

# 钒酸盐晶体拉曼及其混频可见光波段激光研究进展

程梦瑶, 段延敏\*, 孙瑛璐, 张立, 朱海永\*\*

温州大学激光与光电子技术研究所, 浙江 温州 325035

**摘要** 受激拉曼散射是获得新型波长激光的重要变频手段。腔内拉曼激光同时存在着基频光和多阶斯托克斯光, 为通过二阶非线性光学变频获得多种可见光波长激光提供了基础, 可满足一些领域对多种波长激光的应用需求, 在激光医疗、激光显示、光谱成像和生物光子学等领域具有重要应用。钒酸盐晶体具有优异的受激拉曼散射特性, 是钕离子激光驱动的重要固体拉曼增益介质。简要介绍了钒酸盐晶体拉曼光谱特性以及相关拉曼激光研究现状, 随后对近年来拉曼倍频与和频激光的研究进展进行了总结, 并对基于拉曼选择性混频实现可见光波段可选激光技术的发展及应用前景作了简要分析。

**关键词** 材料; 拉曼激光器; 钒酸盐; 倍频; 和频; 可见光

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.071611

## Research Progress of Raman and Frequency Mixing for Visible Lasers Based on Vanadate Crystals

Cheng Mengyao, Duan Yanmin\*, Sun Yinglu, Zhang Li, Zhu Haiyong\*\*

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

**Abstract** Stimulated Raman scattering is an important frequency conversion method for obtaining novel wavelength laser. For an intracavity Raman laser, the fundamental light and multi-Stokes light simultaneously resonating in the laser cavity provide the possibility for outputting multi-wavelength visible laser by second-order nonlinear optical frequency conversion, which can meet the application needs for multiple wavelength laser in some fields, such as laser medical treatment, laser display, spectral imaging, and biophotonics. Vanadate crystal is an important solid Raman gain medium driven by Nd-ion laser for its excellent stimulated Raman scattering properties. In this paper, the Raman spectral characteristics of vanadate crystals and the research status of related Raman laser are briefly introduced. Then, the research progress of second harmonic and sum-frequency generation of Raman laser in recent years is summarized, and the development and application prospects of techniques for generating multiple wavelength-switchable visible laser by Raman selective frequency mixing are briefly analyzed.

**Key words** materials; Raman lasers; vanadate; second-harmonic generation; sum-frequency generation; visible light

**OCIS codes** 160.4670; 140.3550; 140.3480; 190.2620

## 1 引言

随着激光技术的快速发展和对新型激光器需求的日益增加, 受激拉曼散射作为一种产生新波长激光的重要变频技术受到重点关注。近些年很多材料被发现可作为固体拉曼增益介质。其中钒酸盐晶体

是最常见的一类拉曼晶体, 其  $\text{VO}_4^{3-}$  离子基团的  $A_{1g}$  振动模对应较窄的拉曼谱宽和较大的拉曼增益。2001年, Kaminskii 等<sup>[1]</sup>发现  $\text{YVO}_4$  和  $\text{GdVO}_4$  晶体也是优良的拉曼晶体, 并提出  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  和  $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$  可以作为自拉曼晶体并可应用于新型可见光和近红外波段激光的产生。2004年, Chen<sup>[2-3]</sup>报

收稿日期: 2020-03-03; 修回日期: 2020-03-17; 录用日期: 2020-03-19

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY19F050012)、国家自然科学基金(61505147)、温州市公益性科技计划(G20180013)、温州大学实验室开放项目(JW19SK41)

\* E-mail: ymduan@wzu.edu.cn; \*\* E-mail: hyzhu.opt@gmail.com

道了由半导体激光(LD)端面抽运的被动调 Q Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光输出。基于 c 切 Nd:GdVO<sub>4</sub> 的自拉曼获得了波长为 1175.6 nm 的一阶斯托克斯(Stokes)激光输出,对应的最大平均输出功率为 140 mW,从抽运光到拉曼光的转换效率为 7%。2007 年, Su 等<sup>[4]</sup> 基于声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 激光晶体和拉曼晶体分离结构系统实现了平均输出功率为 2.6 W、转换效率为 13.9% 的 1176 nm 激光输出。此后针对钽酸盐晶体的自拉曼和独立拉曼晶体的内腔式拉曼激光系统均被广泛采用。

受激拉曼散射还是实现可见光波段激光的重要途径。掺铈离子激光驱动的腔内拉曼激光存在着基频和各阶 Stokes 激光同时振荡的现象,为倍频或和频获得红橙黄绿等可见光波段激光提供了可能。相关可见光波段的激光在激光医疗、激光显示、光谱成像和生物光子学等领域具有重要应用<sup>[5]</sup>。绿色激光在科学研究、工业加工和军事上,特别是在海洋探测方面,都有着广泛的应用。黄光波长包含了人眼最敏感的波段,所以黄光激光适用于激光显示和照明,适用于有雾情况下的大地测量以及各种准直场合,特别是 589 nm 激光可替代传统的钠导信号光源。橙光激光在医学上可用于治疗眼底黄斑水肿,在美容方面可去除多余的毛细血管。红光激光对组织的穿透能力强,可以达到组织深处,在医学手术方面具有重要应用,在癌症光动力

表 1 常见拉曼晶体的拉曼性能参数<sup>[9]</sup>Table 1 Raman performance parameters of common Raman crystals<sup>[9]</sup>

Crystal	Raman shift /cm <sup>-1</sup>	Raman line width /cm <sup>-1</sup>	Raman gain at 1064 nm/(cm·GW <sup>-1</sup> )	Damage threshold/(GW·cm <sup>-2</sup> )
PbMO <sub>4</sub>	870	8	~8	~0.4
BaWO <sub>4</sub>	925	1.6	8.5	—
SrWO <sub>4</sub>	922	2.7	5	~5
GdVO <sub>4</sub>	885	3.0	>4.5	~1
YVO <sub>4</sub>	890	2.6	>4.5	~1
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1047	0.4	11	~0.4
KGW	768	6.4	4.4	~10
	901	5.4	3.5	

对于拉曼激光器的设计来说,除考虑拉曼增益系数、线宽外,拉曼晶体的其他性质如光学损伤阈值和热导等物理性能也是重要的考虑因素。钽酸盐晶体具有较大的拉曼增益,虽然不及 PbMO<sub>4</sub> 和 Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 等晶体,但其光学损伤阈值高,同时还可以当作优秀的激光增益介质的基质材料<sup>[10]</sup>。通过掺杂稀土元素,晶体可同时作为激光晶体和拉曼晶体,并用作自拉曼增益介质。Nd:YVO<sub>4</sub> 和

学疗法上可用作高效的光敏剂激发光源。所以可见光波段激光在民用、国防高技术领域都具有重要应用价值和市场前景。

本文综合本课题组和国际上对钽酸盐拉曼激光的研究,简要介绍了钽酸盐晶体拉曼光谱特性以及相关拉曼激光的研究现状,并对近年来拉曼倍频与和频激光的研究进展进行了总结,随后对通过拉曼选择性混频实现可见光波段可选激光技术的发展及应用前景作了简要分析。

## 2 钽酸盐晶体拉曼光谱特性

拥有较大拉曼增益的晶体大多包含一个或两个碱土金属和一个原子团[XO<sub>3</sub>]或[YO<sub>4</sub>],其中 X=N, C, Cl, Br, I; Y=V, W, P, Mo<sup>[6-7]</sup>。拉曼晶体的性能主要由原子团的性质决定,对于不同的原子团,因振动频率不同,拉曼线宽及散射截面都不同。但碱土金属对晶体的拉曼性能也有影响, Basiev 等<sup>[8]</sup> 曾对碱土金属对拉曼晶体性能的影响进行了分析。目前经常采用的拉曼晶体有硝酸盐、钨酸盐和钽酸盐,例如 PbMO<sub>4</sub>, BaWO<sub>4</sub>, SrWO<sub>4</sub>, KGW, GdVO<sub>4</sub>, YVO<sub>4</sub>, Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>。表 1 给出了一些具有拉曼效应晶体的拉曼性能参数。根据这些具有拉曼效应晶体的不同频移量可以获得不同谱线的拉曼激光,而拉曼线宽及拉曼增益将直接决定拉曼的阈值及转换效率等。

Nd:GdVO<sub>4</sub> 已成为重要的自拉曼晶体。

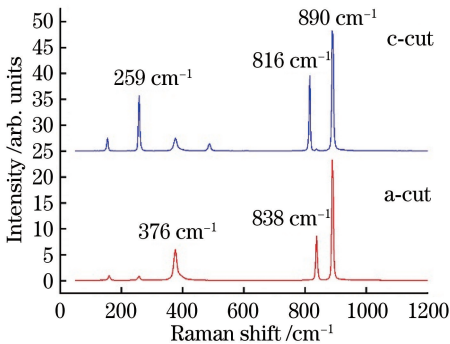
掺铈钽酸盐晶体属于四方单轴晶系,锆英石型结构,光轴平行于 c 轴,基质对激活粒子有敏化作用,可提高吸收率,是适用于半导体激光抽运的一类优良激光晶体。表 2 给出 Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:LuVO<sub>4</sub> 三种相对常见的掺铈钽酸盐的激光与拉曼性能<sup>[11-15]</sup>。三种晶体对应的激光波长和拉曼频移量略有不同,Nd:LuVO<sub>4</sub> 晶体是相对较新的激

表 2 各晶体性能及能级跃迁参数

Table 2 Crystal performance and energy level transition parameters

Crystal	Tetragonal Nd:YVO <sub>4</sub>	Tetragonal Nd:GdVO <sub>4</sub>	Tetragonal Nd:LuVO <sub>4</sub>
Wavelength of <sup>4</sup> F <sub>3/2</sub> -I <sub>11/2</sub> transition /nm	1064	1063	1066
Stimulated cross section of <sup>4</sup> F <sub>3/2</sub> -I <sub>11/2</sub> transition / (10 <sup>-19</sup> cm <sup>2</sup> )	12	7.6	14.6
Fluorescence lifetime /μs	90	90	129
Raman gain@ 1064 nm / (cm · GW <sup>-1</sup> )	>4.5	>4.5	>3.2
Raman shift /cm <sup>-1</sup>	890	885	900
Raman line width /cm <sup>-1</sup>	2.6	3.0	5.0
Thermal conductivity / (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	5.2	11.7	9.7

光晶体,具有最大的跃迁截面和较长的荧光寿命,激光性能最佳,但拉曼增益相对较小;Nd:GdVO<sub>4</sub>晶体热导性能最好,有利于在高功率下运转,但跃迁截面最小;Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的激光性能和拉曼性能均较好,但热导性能较差,不利于激光高功率运转。最近随着键合技术的发展,可通过晶体的键合设计来改善热效应。图 1 给出了 YVO<sub>4</sub> 晶体 Z(XX)Z 和 X(ZZ)X 几何配置下的拉曼频移特性图<sup>[16]</sup>。最近也有一些新型的钒酸盐及其混晶材料被用于拉曼激光研究<sup>[17-18]</sup>。掺钕离子的混晶具有较宽的荧光光谱和相对较小的跃迁截面,在调 Q 和锁模激光应用方面具有潜在的优势。

图 1 YVO<sub>4</sub> 晶体的拉曼频移特性图<sup>[16]</sup>Fig. 1 Raman shift characteristic diagram of YVO<sub>4</sub> crystal<sup>[16]</sup>

### 3 钒酸盐拉曼激光研究现状

#### 3.1 不同工作模式下的固体拉曼激光特点

内腔式固体拉曼激光器按工作模式可分为连续波、被动调 Q、主动调 Q 和锁模等模式。连续波内腔式固体拉曼激光器要求具有高 Q 值的腔,在拉曼晶体上具有较小的束腰,并可通过提升腔内功率密

度来降低连续拉曼阈值<sup>[19]</sup>。为使连续波拉曼高效输出,通常一阶 Stokes 激光的耦合透过率小于 1%。被动调 Q 拉曼激光器通过在腔内插入可饱和吸收体来实现对腔内基频激光的 Q 值调制、高峰值的脉冲激光和高效的拉曼转换。但可饱和吸收体也会引入额外的吸收损耗,影响整体的效率,目前主要应用在小功率拉曼激光器,具有结构简单、低成本、易操作的优点<sup>[20-21]</sup>。主动调 Q 拉曼激光器通常采用声光或电光调 Q 实现调制,通过外部控制调制参数(重复频率和占空比)来优化拉曼激光输出,具有可灵活调节激光脉冲参数的优势,可实现高功率激光输出,但相对被动调 Q 成本较高。实验表明随着重复频率的增加,可以在更高的抽运功率下实现较高的输出功率<sup>[22]</sup>。锁模拉曼激光器可通过固体锁模技术实现超短脉宽的拉曼激光输出,而固体拉曼过程经常存在自锁模现象<sup>[23-25]</sup>。内腔式固体拉曼激光器按结构可分为独立拉曼介质的分离式拉曼结构和具有拉曼效应激光晶体的自拉曼结构。2007 年 Piper 等<sup>[9]</sup>对固体拉曼激光器的相关结果作了综述。

#### 3.2 一阶 Stokes 激光的研究进展

分离式拉曼激光器采用激光增益介质和拉曼增益介质分离的结构。其优点是可通过设计将拉曼晶体放置在较小的束腰位置,并可根据需要选择拉曼晶体长度以提高拉曼转换效率;其缺点在于分离结构增加了腔内元件的表面反射,激光晶体和拉曼晶体分离需要同时对两块晶体进行温控,系统相对复杂。2017 年, Jiang 等<sup>[26]</sup>利用 885 nm LD 侧面抽运声光调 Q Nd:YAG/YVO<sub>4</sub> 的分离结构拉曼系统,设计 Z 型折叠腔,将 YVO<sub>4</sub> 放置于折叠臂束腰位置,以提高晶体的功率密度。在 190 W 的抽运功率和 10 kHz 重复频率下,获得了 16.7 W 的 1176 nm

一阶 Stokes 激光输出。2018 年, Liu 等<sup>[27]</sup>也利用折叠腔设计的 Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 分离结构拉曼系统, 在 39 W 抽运功率和 160 kHz 重复频率下, 获得了 10.3 W 的 1176 nm 一阶 Stokes 激光输出, 转换效率达 27.8%。2019 年, Zhou 等<sup>[28]</sup>报道了利用 Nd:YVO<sub>4</sub>/LuVO<sub>4</sub> 组合同时实现 YVO<sub>4</sub> 和 LuVO<sub>4</sub> 的 890 cm<sup>-1</sup> 和 900 cm<sup>-1</sup> 的拉曼频移, 并获得了 1175.8 nm 和 1177.1 nm 双波长激光输出。

自拉曼激光器腔内的激光晶体同时也是拉曼增益介质, 因此有利于减少腔内光学元件, 具有结构简单紧凑、性能稳定的优点, 但也降低了模式匹配的灵活性, 由于叠加了激光产生和拉曼过程的热沉积, 产生了更加严重的热效应。2011 年, Zhu 等<sup>[29]</sup>报道了基于 LD 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 的连续波拉曼, 在 22.5 W 的抽运功率下, 实现了 1.53 W 输出功率和 8.1% 转换效率的 1176 nm 激光输出。2013 年, Ding 等<sup>[20]</sup>报道了基于 c 切 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体和 Cr<sup>4+</sup>:YAG 组合的被动调 Q 拉曼, 实现了具有 800 mW 输出功率和 10.1% 转换效率的 1178 nm 激光输出。2015 年 Kores 等<sup>[30]</sup>报道了基于 LD 侧面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 的连续波拉曼, 在 24.5 W 的抽运功率下, 实现了 1.8 W 输出功率和 7.3% 转换效率的 1176 nm 激光输出。2012 年 Li 等<sup>[31]</sup>对 YVO<sub>4</sub> 晶体拉曼的温度调谐进行了研究, 当晶体温度从 5 °C 变化到 150 °C, 一阶 Stokes 激光波长从 1175.76 nm 变化到 1175.27 nm, 调谐宽度为 0.49 nm。

为了在较高的抽运功率下实现更高的拉曼激光输出功率, 通常可采用键合结构的自拉曼晶体。图 2 给出了本课题组曾设计的用于自拉曼激光的单端和双端键合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体。在设计双端键合三段式自拉曼晶体时, 中间的掺钕离子自拉曼晶体需根据其激光性能来设计; 自拉曼晶体的抽运光输入端键合一段未掺杂的晶体以改善热效应; 自拉曼晶体的另一端键合一段较长的未掺杂晶体, 作为拉曼增益介质以提高拉曼变频效率。自拉曼晶体两端键合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, 而且可与自拉曼晶体一起作为拉曼增益介质, 增长了拉曼作用介质的长度, 有效提高拉曼变频效率和输出功率, 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, 改善了晶体的冷却效果。热透镜效应的改善, 又可降低对基波和拉曼光的衍射损耗, 从而提高激光光束质量。2011 年, 本课题组将该三段式键合晶体应用于自拉曼倍频, 实现了高效的 588 nm 黄光

输出<sup>[19]</sup>。2010 年 Du 等<sup>[32]</sup>基于键合的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 在 25 W 抽运功率和 90 kHz 重复频率下, 获得了平均输出功率为 3.1 W 和转换效率为 12.4% 的 1176 nm 激光输出。同年 Fan 等<sup>[33]</sup>报道了基于 YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 三段式键合的连续波拉曼, 有效改善了热效应并降低了阈值, 在 25.5 W 的抽运功率下实现了 2.8 W 输出功率和 11% 转换效率的 1175 nm 激光输出。2019 年, Chen 等<sup>[34]</sup>报道了基于 c 切键合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 拉曼, 在 20.6 W 的抽运功率下, 实现了 2.53 W 输出功率和 12.3% 转换效率的 1178 nm 激光输出。



图 2 为实验设计出的两种键合晶体

Fig. 2 Two kinds of bonded crystals designed for experiments

### 3.3 二阶 Stokes 激光的研究进展

2010 年, Lee 等<sup>[35]</sup>设计了 V 型折叠腔结构的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼, 分析了折叠角对二阶 Stokes 激光输出的影响。在 15° 折叠角的情况下, 通过级联拉曼实现了最大功率为 950 mW 的 1308 nm 二阶 Stokes 光输出, 转换效率为 6.8%。再结合非临界相位匹配(PM)切割 LBO 晶体对腔内 1173 nm 一阶 Stokes 光和 1308 nm 二阶 Stokes 光进行和频, 实现了 1027 mW 的 620 nm 橙红色可见光输出, 总转换效率为 4.9%。2012 年, Chen 等<sup>[36]</sup>利用三段式键合 YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 晶体作为自拉曼晶体, 对基于 890 cm<sup>-1</sup> 频移的二阶 Stokes 激光进行了研究。采用对 1313 nm 波长光的透过率为 13% 的镜片, 在 14.6 W 抽运功率和 40 kHz 重复频率下, 获得了 2.34 W 平均输出功率和 16% 转换效率的 1313 nm 二阶 Stokes 激光输出。2014 年, Du 等<sup>[37]</sup>也基于三段式键合 YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 晶体, 实现了 1.3 W 的调 Q 锁模激光输出。

2017 年, 本课题组针对 a 切和 c 切的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的 890 cm<sup>-1</sup> 和 259 cm<sup>-1</sup> 频移的级联拉曼进行了研究, 获得了瓦级以上的二阶 Stokes 激光输出<sup>[16,38-39]</sup>。基于普通的 a 切 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的 890 cm<sup>-1</sup> 频移, 并采用对 1313 nm 波长光的透过率



为 47% 的镜片,在 17.1 W 抽运功率和 50 kHz 重复频率下,获得了 2.5 W 平均输出功率、14.7% 转换效率的 1313 nm 二阶 Stokes 激光<sup>[39]</sup>。最近,张喜梅等<sup>[40]</sup>基于普通 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体,在 10 W 抽运功率和 50 kHz 重复频率下,获得了 1.48 W 平均输出功率、14.8% 转换效率的 1309 nm 二阶 Stokes 激光。2018 年,Liu 等<sup>[41]</sup>采用与实现 1176 nm 一阶 Stokes 激光类似的系统,基于声光调 Q 折叠腔设计的 Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 分离结构拉曼系统,并采用对 1313 nm 波长光的透过率为 82% 的镜片,在 36.7 W 抽运功率和 80 kHz 重复频率下,获得了 5.16 W 的 1313 nm 一阶 Stokes 激光输出,转换效率达 14%。

## 4 拉曼混频单波长激光研究进展

### 4.1 混频非线性光学晶体性能分析

目前可用于掺钕离子激光驱动钒酸盐晶体拉曼倍频或和频的非线性光学晶体主要有 BBO、LBO 和 KTP 等。表 3 对基于 SNLO 软件计算的 1176 nm 倍频相位匹配参数进行了对比。

表 3 1176 nm 倍频相位匹配参数

Table 3 Phase-matching parameters for second harmonic generation at 1176 nm

Crystal	BBO	LBO	KTP
PM type	CPMI	NCPMI	CPMII
Temperature /K	300	315	300
$d_{\text{eff}}/(\text{pm} \cdot \text{V}^{-1})$	2	0.839	3.5
PM angle	$\theta=21.5^\circ$	$\theta=90^\circ,$ $\phi=0^\circ$	$\theta=69^\circ,$ $\phi=0^\circ$
Walk-off angle /mrad	52.87	0	34.32

KTP 晶体的有效非线性系数 ( $d_{\text{eff}}$ ) 最大,是 LBO 晶体的 4 倍左右,但它们的走离角非常大,孔径相干长度很短,II 类相位匹配<sup>[42]</sup>更适合腔内无偏振激光的倍频。LBO 的有效非线性系数较小 (0.839 pm/V),I 类相位匹配相较于 II 类有更大的有效非线性系数,在常温下非常接近于非临界相位匹配。可通过温度调节,在 315 K 的温度下实现非临界相位匹配,利用较长的晶体提高倍频效率。目前的相关研究利用 LBO 晶体进行混频时,大多采用非临界相位匹配 ( $\theta=90^\circ, \phi=0^\circ$ ) 切割晶体,所以下文中未特别说明的 LBO 晶体均为采用非临界相位匹配 ( $\theta=90^\circ, \phi=0^\circ$ ) 切割。BBO 晶体的 I 类相位匹配有效非线性系数较大 (2 pm/V),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,可在一定程

度上弥补走离角较大的不足。

### 4.2 连续波拉曼混频可见光波段激光

2007 年,Dekker 等<sup>[43]</sup>基于连续波 Nd:GdVO<sub>4</sub>/LBO 自拉曼腔内一阶 Stokes 激光倍频,在 16.3 W 抽运功率下,实现了 678 mW 的 586.5 nm 激光输出。同年, Lee 等<sup>[44]</sup>基于 Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO 自拉曼倍频,获得了 140 mW 平均输出功率和 4.4% 转换效率的黄光输出。通过对不同的谐振腔结构进行分析,研究了振幅稳定性,实现了低阈值、高输出功率和效率输出。2008 年, Lee 等<sup>[45]</sup>基于 880 nm LD 端面抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub>/LBO 自拉曼倍频,采用耦合腔结构对反向倍频光进行反射,防止其进入自拉曼晶体,实现了 2.51 W 输出功率和 12.2% 转换效率的 586.5 nm 连续黄光输出。2010 年, Lü 等<sup>[46]</sup>基于 880 nm LD 端面抽运双端扩散键合的 Nd:LuVO<sub>4</sub>/LBO 自拉曼倍频,实现了 3.5 W 输出功率和 13.3% 转换效率的 589 nm 连续黄光输出。同年, Lü 等<sup>[47]</sup>基于 Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO 自拉曼和频,获得了 890 mW 输出功率和 4.9% 转换效率的 559 nm 黄绿光输出。Lee 等<sup>[48]</sup>基于 Nd:GdVO<sub>4</sub>/LBO 自拉曼和频,实现了 5.3 W 输出功率和 21% 转换效率的 559 nm 连续黄绿光输出。2011 年, Li 等<sup>[49]</sup>利用高掺杂 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体实现了紧凑型的腔内倍频,获得 220 mW 的 587.8 nm 连续黄光输出。同年, Zhu 等<sup>[29]</sup>基于普通的 808 nm LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 作为自拉曼晶体,临界相位匹配的 KTP 作为和频晶体,获得了输出功率为 480 mW 的 558.6 nm 激光输出。2013 年, Tan 等<sup>[50]</sup>基于 880 nm LD 抽运 Nd:LuVO<sub>4</sub>/LBO 自拉曼和频,实现了 4.2 W 输出功率和 22.9% 转换效率的 560 nm 连续黄绿光输出。2014 年, Lee 等<sup>[51]</sup>还报道了基于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼倍频的涡旋黄光激光输出,输出功率为 727 mW,转化效率为 4%。

由于连续自拉曼对激光腔损耗控制要求非常高,为获得高效的连续拉曼混频,除了考虑腔镜透射损耗和腔内光学元件散射反射损耗外,对二阶非线性变频晶体的长度等影响混频转换效率的参数进行优化也非常关键。Li 等<sup>[52]</sup>通过对拉曼混频腔内损耗的估算表明过长的倍频晶体长度会导致过高的腔内损耗,从而降低拉曼转换效率。Lin 等<sup>[53]</sup>对 Nd:GdVO<sub>4</sub> 连续波自拉曼腔内倍频黄光输出功率稳定性进行了分析,分析表明在高功率下黄光的波动性与普通的倍频绿光一样,峰峰值大于 20%,但在某个较低的功率值处可以获得非常稳定的输出,峰

峰值小于1%。

### 4.3 调Q拉曼混频可见光波段激光

2007年, Wang等<sup>[54]</sup>基于Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO自拉曼倍频,在5 kHz重复频率下,实现了3.5 W平均输出功率和1.9%转换效率的588 nm黄光输出。2009年, Omatsu等<sup>[55]</sup>则采用Cr:YAG作为可饱和吸收体进行被动调Q的Nd:YVO<sub>4</sub>自拉曼,实现了最高264 mW输出功率和5.9%转换效率的倍频黄光输出。2011年, Duan等<sup>[56]</sup>基于普通c切Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO拉曼倍频,在16.2 W入射抽运功率和40 kHz重复频率下,实现了输出功率为2.15 W、转换效率为13.3%、中心波长为589.17 nm的黄光输出,该方法也是获得钠信标光源的潜在途径;基于c切Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP自拉曼和频,在14 W抽运功率和20 kHz脉冲重复频率下,实现了840 mW平均输出功率和7.6%转换效率的560 nm黄绿光输出<sup>[57]</sup>。2013年,段延敏等<sup>[58]</sup>基于a切Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP自拉曼和频,在17.5 W的抽运功率和30 kHz脉冲重复频率下,获得了1.71 W平均输出功率和9.8%转换效率的560 nm黄绿光输出。2015年, Su等<sup>[59]</sup>基于Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP自拉曼和频,在13.7 W入射抽运功率和40 kHz重复频率下,获得了0.9 W输出功率和6.6%转换效率的560 nm黄绿光输出。

相对于普通的掺钕钒酸盐自拉曼混频,采用键合结构的自拉曼晶体可在更高的抽运功率下实现更高的转换效率。2009年, Chang等<sup>[60]</sup>基于20 mm长的双端键合Nd:YVO<sub>4</sub>晶体自拉曼,将临界相位匹配切割的BBO晶体作为和频晶体,在17.5 W入射抽运功率和100 kHz脉冲重复频率下,实现了总转换效率为12.5%的1176 nm一阶Stokes光和559 nm和频光双输出。其中,和频559 nm激光的平均输出功率为1.67 W。2009年, Zhu等<sup>[61]</sup>基于键合的YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>晶体自拉曼,将非临界相位匹配切割的LBO作为倍频晶体,在23.5 W抽运功率和60 kHz重复频率下,实现了5.7 W平均输出功率和24.2%转换效率的倍频588 nm黄光输出。同年, Zhu等<sup>[22]</sup>进一步采用30 mm长三段式键合的YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub>晶体,有效改善热效应并增加受激拉曼散射作用长度。结合重复频率和占空比优化,在110 kHz重复频率和5%占空比条件下,获得了7.93 W平均输出功率和30%转换效率的588 nm黄光输出。2013年, Du等<sup>[62]</sup>基于双端键合的Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO自拉曼和频,在32 W

入射抽运功率和30 kHz重复频率下,实现了3.55 W输出功率和11%转换效率的559 nm黄绿光输出。

通过分析调Q的拉曼倍频与和频激光结果,发现键合长晶体自拉曼结构设计、调Q参数的优化对在更高功率下实现更高输出功率和效率具有重要意义。与连续自拉曼不同,调Q自拉曼和频的效率明显比倍频的效率低,这主要是因为调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。

## 5 拉曼混频可见光波段多波长激光

随着一阶Stokes激光倍频与和频效率及功率的提升,针对在拉曼激光腔内通过不同波长混频实现波长可选的多波长激光的研究逐渐成为热点。激光腔内基频光和各阶Stokes光同时振荡,为通过倍频和频实现多种可见光波段激光输出提供了可能。目前相关报道分别采用非线性光学晶体实现了单个波长可选择输出和多个波长同时输出。

### 5.1 拉曼腔内混频方案

以Nd:YVO<sub>4</sub>晶体作为自拉曼晶体的二阶级联拉曼系统为例。Nd:YVO<sub>4</sub>晶体产生的1064 nm波长激光作为基频光,通过自身890 cm<sup>-1</sup>的频移,产生对应的一阶Stokes光的波长为1176 nm,二阶Stokes光的波长为1313 nm。图3给出了基于自拉曼混频产生多种颜色波长激光的运行机制。

目前针对钒酸盐晶体拉曼腔内混频用到的常见二阶非线性光学晶体主要有LBO、BBO和KTP三种,相位匹配方式主要包括温度匹配和角度匹配。表4给出了利用SNLO软件对各个晶体的相位匹配参数进行计算的结果。针对混频实现单个波长的输出,不同晶体各有优缺点。利用温度调节的LBO和角度调节的BBO晶体可能输出尽量多波长的可见激光。BBO晶体在近红外波段的选择性混频相位匹配的容忍温度大,对温度不敏感,而对角度比较敏感,利用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,对温度较为敏感,适合温度调节的LBO晶体非临界相位匹配技术具有没有走离角、可通过增加晶体长度来提高转换效率的优点,但需要实现对LBO晶体在很大的范围(如-1~149℃)的温度调节,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。相较于温度调节的非临界相位匹配技

术, BBO 晶体临界相位匹配技术虽然存在较大走离角, 影响了转化效率, 但其只需微调晶体角度  $2.5^\circ$  以

内即可输出 5 个不同波长的激光, 切换起来更加方便快捷。同时 BBO 晶体的有效非线性光学

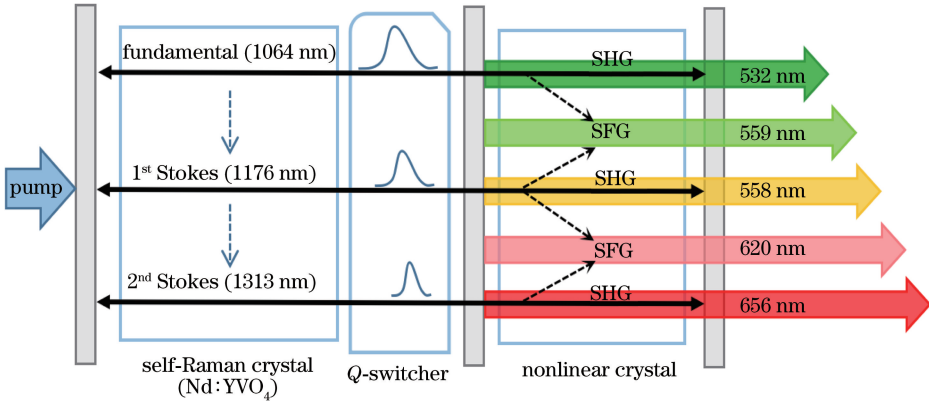


图 3 基于自拉曼和选择性混频机制的多波长可选激光运行机制

Fig. 3 Multi-wavelength switchable laser operation mechanism based on self-Raman and selective frequency mixing

表 4 各波长组合对应不同混频机制的非线性光学晶体相位匹配参数

Table 4 Phase-matching parameters of nonlinear optical crystals with different frequency mixing mechanisms corresponding to different wavelength combinations

Wavelength conversion	1064 nm	1064 nm & 1176 nm	1176 nm	1176 nm & 1313 nm	1313 nm
	SHG	1176 nm SFG	SHG	1313 nm SFG	SHG
Output wavelength /nm	532	559	588	620	657
LBO PM angle	$\theta=90^\circ,$ $\phi=11.3^\circ$	$\theta=90^\circ,$ $\phi=7.9^\circ$	$\theta=90^\circ,$ $\phi=3.7^\circ$	$\theta=86.7^\circ,$ $\phi=0^\circ$	$\theta=85.8^\circ,$ $\phi=0^\circ$
LBO PM temperature / $^\circ\text{C}$	149	89	41	10	-1
BBO PM angle / $(^\circ)$	22.9	22.1	21.5	20.9	20.4

系数(2.0 pm/V)较大, 比 LBO 晶体(0.84 pm/V)高出一倍以上, 可在一定程度上弥补走离角的不足。所以实验室以 BBO 晶体为主开展相关研究。

### 5.2 连续波拉曼混频波长可选激光

2005 年, Mildren 等<sup>[63]</sup> 提出利用一块非临界相位匹配切割 LBO 晶体并按  $25^\circ\text{C}$  下的 1064 nm 倍频匹配角度切割的 LBO 晶体组合对 Nd:YAG/KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 腔内不同波长级联拉曼激光进行混频, 实现了 532, 555, 579, 606 nm 4 种可见光输出。2008 年, Pask 等<sup>[64]</sup> 用临界相位匹配 BBO 晶体角度调节, 成功实现了不同波长组合 5 个可见光波长的激光输出, 对应于 532, 555, 579, 605, 636 nm 波长的输出功率分别为 1.7, 0.5, 1.1, 0.28, 0.04 W。2010 年, Lee 等<sup>[65]</sup> 基于 880 nm 半导体激光抽运连续波 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼, 控制 LBO 晶体温度在 45.5, 95, 155  $^\circ\text{C}$  下, 通过基频光和一阶 Stokes 光之间的倍频与和频, 分别实现了 586, 559, 532 nm 三个波长输出, 每个波长的输出功率都大于 3.5 W, 转换效率大于 11%。2011 年, Li 等<sup>[52]</sup> 采用 Nd:YVO<sub>4</sub> 作为自

拉曼晶体, 通过改变腔内 LBO 晶体的温度实现 320 mW 的 588 nm 黄光和 660 mW 的 559 nm 黄绿光输出, 转换效率分别为 8.4% 和 17%。同时对非线性过程相互作用对拉曼转换过程的影响进行了分析, 分析表明非线性晶体过度耦合损耗会降低拉曼转换效率, 导致较短的 LBO 晶体产生较高的可见输出功率, 这为连续的腔内拉曼激光器输出可见光的优化设计提供了新的思路。2012 年, Spence 等<sup>[66]</sup> 针对连续波拉曼腔内选择性混频建立相关模型, 结合之前的相关实验, 分析二阶非线性混频转换对产生可见光效率的影响, 研究表明和频过程会影响 Stokes 激光的产生, 较短约几毫米的 LBO 晶体可获得较高的输出功率。2016 年, Li 等<sup>[67]</sup> 利用 BBO 角度调节实现 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体基频光和一阶 Stokes 光的混频, 获得了输出功率为 600, 560, 200 mW 的 559, 532, 588 nm 激光输出。2019 年, Chen 等<sup>[68-69]</sup> 通过在腔内放置两块或三块针对基频光和一阶 Stokes 光不同组合混频的匹配角度切割的 LBO 晶体, 分别实现了双波长和三波长激光同时输出。针



对腔内损耗控制非常严格的连续波拉曼选择性混频,利用温度调节的 LBO 晶体、相对角度调节的 BBO 晶体可避免晶体倾斜引起的端面反射损耗,更有利于实现高功率的输出。

### 5.3 声光调 Q 混频波长可选激光

近年来温州大学团队开展了一系列针对  $\text{YVO}_4$  晶体调 Q 拉曼腔内基频和一阶 Stokes 光之间的选择性混频研究。2019 年, Yue 等<sup>[70]</sup>利用声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 自拉曼结合非临界相位匹配切割 LBO 晶体的温度调节,实现了 2.5 W 的 588 nm 黄光和 1.8 W 的 559 nm 黄绿光输出,实现的转换效率分别为 13.1% 和 9.5%。受温控设备的限制,未能在近 150 °C 下实现 532 nm 绿光输出。2018 年, Guo 等<sup>[71]</sup>采用临界相位匹配( $\theta=21.5^\circ$ )切割的 BBO 晶体作为非线性光学晶体,在 10.2 W 抽运功率和 60 kHz 重复频率下,通过微调 BBO 角度实现了 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%。最近的研究基于三段式键合  $\text{YVO}_4/\text{Nd}:\text{YVO}_4/\text{YVO}_4$  晶体,结合 BBO 角度调节,在 19.5 W 抽运功率下,将输出功率分别提高到 4.37, 2.03, 3.43 W。2019 年, Chen 等<sup>[72-73]</sup>利用声光调 Q 的 Nd:YAP 晶体并以 1080 nm 波长激光作为基频光、纯的  $\text{YVO}_4$  晶体作为拉曼晶体,分别开展了基于 LBO 和 BBO 晶体的选择性混频。其中在 6 W 的抽运功率和 20 kHz 重复频率下,基于 BBO 晶体的角度调节获得了 418, 266, 361 mW 的 540 nm 绿光、567 nm 黄光和 597 nm 橙光输出。实验发现利用 LBO 晶体温度调节实现不同波长输出切换的速度慢,特别针对 532 nm 绿光需要近 150 °C 的温度。利用 BBO 角度调节的效率虽然不如采用非临界相位匹配 LBO 晶体,但角度切换小、调节方便。微小的角度倾斜虽然也会影响腔内增益,但声光调 Q 工作模式下 BBO 晶体倾斜带来的表面反射损耗相对连续波模式对增益的影响较小。

## 6 钒酸盐拉曼混频的潜在应用及展望

目前研究人员对钒酸盐晶体一阶 Stokes 光及其混频的研究较为深入,已取得非常好的结果。针对连续拉曼和调 Q 拉曼的一阶 Stokes 光混频可见光波段激光的转换效率最高分别可达 20% 和 30%。最近基于 Nd:YVO<sub>4</sub> 自拉曼实现二阶 Stokes 光的转换效率最高达 16%。所以针对钒酸盐级联拉曼腔内不同波长的选择性混频也可望获得较高的转换效

率。针对腔内包括二阶 Stokes 光的腔内腔选择性拉曼混频,可获得绿光到红光波段 5 个波长的激光输出。最近本课题组也开展了基于三段式键合  $\text{YVO}_4/\text{Nd}:\text{YVO}_4/\text{YVO}_4$  晶体的声光调 Q 级联自拉曼选择性混频的初步实验,成功实现 5 个波长超过瓦级的多波长可选激光输出。通过实验发现基频和一阶 Stokes 激光参与混频时,存在着一阶 Stokes 光往二阶 Stokes 光转换的损耗,从而影响混频效率。调 Q 模式下,基频和各阶 Stokes 脉冲不重叠影响和频激光效率。目前麦考瑞大学针对连续波拉曼及腔内混频的理论研究较为深入,而调 Q 级联拉曼混频理论有待进一步研究。基于级联拉曼选择性混频实现绿光到红光波段多波长的功率提升有助于推广该激光器的应用。

很多激光应用领域需要波长(颜色)可切换的激光器来实现不同的目的<sup>[74-76]</sup>。医疗领域的眼底病治疗针对不同眼底疾病、不同眼底部位、不同屈光间质状况,选用红、黄、绿激光来实现最佳的的诊治效果;肿瘤的光动力学疗法通过蓝、绿、黄、红可见光波段激光激发光敏剂,可选择性消除病变;此外,多波长激光在激光显示、大气遥感和激光雷达等民用、国防高技术领域也具有重要的应用价值和广阔的市场前景。相关设备主要通过多台激光器或一台激光器配置多个变频模块来实现,系统相对复杂,操作不便。比如多波长眼底病治疗激光设备<sup>[77]</sup>通过三个激光器的集成和独立的开关电源控制,实现三个波长的可见激光输出。利用激光晶体中掺杂离子的不同能级跃迁发射两种波长相干光,分别在不同的谐振腔内通过独立的变频模块实现红绿颜色的可见多波长激光输出<sup>[78]</sup>。基于级联拉曼混频技术实现的可见光波段波长可选激光器可克服一些领域常规多波长激光设备对多台激光器或多个谐振腔和变频模块的依赖,在激光医疗、激光显示等领域具有重要的应用价值和广阔的市场前景。

### 参 考 文 献

- [1] Kaminskii A A, Ueda K I, Eichler H J, et al. Tetragonal vanadates  $\text{YVO}_4$  and  $\text{GdVO}_4$ -new efficient  $\chi(3)$ -materials for Raman lasers [J]. Optics Communications, 2001, 194(1/2/3): 201-206.
- [2] Chen Y F. Compact efficient self-frequency Raman conversion in diode-pumped passively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> laser [J]. Applied Physics B, 2004, 78 (6): 685-687.
- [3] Chen Y F. Efficient subnanosecond diode-pumped



- passively Q-switched Nd : YVO<sub>4</sub> self-stimulated Raman laser [J]. *Optics Letters*, 2004, 29 (11): 1251-1253.
- [4] Su K W, Chang Y T, Chen Y F. Power scale-up of the diode-pumped actively Q-switched Nd : YVO<sub>4</sub> Raman laser with an undoped YVO<sub>4</sub> crystal as a Raman shifter[J]. *Applied Physics B*, 2007, 88(1): 47-50.
- [5] Pask H M, Dekker P, Mildren R P, et al. Wavelength-versatile visible and UV sources based on crystalline Raman lasers [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2008, 32(3/4): 121-158.
- [6] Liu B. The researches on yellow light generated by Frequency doubling of the Raman laser [D]. Jinan: Shandong University, 2007: 20.  
刘波. 拉曼倍频黄光激光器的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2007: 20.
- [7] Ren X K, Xie J, Ruan S C, et al. ZnWO<sub>4</sub>/Nd:YAG second-order Raman laser at 1318 nm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0536001.  
任席奎, 谢建, 阮双琛, 等. 1318 nm ZnWO<sub>4</sub>/Nd:YAG 二阶拉曼激光器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0536001.
- [8] Basiev T T, Sobol A A, Voronko Y K, et al. Spontaneous Raman spectroscopy of tungstate and molybdate crystals for Raman lasers [J]. *Optical Materials*, 2000, 15(3): 205-216.
- [9] Piper J A, Pask H M. Crystalline Raman lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 692-704.
- [10] Jin T, Hu M, Li P, et al. Experimental study of the dual-frequency laser based on the Nd : YVO<sub>4</sub>/Nd : GdVO<sub>4</sub> combined crystal [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091407.  
金涛, 胡森, 李鹏, 等. Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> 组合晶体双频激光器实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 091407.
- [11] Koechner W. Solid-state laser engineering [M]. Sun W, Jiang Z W, Cheng G X. et al, Transl. 5th ed. Beijing: Science Press, 2002: 356-365.  
Koechner W. 固体激光工程 [M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 等, 译. 5 版. 北京: 科学出版社, 2002: 356-365.
- [12] Yoneda H, Zhang J, Tang D Y, et al. Impulsive stimulated Raman scattering in tetragonal GdVO<sub>4</sub> single crystal: many-phonon Stokes and cross-cascaded lasing [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12 (8): 085801.
- [13] Kaminskii A A, Eichler H J, Rhee H, et al. New manifestations of nonlinear  $\chi(3)$ -laser properties in tetragonal YVO<sub>4</sub> crystal: many-phonon SRS, cascaded self-frequency “tripling”, and self-sum-frequency generation in blue spectral range with the involving of Stokes components under one-micron picosecond pumping [J]. *Laser Physics Letters*, 2008, 5(11): 804-811.
- [14] Liu F Q. The researches on characteristics of crystal and performance of diode-pumped Nd:LuVO<sub>4</sub> lasers [D]. Jinan: Shandong University, 2007: 5.  
刘凤芹. Nd:LuVO<sub>4</sub> 晶体特性及其全固态激光器研究 [D]. 济南: 山东大学, 2007: 5.
- [15] Kaminskii A A, Bettinelli M, Dong J, et al. Nanosecond Nd<sup>3+</sup> : LuVO<sub>4</sub> self-Raman laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(5): 374-379.
- [16] Zhu H Y, Guo J H, Ruan X K, et al. Cascaded self-Raman laser emitting around 1.2-1.3  $\mu\text{m}$  based on a c-cut Nd:YVO<sub>4</sub> crystal [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1500807.
- [17] Cai W Y, Duan Y M, Li J T, et al. Diode-pumped c-cut Nd : Lu<sub>0.99</sub> La<sub>0.01</sub> VO<sub>4</sub> self-stimulated Raman laser at 1181 nm [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(3): 034206.
- [18] Bai R X, Lin H F, Zhang L Z, et al. Actively Q-switched intracavity Nd:YAG/m-LaVO<sub>4</sub> Raman laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45 (9): 0901003.  
白如雪, 林海枫, 张莉珍, 等. 主动调 Q 内腔式 Nd:YAG/m-LaVO<sub>4</sub> 拉曼激光器 [J]. *中国激光*, 2018, 45 (9): 0901003.
- [19] Zhu H Y, Duan Y M, Zhang G, et al. Efficient continuous-wave YVO<sub>4</sub>/Nd : YVO<sub>4</sub> Raman laser at 1176 nm [J]. *Applied Physics B*, 2011, 103(3): 559-562.
- [20] Ding S H, Wang M Q, Wang S W, et al. Investigation on LD end-pumped passively Q-switched c-cut Nd : YVO<sub>4</sub> self-Raman laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13052-13061.
- [21] Duan Y M, Zhang J, Zhu H Y, et al. Compact passively Q-switched RbTiOPO<sub>4</sub> cascaded Raman operation [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4550-4553.
- [22] Zhu H Y, Duan Y M, Zhang G, et al. Efficient second harmonic generation of double-end diffusion-bonded Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser producing 79 W yellow light [J]. *Optics Express*, 2009, 17 (24): 21544-21550.

- [23] Kravtsov N V, Naumkin N I. Mode self-locking in stimulated Raman emission [J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1979, 9(2): 223-224.
- [24] Lisinetskii V A, Busko D N, Chulkov R V, et al. Self-mode locking at multiple Stokes generation in the Raman laser [J]. Optics Communications, 2010, 283(7): 1454-1458.
- [25] Ding S H, Zhang X Y, Wang Q P, et al. Temporal properties of the solid-state intracavity Raman laser using the traveling-wave method [J]. Physical Review A, 2007, 76(5): 053830.
- [26] Jiang P B, Zhang G Z, Liu J, et al. 16.7 W 885 nm diode-side-pumped actively Q-switched Nd:YAG/YVO<sub>4</sub> intracavity Raman laser at 1176 nm [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(46): 465303.
- [27] Liu J, Ding X, Jiang P B, et al. 103-W actively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> folded coupled-cavity Raman laser at 1176 nm [J]. Applied Optics, 2018, 57(12): 3154-3158.
- [28] Zhou Q Q, Shi S C, Chen S M, et al. First-Stokes wavelengths at 1175.8 and 1177.1 nm generated in a diode end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/LuVO<sub>4</sub> Raman laser [J]. Chinese Physics Letters, 2019, 36(1): 014205.
- [29] Zhu H Y, Zhang G, Duan Y M, et al. Compact continuous-wave Nd:YVO<sub>4</sub> laser with self-Raman conversion and sum frequency generation [J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28(5): 054202.
- [30] Kores C C, Jakutis-Neto J, Geskus D, et al. Diode-side-pumped continuous wave Nd<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser at 1176 nm [J]. Optics Letters, 2015, 40(15): 3524-3527.
- [31] Li L, Liu Z J, Zhang X Y, et al. Characteristics of the temperature-tunable Nd:YAG/YVO<sub>4</sub> Raman laser [J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2637-2639.
- [32] Du C L, Zhang L, Yu Y Q, et al. 3.1 W laser-diode-end-pumped composite Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser at 1176 nm [J]. Applied Physics B, 2010, 101(4): 743-746.
- [33] Fan L, Fan Y X, Wang H T. A compact efficient continuous-wave self-frequency Raman laser with a composite YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> crystal [J]. Applied Physics B, 2010, 101(3): 493-496.
- [34] Chen M T, Dai S B, Zhu S Q, et al. Multi-watt passively Q-switched self-Raman laser based on a c-cut Nd:YVO<sub>4</sub> composite crystal [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2019, 36(2): 524-532.
- [35] Lee A J, Lin J P, Pask H M. Near-infrared and orange-red emission from a continuous-wave, second-Stokes self-Raman Nd:GdVO<sub>4</sub> laser [J]. Optics Letters, 2010, 35(18): 3000-3002.
- [36] Chen W D, Wei Y, Huang C H, et al. Second-Stokes YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> self-frequency Raman laser [J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 1968-1970.
- [37] Du C L, Huang G X, Yu Y Q, et al. Q-switched mode-locking of second-Stokes pulses in a diode-pumped YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> self-Raman laser [J]. Laser Physics, 2014, 24(12): 125003.
- [38] Guo J H, Zhu H Y, Duan Y M, et al. Cascaded c-cut Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser operation with a single 259 cm<sup>-1</sup> shift [J]. Journal of Optics, 2017, 19(3): 035501.
- [39] Xie Z, Duan Y M, Guo J H, et al. Cascaded a-cut Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman with second-Stokes laser at 1313 nm [J]. Journal of Optics, 2017, 19(11): 115501.
- [40] Zhang X M, Chen S M, Shi S C, et al. Study on the performance of cascaded Nd:GdVO<sub>4</sub> self-Raman laser at 1309 nm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(11): 47-51.  
张喜梅, 陈思梦, 施沈城, 等. 级联 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼 1309 nm 激光性能研究 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(11): 47-51.
- [41] Liu J, Ding X, Jiang P B, et al. High-performance second-Stokes generation of a Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> Raman laser based on a folded coupled cavity [J]. Optics Express, 2018, 26(8): 10171-10178.
- [42] Gao Z H, Zhang W X, Guo X L, et al. Single-frequency green laser based on birefringent filter comprising a wedge Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0301011.  
高志红, 张文喜, 郭晓丽, 等. 基于楔形 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 双折射滤波的单频绿光激光器 [J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0301011.
- [43] Dekker P, Pask H M, Spence D J, et al. Continuous-wave, intracavity doubled, self-Raman laser operation in Nd:GdVO<sub>4</sub> at 586.5 nm [J]. Optics Express, 2007, 15(11): 7038-7046.
- [44] Lee A J, Pask H M, Omatsu T, et al. All-solid-state continuous-wave yellow laser based on intracavity frequency-doubled self-Raman laser action [J]. Applied Physics B, 2007, 88(4): 539-544.
- [45] Lee A J, Pask H M, Dekker P, et al. High efficiency, multi-Watt CW yellow emission from an

- intracavity-doubled self-Raman laser using Nd : GdVO<sub>4</sub> [J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21958-21963.
- [46] Lü Y, Zhang X H, Li S T, et al. All-solid-state cw sodium D<sub>2</sub> resonance radiation based on intracavity frequency-doubled self-Raman laser operation in double-end diffusion-bonded Nd<sup>3+</sup> : LuVO<sub>4</sub> crystal [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(17): 2964-2966.
- [47] Lü Y F, Cheng W B, Xiong Z, et al. Efficient CW laser at 559 nm by intracavity sum-frequency mixing in a self-Raman Nd:YVO<sub>4</sub> laser under direct 880 nm diode laser pumping [J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(11): 787-789.
- [48] Lee A J, Pask H M, Spence D J, et al. Efficient 53 W cw laser at 559 nm by intracavity frequency summation of fundamental and first-Stokes wavelengths in a self-Raman Nd:GdVO<sub>4</sub> laser [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(5): 682-684.
- [49] Li X L, Lee A J, Pask H M, et al. Efficient, miniature, cw yellow source based on an intracavity frequency-doubled Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(8): 1428-1430.
- [50] Tan Y, Fu X H, Zhai P, et al. An efficient cw laser at 560 nm by intracavity sum-frequency mixing in a self-Raman Nd:LuVO<sub>4</sub> laser [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(4): 045806.
- [51] Lee A J, Zhang C Y, Omatsu T, et al. An intracavity, frequency-doubled self-Raman vortex laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5400-5409.
- [52] Li X L, Pask H M, Lee A J, et al. Miniature wavelength-selectable Raman laser: new insights for optimizing performance [J]. *Optics Express*, 2011, 19(25): 25623-25631.
- [53] Lin J P, Pask H M, Lee A J, et al. Study of amplitude noise in a continuous-wave intracavity frequency-doubled Raman laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, 47(3): 314-319.
- [54] Wang B S, Tan H M, Peng J Y, et al. Low threshold, actively Q-switched Nd<sup>3+</sup> : YVO<sub>4</sub> self-Raman laser and frequency doubled 588 nm yellow laser [J]. *Optics Communications*, 2007, 271(2): 555-558.
- [55] Omatsu T, Lee A, Pask H M, et al. Passively Q-switched yellow laser formed by a self-Raman composite Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> crystal [J]. *Applied Physics B*, 2009, 97(4): 799-804.
- [56] Duan Y M, Zhu H Y, Huang C H, et al. Potential sodium D<sub>2</sub> resonance radiation generated by intracavity SHG of a c-cut Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser [J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6333-6338.
- [57] Duan Y M, Zhang G, Zhang Y J, et al. LD end-pumped c-Cut Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP self-Raman laser at 560 nm [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(11): 1859-1862.
- [58] Duan Y M, Zhu H Y, Feng Z R, et al. Laser diode end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser at 559 nm with sum-frequency mixing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 0502002.  
段延敏, 朱海永, 凤正荣, 等. 半导体激光端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 自拉曼和频 559nm 激光 [J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0502002.
- [59] Su F F, Zhang X Y, Wang W T, et al. Diode-pumped intracavity yellow-green Raman laser at 560 nm with sum-frequency-generation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 66: 122-124.
- [60] Chang Y T, Chang H L, Su K W, et al. High-efficiency Q-switched dual-wavelength emission at 1176 and 559 nm with intracavity Raman and sum-frequency generation [J]. *Optics Express*, 2009, 17(14): 11892-11897.
- [61] Zhu H Y, Duan Y M, Zhang G, et al. Yellow-light generation of 57 W by intracavity doubling self-Raman laser of YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub> composite [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(18): 2763-2765.
- [62] Du C L, Guo Y Y, Yu Y Q, et al. High power Q-switched intracavity sum-frequency generation and self-Raman laser at 559 nm [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 47: 43-46.
- [63] Mildren R P, Pask H M, Ogilvy H, et al. Discretely tunable, all-solid-state laser in the green, yellow, and red [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(12): 1500-1502.
- [64] Pask H M, Mildren R P, Piper J A. Optical field dynamics in a wavelength-versatile, all-solid-state intracavity cascaded pulsed Raman laser [J]. *Applied Physics B*, 2008, 93(2/3): 507-513.
- [65] Lee A J, Spence D J, Piper J A, et al. A wavelength-versatile, continuous-wave, self-Raman solid-state laser operating in the visible [J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 20013-20018.
- [66] Spence D J, Li X L, Lee A J, et al. Modeling of wavelength-selectable visible Raman lasers [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(18): 3849-3854.
- [67] Li X L. Multiwavelength visible laser based on the stimulated Raman scattering effect and beta Barium borate angle tuning [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(2): 021404.



- [68] Chen Y F, Liu Y C, Pan Y Y, et al. Efficient high-power dual-wavelength lime-green Nd:YVO<sub>4</sub> lasers [J]. Optics Letters, 2019, 44(6): 1323-1326.
- [69] Chen Y F, Pan Y Y, Liu Y C, et al. Efficient high-power continuous-wave lasers at green-lime-yellow wavelengths by using a Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman crystal [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2029-2035.
- [70] Yue Y, Ding H, Chen C, et al. 3D self-assembly technique applied to manufacturing microsphere whispering gallery mode laser [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11209: 112091P.
- [71] Guo J, Zhu H Y, Chen S M, et al. Yellow, lime and green emission selectable by BBO angle tuning in Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser [J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(7): 075803.
- [72] Chen S M, Cheng M Y, Zhu H Y, et al. Orange, yellow and green emissions generated in Q-switched Nd:YALO<sub>3</sub>/YVO<sub>4</sub> Raman laser [J]. Journal of Luminescence, 2019, 214: 116555.
- [73] Mao T W, Duan Y M, Chen S M, et al. Yellow and orange light selectable output generated by Nd:YAP/YVO<sub>4</sub>/LBO Raman laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(13): 1112-1115.
- [74] Runcorn T H, Gorlitz F G, Murray R T, et al. Visible Raman-shifted fiber lasers for biophotonic applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 1-8.
- [75] Staples G, Wu H, Qian J et al. Multi-wavelength excitation in Raman spectroscopy [J]. Laser Focus World, 2015, 51(8): 61-63.
- [76] Xia D Q, Li Z J, Lü T. Equipment to cure retinopathy with three-colour laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(6): 061701. 夏丹青, 李正佳, 吕涛. 用于眼底治疗的三色激光系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(6): 061701.
- [77] Liu W L, Zhou C Q, Ren Q S. Solid-state multi-wavelength lasers equipment for retina treatment [J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2012, 36(5): 326-328. 刘文陆, 周传清, 任秋实. 全固态多波长激光眼底病治疗设备 [J]. 中国医疗器械杂志, 2012, 36(5): 326-328.
- [78] Bai J T, Chen X Y, Gu Y, et al. Medical application of new solid-state multi-wavelength laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(4): 65-67. 白晋涛, 陈秀艳, 顾瑛, 等. 新型全固态多波长激光器的医学应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(4): 65-67.