



声光调Q Nd:YVO<sub>4</sub>晶体级联拉曼倍频窄脉宽657 nm激光器

段延敏 周玉明 孙瑛璐 李志红 张耀举 王鸿雁 朱海永

**Frequency doubling of acousto-optic Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> cascaded Raman laser for narrow pulse-width 657nm laser**

Duan Yan-Min Zhou Yu-Ming Sun Ying-Lu Li Zhi-Hong Zhang Yao-Ju Wang Hong-Yan Zhu Hai-Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 224209 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210695

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210695>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

波长锁定激光二极管共振泵浦Nd:YVO<sub>4</sub>晶体连续波自拉曼激光器的设计与研究

Research and design of continuous-wave Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser in-band pumped by a wavelength-locked laser diode  
物理学报. 2017, 66(19): 194203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.194203>

波长锁定878.9 nm激光二极管抽运内腔式YVO<sub>4</sub>/BaWO<sub>4</sub>连续波拉曼激光器

Continuous-wave intracavity YVO<sub>4</sub>/BaWO<sub>4</sub> Raman laser pumped by a wavelength-locked 878.9 nm laser diode  
物理学报. 2018, 67(2): 024206 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171848>

自拉曼混频黄绿波段三波长可切换激光

Triple wavelength-switchable lasing in yellow-green based on frequency mixing of self-Raman operation  
物理学报. 2020, 69(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200324>

基于光学tamm态的声光开关的研究

Research on acousto-optic switch based on optical tamm state  
物理学报. 2020, 69(16): 164204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200396>

基于单壁碳纳米管调Q锁模低阈值Tm,Ho:LiLuF<sub>4</sub>激光器

Passively Q-switched mode-locked low threshold Tm, Ho: LLF laser with a single walled carbon nanotubes saturable absorber  
物理学报. 2018, 67(1): 014201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171748>

基于WS<sub>2</sub>可饱和吸收体的调Q锁模Tm, Ho: LLF激光器

Passively Q-switched mode-locked Tm, Ho:LLF laser with a WS<sub>2</sub> saturable absorber  
物理学报. 2017, 66(11): 114207 <https://doi.org/10.7498/aps.66.114207>

# 声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体级联拉曼倍频窄脉宽 657 nm 激光器\*

段延敏<sup>1)</sup> 周玉明<sup>1)</sup> 孙瑛璐<sup>1)</sup> 李志红<sup>2)</sup>  
张耀举<sup>2)</sup> 王鸿雁<sup>3)</sup> 朱海永<sup>2)†</sup>

1) (温州大学数理学院, 温州 325035)

2) (温州大学电气与电子工程学院, 温州 325035)

3) (青岛海泰光电技术有限公司, 青岛 266100)

(2021 年 4 月 13 日收到; 2021 年 7 月 28 日收到修改稿)

本工作对声光调 Q 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体级联自拉曼腔内二阶斯托克斯光倍频实现窄脉宽红光激光进行了研究. 从改善自拉曼晶体热效应出发, 综合考虑基频激光性能和提高拉曼变频性能, 设计了三段式键合 YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 晶体来提升拉曼转换效率和输出功率. 选用针对二阶斯托克斯波长倍频的室温临界相位匹配切割的 LBO 晶体作为非线性光学晶体. 其匹配角度 ( $\theta = 86.0^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ) 非常接近非临界相位匹配, 具有较小的走离角, 有利于实现高效的倍频转换效率. 通过抽运光束腰位置、声光调 Q 重复频率等参数优化, 在 14.2 W 抽运功率和 60 kHz 重复频率下, 获得最高平均输出功率 1.63 W、转换效率 11.5% 的 657 nm 红光激光输出. 657 nm 红光的脉冲宽度为 11.5 ns, 窄于普通掺钕激光晶体 1.3  $\mu\text{m}$  波段激光倍频实现的红光激光, 表明通过级联拉曼倍频技术可发挥拉曼过程脉宽压缩特性实现较窄脉宽红光激光输出.

**关键词:** 自拉曼, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 红光, 声光调 Q

**PACS:** 42.55.Ye, 42.65.Ky, 42.72.Bj, 42.55.Rz

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210695

## 1 引言

受激拉曼散射是获得新型波长激光的一种重要变频手段, 已成为激光与非线性光学领域的研究热点<sup>[1-3]</sup>. 通过拉曼变频, 可使激光波长往长波方向拓展, 能得到普通激光难以直接发射的波长. 钒酸盐晶体本身拥有较大的拉曼增益, 是极具代表性的一类拉曼介质<sup>[4,5]</sup>. 同时, 稀土离子掺杂的钒酸盐晶体也是一类优秀的激光介质<sup>[6]</sup>. 2001 年, Kaminskii 等<sup>[7]</sup> 研究表明 YVO<sub>4</sub> 是优良的拉曼晶体, 并指出 Nd:YVO<sub>4</sub> 可作为产生新型可见和近红外波段激光的自拉曼晶体. 2004 年 Chen<sup>[8]</sup> 首次报

道了半导体激光 (LD) 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的自拉曼激光实验. 随后, 针对钒酸盐晶体的拉曼激光被广泛且深入地研究. 2012 年, Chen 等<sup>[9]</sup> 利用 LD 端面抽运 a 切 YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 键合晶体, 获得二阶斯托克斯激光. 在 14.6 W 抽运功率和 40 kHz 重复频率下, 获得最大输出功率 2.34 W 的 1313 nm 激光, 转换效率为 16%. 针对 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体级联拉曼可获得高效的 1.3  $\mu\text{m}$  二阶斯托克斯激光, 为进一步倍频获得红光激光提供了新途径<sup>[10,11]</sup>. 高功率相干红光作为三基色之一, 在高分辨率激光打印、全彩激光显示、医疗以及作为 Cr:LiSAF 等可调谐激光器的抽运源等方面具有广泛的应用.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 62075167, 61905180)、浙江省自然科学基金 (批准号: LY19F050012) 和温州市公益性科技计划项目 (批准号: G2020013, S20180015) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [hyzhu.opt@gmail.com](mailto:hyzhu.opt@gmail.com)

目前获得红光激光的常用技术是利用 KTP, LBO 等非线性光学晶体对掺钕激光晶体的  $1.3 \mu\text{m}$  基频激光进行倍频, 这种方式已经被许多研究者报道, 而且调 Q 产生的脉宽偏宽. 2007 年, Huang 等<sup>[12]</sup> 报道了基于声光调 Q 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体  $1.3 \mu\text{m}$  基频光倍频的红光激光器. 在 14.8 W 吸收抽运功率和 15 kHz 重复频率下, 获得平均输出功率 1.37 W, 脉冲宽度 33 ns 的红光输出, 相应的光转换效率为 9.3%. 2007 年, Qin 等<sup>[13]</sup> 采用双二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 在 78.4 W 总抽运功率下, 获得平均输出功率 10.2 W, 脉冲宽度 94 ns 的红光输出. 其他激光晶体 Nd:GdVO<sub>4</sub>, Nd:YAG 等晶体的  $1.3 \mu\text{m}$  基频光倍频获得的红光脉冲宽度也普遍较宽, 都在 30 ns 以上, 甚至数百 ns<sup>[14-16]</sup>. 近年来, 利用蓝光抽运掺镨激光材料直接输出红光激光的技术获得快速发展<sup>[17,18]</sup>, 目前可获得高效的瓦级红光波段激光, 但脉宽也都在数百纳秒量级<sup>[19,20]</sup>.

拉曼过程存在着光束净化效应和脉宽压缩特性<sup>[21,22]</sup>, 所以级联拉曼倍频可望获得高质量、窄脉宽红光激光. 2010 年, Lee 等<sup>[23]</sup> 报道了利用通过非临界相位匹配切割 LBO 晶体对连续波 Nd:GdVO<sub>4</sub> 级联自拉曼腔内一阶和二阶斯托克斯光的和频, 获得了输出功率 1027 mW, 转换效率 4.9% 的 620 nm 激光输出, 同时指出对二阶斯托克斯光倍频需要将非临界相位匹配 LBO 晶体温度在零下 2 °C 而难以实现. 本文首次对声光调 Q 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体级联自拉曼二阶斯托克斯光倍频实现红光激光进行研究. 选用接近非临界相位匹配 ( $\theta = 86.0^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ) 切割 LBO 晶体在室温下进行二阶斯托克斯光的倍频. 设计三段式键合 YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 晶体来改善自拉曼晶体热效应, 同时可增大拉曼增益介质作用长度, 达到提升拉曼转换效率和输出功率. 在 14.2 W 抽运功率和 60 kHz 重复频率下, 获得输出功率 1.63 W、转换效率达 11.5 % 的 657 nm 红光激光输出. 脉冲宽度为 11.5 ns, 窄于普通掺钕激光晶体  $1.3 \mu\text{m}$  波段激光倍频实现的红光激光.

## 2 键合拉曼晶体设计分析及倍频晶体选择

在自拉曼激光产生过程中, 自拉曼晶体中叠加了激光产生过程和拉曼转换过程的热效应, 相对普

通激光晶体具有更严重的热效应. 随着抽运功率的提高, 热效应成为限制自拉曼激光输出功率和光束质量提升的重要因数. 因此, 从改善自拉曼晶体热效应出发, 综合考虑激光性能和提高拉曼变频性能, 提出对自拉曼晶体进行三段式键合设计. 图 1 给出本实验所用三段式键合 YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 晶体. 中间的激光增益介质部分的长度和浓度考虑有利于基频激光性能和对抽运光吸收来选择, 根据前期 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体基频激光性能<sup>[24]</sup>, 选用沿 a 轴切割, 掺原子百分比为 0.3% 的 Nd<sup>3+</sup>, 尺寸为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体; Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体两端键合的未掺杂的基质晶体不但可通过热传导帮助自拉曼晶体散热, 改善拉曼器件的热效应, 而且可与自拉曼激光晶体一起作为拉曼增益介质, 增长了拉曼介质的作用长度, 有效提高拉曼变频效率和输出功率. 抽运输入端键合的基质晶体通过热传导方式帮助激光增益介质改善抽运光入射端严重的热效应, 同时考虑入射抽运光斑和晶体孔径大小, 不宜过长, 选用尺寸为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的纯 YVO<sub>4</sub> 晶体; 另一端键合的较长基质晶体, 以增大拉曼增益介质长度以提高拉曼变频效率为主, 选用尺寸为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 17 \text{ mm}$  的纯 YVO<sub>4</sub> 晶体. 三段不同功能为主的晶体通过扩散键合技术实现复合: 首先将三段晶体端面经过精密抛光处理后贴在一起形成光胶, 然后再对晶体进行热处理, 实现界面分子相互扩散、融合, 最终形成稳定化学键, 达到真正意义上的结合为一体. 最近, 本课题组采用该三段式键合设计晶体进行自拉曼腔内基频光与一阶斯托克斯光之间的混频<sup>[25]</sup>, 相比之前采用普通 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体自拉曼<sup>[26]</sup>, 在更高抽运功率下, 实现了更高输出功率和效率的黄绿波段激光输出, 所以三段式键合设计晶体也将更有利于级联拉曼获得高输出功率和转换效率.



图 1 三段式键合 YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 晶体照片

Fig. 1. An image of three-stage bonded YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> crystal.

YVO<sub>4</sub> 晶体最强拉曼增益的频移为 890 cm<sup>-1</sup>, 对应的增益系数大于 4.5 cm/GW[7], 对应 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 1064 nm 基频光的一阶斯托克斯光波长为 1176 nm, 二阶斯托克斯光波长为 1313 nm. 为了规避类似文献 [23] 中采用非临界相位匹配 LBO 对二阶斯托克斯光倍频需要温控在零下的问题, 本实验中改用针对二阶斯托克斯光倍频的室温下临界相位匹配角 ( $\theta = 86.0^\circ, \varphi = 0^\circ$ ) 切割的 LBO 晶体. 由于该临界相位匹配角非常接近非临界相位匹配, 其有效非线性系数 0.818 pm/V, 走离角也非常小, 仅为 3.54 mrad, 所以我们同样可采用较长晶体提高转换效率. 本实验中选用同文献 [26] 非临界相位匹配 LBO 晶体一样长度 (尺寸 3 mm × 3 mm × 15 mm), 匹配角度 ( $\theta = 86.0^\circ, \varphi = 0^\circ$ ) 切割的 LBO 晶体作为倍频晶体, 采用 15 mm 长晶体计算得到的最大走离偏移约为 53 μm, 远小于腔内基模光斑直径.

### 3 实验装置设计

图 2 为 LD 端面抽运三段式键合 YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 晶体级联拉曼倍频红光激光实验装置示意图. 抽运源为工作波长 808 nm 的光纤耦合输出的半导体激光, 其光纤芯径为 200 μm、数值孔径为 0.22. 抽运光经过一对焦距为 50 和 80 mm 的耦合透镜准直再聚焦到三段式键合晶体中的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体内, 形成一个直径为 320 μm 的束腰光斑. 紧随键合晶体后, 放置型号为 QS041-10G-GHI2 (Gooch & Housego 公司) 的声光 Q 开关, 用于实现主动调 Q 脉冲激光振荡.

实验装置中, YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 键合晶体两端镀制的膜系对 1064, 1176 和 1313 nm 增透,

而且抽运输入端同时对抽运光 808 nm 增透, 另一端面同时对倍频红光 657 nm 高反 ( $R > 95\%$ ), 起到反射反方向倍频产生的红光使激光输出最大化的作用. LBO 晶体两端面均镀有对基频光、一阶、二阶斯托克斯光以及红光增透的膜系. LBO 晶体同键合晶体侧面均采用铝箔包裹并置于紫铜块内, 用半导体制冷控温系统 (TEC) 控制温度在 25 °C 左右. 由一个抽运光输入腔镜 IM 和倍频输出腔镜 OC 组成平凹腔结构, 作为基频、一阶和二阶斯托克斯光共用的谐振腔. 对应模拟计算得到三段式键合晶体上不同位置谐振腔基模光斑直径约为 340—360 μm, LBO 晶体上的光斑直径约为 320 μm. 输入腔镜 IM 镀对基频光 1064 nm、一阶斯托克斯光 1176 nm 和二阶斯托克斯光 1313 nm 高反 ( $R > 99.8\%$ ), 同时对抽运光 808 nm 高透 ( $T > 95\%$ ) 的膜系. 输出镜 OC 镀对 1064, 1176 和 1313 nm 高反, 同时对倍频光 657 nm 高透的膜系.

### 4 实验结果与讨论

基于以上实验装置设计, 在 10.5 W 输入抽运功率下, 将重复频率设在 30 kHz, 60 kHz 和 90 kHz 下优化二阶斯托克斯光倍频的红光激光输出功率, 分别获得最高 0.96 W, 1.27 W 和 1.05 W 的红光. 其中重复频率 60 kHz 时的红光输出功率最高, 对应的转换效率为 12.1%. 针对红光激光的平均输出功率, 在 10.5 W 抽运功率下优化系统后降低抽运功率, 再从阈值开始记录输出功率, 得到的平均输出功率随抽运功率的变换关系如图 3 所示. 发现红光从阈值 4.27 W 开始, 在 5.5 W 抽运功率下获得 0.54 W 的输出功率后, 输出功率开始下降并出现较大的跳动, 在 7.9 W 抽运功率下, 输

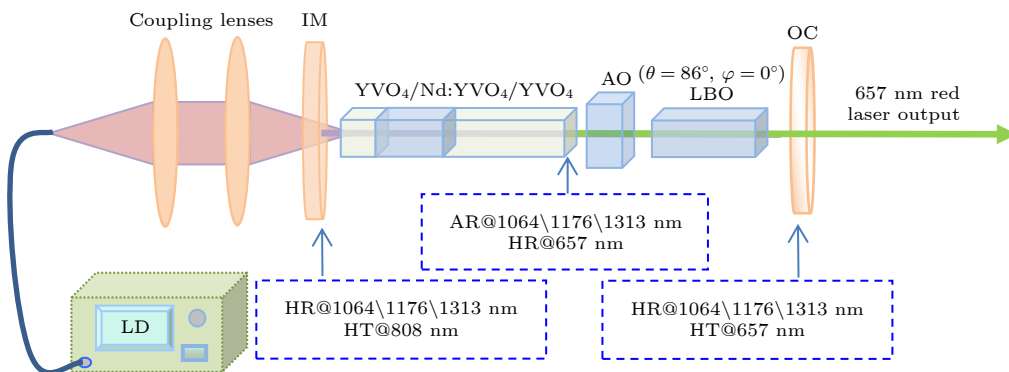


图 2 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体级联拉曼倍频红光激光实验装置示意图

Fig. 2. Experimental arrangement offrequency doubling of Nd:YVO<sub>4</sub> cascade Raman laser for red light emission.

输出功率开始重新快速增大,直到获得最高的输出功率.进一步对不加LBO晶体的情况下,用对1064和1176 nm高反,对1313 nm透过率为47%的输出镜片对二阶斯托克斯光的输出特性进行研究.在60 kHz重复功率下,发现二阶斯托克斯光在更高15.5 W入射抽运功率下,获得最高输出功率2.18 W的1313 nm激光输出,对应的光光转换效率14.1%.由输出功率曲线可知,输出功率随着抽运功率的升高,也存在先增大后减小再快速增大的特点;而且在10.5 W抽运功率附近,输出功率出现模式变换引起的平坦区后再增大.

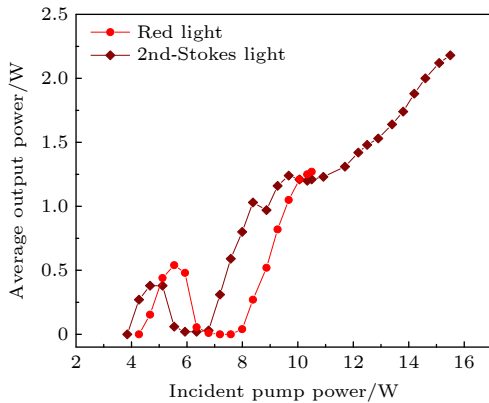


图3 在10.5 W入射抽运功率下优化后测量的二阶斯托克斯光及其倍频红光输出功率与入射抽运功率关系  
Fig. 3. Output power of 2nd-Stokes and red light versus incident pump power for the laser system optimized at incident pump power of 10.5 W.

随后,通过调节抽运光束腰在Nd:YVO<sub>4</sub>晶体里的位置,发现增大束腰位置与抽运光输入端面的距离,可在更高的14.2 W抽运功率下获得更高1.63 W的输出功率,光转换效率11.5%.利用功率计观察了输出激光稳定性,在0.5 h内功率波动在波动范围在1.55—1.63 W之间,稳定性约为5%.并使用光纤光谱仪(AvaSpec, 3648-2-USB2)测量对最高输出功率下的激光输出的光谱进行测量.图4给出了优化抽运光束腰位置后的输出功率曲线及最高输出功率下测量的激光谱线.由谱线图可知,输出激光主要为波长656.7 nm的倍频红光,线宽约0.3 nm.伴随红光输出还测到微弱的587.9和620.4 nm波长,分别为一阶斯托克斯光的倍频波长和一阶与二阶斯托克斯光的和频波长.由输出功率曲线可知阈值功率也明显升高,功率先增后减再增对应的抽运功率也对应升高.分析其原因主要随着束腰位置深入激光增益介质,端面抽运光

斑增大,增益介质上的抽运光功率密度下降,导致阈值升高,同时等效热透镜焦距的主平面将往激光输出方向靠近,增益介质的热透镜效应也变弱,所以可以在更高的抽运功率下实现最高的输出功率.结合前期实验表明输出功率随着抽运功率先增后减再增的功率变化趋势主要体现在三段式键合晶体中[25,27],具体原因有待进一步研究.

进一步对级联拉曼倍频红光脉冲特性进行测量.采用InGaAs自由空间光电探测器(5 GHz, Thorlabs)接收红光激光,并由型号DPO3052B泰克数字示波器呈现脉冲特性.红光脉冲宽度随着抽运功率的增加,引起基频脉宽变窄而变窄.图5给出了14.2 W入射抽运功率下,最高输出功率1.63 W

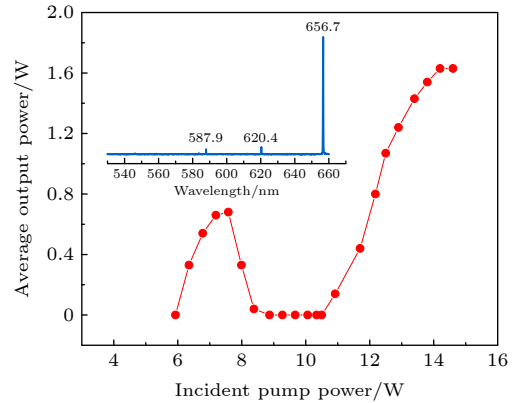


图4 优化抽运光束腰位置后的红光输出功率曲线及最高输出功率下测量的激光谱线  
Fig. 4. Red light output power after optimizing of the pump beam focus position and laser spectra measured at the maximum output power.

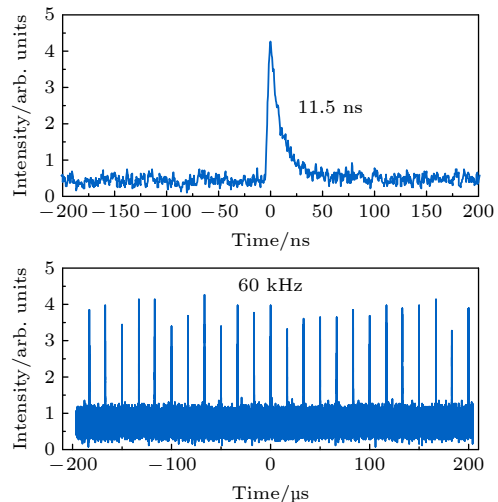


图5 倍频657 nm红光的脉冲波形和脉冲序列  
Fig. 5. Temporal pulse profile and pulse train of 657 nm red light.

时测量得到的脉冲波形和序列. 红光激光脉冲重复频率 60 kHz, 所以对应的单脉冲能力为 27.2  $\mu\text{J}$ ; 测量得到的脉冲宽度为 11.5 ns, 计算得到峰值功率 2.4 kW. 相对普通掺钕激光晶体 1.3  $\mu\text{m}$  波段倍频的数十纳秒的脉宽, 拉曼过程的脉宽压缩特性使得倍频红光脉冲具有更窄的脉宽.

## 5 结 论

本文研究了 LD 端面抽运  $\text{YVO}_4/\text{Nd:YVO}_4/\text{YVO}_4$  晶体的声光调 Q 级联自拉曼二阶斯托克斯光倍频红光激光输出特性. 从改善自拉曼晶体热效应出发, 综合考虑激光性能和提高拉曼变频性能, 对自拉曼晶体进行三段式键合设计, 获得高效的二阶斯托克斯 1313 nm 激光输出. 选用接近非临界相位匹配 ( $\theta = 86.0^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ) 的 LBO 晶体作为二阶非线性光学晶体对二阶斯托克斯光进行倍频, 克服普通非临界相位匹配需要零下温控的问题, 获得了高效的窄脉宽 657 nm 红光输出. 通过抽运光束腰位置、重复频率等参数优化, 在 14.2 W 抽运功率和 60 kHz 重复频率下, 获得输出功率 1.63 W、转换效率达 11.5% 的 657 nm 红光激光输出. 由于级联拉曼过程的脉宽压缩特性, 657 nm 红光的脉冲宽度为 11.5 ns, 相对已报道的 1.3  $\mu\text{m}$  波段基频光倍频的红光激光器, 本文设计的级联自拉曼二阶斯托克斯光倍频产生的红光激光脉冲宽度更窄, 光束质量更好.

## 参考文献

- [1] Duan Y M, Sun Y L, Zhu H Y, Mao T W, Zhang L, Chen X 2020 *Opt. Lett.* **45** 2564
- [2] Zhang Y C, Fan L, Wei C F, Gu X M, Ren S X 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 024206 (in Chinese) [张蕴川, 樊莉, 魏晨飞, 顾晓敏, 任思贤 2018 物理学报 **67** 024206]
- [3] Liu Y, Liu Z J, Cong Z H, Men S J, Xia J B, Rao H, Zhang S S 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 124201
- [4] Cheng M Y, Duan Y M, Sun Y L, Zhang L, Zhu H Y 2020 *Laser & Optoelectronics Progress* **57** 071611 (in Chinese) [程梦瑶, 段延敏, 孙瑛璐, 张立, 朱海永 2020 激光与光电子学进展 **57** 071611]
- [5] Zhang L, Duan Y M, Mao X H, Li Z H, Chen Y X, Zhang Y J, Zhu H Y 2021 *Opt. Mater. Express* **11** 1815
- [6] Fan L, Zhao X D, Zhang Y C, Gu D X, Wan H P, Fan H B, Zhu J 2019 *Chin. Phys. B.* **28** 084210
- [7] Kaminskii A A, Ueda K, Eichler H J, Kuwano Y, Kouta H, Bagaev S N, Chyba T H, Barnes J C, Gad G M A, Murai T, Lu J 2001 *Opt. Commun.* **194** 201
- [8] Chen Y F 2004 *Appl. Phys. B* **78** 685
- [9] Chen W D, Wei Y, Huang C H, Wang X L, Shen H Y, Zhai S Y, Xu S, Li B X, Chen Z Q, Zhang G 2012 *Opt. Lett.* **37** 1968
- [10] Zhu H Y, Guo J H, Ruan X K, Xu C W, Duan Y M, Zhang Y J, Tang D Y 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 1500807
- [11] Xie Z, Duan Y M, Guo J H, Huang X H, Yan L F, Zhu H Y 2017 *J. Opt.* **19** 115501
- [12] Huang H T, He J L, Zuo C H, Zhang B T, Dong X L, Zhao S 2008 *Opt. Commun.* **281** 803
- [13] Qin W, Du C L, Ruan S C, Wang Y C 2007 *Opt. Express.* **15** 1594
- [14] Li Z Y, Zhang B T, Yang J F, He J L, Huang H T, Zuo C H, Xu J L, Yang X Q, Zhao S 2010 *Laser Phys.* **20** 761
- [15] Zhu H Y, Zhang G, Huang C H, Wei Y, Huang L X, Huang Y D 2009 *Appl. Phys.* **42** 045108
- [16] Zhou H Q, Bi X L, Zhu S Q, Li Z, Yin H, Zhang P X, Zhen Q C, Qi T L 2018 *Opt. Quant. Electron.* **50** 56
- [17] Zhang Y X, Wang S, Alberto D L, Yu G L, Yu H H, Zhang H J, Mauro T, Xu X G, Wang J Y 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 054210
- [18] He M M, Chen S, Na Q X, Luo S J, Zhu H Y, Li Y, Xu C W, Fan D Y 2020 *Chin. Opt. Lett.* **18** 011405
- [19] Zhang T, Zhou L B, Zou J Y, Bu Y K, Xu B, Xu X D, Xu J 2021 *Opt. Laser. Technol.* **139** 106961
- [20] Zhang Y X, Yang Y L, Zhang L H, Lu D Z, Xu M, Hang Y, Yan S S, Yu H H, Zhang H J 2019 *Chin. Opt. Lett.* **17** 071402
- [21] Frey R, Martino A D, Pradère F 1983 *Opt. Lett.* **8** 437
- [22] Murray J T, Austin W L, Richard C, Powell 1999 *Opt. Mater.* **11** 353
- [23] Lee A J, Jipeng L, Pask H M 2010 *Opt. Lett.* **35** 3000
- [24] Yu Y, Duan Y M, Guo J H, Zhang D, Chen S M, Liao X Q, Zhu H Y 2017 *Chin. J. Lasers* **44** 0701007 (in Chinese) [俞叶, 段延敏, 郭俊宏, 张栋, 陈思梦, 廖小青, 朱海永 2017 中国激光 **44** 0701007]
- [25] Sun Y L, Duan Y M, Cheng M Y, Yuan X Z, Zhang L, Zhang D, Zhu H Y 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 124201 (in Chinese) [孙瑛璐, 段延敏, 程梦瑶, 袁先漳, 张立, 张栋, 朱海永 2020 物理学报 **69** 124201]
- [26] Guo J, Zhu H Y, Chen S M, Duan Y M, Xu X R, Xu C W, Tang D Y 2018 *Laser Phys. Lett.* **15** 075803
- [27] Zhu H Y, Duan Y M, Zhang G, Huang C H, Wei Y, Shen H Y, Zheng Y Q, Huang L X, Chen Z Q 2009 *Opt. Express* **17** 21544

# Frequency doubling of acousto-optic Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> cascaded Raman laser for narrow pulse-width 657 nm laser\*

Duan Yan-Min<sup>1)</sup> Zhou Yu-Ming<sup>1)</sup> Sun Ying-Lu<sup>1)</sup> Li Zhi-Hong<sup>2)</sup>  
 Zhang Yao-Ju<sup>2)</sup> Wang Hong-Yan<sup>3)</sup> Zhu Hai-Yong<sup>2)†</sup>

1) (*College of Mathematics and Physics, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China*)

2) (*College of Electrical and Electronic Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China*)

3) (*Crystech Inc., Qingdao 266100, China*)

( Received 13 April 2021; revised manuscript received 28 July 2021 )

## Abstract

Frequency doubling of second-Stokes in an acousto-optic Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> cascaded self-Raman cavity is demonstrated to achieve a narrow pulse-width red laser. A three-stage bonded YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> crystal is designed by comprehensively considering the improvement of thermal effect, the performance of fundamental frequency laser and Raman conversion, to improve the Raman efficiency and output power. An LBO crystal cut for critical phase matching at room temperature is selected and used as a nonlinear optical crystal for realizing the frequency doubling of second-Stokes wave. Its phase matching angle ( $\theta = 86.0^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ) is very close to the non-critical phase matching angle and has a small walk-off angle, which is beneficial to the realizing of the high conversion efficiency of frequency doubling. In the experiment, the beam waist position of the pump light and the repetition frequency of the acousto-optic Q-switcher are optimized. Under an incident pump power of 14.2 W and a repetition frequency of 60 kHz, the highest average output power of 1.63 W and conversion efficiency of 11.5% are obtained for the 657 nm red laser emission. The pulse width of 657 nm red light is 11.5 ns at the maximum output power, which is much narrower than that generated by frequency doubling of ordinary neodymium-doped laser at a waveband of 1.3  $\mu\text{m}$ . The result shows that the frequency doubling of the acousto-optic Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> cascaded self-Raman laser can take advantage of the pulse-width compression characteristics of Raman process to achieve a narrower pulse-width red light laser output.

**Keywords:** self-Raman, Nd:YVO<sub>4</sub> crystal, red laser, acousto-optic Q-switch

**PACS:** 42.55.Ye, 42.65.Ky, 42.72.Bj, 42.55.Rz

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210695

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62075167, 61905180), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (Grant No. LY19F050012), and Public Welfare Projects of Wenzhou City (Grant Nos. G2020013, S20180015).

† Corresponding author. E-mail: [hyzhu.opt@gmail.com](mailto:hyzhu.opt@gmail.com)