

文章编号: 0258-7025(2009)07-1798-04

# 全固体腔内倍频 Nd : YAG/SrWO<sub>4</sub>/KTP 拉曼激光器

张行愚<sup>1</sup> 王青圃<sup>1</sup> 常 军<sup>1</sup> 李 平<sup>1</sup> 王 浩<sup>1</sup> 李述涛<sup>1</sup> 丛振华<sup>1</sup>

陈晓寒<sup>1</sup> 刘兆军<sup>1</sup> 范书振<sup>1</sup> 张 琛<sup>1</sup> 于浩海<sup>2</sup> 张怀金<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100  
<sup>2</sup> 山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100)

**摘要** 报道了以 KTP 晶体作为倍频介质, 以 Nd : YAG 晶体作为激活介质, 以 SrWO<sub>4</sub> 晶体作为拉曼介质的折叠腔型主动调 Q 腔内倍频拉曼激光器的输出特性, 给出了输出黄光平均功率、脉冲能量、脉冲宽度随激光二极管(LD)抽运功率及脉冲重复率的变化关系。在输入抽运功率为 12.6 W, 脉冲重复率为 20 kHz 时, 获得了 1.4 W 的 590 nm 激光输出, 从 LD 到黄光的转换效率为 11.1%。在输入抽运功率为 12.6 W, 脉冲重复率为 10 kHz 时, 单脉冲能量为 122 μJ, 脉冲宽度为 4.0 ns, 相应的脉冲峰值功率为 30.5 kW。

**关键词** 激光器; 全固态激光器; 拉曼激光器; 腔内倍频; SrWO<sub>4</sub> 晶体; 主动调 Q

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1798

## All Solid State Intracavity Frequency-Doubled Nd : YAG/SrWO<sub>4</sub>/KTP Raman Laser

Zhang Xingyu<sup>1</sup> Wang Qingpu<sup>1</sup> Chang Jun<sup>1</sup> Li Ping<sup>1</sup> Wang Hao<sup>1</sup> Li Shutao<sup>1</sup>

Cong Zhenhua<sup>1</sup> Chen Xiaohan<sup>1</sup> Liu Zhaojun<sup>1</sup> Fan Shuzhen<sup>1</sup>

Zhang Chen<sup>1</sup> Yu Haohai<sup>2</sup> Zhang Huaijin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)  
(<sup>2</sup> State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

**Abstract** We present the characteristics of a folded-cavity actively Q-switched intracavity frequency-doubled Raman laser in which a KTP crystal is used as the frequency-doubling material, an Nd : YAG crystal is used as the gain medium and an SrWO<sub>4</sub> crystal as the Raman medium. The dependences of the average output power, the pulse energy and width on the pulse repetition rate and incident LD pump power are given. When the incident pump power is 12.6 W and the repetition rate is 20 kHz, the average output power is 1.4 W, and the corresponding conversion efficiency from the diode laser to yellow laser is 11.1%. When the incident pump power is 12.6 W and the repetition rate is 10 kHz, the pulse energy is 122 μJ, the pulse width is 4.0 ns, and the corresponding peak power is 30.5 kW.

**Key words** lasers; all solid state lasers; Raman lasers; intracavity frequency-doubling; SrWO<sub>4</sub> crystal; active Q-switching

## 1 引 言

黄光激光在医疗、光谱学、信息存储、雷达、大气探测等领域有广泛的应用<sup>[1~6]</sup>, 固体拉曼介质具有增益高、热传导性好、机械特性好、易于和全固态激光技术结合等优点<sup>[7~10]</sup>。固体倍频拉曼激光器是获取黄光激光的重要手段之一, 其中激光二极管(LD)

抽运的主动调 Q 腔内倍频拉曼激光器因为把激光晶体、拉曼晶体和倍频晶体集合在一个激光腔中, 不需要额外的激光器作为抽运源, 充分利用了腔内基频光和拉曼光高的脉冲峰值功率密度, 具有结构紧凑、体积小、转换效率高等优点<sup>[1~6]</sup>, 因此成为从晶体拉曼激光器获得黄光输出最重要的途径。钨酸铽

收稿日期: 2008-12-04; 收到修改稿日期: 2008-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(60778012)资助项目。

作者简介: 张行愚(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光物理与技术和光电子学等方面的研究。E-mail: xyz@sdu.edu.cn

(SrWO<sub>4</sub>)晶体是一种性能优良的拉曼晶体<sup>[11~18]</sup>,它的透光范围为 0.3 ~ 2.7 μm,其拉曼频移为 921 cm<sup>-1</sup>。当用波长为 1064 nm 的激光抽运时,一阶斯托克斯光的波长为 1180 nm,倍频后就可得到 590 nm 的黄光,相应的拉曼增益系数为 5 cm/GW。SrWO<sub>4</sub> 晶体还可以掺入 Nd<sup>3+</sup> 离子,使得 SrWO<sub>4</sub> 晶体同时具有激光特性和拉曼特性。文献[11]研究了 SrWO<sub>4</sub> 晶体的自发拉曼光谱,文献[12~15]报道了 Nd : SrWO<sub>4</sub> 晶体自激活、自拉曼效应的激光特性。文献[16~18]分别报道了 SrWO<sub>4</sub> 外腔和内腔拉曼激光器的特性。本文用 KTP 晶体作为倍频介质,研究了折叠腔型的腔内倍频 Nd : YAG/SrWO<sub>4</sub> 拉曼激光器的输出特性,测量了输出黄光的平均功率、脉冲能量、脉冲宽度随抽运功率及脉冲重复率的变化关系。在输入抽运功率为 12.6 W,脉冲重复率为 20 kHz 时,获得了 1.4 W 的 590 nm 激光输出,从 LD 到黄光的转换效率为 11.1%。

## 2 实验装置

折叠腔结构 LD 抽运主动调 Q 腔内 KTP 倍频 Nd : YAG/SrWO<sub>4</sub> 拉曼激光器如图 1 所示。使用三个平面镜组成激光腔,输入镜 M1 镀膜对 808 nm 的光高透 ( $T = 94\%$ ),对 590 nm, 1064 nm 和 1180 nm 的光高反 ( $R = 99.97\%$  (1064 nm))。M2 镜面与激光腔光轴成 45° 夹角,对 1064 nm 和 1180 nm 的光高反 ( $R = 99.6\%$  (1064 nm); 99.0% (1180 nm)),对 590 nm 的光高透 ( $T = 97\%$ )。M3 镀膜同 M1。激光谐振腔总长为 150 mm 左右。激活介质 Nd : YAG 的尺寸为  $\phi 4 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,掺 Nd 原子数分数为 1%,两个端面镀膜对 1000~1200 nm 高透,其中一端镀膜对 808 nm 高透。拉曼晶体 SrWO<sub>4</sub> 的尺寸为 3 mm × 3 mm × 35.7 mm,两个端面镀膜对 1000~1200 nm 高透。KTP 晶体的尺寸为 3 mm × 3 mm × 6 mm,两个端面镀膜对 1000~1200 nm 和 585~595 nm 波长范围的光高透,晶体沿  $\phi = 0^\circ, \theta = 68.7^\circ$  切割,稍微调节就可以满足 1180 nm 波长倍频的匹配角度。Nd : YAG, SrWO<sub>4</sub> 和 KTP 晶体用铝箔包裹并放置在带有水冷装置的铜块内,循环水温度控制在 18 °C。声光调 Q 晶体 (Gooch & Housego 公司)长度为 30 mm,两个端面镀有 1000~1200 nm 波段的高透膜,调制频率为 41 MHz,最大调制功率为 15 W。在腔外用一滤光片滤掉剩余的 1064 nm 和 1180 nm 激光。黄光的平均功率由功率计 Molecron EPM2000 测量,脉冲

波形由快速 PIN 管接收后由 Tektronix TDS 5052B 存储示波器 (5G Samples/s, 500 MHz bandwidth) 显示。光谱特性由 Yokogawa AQ 6315A 光谱分析仪 (350~1750 nm) 记录。

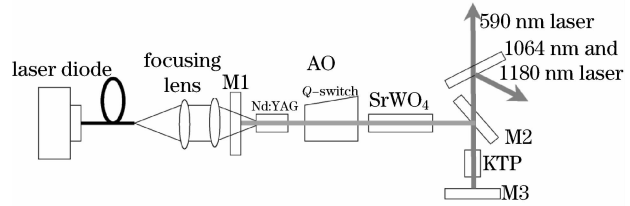


图 1 折叠腔结构 LD 抽运主动调 Q 腔内 KTP 倍频 Nd : YAG/SrWO<sub>4</sub> 拉曼激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of the folded-cavity LD-pumped actively Q-switched intracavity KTP frequency-doubled Nd : YAG/SrWO<sub>4</sub> Raman laser

## 3 实验结果

图 2 给出了 LD 抽运主动调 Q 腔内 KTP 倍频 Nd : YAG/SrWO<sub>4</sub> 拉曼激光器的光谱组成,它是在移掉滤光片,使黄光和剩余的基频光及拉曼光一同进入光谱分析仪的情况下得到的。可以看出,基频光中心波长为 1064 nm,拉曼光中心波长为 1180 nm,黄光激光中心波长为 590 nm。

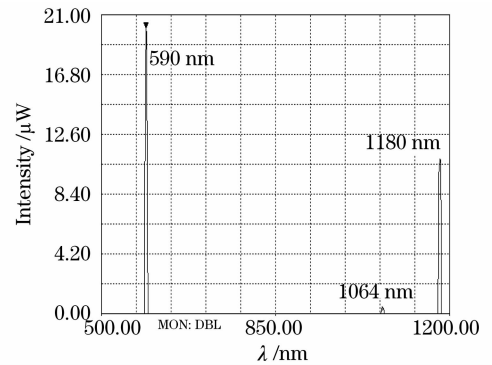


图 2 LD 抽运主动调 Q 腔内 KTP 倍频 Nd : YAG/SrWO<sub>4</sub> 拉曼激光器的光谱组成

Fig. 2 Spectra of the LD-pumped actively Q-switched intracavity KTP frequency-doubled Nd : YAG/SrWO<sub>4</sub> Raman laser

图 3(a)给出了当脉冲重复率分别为 10 kHz, 15 kHz 和 20 kHz 时,590 nm 激光平均功率与输入抽运功率之间的关系。可以看到,脉冲重复率为 10 kHz, 15 kHz 和 20 kHz 时黄光的阈值抽运功率分别约为 3.5 W, 4.2 W 和 4.6 W。随着抽运功率的增加,15 kHz 和 20 kHz 时的黄光功率超过了 10 kHz 时的黄光功率,当抽运功率为 12.6 W,脉冲

重复率为 20 kHz 时,获得的 590 nm 激光的最大功率为 1.4 W。此时从 LD 抽运光到黄光激光的转换效率为 11.1%,以往报道的腔内倍频固体拉曼激光器从 808 nm LD 抽运光到黄光激光的转换效率一般在 8% 以下<sup>[1~6]</sup>。

图 3(b) 给出了脉冲重复率分别为 10 kHz, 15 kHz 和 20 kHz 时,590 nm 激光脉冲能量与输入抽运功率之间的关系。当输入抽运功率为 12.6 W 时,脉冲重复率分别为 10 kHz, 15 kHz 和 20 kHz 时的 590 nm 激光脉冲能量分别为 122  $\mu\text{J}$ , 91  $\mu\text{J}$  和 70  $\mu\text{J}$ 。

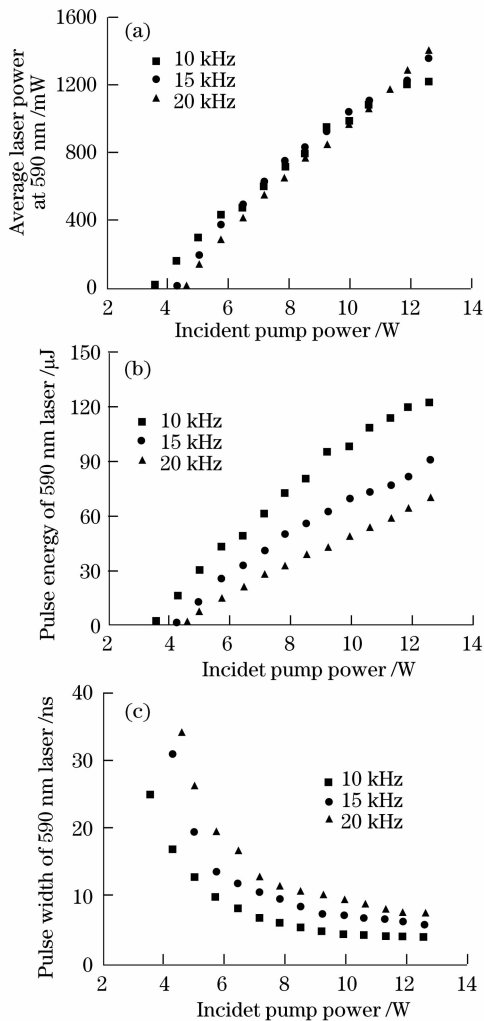


图 3 脉冲重复率分别为 10 kHz, 15 kHz 和 20 kHz 时, 590 nm 激光平均功率(a), 脉冲能量(b)和脉冲宽度(c)与输入抽运功率之间的关系

Fig. 3 Average output power (a), pulse energy (b) and pulse width (c) of the 590 nm laser with respect to the pump power at pulse repetition rates of 10 kHz, 15 kHz and 20 kHz

图 3(c) 给出了当脉冲重复率分别为 10 kHz,

15 kHz 和 20 kHz 时,590 nm 激光脉冲宽度与输入抽运功率之间的关系。可以看到,脉冲宽度随抽运功率的增加而减小,随脉冲重复率的增加而变大。当输入抽运功率为 12.6 W 时,脉冲重复率为 10 kHz, 15 kHz 和 20 kHz 的 590 nm 激光脉宽分别为 4.0 ns, 5.9 ns 和 7.2 ns。根据图 3(b) 和(c) 提供的脉冲能量和脉冲宽度的数据,可以计算出黄光激光的峰值功率,当脉冲重复率为 10 kHz, 15 kHz 和 20 kHz 时的黄光激光的最大峰值功率分别为 30.5 kW, 15.4 kW 和 9.7 kW。图 4 给出了当输入抽运功率为 12.6 W, 脉冲重复率为 20 kHz 时, 590 nm 激光的脉冲波形。

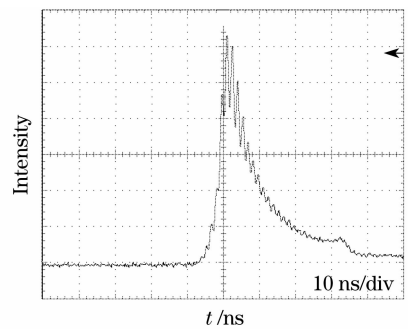


图 4 输入抽运功率为 12.6 W, 脉冲重复率为 20 kHz 时, 590 nm 激光的脉冲波形

Fig. 4 Typical oscilloscope trace for the yellow laser pulse at an incident pump power of 12.6 W and a repetition rate of 20 kHz

## 4 结 论

报道了以 KTP 晶体作为倍频介质,以 Nd : YAG 晶体作为激活介质,以  $\text{SrWO}_4$  晶体作为拉曼介质的折叠腔型主动调 Q 腔内倍频拉曼激光器的输出特性,给出了输出黄光平均功率、脉冲能量、脉冲宽度随抽运功率及脉冲重复率的变化关系。在输入抽运功率为 12.6 W, 脉冲重复率为 20 kHz 时,获得了 1.4 W 的 590 nm 激光输出,从 LD 到黄光的转换效率为 11.1%。实验结果表明, $\text{SrWO}_4$  是优良的拉曼晶体,由 KTP, Nd : YAG 和  $\text{SrWO}_4$  搭配形成的腔内倍频拉曼激光器是获得黄光激光的有效手段。

## 参 考 文 献

- 1 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): 285~288
- 2 H. M. Pask, J. A. Piper. Efficient all-solid-state yellow laser source producing 1.2-W average power[J]. *Opt. Lett.*, 1998,

- 24(21): 1490~1492
- 3 J. A. Piper, H. M. Pask. Crystalline Raman lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 692~704
- 4 H. M. Pask. Review design and operation of solid-state Raman lasers[J]. *Prog. Quantum Electron.*, 2003, **27**(1): 3~56
- 5 Liu Bo, Zhang Xingyu, Wang Qingpu *et al.*. Diode pumped intracavity frequency doubled Nd : YVO<sub>4</sub> self-Raman yellow laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1777~1780  
刘波, 张行愚, 王青圃等. LD抽运 Nd : YVO<sub>4</sub> 自拉曼倍频黄光激光器[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1777~1780
- 6 Wang Zhichao, Du Chenlin, Ruan Shuangchen. Research progress of all-solid-state yellow lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(1): 29~36  
王志超, 杜晨林, 阮双琛. 全固态黄光激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(1): 29~36
- 7 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
- 8 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
- 9 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
- 10 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
- 11 T. T. Basiev, A. A. Sobol, P. G. Zverev. Spontaneous Raman spectroscopy of tungstate and molybdate crystals for Raman lasers[J]. *Opt. Mater.*, 2000, **15**(3): 205~216
- 12 F. Cornacchia, A. Toncelli, M. Tonelli *et al.*. Optical spectroscopy of SrWO<sub>4</sub> : Nd<sup>3+</sup> single crystals[J]. *J. Phys. Condens. Matter*, 2004, **16**(39): 6867~6876
- 13 A. Brenier, G. H. Jia, C. Y. Tu. Raman lasers at 1.171 and 1.517 μm with self-frequency conversion in SrWO<sub>4</sub> : Nd<sup>3+</sup> crystal[J]. *J. Phys. Condens. Matter*, 2004, **16**(49): 9103~9108
- 14 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
- 15 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
- 16 S. H. Ding, X. Y. Zhang, Q. P. Wang *et al.*. Highly efficient Raman frequency converter with strontium tungstate crystal[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2006, **42**(1): 78~84
- 17 X. H. Chen, X. Y. Zhang, Q. P. Wang *et al.*. Highly efficient diode-pumped actively Q-switched Nd : YAG-SrWO<sub>4</sub> intracavity Raman laser[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(7): 705~707
- 18 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