-1} 所对应的波长 1178 nm, 主频移 882 cm^{-1} 所对应的波长 1177 nm 以及次级频移 259 cm^{-1} 所对应的波长 1097 nm, 功率密度分别为 $I_{1g} = e^{g_1 l_r I_l}$ 、 I_{2y} 、 I_{3y} 。a-cut YVO₄ 890 cm^{-1} 频移的拉曼增益系数 g_{22} , c-cut Nd:YVO₄ 主频移的拉曼增益系数 g_{21} 是 a-cut YVO₄ 增益系数的 60%, c-cut Nd:GdVO₄ 主频移的拉曼增益系数 g_1 , c-cut Nd:YVO₄ 次级频移 259 cm^{-1} 的拉曼增益系数 g_{31} , c-cut Nd:GdVO₄ 次级频移 259 cm^{-1} 的拉曼增益系数 g_{32} , l_{r1} 、 l_{r2} 、 l_{r3} 是 c 切 Nd:YVO₄、c 切 Nd:GdVO₄、a 切 YVO₄ 晶体长度, 可得:

$$\frac{dI_{1g}}{dt} = \frac{1}{\tau_c} g_1 I_l I_{1g} l_{r2} \frac{A}{A_1} \quad (1)$$

$$\frac{dI_{2y}}{dt} = \frac{1}{\tau_c} g_{21} I_l I_{2y} l_{r1} \frac{A}{A_2} + \frac{1}{\tau_c} g_{22} I_l I_{2y} l_{r3} \frac{A}{A_3} \quad (2)$$

$$\frac{dI_{3y}}{dt} = \frac{1}{\tau_c} g_{31} I_l I_{3y} l_{r1} \frac{A}{A_1} + \frac{1}{\tau_c} g_{32} I_l I_{3y} l_{r2} \frac{A}{A_2} \quad (3)$$

其中, τ_c 为归一化时间, A 为基频光在自拉曼晶体 c-Nd:YVO₄ 泵浦焦点的光束半径, A_1 为 c-cut GdVO₄ 晶体中心处的光束半径。 A_2 为基频光在自拉曼晶体 c-Nd:YVO₄ 中心处的光束半径。 A_3 为 a-cut YVO₄ 晶体中心处的光束半径。根据方程(2)~(4), 通过理论计算可以分析出腔内热效应的变化。

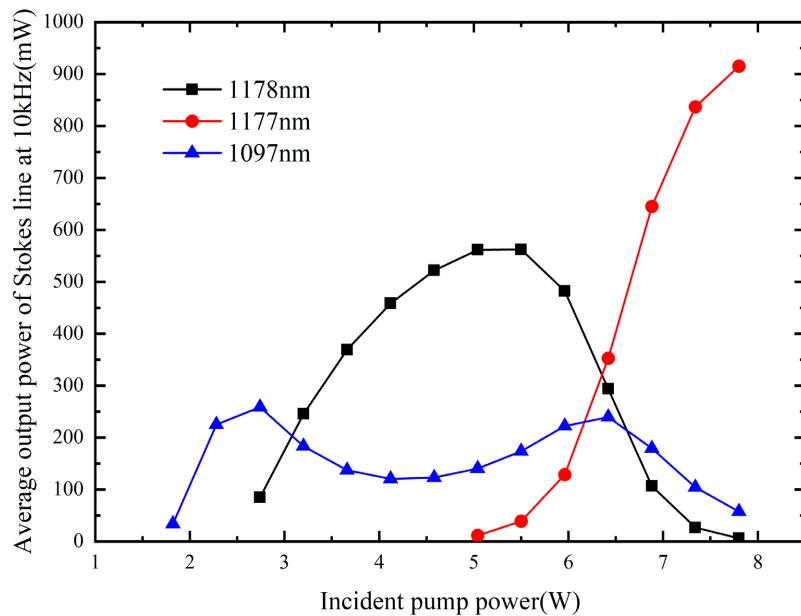


Figure 4. Output power of the first-Stokes light as a function of the incident pump power

图 4. 一阶斯托克斯光输出功率随入射功率的变化

测量输出激光经过四个不同镀膜曲线的镜片的透过功率, 经计算可以得到输出激光中各波长激光的平均功率。如图 4 所示, 为一阶斯托克斯光平均功率随入射泵浦功率的变化, 1097 nm 激光对应 GdVO₄ 晶体和 Nd:YVO₄ 晶体的 259 cm^{-1} 次级频移, 1177 nm 与 1178 nm 激光则分别对应 GdVO₄ 晶体的 882 cm^{-1} 主频移和 Nd:YVO₄ 晶体的 890 cm^{-1} 主频移。在晶体长度固定的前提下, 这三种谱线的增益速率主要由谐

振腔结构和晶体热效应决定的腔内光束分布的影响。在低入射泵浦功率区间, 热效应不明显, 两块拉曼晶体长度相等, 光束半径差异较小。此时, 凭借 a-YVO₄ 晶体对 890 cm⁻¹ 的增益, 1178 nm 激光泵浦阈值(2.74 W)比 1177 nm 激光(阈值 5.04 W)更低。与此同时, 对应 259 cm⁻¹ 频移的 1097 nm 激光由于具有最低的透过率损耗和振荡阈值(1.82 W), 因此率先起振。当入射泵浦功率超过 5.04 W 后, 三种一阶斯托克斯光能够实现同步振荡。随着泵浦功率提升, 热效应加剧导致 GdVO₄ 晶体内的光束截面变小, 1178 nm 的输出功率随泵浦增长开始下降, 1177 nm 的增益增长速率逐渐超越 1178 nm 开始占据增益优势, 功率明显上升, 并在 7.8 W 泵浦功率达到 915 mW 的峰值。三条谱线间具有显著的级联竞争关系, 在入射泵浦功率为 4.12 W 时, 由于 1178 nm 增益增长较快, 1097 nm 受到抑制导致功率下降至 120 mW; 随后在 6.42 W 时, 随着 1177 nm 增益的快速增长并抑制了 1178 nm, 1097 nm 的增益再次上升, 功率回升至 239 mW, 最后在高功率下因 1177 nm 增益占据主导被抑制而再次下降。在入射泵浦功率为 6.42 W 时, PRF 为 10 kHz 时, 可以达到三种一阶斯托克斯光 1097 nm、1177 nm、1178 nm 激光的同步脉冲三波长高峰值功率输出, 1097 nm, 1177 nm 和 1178 nm 共同组成的激光有效最高输出功率为 885 mW, 1097 nm 激光输出功率为 239 mW, 1177 nm 激光输出功率为 353 mW, 1178 nm 激光输出功率为 293 mW, 其有效的光 - 光转换效率为 13.79%。

用示波器(Tektronix MDO 3054, 500 MHz, 5 × 109 采样/s)和 InGaAs 偏置检测器(Thorlabs Det 10 C/m, 700~1800 nm)记录激光输出的激光脉冲轮廓。如图 5 所示, 当脉冲重复率为 10 kHz, 入射泵浦功率为 6.42 W 时的典型示波器轨迹。脉冲峰值由三种一阶斯托克斯光 1097 nm, 1177 nm 和 1178 nm 共同组成, 其脉冲宽度为 4.1 ns, 其峰值功率为 21.6 kW。

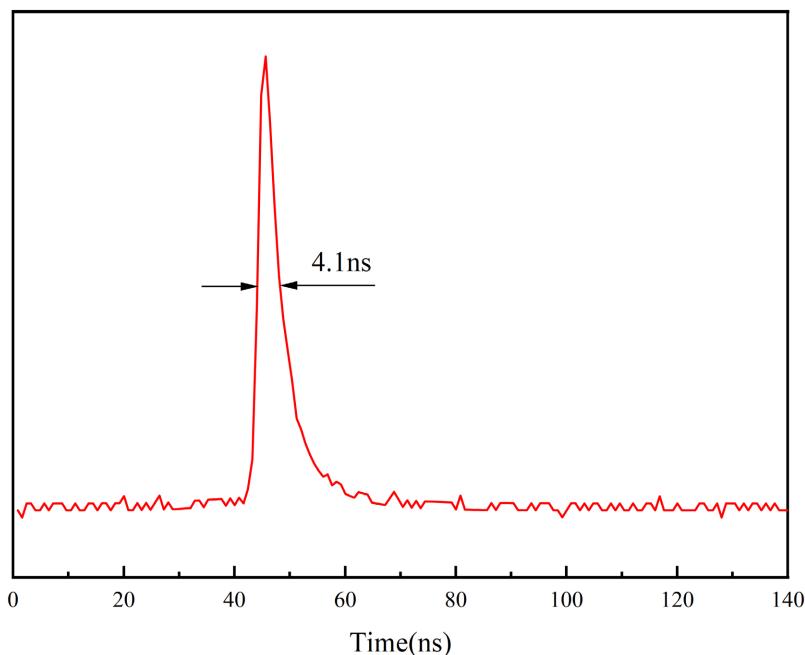


Figure 5. Typical pulse shape of the output laser at a PRF of 10 kHz and an incident pump power of 6.42 W
图 5. PRF 为 10 kHz 入射泵浦功率 6.42 W 时输出激光的典型脉冲形状

使用光束质量分析仪(M²-200s-FW, Spiricon Corp.)对光束轮廓进行了测量。如图 6 显示了在入射泵浦功率为 6.42 W 条件下, 输出激光经 F1 滤光片后的光束轮廓。两个正交方向上的 M² 因子分别为 1.47 和 1.32。

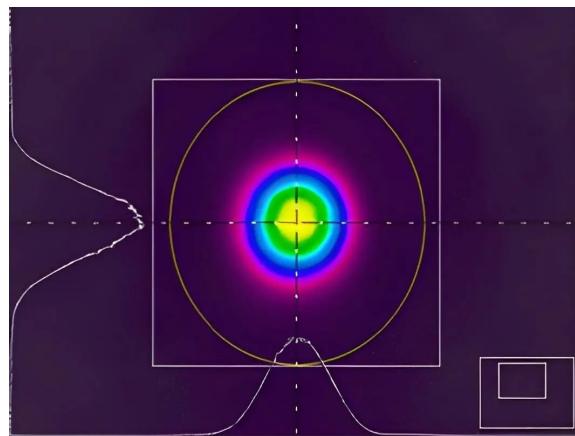


Figure 6. The beam profile of the output laser at the incident pump power of 6.42 W and PRF of 10 kHz
图 6. 泵浦功率为 6.42 W, 脉冲重复频率为 10 kHz 时输出激光的光束分布

4. 结论

本文使用 c 切 Nd:YVO₄ 作为自拉曼晶体, c 切 GdVO₄ 作为拉曼晶体, 利用两块晶体共有的 259 cm⁻¹ 次级频移, 在腔内加入 a 切 YVO₄, 实现了 259 cm⁻¹、882 cm⁻¹ 与 890 cm⁻¹ 三个频移所对应的一阶斯托克斯光对应各自输出透过率的合理增益匹配, 获得不产生二阶斯托克斯光的三种一阶斯托克斯光 1097 nm、1177 nm、1178 nm 激光的同步脉冲三波长输出, 并对其腔内热效应、光谱、功率、脉冲图以及光束质量进行了研究。当脉冲重复率为 10 kHz, 入射泵浦功率为 6.42 W 时, 1097 nm, 1177 nm 和 1178 nm 共同组成的激光有效最高输出功率为 885 mW, 1097 nm 激光输出功率为 239 mW, 1177 nm 激光输出功率为 353 mW, 1178 nm 激光输出功率为 293 mW, 光 - 光转换效率为 13.79%, 脉宽为 4.1 ns, 其峰值功率为 21.6 kW。

基金项目

吉林省自然科学基金(20240101306JC)。

参考文献

- [1] Huang, X., Zou, Q., Peng, S., Wang, S., Mu, P., Zhang, X. and Ding, S. (2023) LD End-Pumped Passively Q-Switched Nd: YLF/SrWO₄/Cr⁴⁺: YAG Solid-State Raman Lasers Based on Raman Modes of 923 cm⁻¹ and 334.5 cm⁻¹. *Applied Physics B*, **129**, Article No. 173. <https://doi.org/10.1007/s00340-023-08119-3>
- [2] 丁双红. 全固态拉曼激光器理论与实验研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2006.
- [3] Shen, Y., Fu, X., Yao, C., Li, W., Wang, Y., Zhao, X., et al. (2022) Optical Crystals for 1.3 μm All-Solid-State Passively Q-Switched Laser. *Crystals*, **12**, Article 1060. <https://doi.org/10.3390/cryst12081060>
- [4] 孟宪林, 张怀金, 祝俐, 吕孟凯. 掺钕钒酸钇单晶光谱与激光特性[J]. 人工晶体学报, 1999(2): 29-33.
- [5] Chen, Y.F. (2004) Compact Efficient All-Solid-State Eye-Safe Laser with Self-Frequency Raman Conversion in a Nd:YVO₄ Crystal. *Optics Letters*, **29**, 2172-2174. <https://doi.org/10.1364/ol.29.002172>
- [6] Chen, Y.F. (2004) Efficient 1521-nm Nd:GdVO₄ Raman Laser. *Optics Letters*, **29**, 2632-2634. <https://doi.org/10.1364/ol.29.002632>
- [7] Wang, Z.C., Du, C.L., Ruan, S.C. and Zhang, L. (2009) LD-Pumped Q-Switched Nd:YVO₄ Self-Raman Laser. *Laser Physics*, **20**, 474-477. <https://doi.org/10.1134/s1054660x10030217>
- [8] Wang, Z., Du, C., Ruan, S. and Zhang, L. (2010) Laser Diode Pumped Actively Q-Switched Nd:GdVO₄ Self-Raman Laser Operating at 1173nm. *Optics & Laser Technology*, **42**, 716-719. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2009.11.014>
- [9] Shi, Y.X., Zheng, Y., Peng, J.Y. and Lu, T.L. (2012) Passively Q-Switched a-Cut Nd:YVO₄ Self-Raman Laser. *Laser Physics*, **22**, 904-906. <https://doi.org/10.1134/s1054660x12050246>

- [10] Fan, S., Zhang, X., Wang, Q., Liu, Z., Li, L., Cong, Z., Chen, X., & Zhang, X. (2011). 1097 nm N Nd:YVO₄ Self-Raman laser. *Optics Communications*, **284**, 1642-1644. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.11.050>
- [11] Peng, J.Y., Zheng, Y., Shi, Y.X. and Shen, J.P. (2012) Passively Q-Switched *a*-Cut Nd:GdVO₄ Self-Raman Laser with Cr:YAG. *Optics & Laser Technology*, **44**, 2175-2177. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.03.006>
- [12] Wang, M.Q., Ding, S.H., Yu, W.Y. and Zhang, W.H. (2013) High-Efficient Diode-Pumped Passively *Q*-Switched *c*-Cut Nd:GdVO₄ Self-Raman Laser. *Laser Physics Letters*, **10**, Article ID: 045403. <https://doi.org/10.1088/1612-2011/10/4/045403>
- [13] Sun, Y., Duan, Y., Zhang, L., Yang, Z., Chen, X., Huang, X., et al. (2020) Efficient Actively Q-Switched Nd:YAP/YVO₄ Raman Laser Operation at 1195 nm. *Journal of Russian Laser Research*, **41**, 373-377. <https://doi.org/10.1007/s10946-020-09888-4>
- [14] Duan, Y., Xu, J., Li, Y., Li, Z., Jin, X. and Zhu, H. (2023) Generation of 1216 Nm and 608 Nm Laser Emission Using Cascaded Raman Shifts in Nd:YVO₄. *Optics & Laser Technology*, **157**, Article ID: 108716. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108716>
- [15] Li, S., Jin, G. 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**, Article No. 37. <https://doi.org/10.1007/s00340-020-7389-3>
- [16] Li, S., Tang, R., Jin, G. and Wang, C. (2021) Actively Q-Switched Intracavity Nd:YVO₄/GdVO₄ Raman Laser Operating with Multiple Raman Shifts of 259, 882 and 890 cm⁻¹. *Applied Physics B*, **127**, Article No. 16. <https://doi.org/10.1007/s00340-020-07551-z>
- [17] Bai, F., Jiao, Z., Xu, X. and Wang, Q. (2019) High Power Stokes Generation Based on a Secondary Raman Shift of 259 cm⁻¹ of Nd:YVO₄ Self-Raman Crystal. *Optics & Laser Technology*, **109**, 55-60. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.07.067>