

文章编号 1004-924X(2009)05-0975-05

# 外腔型 YVO<sub>4</sub> 拉曼激光器

胡大伟<sup>1,2</sup>, 王正平<sup>1</sup>, 张怀金<sup>1</sup>, 程秀凤<sup>1</sup>,  
于浩海<sup>1</sup>, 许心光<sup>1</sup>, 王继扬<sup>1</sup>, 邵宗书<sup>1</sup>

(1. 山东大学 晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100; 2. 山东大学 国防科学技术研究院, 山东 济南 250100)

**摘要:**为了实现新波长、高效率的激光输出,建立了外腔型拉曼实验装置并对 YVO<sub>4</sub> 晶体进行了测量。采用提拉法生长了最大尺寸为  $\phi 28\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ , 质量为 126 g 的高光学质量 YVO<sub>4</sub> 晶体,以脉冲宽度为 40 ps 的 Nd:YAG 锁模激光器作为激发源,研究了 YVO<sub>4</sub> 晶体的外腔拉曼输出特性。结果显示,该激光器多波长输出的总转换效率达到 51.4%,最大输出能量为 2.21 mJ; 1 175 nm 一级斯托克斯拉曼输出的最高转换效率为 32%,最大输出能量为 0.57 mJ; 1 313 nm 二级斯托克斯拉曼输出的最高转换效率为 12.3%,最大输出能量为 0.36 mJ。结果表明,采用外腔型结构可使 YVO<sub>4</sub> 晶体的拉曼输出性能显著提高。

**关键词:**拉曼激光器;受激拉曼散射;外置谐振腔;YVO<sub>4</sub> 晶体;斯托克斯激光;转换效率

**中图分类号:** TN248.7; O437.3 **文献标识码:** A

## External resonator YVO<sub>4</sub> crystal Raman laser

HU Da-wei<sup>1,2</sup>, WANG Zheng-ping<sup>1</sup>, ZHANG Huai-jin<sup>1</sup>, CHENG Xiu-feng<sup>1</sup>,  
YU Hao-hai<sup>1</sup>, XU Xin-guang<sup>1</sup>, WANG Ji-yang<sup>1</sup>, SHAO Zong-shu<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China;*  
2. *Institute of Science Technology for National Defence, Shandong University, Jinan 250100, China*)

**Abstract:** In order to obtain new wavelengths and high efficient laser outputs, an external resonator Raman experimental setup was established and the properties of YVO<sub>4</sub> crystals were measured. Then, a high optical quality YVO<sub>4</sub> crystal with the largest size of  $\phi 28\text{ mm} \times 40\text{ mm}$  and a mass of 126 g was grown by Czochralski pulling method. The Raman output properties of YVO<sub>4</sub> crystals in the external resonator were researched using a mode-locked Nd:YAG laser with a pulse width of 40 ps as the pump source. The results indicate that the total conversion efficiency for multi-wavelength output has reached 51.4%, and the largest output energy is 2.21 mJ. Moreover, the highest conversion efficiency for the first Stocks Raman output at 1 175 nm is 32%, and the largest output energy is 0.57 mJ. The conversion efficiency for the second Stocks Raman output at 1 313 nm is 12.3%, and the largest output energy is 0.36 mJ. These results reported here show that the external resonator structure can improve the Raman performance of YVO<sub>4</sub> crystals evidently.

**Key words:** Raman laser; stimulated Raman scattering; external resonator; YVO<sub>4</sub> crystal; Stocks laser; conversion efficiency

收稿日期:2008-08-15;修订日期:2008-08-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60508010, 50590401)、山东省泰山学者计划资助项目

## 1 引言

受激拉曼散射 (Stimulated Raman Scattering, SRS) 是获得新波段激光的有效手段。与气体和液体拉曼介质相比, 固体拉曼介质具有增益高、热传导性好、机械特性好、易于全固化等优点, 是近年来非常活跃的研究方向, 所制成的拉曼激光器在军事、医疗、显示、遥感、海洋探测等领域有广泛需求。除  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{BaWO}_4$ 、 $\text{SrWO}_4$  等硝酸、钨酸盐<sup>[1-4]</sup> 之外, 以  $\text{YVO}_4$ 、 $\text{GdVO}_4$  为代表的钒酸盐也是一类有实际应用前景的优质拉曼晶体<sup>[5-7]</sup>。这些晶体生长周期短、光损伤阈值高、物化性能稳定、拉曼增益系数大, SRS 的转换效率高, 在掺入稀土离子后具有优良的激光性能<sup>[8-10]</sup>, 结合其拉曼特性可以制作出结构紧凑的全固态自拉曼激光器<sup>[11-12]</sup>。以往对于  $\text{YVO}_4$  晶体的拉曼变频研究全部集中于无腔和内腔工作方式, 本文报道了  $\text{YVO}_4$  晶体的外腔式拉曼激光器, 当激发源为 1 064 nm 皮秒激光时, 多波长拉曼输出的总转换效率达到 51.4%, 1 175 nm 一级斯托克斯的最高转换效率为 32%, 1 313 nm 二级斯托克斯的最高转换效率为 12.3%。

## 2 晶体生长

本文采用提拉法 (Czochralski) 从化学计量比的熔体中生长出了大尺寸、高质量的  $\text{YVO}_4$  单晶。生长装置为华北光电技术研究所生产的 DJL-400 型单晶炉, 所用籽晶沿  $c$  方向切割, 生长气氛为添加了 1%~2%  $\text{O}_2$  的  $\text{N}_2$ , 使用  $\Phi 66$  mm  $\times 40$  mm 的铱 (Ir) 坩埚。生长经过收颈—放肩—等径等工艺, 晶体等径生长速率为 1 mm/h 左右, 晶体生长结束后以 30~50  $^\circ\text{C}/\text{h}$  的速率降到室温。图 1 是获得的  $\text{YVO}_4$  原生晶体的照片, 晶体无宏观缺陷、均匀透明。图中晶体尺寸达到  $\Phi 28$  mm  $\times 40$  mm, 质量为 126 g。将晶体置于 10 mW 的 He-Ne 激光器下照射, 未发现散射颗粒, 表明所生长  $\text{YVO}_4$  单晶具有良好的光学质量。利用分光光度计测量了  $\text{YVO}_4$  晶体的室温透过光谱, 测试结果表明  $\text{YVO}_4$  晶体的透过短波限为 350

nm, 长波限  $> 3\ 000$  nm, 因此可在较宽波长范围内实现拉曼激光频移。

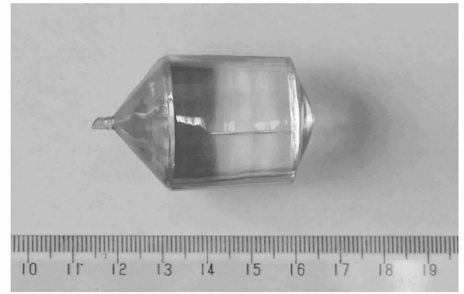


图 1  $\text{YVO}_4$  晶体

Fig. 1  $\text{YVO}_4$  crystal

## 3 实验装置

利用图 2 所示的实验装置, 实现了  $\text{YVO}_4$  晶体的外腔型拉曼激光输出。所用抽运光源为美国 Continuum 公司生产的 PY61 型 Nd:YAG 锁模激光器, 输出波长 1 064 nm, 重复频率 10 Hz, 脉冲宽度 40 ps。利用两个偏振棱镜, 其作用是使泵浦能量可以连续变化; 泵浦光束的初始直径为 4 mm, 采用一个由双透镜组成的缩束系统将其减小至 1 mm, 以提高入射到晶体上的功率密度。

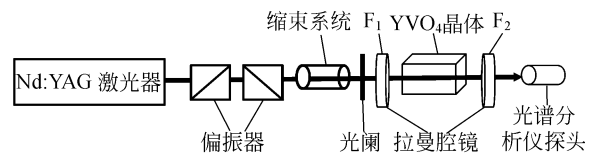


图 2 外腔型  $\text{YVO}_4$  拉曼激光器实验装置

Fig. 2 External resonator Raman experimental set-up for  $\text{YVO}_4$  crystal

## 4 外腔式 $\text{YVO}_4$ 多波长拉曼激光器

将  $\text{YVO}_4$  晶体沿  $c$  向加工成长度为 35.4 mm 的样品, 截面为 6 mm  $\times$  6 mm, 样品两通光端面进行抛光但未镀膜。由  $F_1$  和  $F_2$  构成的拉曼腔长约为 40 mm。输入镜  $F_1$  对 1 064 nm 泵浦光高透 ( $T > 90\% @ 1\ 064$  nm), 在 1 130~1 380 nm 波段高反 ( $T < 0.1\% @ 1\ 130 \sim 1\ 380$  nm)。本文对具有不同透过率的两种输出镜进行了实验,

两种输出镜对 YVO<sub>4</sub> 晶体各级斯托克斯光的透过率如表 1 所示,输出镜都对 1 064 nm 高反以实现双程泵浦。

表 1 外腔输出镜 F<sub>2</sub> 在各级 Stokes 光处的透过率 (%)

Tab.1 Transmittance of output mirror F<sub>2</sub> at different Stokes wavelengths

No.	泵浦波长 (1 064 nm)	S <sub>1</sub> (1 175 nm)	S <sub>2</sub> (1 313 nm)	S <sub>3</sub> (1 487 nm)
F <sub>2</sub> -1	0	25	41	71
F <sub>2</sub> -2	0	38	65	80

实验中,采用 Anritsu-MS9710C 型光谱分析仪测得混合输出激光的波长为 1 175 nm、1 313 nm、1 487 nm,输出能量和转换效率随激发能量的变化如图 3、图 4 所示。

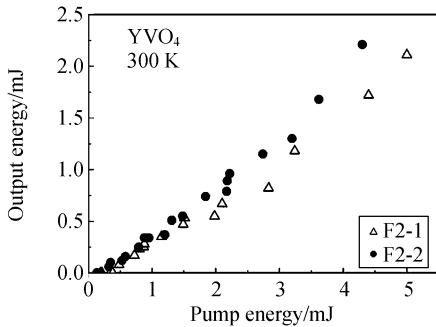


图 3 外腔式 YVO<sub>4</sub> 晶体多波长拉曼激光器的输出能量变化特性

Fig. 3 Output energy curve of external resonator YVO<sub>4</sub> crystal multi-wavelength Raman laser

总输出激光最大能量为 2.21 mJ,最佳转换效率为 51.4%,均为使用 F<sub>2</sub>-2 号输出腔镜时获得。在图 2 中 F<sub>2</sub> 的右侧添加仅透过 S<sub>1</sub> 的滤光片 (T=90% @ 1 181 nm, T<0.1% @ 1 250~1 520 nm),当激发能量为 1.78 mJ 时,测得了一级斯托克斯拉曼激光的最大输出,计入滤光片损耗后为 0.57 mJ,最高转换效率为 32%。当激发能量继续增加时,由于向更高级斯托克斯谱线的能量传递,一级斯托克斯光的输出能量逐渐降低,转换效率随之下降。此前,本实验在 532 nm 皮秒激发的无腔实验条件下,用 35.4 mm 长 YVO<sub>4</sub> 晶体获

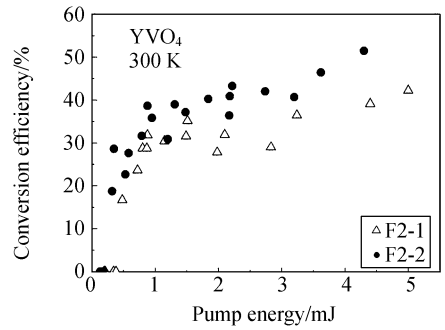


图 4 外腔式 YVO<sub>4</sub> 晶体多波长拉曼激光器的转换效率变化特性

Fig. 4 Conversion efficiency curves of external resonator YVO<sub>4</sub> crystal multi-wavelength Raman laser

得了 52% 的总转换效率和 28% 的一级斯托克斯转换效率。由于拉曼晶体的增益系数随激发波长的增加而迅速减小(如 YVO<sub>4</sub> 晶体对 532 nm 和 1 064 nm 的增益系数分别为 16 cm/GW 和 4.5 cm/GW),所以能够预料在 1 064 nm 皮秒激发的无腔实验条件下两种效率都将显著降低。而本文在 1 064 nm 皮秒激发的外腔实验条件下,获得了 51.4% 的总转换效率和 32% 的一级斯托克斯转换效率,接近甚至优于 532 nm 皮秒激发的无腔实验结果,所以也将优于 1 064 nm 皮秒激发的无腔实验结果。由此可见,采用外腔式结构可以大幅提高 YVO<sub>4</sub> 晶体的拉曼变频性能,有助于获得更高的转换效率和更大的输出能量。

### 5 外腔式 YVO<sub>4</sub> 晶体 1 313 nm 拉曼激光器

沿 c 向加工了两块 YVO<sub>4</sub> 晶体。长度分别为 35.4 mm 和 15.5 mm。由 F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 构成的腔长约为 40 mm。输入镜 F<sub>1</sub> 对 1 064 nm 激发光高透 (T>90% @ 1 064 nm),在 1 130~1 380 nm 波段高反 (T<0.1% @ 1 130~1 380 nm)。输出镜 F<sub>2</sub> 对 1 050~1 250 nm 波段高反 (T<0.1% @

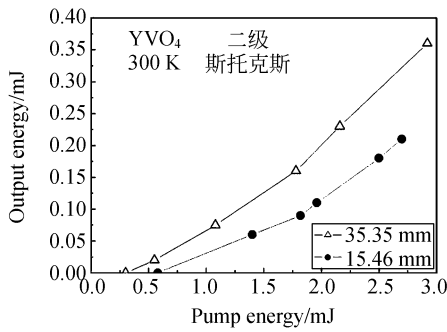


图 5 YVO<sub>4</sub> 晶体 1 313 nm 外腔拉曼激光器的输出能量变化特性

Fig. 5 Output energy curves of 1 313 nm external resonator YVO<sub>4</sub> crystal Raman laser

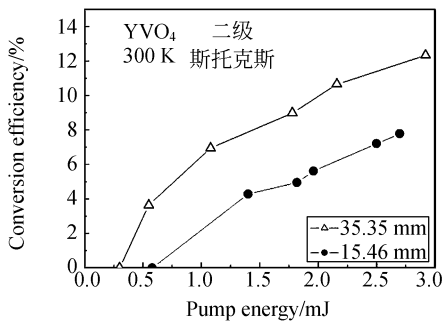


图 6 YVO<sub>4</sub> 晶体 1 313 nm 外腔拉曼激光器的转换效率变化特性

Fig. 6 Conversion efficiency curves of 1 313 nm external resonator YVO<sub>4</sub> crystal Raman laser

1 050 ~ 1 250 nm), 对 1313 波段的透过率为 34%。实验中采用 Anritsu 的 MS9710C 光谱仪得到输出激光的波长为 1 313 nm, 未观察到其它波长激光的输出。实验结果如图 5、图 6 所示, 1 313 nm 二阶斯托克斯拉曼激光的最大输出能量为 0.36 mJ, 最高转换效率为 12.3%, 均由 35.4 mm YVO<sub>4</sub> 晶体获得。

## 6 结 论

本文首次报道了 YVO<sub>4</sub> 晶体的外腔式拉曼激光器, 实现了 1 064 nm 皮秒脉冲激发条件下的高效运转。多波长输出的最大输出能量为 2.21 mJ, 总转换效率达到 51.4%。实验中获得了 0.57 mJ 的一级斯托克斯最大输出, 最高转换效率为 32%。1 313 nm 二级斯托克斯单波长拉曼激光输出的最大能量为 0.36 mJ, 转换效率为 12.3%。实验结果表明, 外腔型结构是提高 YVO<sub>4</sub> 晶体拉曼输出性能的有效方式。

## 参考文献:

- [1] ZVEREV P G, BASIEV T T, OSIKO V V, *et al.*. Physical, chemical and optical properties of barium nitrate Raman Crystal [J]. *Optics Materials*, 1999, 11(4): 315-334.
- [2] CERNY P, ZVEREV P G, JELINKOVA H, *et al.*. Efficient Raman shifting of picosecond pulses using BaWO<sub>4</sub> crystal [J]. *Optics Commun.*, 2000, 177(1-6): 397-404.
- [3] WANG Z P, HU D W, FANG X, *et al.*. Eye-safe Raman laser at 1.5 μm based on BaWO<sub>4</sub> crystal [J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, 25(1): 122-124.
- [4] HU D W, WANG Z P, ZHANG H J, *et al.*. Pico-second stimulated Raman scattering of SrWO<sub>4</sub> crystal [J]. *Chinese Physics Letters*, 2006, 23(10): 2766-2769.
- [5] KAMINSKII A A, UEDA K, EICHLER H, *et al.*. Tetragonal vanadates YVO<sub>4</sub> and GdVO<sub>4</sub> - new efficient χ(3)-materials for Raman lasers [J]. *Optics Commun.*, 2001, 194(1-3): 201-206.
- [6] 胡大伟, 于浩海, 王正平, 等. YVO<sub>4</sub> 晶体的高效受激拉曼散射 [J]. *光学学报*, 2006, 26(6): 918-920.  
HU D W, YU H H, WANG ZH P, *et al.*. Efficient stimulated Raman scattering of YVO<sub>4</sub> crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(6): 918-920. (in Chinese)
- [7] 胡大伟, 王正平, 张怀金, 等. GdVO<sub>4</sub> 晶体的受激拉曼散射 [J]. *中国激光*, 2008, 35(1): 11-16.  
HU D W, WANG ZH P, ZHANG H J, *et al.*. Stimulated Raman scattering of GdVO<sub>4</sub> crystal [J]. *Chin. J. Lasers*, 2008, 35(1): 11-16. (in Chinese)

- [8] 郝二娟, 檀慧明, 李特, 等. LD 端面泵浦的高输出单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 绿光激光器 [J]. 光学精密工程, 2006, 14 (4): 580-583.  
HAO E J, TAN H M, LI T, *et al.*. High output and single-frequency ring Nd: YVO<sub>4</sub> laser end-pumped by diode laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 580-583. (in Chinese)
- [9] LIU Y F, ZHANG X H, YAO Z H, *et al.*. 1.1W continuous-wave orange-yellow light Nd:YVO<sub>4</sub> laser with intracavity sum-frequency generation [J].

*Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 736-739.

- [10] YE Z Q, JING Z, BU Y K, *et al.*. 6.5W LD-pumped 914 nm Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 321-325.
- [11] CHEN Y F. Compact efficient all-solid-state eye-safe laser with self-frequency Raman conversion in a Nd: YVO<sub>4</sub> crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29 (18): 2172-2174.
- [12] CHEN Y F. Efficient 1 521 nm Nd:GdVO<sub>4</sub> Raman laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29(22): 2632-2634.

#### 作者简介:



胡大伟(1980—),男,山东昌乐人,博士,讲师,2002,2007年分别于山东大学获学士和博士学位,主要研究方向为晶体物理和激光技术。E-mail: haw@icm.sdu.edu.cn



张怀金(1965—),男,山东阳谷人,博士,教授,博士生导师,1988,1994,2001年于山东大学分别获学士、硕士和博士学位,主要从事功能晶体的制备和性能表征工作。E-mail: hjzhang@icm.sdu.edu.cn



程秀凤(1969—),女,山东莘县人,学士,高级实验师,主要从事功能晶体的物理性能研究。E-mail: xfcheng@icm.sdu.edu.cn



于浩海(1981—),男,山东章丘人,博士,讲师,主要从事激光与非线性光学晶体的生长和研究。E-mail: yha@icm.sdu.edu.cn



许心光(1964—),男,山东荣成人,博士,教授,博士生导师,1987,1999,2002年于山东大学分别获学士、硕士和博士学位,主要研究领域为晶体物理、晶体器件和非线性光学。E-mail: xgxu@icm.sdu.edu.cn



王继扬(1946—),男,江苏苏州人,学士,教授,博士生导师,1968年毕业于南京大学化学系,主要从事功能晶体材料的生长、表征及应用研究。E-mail: jywang@icm.sdu.edu.cn



邵宗书(1942—),男,浙江镇海人,学士,教授,博士生导师,1965年毕业于复旦大学物理系,主要从事晶体物理、晶体器件及激光技术的研究。E-mail: zshao@icm.sdu.edu.cn

#### 通讯作者:



王正平(1973—),男,江苏丰县人,博士,副教授,硕士生导师,1996,1999,2002年于山东大学分别获学士、硕士、博士学位,主要研究方向为晶体物理、激光与非线性光学。E-mail: zpwang@icm.sdu.edu.cn