

文章编号: 0253-2239(2006)05-0693-4

外腔式 SrWO_4 拉曼激光器的输出特性研究*

苏富芳 张行愚 王青圃 丁双红 李述涛 范书振 刘兆军

(山东大学信息科学与工程学院, 济南 250100)

摘要: 研究了外腔式 SrWO_4 拉曼激光器在 ns 脉冲抽运下的输出特性。利用主动调 Q 的 Nd:YAG 激光器产生的脉冲宽度为 11.7 ns, 输出能量为 80 mJ 的激光作为抽运源, 拉曼激光谐振腔采用平平腔, 实验采用 4 片对一阶斯托克斯脉冲和二阶斯托克斯脉冲不同反射率的输出耦合镜, 测量了输出能量与抽运能量的关系, 计算了转换效率与抽运能量的关系。当输出耦合镜对一阶斯托克斯脉冲的反射率为 39.9% 时, 实验得到一阶斯托克斯脉冲的最大能量和转换效率分别为 23.9 mJ 和 36.2%, 当输出耦合镜对一阶斯托克斯脉冲和二阶斯托克斯脉冲的反射率分别为 80.5% 和 12.4% 时, 得到二阶斯托克斯脉冲的最大输出能量和转换效率分别为 16.4 mJ 和 25.4%, 典型的一阶斯托克斯脉冲和二阶斯托克斯脉冲的脉冲宽度分别为 6.1 ns 和 5.8 ns。

关键词: 激光器; 拉曼激光器; 受激拉曼散射; 钨酸锶(SrWO_4)晶体

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Output Properties of External Resonator SrWO_4 Raman Laser

Su Fufang Zhang Xingyu Wang Qingpu Ding Shuanghong Li Shutao

Fan Shuzhen Liu Zhaojun

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100)

Abstract: The output properties of an external resonator SrWO_4 Raman laser pumped by nanosecond pulses are studied. An actively Q-switched Nd:YAG laser is used as the pumping source, with pulse width of 11.7 ns and energy of 80 mJ. The Raman laser cavity is a flat-flat one. Four output couplers with different reflectivities for the first- and second-Stokes wavelengths are used in the experiment. The relations between the output energy and pumping energy are measured, and the relations between the conversion efficiency and pumping energy are calculated. When the output coupler reflectivity for the first-Stokes wavelength is 39.9%, the obtained maximum output energy and conversion efficiency of the first-Stokes pulses are 23.9 mJ and 36.2%, respectively. When the output coupler reflectivities for the first and the second-Stokes wavelengths are 80.5% and 12.4%, respectively, the obtained maximum output energy and conversion efficiency of the second-Stokes pulses are 16.4 mJ and 25.4%, respectively. The pulse widths of the typical first and second-Stokes pulses are 6.1 ns and 5.8 ns, respectively.

Key words: lasers; Raman laser; stimulated Raman scattering; strontium tungstate (SrWO_4) crystal

1 引 言

拉曼激光技术是利用拉曼介质的受激拉曼散射(SRS)效应获得新波长激光的一种技术, 是产生新波长激光的有效方法。拉曼介质有气体、液体和固体, 对气体及液体拉曼激光器的研究已经有几十年的时间^[1~5]。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、易与全固态激光技术结合等优点。近几年固体拉曼介质

及固体拉曼激光器成为激光材料和器件领域的研究热点^[6~11]。

钨酸锶(SrWO_4)晶体是拉曼晶体家族的新成员^[12~15], 它具有拉曼阈值低、积分散射截面大、散射谱线宽度窄等优点, 而且还可以掺入 Nd^{3+} 离子, 使得 SrWO_4 晶体同时具有激光特性和拉曼特性。文献^[12]研究了 SrWO_4 晶体自发拉曼光谱, 文献^[13~15]展示了 $\text{Nd}^{3+}:\text{SrWO}_4$ 晶体自激活、自拉曼

* 教育部留学回国人员科研启动基金和山东省优秀中青年科学家奖励(03BS095)资助课题。

作者简介: 苏富芳(1977~), 女, 山东省泗水人, 博士研究生, 主要从事激光物理的研究。E-mail: sufufang@sina.com

收稿日期: 2005-08-10; 收到修改稿日期: 2005-09-15

效应的激光特性。外腔式拉曼激光器是把拉曼晶体放在一个独立的谐振腔内的激光器,它不改变抽运激光器的结构,拉曼激光谐振腔可以进行专门的设计以实现最佳化运转,外腔式拉曼激光器是拉曼激光器的一种重要形式^[16,17]。我们利用主动调Q的Nd:YAG激光器作为抽运源,研究了外腔式SrWO₄拉曼激光器的输出特性,得一阶斯托克斯(Stokes)脉冲的最大能量和转换效率分别为23.9 mJ和36.2%,二阶斯托克斯脉冲的最大能量和转换效率分别为16.4 mJ和25.4%。

2 实验装置

实验装置如图1所示,主动调Q的Nd:YAG激光器产生的1064 nm抽运脉冲宽度为11.7 ns,输出能量为80 mJ,脉冲重复率是1 Hz。P和A为两个格兰-泰勒棱镜,通过调节P可以改变入射到SrWO₄晶体上的能量。F是焦距为40 cm的聚焦透镜,抽运脉冲经F聚焦后到达SrWO₄晶体中心的半径为960 μm。M₁和M₂构成拉曼激光器谐振腔,腔长为60 mm,M₁,M₂均为平面镜。M₁为输入镜,对1064 nm的抽运光高透,对从1140 nm到1330 nm范围的光高反,M₂为输出耦合镜,实验中采用4片输出耦合镜,它们对一阶斯托克斯脉冲和二阶斯托克斯脉冲有不同的反射率(见表1)。SrWO₄晶体的尺寸为φ4 mm×49 mm,放在谐振腔的中央。F₁是滤波片,其作用是滤掉剩余的抽运光。脉冲能量E由EPM2000型激光能量计进行测

量,脉冲波形由MRD500快速光电二极管接收后由Tektronix TDS 3052B存储示波器显示。

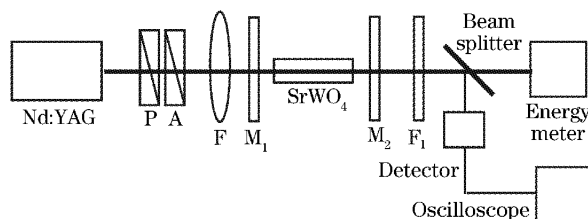


图1 实验装置图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

表1 输出耦合镜的反射率

Table 1 The reflectivity of output couplers

Output coupler number	1	2	3	4
Reflectivity at 1180 nm / %	39.9	11.8	36.8	80.5
Reflectivity at 1323 nm / %	10	18	11.5	12.4

3 实验结果及讨论

实验中采用4片输出耦合镜均得到一阶斯托克斯脉冲输出,图2分别给出了典型的抽运脉冲、一阶斯托克斯脉冲和二阶斯托克斯脉冲的形状,一阶斯托克斯脉冲宽度仅为6.1 ns。图3和图4分别给出了不同输出耦合镜的一阶斯托克斯脉冲的输出能量和转换效率随着抽运能量的变化关系,图中的曲线1、2、3和4分别对应相应序号的输出耦合镜。使用输出耦合镜4时可以得到二阶斯托克斯脉冲的输出,图5给出了二阶斯托克斯脉冲的输出能量和转换效率随抽运能量的关系。图中实线是根据实验结果做出的拟合曲线。

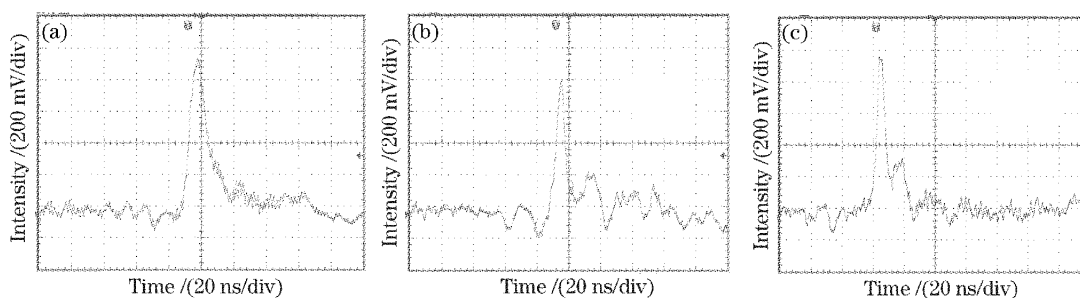


图2 抽运激光(a),一阶斯托克斯(b)和二阶斯托克斯(c)脉冲的波形

Fig.2 The temporal characteristic of the pump pulses (a), first-Stokes pulses (b), second-Stokes pulses (c)

由图3可以看出,一阶斯托克斯脉冲的输出能量随抽运能量的增加而增加,使用输出耦合镜1时输出能量最大,当抽运能量为66 mJ时一阶斯托克斯脉冲的最大输出能量为23.9 mJ,阈值约为14.5 mJ,斜率效率为46.4%。对于一定的抽运能量,随着输出耦合镜对1180 nm的一阶斯托克斯脉冲反射率的增加,一

阶斯托克斯脉冲的输出能量先增加后减少,对我们的测量结果而言,输出耦合镜对1180 nm反射率为39.9%时一阶斯托克斯脉冲的输出能量达到最佳。

图4给出了一阶斯托克斯脉冲的转换效率与抽运能量的关系,其中转换效率是指输出的一阶斯托克斯脉冲的能量与输入的抽运能量的比值。由图4

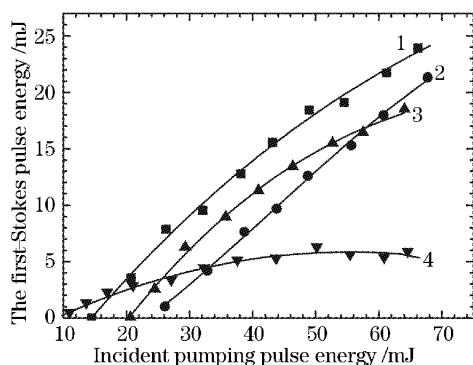


图 3 不同输出耦合镜的一阶斯托克斯脉冲输出能量随抽运能量的变化关系

Fig. 3 Dependence of the first-Stokes pulse energy output on pump energy with different couplers

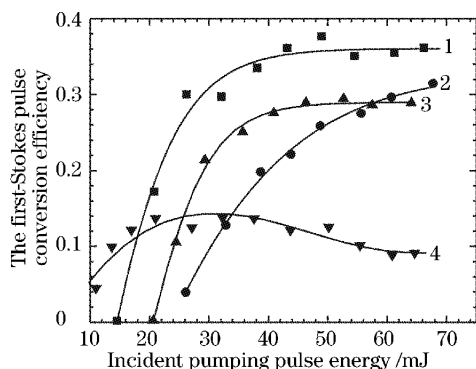


图 4 不同输出耦合镜的一阶斯托克斯脉冲的转换效率随抽运能量的变化关系

Fig. 4 Dependence of the first-Stokes pulses conversion efficiency on pump energy with different couplers

可以看出,使用输出耦合镜 1 和 3 时,随着抽运能量的增加,转换效率先增加到一定值后又缓慢下降,输出耦合镜 2 对一阶斯托克斯脉冲的转换效率随抽运能量的增加一直上升,输出耦合镜 4 对一阶斯托克斯脉冲的转换效率较小,低于 14%。

如图 5 所示,二阶斯托克斯脉冲的能量和转换效率都随抽运能量的增加而增加。实验测得使用输出耦合镜 4 时一阶斯托克斯脉冲和二阶斯托克斯脉冲总能量为 22.3 mJ,相应的转换效率为 34.6%,一阶斯托克斯脉冲的阈值约为 11 mJ,二阶斯托克斯脉冲的阈值约为 16 mJ。二阶斯托克斯脉冲的最大能量和相应的转换效率分别为 16.4 mJ 和 25.4%,斜率效率为 33.7%,二阶斯托克斯脉冲的宽度为 5.8 ns。

图 6 是受激拉曼散射的产生原理示意图,当能量为 $h\nu_p$ 的抽运光入射到拉曼晶体后,通过受激拉曼散射产生了频率为 ν_{s1} 的一阶斯托克斯脉冲,当一

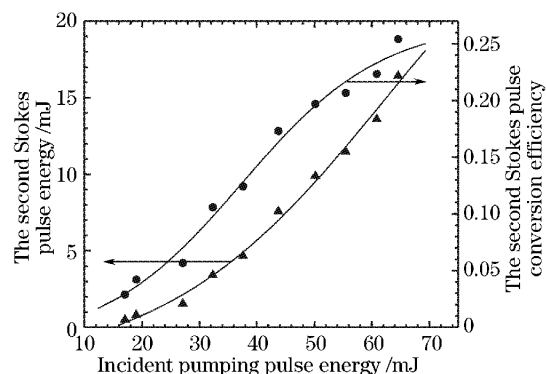


图 5 二阶斯托克斯脉冲的输出能量和转换效率与抽运能量的关系

Fig. 5 Dependence of the second-Stokes pulse output and conversion efficiency on pump energy

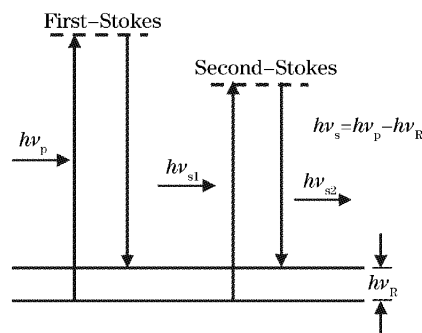


图 6 受激拉曼散射的产生原理

阶斯托克斯脉冲达到一定的强度时,就作为二阶斯托克斯散射的抽运光,产生二阶斯托克斯散射。一旦产生二阶斯托克斯散射,一阶斯托克斯脉冲就被部分消耗,导致一阶斯托克斯脉冲的转换效率不再随抽运能量的增加而增加。输出耦合镜 2 对一阶斯托克斯脉冲的反射率比较小,腔中一阶斯托克斯脉冲功率较小,未出现二阶斯托克斯散射,所以一阶斯托克斯脉冲的转换效率随抽运能量的增加一直上升。输出耦合镜 1 和 3 对一阶斯托克斯脉冲的反射率比输出耦合镜 2 高,在抽运脉冲能量大于 40 mJ 时,就有二阶斯托克斯散射产生,使得一阶斯托克斯脉冲的转换效率不再上升,但由于输出耦合镜 1 和 3 对二阶斯托克斯散射的反射率不足够高,谐振腔无法满足二阶斯托克斯激光的振荡条件,所以只观察到非常微弱的二阶斯托克斯脉冲(无测量数据)。输出耦合镜 4 对一阶斯托克斯脉冲的反射率最大,使用输出耦合镜 4 时,腔内一阶斯托克斯脉冲的峰值功率很高,几乎在产生一阶斯托克斯脉冲的同时就产生了二阶斯托克斯脉冲,所以一阶斯托克斯脉冲的转换效率比较低,同时能测量到二阶斯托克斯脉冲输

出。由于输出耦合镜 4 对二阶斯托克斯脉冲的反射率比较小,腔内二阶斯托克斯脉冲峰值功率还不足以产生三阶斯托克斯散射,所以得到的二阶斯托克斯脉冲的转换效率随抽运能量的增加一直上升。

4 结 论

利用主动调 Q 的 Nd:YAG 激光器作为抽运源,研究了外腔式 SrWO₄ 拉曼激光器的输出特性。测量了一阶斯托克斯脉冲和二阶斯托克斯脉冲输出的能量随抽运能量的变化,分析了这些变化的原因。实验得到一阶斯托克斯脉冲的最大输出能量和转换效率分别为 23.9 mJ 和 36.2%,二阶斯托克斯脉冲最大的输出能量和转换效率分别为 16.4 mJ 和 25.4%,在抽运脉冲为 11.7 ns 的情况下,典型的一阶斯托克斯脉冲和二阶斯托克斯脉冲的脉冲宽度分别为 6.1 ns 和 5.8 ns。

参 考 文 献

- 1 James H. Newton, G. M. Schindler. Numerical model of multiple-Raman-shifting excimer lasers to the blue-green in H₂ [J]. *Opt. Lett.*, 1981, **6**(3): 125~127
- 2 D. Von der Linder, M. Maier, W. Kaiser. Quantitative investigations of the stimulated Raman effect using subnanosecond light pulses[J]. *Phys. Rev.*, 1969, **178**(1): 11~17
- 3 Zhong Ming, Han Kai, Li Tong. Studies of (Nd, Ce):YAG Raman shifting laser with compound output mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(4): 509~512 (in Chinese)
钟 鸣,韩 凯,李 彤. 复合输出镜(Nd,Ce):YAG 拉曼频移激光器研究[J]. *光学学报*, 1995, **15**(4): 509~512
- 4 Ye Zhenhuan, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Harmonic solid laser pumped multi-wavelength Raman lasers [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(8): 903~906 (in Chinese)
叶震寰,楼祺洪,董景星. 固体谐波多波长拉曼激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 903~906
- 5 Ye Zhenhuan, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Multi-wavelength Raman shifting in a hybrid gas of methane and hydrogen[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(6): 677~680 (in Chinese)
叶震寰,楼祺洪,董景星等. 甲烷氢气混合气体中的多波长拉曼转换[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 677~680
- 6 H. M. Pask. The design and operation of solid-state Raman lasers[J]. *Pro. Quant. Electron.*, 2003, **27**(1): 3~56
- 7 Pavel Cerny, Helena Jelinkova, Peter G. Zverev *et al.*. Solid state lasers with Raman frequency conversion[J]. *Pro. Quant. Electron.*, 2004, **28**(2): 113~143
- 8 Joshua Simons, Helen Pask, Peter Dekker *et al.*. Small-scale, all-solid-state, frequency-doubled intracavity Raman laser producing 5 mW yellow-orange output at 598 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**(1~6): 305~310
- 9 H. M. Pask, J. A. Piper. Diode-pumped LiIO₃ intracavity Raman lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(8): 949~955
- 10 M. Matsuse, T. Deguchi, H. Ohtsuka *et al.*. Effect of laser pulsewidth on the generation of multi-color laser emission by stimulated Raman scattering and four-wave Raman mixing in a KGd(WO₄)₂ crystal[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **223**(4~6): 411~416
- 11 Julian Findeisen, Hans J. Eichler, A. A. Kaminskii. Efficient picosecond PbWO₄ and two-wavelength KGd(WO₄)₂ Raman lasers in the IR and visible[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(2): 173~178
- 12 T. T. Basiev, A. A. Sobol, Yu K. Voronbo *et al.*. Spontaneous Raman spectroscopy of tungstate and molybdate crystals for Raman lasers[J]. *Opt. Mater.*, 2000, **15**(3): 205~216
- 13 L. I. Ivleva, T. T. Basiev, I. S. Voronina *et al.*. SrWO₄:Nd³⁺-new material for multifunctional lasers[J]. *Opt. Mater.*, 2003, **23**(1~2): 439~442
- 14 H. Jelinkova, J. Sulc, T. T. Basiev *et al.*. Stimulated Raman scattering in Nd:SrWO₄[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2005, **2**(1): 4~11
- 15 Alain Brenier, Guohua Jia, Chaoyang Tu. Raman lasers at 1.171 and 1.517 μm with self-frequency conversion in SrWO₄:Nd³⁺ crystal[J]. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2004, **16**(49): 9103~9108
- 16 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
- 17 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