

自拉曼混频黄绿波段三波长可切换激光*

孙瑛璐 段延敏 程梦瑶 袁先漳 张立 张栋 朱海永†

(温州大学激光与光电子技术研究所, 温州 325035)

(2020年3月2日收到; 2020年3月26日收到修改稿)

报道了高效的 Nd:YVO₄ 晶体自拉曼结合二阶非线性光学混频实现黄绿波段三波长可选输出. 从改善热效应和增加拉曼介质长度出发, 设计双端键合的 YVO₄/Nd:YVO₄/YVO₄ 晶体用于自拉曼变频. 考虑混频转换效率和混频波长切换的便捷性, 选用临界相位匹配的 BaB₂O₄ (BBO) 晶体作为二阶非线性光学混频晶体. 只需微调 BBO 晶体匹配角度在 1.4° 内, 就可成功实现基频光和一阶斯托克斯光之间的倍频与和频, 获得高效的 532 nm 绿光、559 nm 黄绿光和 588 nm 黄光三个波长可切换输出. 在 19.5 W 抽运功率和 60 kHz 的重复频率下, 三个波长激光的最高平均输出功率分别为 4.37 W, 2.03 W 和 3.43 W, 对应抽运光到可见光的转换效率分别达 22.4%, 10.4% 和 17.6%, 对应脉冲宽度分别为 36 ns, 12.2 ns 和 12.7 ns. 可见波段波长可切换激光器可满足激光医疗、显示、光谱成像和生物光子学等领域对多种波长激光的应用需求.

关键词: 自拉曼, Nd:YVO₄ 晶体, 可见光, 波长可切换

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

DOI: 10.7498/aps.69.20200324

1 引言

全固态拉曼激光利用受激拉曼散射效应, 对基频激光进行拉曼频移, 具有灵活的波长转换特性. 结合二阶非线性光学变频技术, 可获得更多新型波长激光输出. 钽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. 同时, 稀土离子掺杂的钽酸盐晶体也是一种优秀的激光介质. 2001年, Kaminskii 等^[1]发现 YVO₄ 和 GdVO₄ 晶体也是优良的拉曼晶体, 并预测 Nd:YVO₄ 和 Nd:GdVO₄ 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^[2,3]首次验证了两种掺钽钽酸盐晶体的自拉曼激光运转. 随后, 针对钽酸盐晶体的拉曼及其倍频或和频激光被广泛且深入地研究^[4-10].

随着拉曼及其混频激光效率的提升^[11,12], 针对

拉曼激光腔内不同波长之间的选择性混频研究也逐步引起关注^[13-17]. 拉曼激光腔内高功率密度的基频光和一阶斯托克斯光同时振荡, 为通过倍频或和频 (混频) 输出不同波长的可见光提供了可能. 2005年, Mildren 等^[18]采用声光调 *Q* 的 Nd:YAG 激光驱动拉曼晶体 KGd(WO₄)₂, 结合非临界相位匹配角度 ($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$) 切割 LiB₃O₅ (LBO) 晶体, 控制其温度在 53 °C 下进行角度调节, 在 23 W 的抽运功率下, 获得了 1.8 W 的 579 nm 黄光、0.95 W 的 555 nm 黄绿光和 1.7 W 的 532 nm 绿光激光输出. 但使用 LBO 晶体时, 针对输出三个波长之间的相位匹配角度差最大达 10°, 过大的角度调节导致基频光倍频转换效率比一阶 Stokes 光倍频还要低. 2010年, Lee 等^[19]基于连续波的 Nd:GdVO₄ 自拉曼混频, 通过控制非临界相位匹配切割 LBO 晶体的温度在 45.5, 95 和 155 °C 下, 实现了超过 3.5 W 的 586, 559 和 532 nm 三个波长

* 浙江省自然科学基金 (批准号: LY19F050012)、国家自然科学基金 (批准号: 61505147) 和温州市公益性科技计划 (批准号: G20180013) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hyzhu@wzu.edu.cn

可选输出, 转换效率大于 11%. 相对于独立拉曼晶体的激光系统, 自拉曼激光系统不需要额外的拉曼晶体, 而且结构更加紧凑^[20–23]; 利用温度调节, 可减少角度调节时晶体倾斜带来的表面反射损耗, 从而获得较高的转换效率和输出功率, 但需要超过 100 °C 的温度跨度大, 给调节带来不便. 2018 年, 我们利用声光调 Q Nd:YVO₄ 自拉曼结合 BaB₂O₄ (BBO) 晶体混频, 只需微调 BBO 晶体匹配角度在 1.4° 内, 实现了 2.05 W 的 532 nm 绿光、0.81 W 的 559 nm 黄绿光和 1.73 W 的 588 nm 黄光输出, 转换效率分别为 20%, 8% 和 17%, 输出功率的进一步提升主要是受到 Nd:YVO₄ 晶体的热效应限制^[24]. 本文对双端键合 YVO₄/Nd:YVO₄/YVO₄ 晶体的自拉曼选择性混频进行研究, 该晶体的使用有效地改善了自拉曼热效应, 并且增加了受激拉曼散射作用长度. 结合 BBO 晶体角度微调, 在更高的 19.5 W 抽运功率下, 将 532, 559 和 588 nm 的激光输出功率分别提高到 4.37, 2.03 和 3.43 W. 该波长可切换激光在激光医疗、显示、光谱成像和生物光子学等需要多种波长激光开展应用的领域具有重要应用, 克服了对多台激光器的依赖^[25–27].

2 不同混频机制分析及实验系统设计

YVO₄ 晶体对应的 890 cm⁻¹ 频移具有最强的拉曼增益, 对应的增益系数为 4.5 cm/GW^[1]. Nd:YVO₄ 晶体 1064 nm 的基频光, 经过 890 cm⁻¹ 拉曼频移, 对应的一阶斯托克斯光波长为 1176 nm. 所以针对 Nd:YVO₄ 自拉曼激光腔内同时存在着 1064 nm 基频光和 1176 nm 一阶斯托克斯光的振

荡, 为选择性混频获得 532 nm 绿光、559 nm 黄绿光和 588 nm 黄光提供了可能. 为了实现单块二阶非线性光学晶体可选输出不同波长, 要求针对不同波长混频需要切换的相位匹配参数尽量小. 针对该波段的选择性混频常用的非线性光学晶体是 LBO 和 BBO 晶体, 相位匹配方式主要包括温度匹配和角度匹配. 表 1 为利用 SNLO 软件计算的不同匹配机制的两种晶体相位匹配参数. BBO 晶体在该波段的选择性混频相位匹配对温度不敏感 (容忍温度大于 40 K·cm), 而对角度比较敏感, 适合采用角度调节的临界相位匹配技术进行拉曼选择性混频. LBO 晶体角度调节的临界相位匹配需要改变的角度较大, 而对温度较为敏感, 适合温度调节的非临界相位匹配, 具有可通过增加晶体长度来提高转换效率的优点, 但调节的温度跨度超过 100 °C, 这不但对温控设备提出了挑战, 而且存在温度切换直到稳定下来的速度比较慢的问题. 所以对比可知, BBO 晶体具有调节方便、对温控要求不高的优点, 同时 BBO 晶体也具有较大的有效非线性光学系数 (2.0 pm/V), 比 LBO 晶体 (0.84 pm/V) 高出一倍以上, 可一定程度上弥补走离角的不足. 所以实验中主要采用 BBO 晶体开展研究. 选用与一阶斯托克斯倍频对应的临界相位匹配角 ($\theta = 21.5^\circ$, $\varphi = 0^\circ$) 切割, 尺寸为 4 mm × 4 mm × 8 mm 的 BBO 晶体开展 Nd:YVO₄ 晶体基频光与一阶斯托克斯光之间的倍频与和频. BBO 晶体的两个端面均镀有对基频光、一阶斯托克斯光和混频对应可见光波长增透的膜系. 放置于可通过旋转平台调节角度的水冷铜块中进行冷却, 温度控制在 20 °C.

表 1 不同混频机制的 LBO 和 BBO 相位匹配参数 (SHG, 倍频; SFM, 和频)

Table 1. Phase-matching (PM) angles for frequency mixing mechanism (SHG, second harmonic generation; SFM, sum frequency generation).

Wavelength conversion	1064 nm SHG	1064 nm & 1176 nm SFM	1176 nm SHG
Output wavelength/nm	532	559	588
LBO PM temperature/°C	149	89	41
LBO PM angle	$\theta = 90^\circ, \varphi = 11.3^\circ$	$\theta = 90^\circ, \varphi = 7.9^\circ$	$\theta = 90^\circ, \varphi = 3.7^\circ$
BBO PM angle	$\theta = 22.9^\circ, \varphi = 0^\circ$	$\theta = 22.1^\circ, \varphi = 0^\circ$	$\theta = 21.5^\circ, \varphi = 0^\circ$

图 1 是基于双端键合自拉曼混频实现可见波段三波长可选激光的装置示意图. 为了在更高的抽运功率下实现更高的输出功率, 设计双端键合的 YVO₄/Nd:YVO₄/YVO₄ 晶体用于自拉曼变频, 如

图 2 所示. 图 2 为在掺杂 Nd³⁺ 浓度 0.3% 的 a 切 Nd:YVO₄ 晶体 (尺寸为 3 mm × 3 mm × 10 mm) 的抽运输入端键合一段尺寸为 3 mm × 3 mm × 3 mm 的 a 切纯 YVO₄ 晶帽, 在另一端键合一段尺

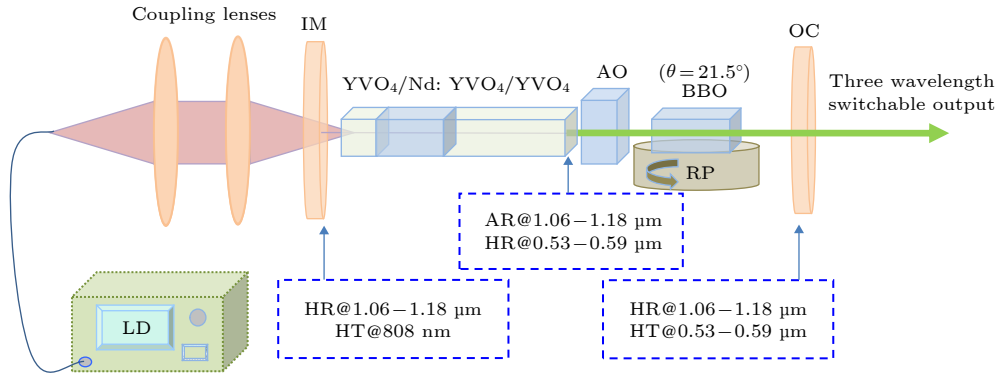


图 1 可见光三波长可切换激光实验装置示意图 (AO, 声光 Q 开关; RP, 旋转平台; LD, 激光二极管)

Fig. 1. Experimental arrangement of the three visible wavelength switchable laser (AO, acousto-optic Q -switcher; RP, rotating platform; LD, laser diode).



图 2 双端键合 $\text{YVO}_4/\text{Nd:YVO}_4/\text{YVO}_4$ 晶体照片 (上方两个晶体图片是本实验所用的同一块晶体, 下方的晶体图片是另一块键合面散射严重的键合晶体)

Fig. 2. An image of the double-end diffusion-bonded $\text{YVO}_4/\text{Nd:YVO}_4/\text{YVO}_4$ crystals (the top two are the same crystal used in the experiment, the bottom one is another crystal with defective bonding).

寸为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 17\text{ mm}$ 的 a 切纯 YVO_4 长晶体而组成的复合晶体. 晶体的侧面用铝箔包于紫铜块内, 并用半导体制冷器控温在 $20\text{ }^\circ\text{C}$. 10 mm 长 Nd:YVO_4 晶体两端键合的纯的 YVO_4 晶体不但可通过热传导帮助 Nd:YVO_4 晶体散热, 改善自拉曼系统的热效应, 而且可与 Nd:YVO_4 晶体一起作为拉曼增益介质, 使得拉曼作用介质的长度达 30 mm , 有效提高拉曼转换效率和输出功率, 从而降低激光阈值. 而且晶体变长后, 与冷却的热沉相互接触面积增大, 提高了晶体的冷却效果. 热透镜效应的改善, 又可降低对基波和拉曼光的衍射损耗, 改善激光光束质量. 双端键合自拉曼晶体的抽运输入端镀制对抽运光 808 nm 、基频光 1064 nm 和拉曼光 1176 nm 增透的膜系 (AR, $R < 0.2\%$); 另一端面镀制对 1064 和 1176 nm 增透 (AR), 同

时对混频产生的 $0.53\text{--}0.59\text{ }\mu\text{m}$ 可见光波段高反 ($R > 95\%$) 的膜系, 起到反射反方向混频产生的可见光使激光输出最大化的作用, 同时消除了激光晶体对可见光吸收产生的附加热效应. 在实验中, 发现键合晶体的质量对自拉曼激光效率影响非常大. 图 2 给出了本文实验中使用过的两块双端键合晶体通过 He-Ne 激光照射后的散射图片. 其中, 上方两个晶体图片是本实验所用的同一块晶体, 获得本文对应的实验结果; 下方的晶体图片是另一块键合面散射严重的键合晶体, 严重影响拉曼激光效率.

利用光纤 (数值孔径为 0.22 , 芯径为 $200\text{ }\mu\text{m}$) 耦合输出的 808 nm 波长的半导体激光来抽运自拉曼晶体. 抽运光经过一对焦距为 50 和 80 mm 的耦合透镜准直再聚焦成直径为 $320\text{ }\mu\text{m}$ 的束腰. 在自拉曼晶体和 BBO 晶体之间放置声光调 Q 开关 (型号 QS041-10G-GHI2, Gooch & Housego 公司) 用于主动调 Q . 由抽运输入镜 IM 和耦合输出镜 OC 组成总腔长约为 10 cm 的基频光和一阶斯托克斯光共同的振荡腔. 输入镜 IM 表面镀有对 808 nm 抽运光高透 (HT, $T > 95\%$) 且对 $1.06\text{--}1.18\text{ }\mu\text{m}$ 高反 (HR, $R > 99.9\%$) 的膜系; 而输出镜 OC 则镀有对 $1.06\text{--}1.18\text{ }\mu\text{m}$ 高反 ($R > 99.9\%$) 且对 $0.53\text{--}0.59\text{ }\mu\text{m}$ 可见波段高透 ($T > 90\%$) 的膜系.

3 实验结果与讨论

首先针对一阶斯托克斯光倍频进行优化, 研究不同调 Q 脉冲重复频率下对应的 588 nm 激光输

出. 在最高 19.5 W 的抽运功率下, 60 kHz 的重复频率调制时, 对应的倍频黄光获得最高 3.43 W 的平均输出功率, 对应的转换效率为 17.6%. 使用光纤光谱仪 (AvaSpec, 3648-2-USB2) 测量可见激光输出的光谱, 检测到该黄光中心波长为 587.9 nm, 线宽约为 0.25 nm. 进一步结合 BBO 晶体的角度调节, 使得相位匹配角 (θ) 对应 22.1° 和 22.9°, 分别实现基频光与一阶斯托克斯光的和频, 以及基频光的倍频, 获得对应的 559 nm 黄绿光和 532 nm 绿光. 在 19.5 W 的抽运功率下, 和频黄绿光和倍频绿光的输出功率分别为 2.03 W 和 4.37 W, 对应转换效率 10.4% 和 22.4%. 图 3 给出了混频输出的三个波长激光谱线, 对应的中心波长分别为 532.3, 558.7 和 587.9 nm.

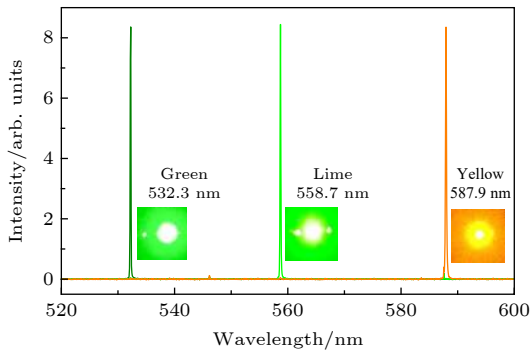


图 3 实验测量的可见波段三波长激光光谱和光斑照片
Fig. 3. Measured spectrum and shooting spots of the three visible emissions.

针对三个可见波长激光的平均输出功率, 在最高功率下优化系统后降低抽运功率, 在从阈值开始记录输出功率, 得到的平均输出功率随入射抽运功率的变换关系如图 4 所示. 输出功率曲线表明一阶斯托克斯光参与的倍频 588 nm 黄光与和频 559 nm 黄绿光的阈值差不多均为 5.4 W, 基频光倍频 532 nm 绿光的阈值约为 1.7 W. 绿光从阈值开始, 平均输出功率随着抽运功率增加而增加, 但一阶斯托克斯光参与的倍频与和频均出现随着抽运功率增加, 明显下降再上升的趋势. 随着抽运功率的增加, 588 nm 黄光在 9.2 W 抽运功率下, 获得 0.81 W 的输出后, 输出功率开始下降并出现较大的跳动. 从 11 W 抽运功率开始, 输出功率重新开始快速增加, 直到获得最高的输出功率. 11 W 抽运功率之后的光斑相比之前的略大, 结合绿光未出现明显下降的趋势, 分析可能是因为基频横模变化导致抽运功率 9—11 W 之间的拉曼转换效率降

低, 相关实验现象在双端键合自拉曼倍频实验中也观察到 [1].

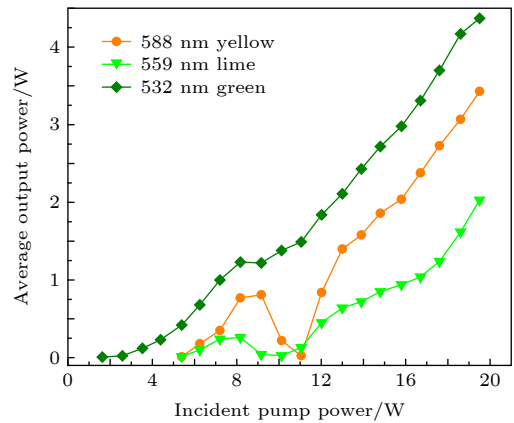


图 4 可见波段三个波长平均输出功率随入射抽运功率的关系
Fig. 4. Average output power of the three visible emissions versus the incident pump power.

此外, 和频的平均输出功率和效率明显比倍频的低, 这与连续波自拉曼的一阶斯托克斯参与的和频比倍频效率高不同. 分析主要原因是调 Q 拉曼激光存在着脉冲压缩特性, 不重叠的基频光和一阶 Stokes 光脉冲影响了和频的转换效率. 采用 InGaAs 自由空间光电探测器 (5 GHz, Thorlabs) 对三个波长输出激光的脉冲波形进行检测, 并由 500 MHz、型号 DPO3052 B 数字示波器呈现, 如图 5 所示. 532 nm 绿光、559 nm 黄绿光和 588 nm 黄光测量的脉冲宽度分别约为 36 ns, 12.2 ns 和 12.7 ns. 基频光的倍频脉冲比一阶斯托克斯光的倍频及基频光和一阶斯托克斯光的和频输出脉冲宽近 3 倍. 该混频脉冲特性也反映了对应的基频光与

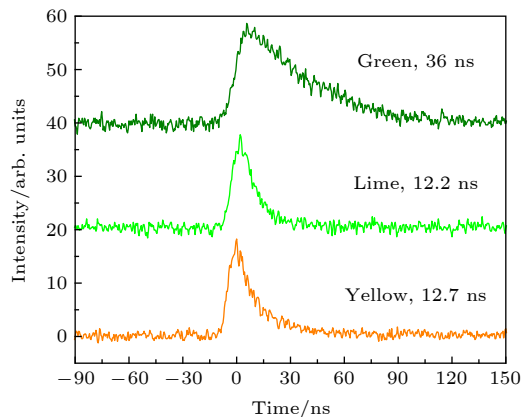


图 5 可见波段三个波长输出的激光脉冲波形
Fig. 5. Temporal pulse profiles of the three visible laser output.

一阶斯托克斯光的脉宽关系, 可以得出基频光脉冲也比一阶斯托克斯光脉冲宽得多, 这导致调 Q 拉曼激光中的基频光和一阶斯托克斯光之间和频的转换效率较低.

4 结 论

本文对 LD 端面抽运声光调 Q 的 Nd:YVO₄ 晶体自拉曼结合二阶非线性光学混频实现黄绿波段三波长可选激光进行了研究. 选用总长度为 30 mm 的双端键合的 YVO₄/Nd:YVO₄/YVO₄ 晶体用于自拉曼变频, 有效改善自拉曼晶体热效应, 并增加拉曼介质长度, 实现了在更高抽运功率下获得更高输出功率和效率的拉曼混频激光输出. 结合对角度敏感的临界相位匹配的 BBO 晶体作为二阶非线性光学混频晶体, 只需微调 BBO 晶体匹配角度在 1.4° 内, 就可成功实现基频光和一阶斯托克斯光之间的倍频与和频, 获得高效的 532 nm 绿光、559 nm 黄绿光和 588 nm 黄光三个波长可切换输出. 在 19.5 W 抽运功率和 60 kHz 的重复频率下, 三个波长激光的最高平均输出功率分别为 4.37, 2.03 和 3.43 W, 对应抽运光到可见光的转换效率分别达 22.4%, 10.4% 和 17.6%, 对应脉冲宽度分别为 36, 12.2 和 12.7 ns. 相对于通常采用温度调节的非临界相位匹配 LBO 晶体实现三个波长所需的近 150 °C 调温跨度, 基于角度调节 BBO 晶体的选择性混频, 实现起来更简单、方便. 可见波段波长可切换激光器可满足激光医疗、显示、光谱成像和生物光子学等领域对多种波长激光的应用需求.

参考文献

- [1] 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
- [2] Chen Y F 2004 *Appl. Phys. B* **78** 685
- [3] Chen Y F 2004 *Opt. Lett.* **29** 1251
- [4] Pask H M, Dekker P, Mildren R P, Spence D J, Piper J A 2008 *Prog. Quantum Electron.* **32** 121
- [5] Cai W Y, Duan Y M, Li J T, Yan L F, Mao M J, Zhao B, Zhu H Y 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 034206
- [6] Zhu H Y, Zhang G, Zhang Y J, Huang C H, Duan Y M, Wei Y, Wei P F, Yu Y L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094209 (in Chinese) [朱海永, 张戈, 张耀举, 黄呈辉, 段延敏, 魏勇, 尉鹏飞, 于永丽 2011 物理学报 **60** 094209]
- [7] Zhang X, Zhang Y C, Li J, Li R J, Song Q K, Zhang J L, Fan L 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 194203 (in Chinese) [张鑫, 张蕴川, 李建, 李仁杰, 宋庆坤, 张佳乐, 樊莉 2017 物理学报 **66** 194203]
- [8] Zhou Q Q, Shi S C, Chen S M, Duan Y M, Zhang X M, Guo J, Zhao B, Zhu H Y 2019 *Chin. Phys. Lett.* **36** 014205
- [9] Chen Y F, Liu Y C, Pan Y Y, Gu D Y, Cheng H P, Tsou C H, Liang H C 2019 *Opt. Lett.* **44** 1323
- [10] Chen M T, Dai S B, Zhu S Q, Yin H, Li Z, Chen Z Q 2019 *J. Opt. Soc. Am. B* **36** 524
- [11] 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
- [12] Liu J, Ding X, Jiang P B, Sheng Q, Yu X Y, Sun B, Wang J B, Shi R, Zhao L, Bai Y T 2018 *Appl. Opt.* **57** 3154
- [13] Spence D J, Li X L, Lee A J, Pask H M 2012 *Opt. Commun.* **285** 3849
- [14] Mao T W, Duan Y M, Chen S M, Chen M Y, Zhang X M, Zhou Q Q, Zhu H Y 2019 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **31** 1112
- [15] Li X L 2016 *Chin. Opt. Lett.* **14** 021404
- [16] Chen Y F, Pan Y Y, Liu Y C, Cheng H P, Tsou C H, Liang H C 2019 *Opt. Express* **27** 2029
- [17] Chen S M, Cheng M Y, Zhu H Y, Mao T W, Zhang X M, Zhou Q Q, Zhang G, Duan Y M 2019 *J. Lumin.* **214** 116555
- [18] Mildren R P, Pask H M, Ogilvy H, Piper J A 2005 *Opt. Lett.* **30** 1500
- [19] Lee A J, Spence D J, Piper J A, Pask H M 2010 *Opt. Express* **18** 20013
- [20] Fan L, Chen H T, Zhu J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 154208 (in Chinese) [樊莉, 陈海涛, 朱骏 2014 物理学报 **63** 154208]
- [21] Zhu H Y, Guo J H, Duan Y M, Zhang J, Zhang Y C, Xu C W, Wang H Y, Fan D Y 2018 *Opt. Lett.* **43** 345
- [22] 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
- [23] Liu Y, Liu Z J, Cong Z H, Men S J, Rao H, Xia J B, Zhang S S, Zhang H J 2016 *Opt. Laser Technol.* **81** 184
- [24] 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
- [25] Runcorn T H, Gorlitz F G, Murray R T, Kelleher E J R 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **24** 1400208
- [26] Staples G, Wu H, Qian J 2015 *Laser Focus World* **51** 61
- [27] Liu W L, Zhou C Q, Ren Q S 2012 *Chinese Journal of Instrumentation* **36** 326 (in Chinese) [刘文陆, 周传清, 任秋实 2012 中国医疗器械杂志 **36** 326]

Triple wavelength-switchable lasing in yellow-green based on frequency mixing of self-Raman operation*

Sun Ying-Lu Duan Yan-Min Cheng Meng-Yao Yuan Xian-Zhang
Zhang Li Zhang Dong Zhu Hai-Yong[†]

(*Institute of Laser and Optoelectronic Technology, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China*)

(Received 2 March 2020; revised manuscript received 26 March 2020)

Abstract

An efficient Nd:YVO₄ crystal self-Raman laser combined with second-order nonlinear frequency conversion is demonstrated to achieve an switchable output of three wavelengths in the yellow-green band. In order to improve the thermal effect and increase the length of Raman medium, a three-stage diffusion-bonded YVO₄/Nd:YVO₄/YVO₄ crystal is designed for high power and efficient self-Raman laser operation. Selective frequency mixing mechanisms between the fundamental wave and the first Stokes wave using the LiB₃O₅ (LBO) and BaB₂O₄ (BBO) crystals are comparatively studied by temperature tuning and angle tuning, respectively. Considering the frequency mixing conversion efficiency and a relatively fast wavelength switching, the BBO crystal with critical phase matching is selected as the second order nonlinear optical crystal for frequency conversion. It only needs to fine-tune the phase match angle of BBO crystal within 1.4°, and thus successfully realizing all second harmonic and sum frequency generation between the fundamental wave and the first Stokes wave. Therefore the efficient-switchable output of the three wavelengths of 532 nm green light, 559 nm lime light and 588 nm yellow light is obtained. Under the incident pump power of 19.5 W and the pulse repetition rate of 60 kHz, maximum average output power of 4.37 W at 532 nm, 2.03 W at 559 nm, 3.43 W at 588 nm are achieved. The conversion efficiency values of the corresponding pump light to visible light are 22.4%, 10.4% and 17.6%, respectively. The corresponding pulse widths are 36 ns, 12.2 ns and 12.7 ns, respectively. The results show that the selective frequency mixing of self-Raman operation is an efficient approach to achieving the wavelength-switchable emission in visible waveband. This wavelength-switchable laser source has important applications in the areas of laser therapy, visual display, spectral imaging and biological medicine.

Keywords: self-Raman, Nd:YVO₄ crystal, visible source, wavelength switchable

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

DOI: [10.7498/aps.69.20200324](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200324)

* Project supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. LY19F050012), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61505147), and the Public Welfare Projects of Wenzhou City, China (Grant No. G20180013).

† Corresponding author. E-mail: hyzhu@wzu.edu.cn