

文章编号: 0258-7025(2010)02-0335-04

# 1064 nm 皮秒脉冲激发的外腔式 SrWO<sub>4</sub> 拉曼激光器

王正平<sup>1</sup> 胡大伟<sup>1, 2</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> 孙 洵<sup>1</sup> 顾庆天<sup>1</sup>

王 波<sup>1</sup> 王继扬<sup>1</sup> 邵宗书<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100)  
(<sup>2</sup> 山东大学国防科学技术研究院, 山东 济南 250100)

**摘要** 研究了 SrWO<sub>4</sub> 晶体在外置谐振腔条件下对于皮秒激发脉冲的受激拉曼散射特性。采用提拉法生长了高光学质量的 SrWO<sub>4</sub> 晶体, 尺寸为  $\phi 22 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ , 质量为 72.3 g。利用分光光度计测量了 SrWO<sub>4</sub> 晶体的室温透过光谱, 其透过短波限为 260 nm, 长波限大于 3200 nm, 因此可在较宽波长范围内实现拉曼激光频移。当激发源为脉宽 40 ps 的 Nd:YAG 锁模激光时, 多波长拉曼输出的总转换效率达到 73%, 最大输出能量 2.58 mJ; 1180 nm 一级斯托克斯拉曼输出的最高转换效率为 38%, 最大输出能量 1.04 mJ; 1324 nm 二级斯托克斯拉曼输出的最高转换效率为 19.3%, 最大输出能量 0.39 mJ。实验表明, SrWO<sub>4</sub> 晶体具有易生长、透光波段宽、增益系数大、转换效率高优点, 是一种有实际应用前景的固体拉曼介质。

**关键词** 非线性光学; SrWO<sub>4</sub> 晶体; 受激拉曼散射; 外置谐振腔; 转换效率

**中图分类号** O437.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103702.0335

## External Resonator SrWO<sub>4</sub> Raman Laser Excited by 1064 nm Pico-Second Pulses

Wang Zhengping<sup>1</sup> Hu Dawei<sup>1, 2</sup> Zhang Huaijin<sup>1</sup> Cheng Xiufeng<sup>1</sup> Yu Haohai<sup>1</sup>

Xu Xinguang<sup>1</sup> Sun Xun<sup>1</sup> Gu Qingtian<sup>1</sup> Wang Bo<sup>1</sup> Wang Jiyang<sup>1</sup> Shao Zongshu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)  
(<sup>2</sup> Institute of Science Technology for National Defence, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

**Abstract** External resonator stimulated Raman scattering of SrWO<sub>4</sub> crystal excited by pico-second pulses is studied. SrWO<sub>4</sub> crystal with high optical quality is prepared by Czochralski pulling method. Its size reaches  $\phi 22 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ , and its weight is 72.3 g. The transmission spectrum of SrWO<sub>4</sub> crystal is detected by spectrophotometer, which shows its short-wave limit is 260 nm, and long-wave limit is larger than 3200 nm. It indicates that SrWO<sub>4</sub> crystal can realize Raman frequency shifting in a wide wave band. When the exciting source is a 40 ps Nd:YAG mode-locked laser, the total conversion efficiency for multi-wavelengths Raman output reaches 73%, and the largest output energy is 2.58 mJ. The highest conversion efficiency for the first Stocks Raman output of 1180 nm is 38%, and the largest output energy is 1.04 mJ. The conversion efficiency for the second Stocks Raman output of 1324 nm is 19.3%, and the largest output energy is 0.39 mJ. The experimental results show that SrWO<sub>4</sub> crystal possesses many advantages such as easy growth, wide transmission spectrum, large gain coefficient, and high conversion efficiency, which indicate that SrWO<sub>4</sub> is a promising solid Raman medium that may have practical applications.

**Key words** nonlinear optics; SrWO<sub>4</sub> crystal; stimulated Raman scattering; external resonator; conversion efficiency

收稿日期: 2009-04-14; 收到修改稿日期: 2009-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(60508010, 50590401)和山东省泰山学者计划资助课题。

作者简介: 王正平(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事晶体物理、激光与非线性光学等方面的研究。

E-mail: zpwang@icm.sdu.edu.cn

## 1 引 言

受激拉曼散射(SRS)是获得新波段激光的有效手段。利用固体拉曼激光技术,可以发展新型的黄、橙光激光,以及 $1.5\ \mu\text{m}$ 人眼安全激光<sup>[1,2]</sup>,这些光源在军事、医疗、显示、遥感、海洋探测等领域有广泛需求,是近年来非常活跃的研究方向。自20世纪80年代以来,由于 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ , $\text{BaWO}_4$ , $\text{YVO}_4$ , $\text{GdVO}_4$ 等硝酸、钨酸、钒酸盐高拉曼增益固体材料的发现以及固体激发光源的商品化,使固体拉曼激光技术有了显著进展<sup>[3~14]</sup>。 $\text{SrWO}_4$ 晶体具有不潮解、热机械性能好、透光波段宽、抗光损伤、拉曼散射强度高、谱线窄等特点,掺入 $\text{Nd}^{3+}$ 离子后还可具有激光与拉曼两种性能结合的自拉曼特性,是一种优良的拉曼介质<sup>[15~18]</sup>。该晶体可用提拉法(Czochralski)生长,生长周期短,易于获得大尺寸高质量的单晶。采用定向籽晶,沿着拉曼激光器所需要的样品方向生长,可以节约原料,降低成本。 $\text{SrWO}_4$ 晶体的这些特点使其在拉曼激光器的应用中有较强的竞争优势,成为近年来国内外研究的热点。外腔式拉曼激光器是拉曼激光器的一种重要形式,它把拉曼晶体放在一个独立的谐振腔内而不改变抽运激光器的结构,对拉曼谐振腔进行专门设计以实现最佳运转<sup>[19, 20]</sup>。2006年,苏富芳等<sup>[21]</sup>使用脉宽 $11.7\ \text{ns}$ 的主动调Q Nd:YAG激光器作为抽运源,研究了纳秒脉冲激发的外腔式 $\text{SrWO}_4$ 拉曼激光器的输出特性,所得一级、二级斯托克斯脉冲的最大转换效率分别为 $36.2\%$ 和 $25.4\%$ 。本文以脉冲宽度为 $40\ \text{ps}$ 的Nd:YAG锁模激光器作为激发源,实现了皮秒脉冲激发的外腔式 $\text{SrWO}_4$ 拉曼激光器的高效运转,所得数据优于同等实验条件下 $\text{BaWO}_4$ , $\text{YVO}_4$ 晶体的实验结果,表现出良好的应用前景。

## 4 外腔式 $\text{SrWO}_4$ 多波长拉曼激光器

将 $\text{SrWO}_4$ 晶体沿 $a$ 向加工成长度为 $30\ \text{mm}$ 的样品,截面为 $6\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}$ ,样品两通光端面进行抛

## 2 晶体生长

采用提拉法从化学计量比的熔体中生长出了大尺寸、高质量的 $\text{SrWO}_4$ 单晶,如图1所示。图中晶体沿 $a$ 轴生长,无宏观缺陷,均匀无色透明,晶体尺寸为 $\phi 22\ \text{mm}\times 40\ \text{mm}$ ,质量为 $72.3\ \text{g}$ 。将晶体置于 $10\ \text{mW}$ 的He-Ne激光束下照射,未发现散射颗粒,这表明所生长的 $\text{SrWO}_4$ 单晶具有良好的光学质量。利用分光光度计测量了 $\text{SrWO}_4$ 晶体的室温透射光谱,测试结果表明 $\text{SrWO}_4$ 晶体的透过短波限为 $260\ \text{nm}$ ,长波限大于 $3200\ \text{nm}$ ,因此可在较宽波长范围内实现拉曼激光频移。

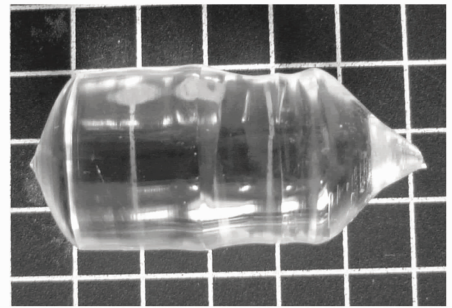


图1 沿 $a$ 轴生长的 $\text{SrWO}_4$ 单晶

Fig. 1  $\text{SrWO}_4$  single crystal grown along  $a$ -axis

## 3 实验装置

利用图2所示的实验装置,实现了 $\text{SrWO}_4$ 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 $1064\ \text{nm}$ ,重复频率 $10\ \text{Hz}$ ,脉冲宽度 $40\ \text{ps}$ 。图中PP1,PP2为偏振棱镜,T为缩束系统,F为光阑,RC为 $\text{SrWO}_4$ 晶体,B为光谱分析仪探头,F1,F2为拉曼腔镜。PP1和PP2作用是使抽运能量可以连续变化;抽运光束的初始直径为

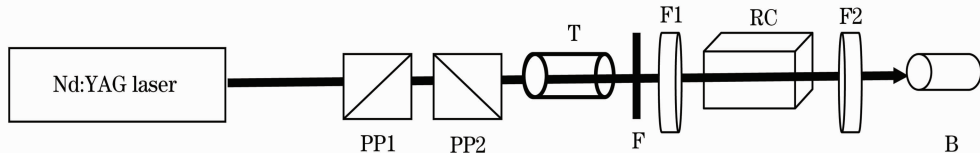


图2 外腔型 $\text{SrWO}_4$ 拉曼激光器实验装置

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

光但未镀膜。由F1和F2构成的拉曼腔长约为 $40\ \text{mm}$ 。输入镜F1对 $1064\ \text{nm}$ 抽运光高透( $T > 90\%$ ),在 $1130\sim 1380\ \text{nm}$ 波段高反( $T < 0.1\%$ )。对具有不同透过率的两种输出镜进行实验,两种输出镜对 $\text{SrWO}_4$ 晶体各级斯托克斯光的透过率如表1所示,输出镜都对 $1064\ \text{nm}$ 高反以实现双程抽运。

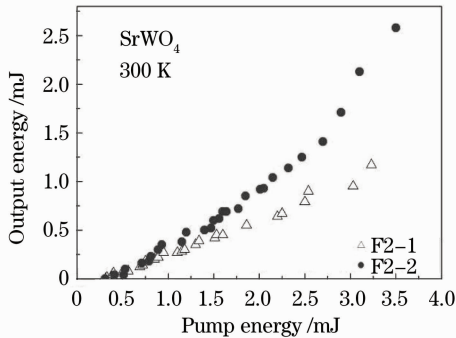
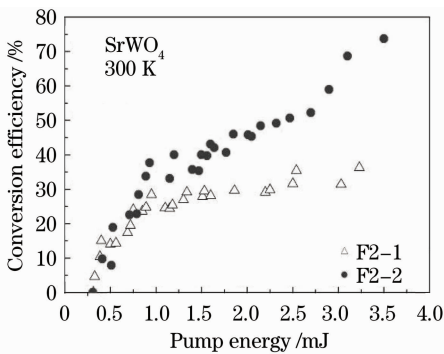
光但未镀膜。由F1和F2构成的拉曼腔长约为 $40\ \text{mm}$ 。输入镜F1对 $1064\ \text{nm}$ 抽运光高透( $T > 90\%$ ),在 $1130\sim 1380\ \text{nm}$ 波段高反( $T < 0.1\%$ )。对具有不同透过率的两种输出镜进行实验,两种输出镜对 $\text{SrWO}_4$ 晶体各级斯托克斯光的透过率如表1所示,输出镜都对 $1064\ \text{nm}$ 高反以实现双程抽运。

表 1 外腔输出镜 F2 在各级 Stokes 光处的透过率(%)

Table 1 Transmittance of the output mirror F2 at different Stokes wavelengths (%)

No.	Pump wavelength (1064 nm)	S <sub>1</sub> (1180 nm)	S <sub>2</sub> (1324 nm)	S <sub>3</sub> (1507 nm)
F2-1	0	14.8	36	90
F2-2	0	38	67	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 1180,1324,1507 nm,输出能量和转换效率随激发能量的变化如图 3,4 所示。

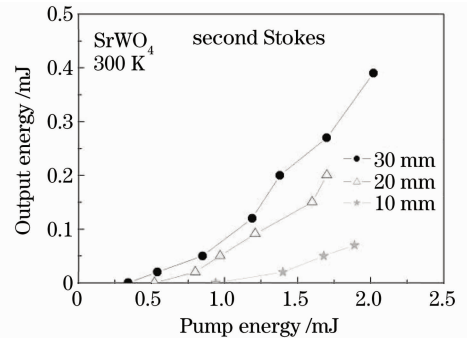
图 3 外腔式 SrWO<sub>4</sub> 晶体多波长拉曼激光器的输出能量变化特性Fig. 3 Output energy curve of the external resonator SrWO<sub>4</sub> crystal multi-wavelengths Raman laser图 4 外腔式 SrWO<sub>4</sub> 晶体多波长拉曼激光器的转换效率变化特性Fig. 4 Conversion efficiency curve of the external resonator SrWO<sub>4</sub> crystal multi-wavelengths Raman laser

总输出激光的最大能量为 2.58 mJ,最佳转换效率为 73%,均为 30 mm SrWO<sub>4</sub> 晶体样品在 F2-2 号输出腔镜中得到。在图 2 中 F2 的右侧添加仅透过 S<sub>1</sub> 的滤光片(在 1181 nm 波段  $T=90\%$ ,在 1250~1520 nm 波段  $T<0.1\%$ ),当激发能量为 2.74 mJ 时测得一级斯托克斯拉曼激光的最大输出,计入滤光片损耗后为 1.04 mJ,最高转换效率为 38%。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。在相同实验条件下,对 BaWO<sub>4</sub>, YVO<sub>4</sub> 晶体的外腔拉曼特性进行了测试,均低于 SrWO<sub>4</sub> 的实验结果。当拉曼介质为 30 mm 长的 BaWO<sub>4</sub> 时,总输出激光的最大能量和最佳转换效率分别为 2.46 mJ 和 58%;当拉曼介质为 35.4 mm 长的 YVO<sub>4</sub> 时,总输出激光的最大能量和最佳转换效率分别为 2.21 mJ 和 51.4%。

## 5 外腔式 SrWO<sub>4</sub> 晶体 1324 nm 拉曼激光器

将 SrWO<sub>4</sub> 晶体沿  $a$  向加工成长度分别为 30, 20, 10 mm 的样品,截面均为 6 mm×6 mm,各样品两通光端面进行抛光但未镀膜。由 F1 和 F2 构成的激光腔长度根据拉曼晶体的长度进行调整,保证实验在紧凑腔型条件下进行。输入镜 F1 对 1064 nm 抽运光高透( $T>90\%$ ),在 1130~1380 nm 波段高反( $T<0.1\%$ )。输出镜 F2 对 1050~1250 nm 波段高反( $T<0.1\%$ ),对 1324 nm 波长的透过率为 53%。实验中采用 Anritsu 的 MS9710C 光谱仪得到输出激光的波长为 1324 nm,未观察到其他波长激光的输出。实验结果如图 5,6 所示,1324 nm 二级斯托克斯拉曼激光的最大输出能量为 0.39 mJ,最高转换效率为 19.3%,均由 30 mm 长的 SrWO<sub>4</sub> 晶体获得。与图 5,6 对应的各 SrWO<sub>4</sub> 晶体的拉曼阈值如表 2 所示。随晶体长度的增加,拉曼阈值降低,转换效率增加。同样地,在相同实验条件下对 BaWO<sub>4</sub>, YVO<sub>4</sub> 晶体进行了测试,当拉曼介质为 50 mm 长的 BaWO<sub>4</sub> 时,在与 SrWO<sub>4</sub> 相同的激发能量下(2 mJ)总拉曼输出的能量和转换效率分别为 0.24 mJ 和 12%;当拉曼介质为 35.4 mm 长的 YVO<sub>4</sub> 时,总输出激光的最大能量

图 5 SrWO<sub>4</sub> 晶体 1324 nm 外腔拉曼激光器的输出能量变化特性Fig. 5 Output energy curve of the external resonator SrWO<sub>4</sub> crystal 1324 nm Raman laser

和最佳转换效率分别为 0.36 mJ 和 12.3%。

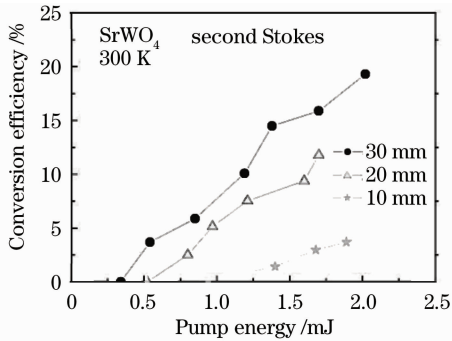


图 6 SrWO<sub>4</sub> 晶体 1324 nm 外腔拉曼激光器的转换效率变化特性

Fig. 6 Conversion efficiency curve of the external resonator SrWO<sub>4</sub> crystal 1324 nm Raman laser

表 2 SrWO<sub>4</sub> 晶体 1324 nm 拉曼激光器的抽运阈值

Table 2 Pump threshold of SrWO<sub>4</sub> crystal 1324 nm Raman laser

No.	Crystal length /mm	Pump energy at threshold /mJ	Pump intensity at threshold /(MW/cm <sup>2</sup> )
1	30	0.34	1082.25
2	20	0.52	1655.21
3	10	0.94	2992.11

## 6 结 论

用 SrWO<sub>4</sub> 晶体实现了 1064 nm 皮秒脉冲激发的外腔式多波长拉曼激光器、外腔式 1324 nm 单波长拉曼激光器的高效运转。多波长输出的最大输出能量为 2.58 mJ, 总转换效率达到 73%。实验中获得了 1.04 mJ 的一级斯托克斯拉曼激光最大输出, 最高转换效率为 38%。1324 nm 二级斯托克斯单波长拉曼激光输出的最大能量为 0.39 mJ, 转换效率为 19.3%, 优于同等实验条件下 BaWO<sub>4</sub>, YVO<sub>4</sub> 晶体的实验结果, 表明 SrWO<sub>4</sub> 晶体在超短脉冲拉曼变频方面具有巨大潜力及良好应用前景。

## 参 考 文 献

- H. M. Pask, J. A. Piper. Practical 580 nm source based on frequency doubling of an intracavity-Raman-shifted Nd:YAG laser [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **148**(4-6): 285~288
- Jin Feng. Development of eye-safe Raman lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(6): 40~42  
金峰. 人眼安全拉曼激光技术的发展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(6): 40~42
- P. G. Zverev, T. T. Basiev, V. V. Osiko *et al.*. Physical, chemical and optical properties of barium nitrate Raman crystal [J]. *Opt. Mater.*, 1999, **11**(4): 315~334
- P. Cerny, P. G. Zverev, H. Jelinkova *et al.*. Efficient Raman shifting of picosecond pulses using BaWO<sub>4</sub> crystal [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **177**(1-6): 397~404
- Wang Zhengping, Hu Dawei, Fang Xin *et al.*. Eye-safe Raman

- laser at 1.5  $\mu\text{m}$  based on BaWO<sub>4</sub> crystal [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(1): 122~124
- Hu Dawei, Wang Zhengping, Zhang Huaijin *et al.*. Picosecond stimulated Raman scattering of SrWO<sub>4</sub> crystal [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(10): 2766~2769
- A. A. Kaminskii, K. Ueda, H. Eichler *et al.*. Tetragonal vanadates YVO<sub>4</sub> and GdVO<sub>4</sub> new efficient  $\chi^{(3)}$ -materials for Raman lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **194**(1-3): 201~206
- Hu Dawei, Yu Haohai, Wang Zhengping *et al.*. Efficient stimulated Raman scattering of YVO<sub>4</sub> crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 918~920  
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
- Jia Peng, Zhang Xingyu, Wang Qingpu *et al.*. Laser diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> self-stimulated Raman laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1309~1313  
贾鹏, 张行愚, 王青圃等. 激光二极管抽运的自拉曼 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1309~1313
- Liu Tianhong, Tan Huiming, Wang Baoshan *et al.*. Laser diode pumped actively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> self-stimulated Raman laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1593~1596  
刘天红, 檀慧明, 王保山等. 激光二极管抽运主动调 Q Nd:GdVO<sub>4</sub> 自受激拉曼激光器 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1593~1596
- Su Fufang, Zhang Xingyu, Wang Qingpu *et al.*. Passively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> self-Raman laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1831~1835  
苏富芳, 张行愚, 王青圃等. 被动调 Q 自拉曼 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1831~1835
- Cong Zhenhua, Zhang Xingyu, Wang Qingpu *et al.*. Actively Q-switched intracavity Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> Raman laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 19~22  
丛振华, 张行愚, 王青圃等. 主动调 Q 腔内 Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> 拉曼激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 19~22
- Hu Dawei, Wang Zhengping, Zhang Huaijin *et al.*. Stimulated Raman scattering of GdVO<sub>4</sub> crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 11~16  
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 Dawei, Wang Zhengping, Zhang Huaijin *et al.*. Stimulated Raman scattering of YbVO<sub>4</sub> crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(3): 1714~1718  
胡大伟, 王正平, 张怀金等. YbVO<sub>4</sub> 晶体的受激拉曼散射 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(3): 1714~1718
- T. T. Basiev, A. A. Sobol, Y. K. Voronbo *et al.*. Spontaneous Raman spectroscopy of tungstate and molybdate crystals for Raman lasers [J]. *Opt. Mater.*, 2000, **15**(3): 205~216
- L. I. Ivleva, T. T. Basiev, I. S. Voronina *et al.*. SrWO<sub>4</sub>:Nd<sup>3+</sup>—new material for multifunctional lasers [J]. *Opt. Mater.*, 2003, **23**(1-2): 439~442
- H. Jelinkova, J. Sulc, T. T. Basiev *et al.*. Stimulated Raman scattering in Nd:SrWO<sub>4</sub> [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2005, **2**(1): 4~11
- A. Brenier, G. Jia, C. Tu. Raman lasers at 1.171 and 1.517  $\mu\text{m}$  with self-frequency conversion in SrWO<sub>4</sub>:Nd<sup>3+</sup> crystal [J]. *J. Phys. -Condens. Matter.*, 2004, **16**(49): 9103~9108
- H. M. Pask, S. Myers, J. A. Piper *et al.*. High average power, all-solid-state external resonator Raman laser [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(6): 435~437
- R. P. Mildren, M. Convey, H. M. Pask *et al.*. Efficient, all-solid-state, Raman laser in the yellow, orange and red [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(5): 785~790
- Su Fufang, Zhang Xingyu, Wang Qingpu *et al.*. Output properties of external resonator SrWO<sub>4</sub> Raman laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 693~696  
苏富芳, 张行愚, 王青圃等. 外腔式 SrWO<sub>4</sub> 拉曼激光器的输出特性研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 693~696