

1064 nm 纳秒脉冲激发的 PbWO₄ 固态拉曼放大器

张文会 丁双红 丁 泽 贾海旭 刘佳佳

(烟台大学光电信息科学与技术学院, 山东 烟台 264005)

摘要 研究了外腔钨酸铅(PbWO₄)拉曼激光器的输出特性,介绍了由 1064 nm 纳秒脉冲激发的 PbWO₄ 固态拉曼放大器。实验所用的抽运源是电光调 Q 的 Nd:YAG 纳秒激光器。对于外腔 PbWO₄ 拉曼激光器,当入射抽运脉冲能量为 40 mJ 时,实验测得一阶斯托克斯脉冲的最大转换效率为 13%,当入射抽运脉冲能量为 48 mJ 时,实验得到包括一阶斯托克斯脉冲在内的总散射光的转换效率为 34%,获得的二阶斯托克斯脉冲的转换效率为 23%。PbWO₄ 拉曼放大器是对外腔 PbWO₄ 拉曼激光器产生的一阶斯托克斯脉冲进行放大,实验获得的放大后一阶斯托克斯脉冲的最大输出能量为 11 mJ,放大倍数为 3.3。

关键词 激光器; 拉曼激光器; 受激拉曼散射; 钨酸铅(PbWO₄)晶体; 拉曼放大器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0502011

A PbWO₄ Solid-State Raman Amplifier Excited by 1064 nm Nanosecond Pulses

Zhang Wenhui Ding Shuanghong Ding Ze Jia Haixu Liu Jiajia

(School of Photo-Electronic Information Science and Technology, Yantai University,
Yantai, Shandong 264005, China)

Abstract The output properties of an extracavity PbWO₄ Raman laser are investigated. A PbWO₄ solid Raman amplifier is also presented. The extracavity PbWO₄ Raman laser and PbWO₄ solid Raman amplifier are both pumped by an electro-optically Q-switched Nd:YAG laser. For the extra cavity PbWO₄ Raman laser, with incident pulse energy of 40 mJ, the obtained maximum conversion efficiency of the first Stokes is 13%. When the pump energy is 48 mJ, the obtained maximum pulse energy and conversion efficiency of the second Stokes are 11 mJ and 23%, and the conversion efficiency of the full scattering laser is 34%. For the PbWO₄ solid Raman amplifier, the maximum output energy of the amplifying first Stokes pulse and the amplification factor are 11 mJ and 3.3.

Key words lasers; Raman laser; stimulated Raman scattering (SRS); lead tungstate (PbWO₄) crystal; Raman amplifier

OCIS codes 140.3550; 290.5910; 230.5298; 140.3280

1 引 言

随着激光技术的快速发展,越来越多的研究者追求新波长的激光输出。受激拉曼散射(SRS)效应是产生新波长激光,实现频率转换的有效方法^[1-4]。SRS有很多优点,如不需要相位匹配,能实现脉冲

压缩、提高光束质量等。近几年,许多高效的、以不同晶体作拉曼介质的全固态拉曼激光器被报道^[5-9],固体拉曼材料和固体拉曼激光器成为固体激光领域研究的热点^[10-11]。

外腔拉曼激光器是拉曼激光器的一种重要形

收稿日期: 2013-11-20; **收到修改稿日期**: 2013-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(10974168)、山东省高校科技计划(J09LA06)

作者简介: 张文会(1989—),女,硕士研究生,主要从事固体拉曼激光器等方面的研究。E-mail: zhw15054529139@163.com

导师简介: 丁双红(1970—),女,博士,副教授,主要从事激光物理及技术等方面的研究。

E-mail: shding@ytu.edu.cn(通信联系人)

式^[12-16],是把拉曼晶体放在一个独立的谐振腔内,不改变抽运激光器的结构。与内腔结构相比,外腔结构的设计与优化相对简单,可以通过优化外腔参数,实现外腔拉曼激光器的最佳运转,有选择的输出不同阶数的拉曼光^[17]。钨酸铅(PbWO_4)的拉曼频移为 901 cm^{-1} ,在中红外波段有较高的拉曼增益(1064 nm 对应的增益为 3.1 cm/GW),可以大尺寸生长且成本较低,具有良好的机械和光学特性,是一种性能优异、有应用前景的固体拉曼材料^[18-19]。2012年,奚坤等^[20]以 1064 nm 纳秒激光脉冲为抽运源,对外腔 PbWO_4 拉曼激光器进行实验研究,得到一阶斯托克斯光脉冲的最大转换效率为 24% 。

将一阶斯托克斯光脉冲(种子光脉冲)和平行的抽运光脉冲同时注入拉曼介质,由于拉曼介质具有拉曼增益,两脉冲相互作用过程就表现为一阶斯托克斯光脉冲在拉曼介质中的放大过程。1989年,Szatmari等^[21]以 690 nm 的纳秒脉冲为种子光,以 537 nm 的飞秒脉冲为抽运光,以 ArF 为拉曼介质对种子光进行放大,实验得到了 0.5 mJ 、 340 fs 的光脉冲。1992年,Glownia等^[22]同样以 ArF 为拉曼放大介质对 193 nm 的飞秒脉冲种子光进行放大,得到了约 0.3 mJ 、 300 fs 的光脉冲。1993年,Vander Veer等^[23]在研究无粒子数反转的光放大实验中,将 326 nm 的抽运光和 479 nm 的种子光注入加热的镉蒸气池中,得到放大的种子光,实验测得的放大倍数为 4.3 。同年,Momma等^[24]以 F_2 为拉曼增益介质,首次实现了 157 nm 的亚皮秒脉冲放大。与气体拉曼介质相比,固体拉曼介质的拉曼增益高、热传导性好、机械化学特性好,而且固体拉曼介质易与全固态激光技术结合。2007年,Ragunathan等^[25]用 $2.88\text{ }\mu\text{m}$ 抽运光和 $3.39\text{ }\mu\text{m}$ 种子光,用硅做拉曼晶体,研究了中红外硅拉曼放大器。2008年,Lisinetskii等^[26]用种子光方法,对硝酸钡拉曼放大

器进行了研究,在抽运能量为 208 mJ 时,实验得到放大后的一阶斯托克斯光的能量为 63 mJ 。2013年,徐洋等^[20]研究了光种子法钨酸钪晶体皮秒拉曼放大器,观察到拉曼放大器中的自净化作用对拉曼光光束质量的改善。2013年,Wang等^[28]用钨酸钡晶体做拉曼介质,研究了钨酸钡脉冲拉曼放大器的输出特性,在抽运脉冲能量为 200 mJ ,种子光信号能量为 8 mJ 时,实验得到放大后的一阶斯托克斯光最大的输出能量为 71.5 mJ 。由于拉曼放大器没有谐振腔,而外腔拉曼激光器的能量主要集中在谐振腔内,所以与外腔拉曼激光器相比,拉曼放大器拉曼介质的损伤阈值相对较高,拉曼放大器可以得到高能量的一阶斯托克斯光,且得到的一阶斯托克斯光的光束质量可以和外腔拉曼激光器的相比拟。以 PbWO_4 晶体为拉曼介质,研究了外腔 PbWO_4 拉曼激光器的输出特性,其次研究了 PbWO_4 固态拉曼放大器的输出特性。

2 实验装置

2.1 外腔 PbWO_4 拉曼激光器

如图1所示,虚线框内是外腔 PbWO_4 拉曼激光器的实验装置图,外腔 PbWO_4 拉曼激光器用主动调Q的Nd:YAG纳秒激光器作抽运源。半波片 HWP1 和格兰棱镜 P1 用来调节入射到外腔 PbWO_4 拉曼激光器的抽运脉冲的能量及其偏振方向,抽运脉冲经过 HWP1、P1 和焦距为 50 cm 的凸透镜 f1 后,聚焦耦合到 PbWO_4 1 晶体 ($20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 80\text{ mm}$) 中。拉曼外腔是平凹腔结构,由 M_1 和 M_2 构成, M_1 是曲率半径为 50 cm 的凹面镜, M_2 为平面镜,拉曼腔长度为 9 cm 。 M_1 到 f1 的距离为 17 cm , M_1 对 1064 nm 抽运光高透,对 1178 nm 一阶斯托克斯光高反。 M_2 对 1064 nm 的抽运光高反,对 1178 nm 的一阶斯托克斯光的反射率为 40% 。

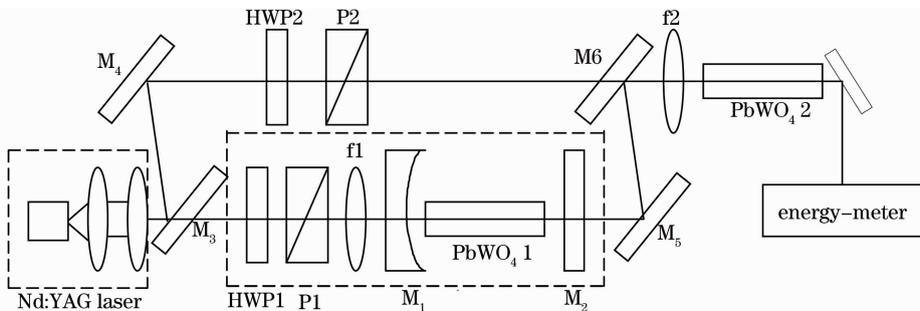


图1 PbWO_4 固体拉曼放大器的实验装置

Fig. 1 Schematic configuration of PbWO_4 solid-state Raman amplifier

2.2 PbWO₄ 固体拉曼放大器

PbWO₄ 固体拉曼放大器实验装置如图 1 所示。M₃ 是平面镜, M₄、M₅、M₆ 都是曲率半径为 2 m 的凹面镜。在抽运源和外腔拉曼激光器之间加入一个分光镜 M₃, M₃ 对 1064 nm 抽运脉冲的反射率为 80%, 即 M₃ 反射 80% 的能量作为固体拉曼放大器的抽运。M₄ 对 1064 nm 抽运脉冲高反, 半波片 HWP2 和格兰棱镜 P2 用于调节入射到固体拉曼放大器的抽运脉冲的能量和偏振方向。M₆ 对 1064 nm 抽运脉冲高透, 对 1178 nm 的一阶斯托克斯脉冲高反。M₃ 透射出 20% 的能量作为外腔拉曼激光器的抽运, 产生待放大的一阶斯托克斯光, 外腔拉曼激光器采用上述实验的外腔结构, 腔长及各镜子的参数都不变。M₅ 对 1064 nm 抽运光和 1178 nm 拉曼光都高反。外腔拉曼激光器产生 1178 nm 的拉曼光脉冲与抽运光脉冲在经过 M₆ 的反射和透射后空间重合, 两脉冲经过凸透镜 f2 聚焦耦合到晶体 PbWO₄ 2 中, 实验测量其输出激光的特性。其中, 透镜 f1 到 M₁ 的距离为 23 cm, M₂ 和 M₅ 之间的距离为 16.5 cm, M₅ 到 M₆ 的距离为 19 cm, M₄ 到 M₆ 的距离为 78 cm, M₆ 和 f2 之间的距离为 9 cm, f2 的焦距为 30 cm。实验中所用的晶体 PbWO₄ 1 与 PbWO₄ 2 都是由中国科学院上海硅酸盐所提供, 是沿 c 轴方向切割, 样品尺寸为 20 mm × 20 mm × 80 mm, 两通光面抛光且镀有减反膜。实验中所使用的能量计是以色列 OPHIR 公司生产的 Laserstar 能量计, 使用的示波器型号为 Agilent InfiniiVision DSO7104A(1 GHz)。

3 实验结果及讨论

3.1 外腔 PbWO₄ 拉曼激光器的输出特性

PbWO₄ 晶体的受激拉曼散射的激发方向是沿 a 轴或 b 轴, 调节 P1 的透光方向, 使 P1 的透光方向与 PbWO₄ 1 的 a 轴或 b 轴平行。外腔 PbWO₄ 拉曼激光器输出的单脉冲能量及相应的转换效率随入射抽运脉冲能量的变化如图 2 所示。实线表示总散射光脉冲的能量 E_s 及效率 n_s 的变化, 点线表示一阶斯托克斯脉冲的能量 E_{1s} 及效率 n_{1s} 的变化, 虚线表示二阶斯托克斯脉冲的能量 E_{2s} 及效率 n_{2s} 的变化。随着抽运能量的增加, E_{1s} 及 n_{1s} 先增加后减小, 一阶斯托克斯脉冲的最大能量为 6 mJ, 相应的最大转换效率为 13%。二阶斯托克斯脉冲能量 E_{2s} 及转换效率 n_{2s} 随抽运能量的增加而增加, 在抽运能量为 48 mJ 时, 测得的二阶斯托克斯脉冲的最大能量为 11 mJ, 最大转换效率为 24%, 包含一阶斯托克斯脉冲在内的总的散射效率 n_s 为 34%。由图 2 可得一阶斯托克斯脉冲的阈值约为 24 mJ, 二阶斯托克斯脉冲的阈值和斜效率分别为 27 mJ 和 50%。由于 PbWO₄ 晶体端面镀有减反膜, 腔内抽运功率很高, 产生的一阶斯托克斯脉冲的功率很高, 很容易达到产生二阶斯托克斯脉冲的阈值, 二阶斯托克斯脉冲的产生消耗了一阶斯托克斯脉冲, 所以一阶斯托克斯脉冲能量和转换效率先增加随后降低。而腔内的二阶斯托克斯脉冲的功率还达不到产生三阶斯托克斯光的阈值, 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。

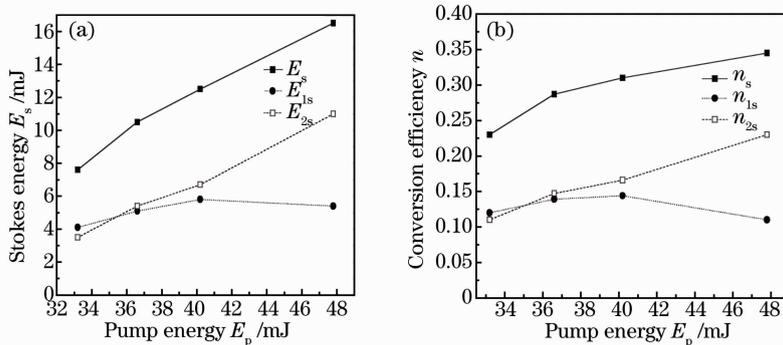


图 2 拉曼激光器的(a)输出脉冲能量及(b)转换效率随抽运能量的变化

Fig. 2 Dependence of (a) Stokes pulse energy or (b) conversion efficiency on incident pump pulse energy

图 3 给出了抽运脉冲、一阶斯托克斯和二阶斯托克斯脉冲的波形。抽运脉冲的宽为 29 ns, 一阶斯托克斯光的脉宽为 20.5 ns, 一阶拉曼光脉宽比抽运脉宽窄, 实现了脉冲压缩, 这是受激拉曼散射的特点之一。抽运脉冲的波形较平滑, 而一阶斯托克斯脉

冲前后沿有小的波包出现, 这是由于少量剩余的抽运光产生的。整个散射过程可分 3 个阶段: 1) 抽运能量还未达到受激拉曼散射的阈值, 自发拉曼散射产生一阶斯托克斯光, 不消耗抽运脉冲, 抽运脉冲保持输入的波形, 一阶斯托克斯脉冲无明显增长; 2)

抽运能量达到受激拉曼散射的阈值,抽运脉冲被快速消耗并转化成一阶斯托克斯脉冲,一阶斯托克斯脉冲迅速增长,直到抽运光脉冲能量低于一阶斯托克斯脉冲的阈值时,一阶斯托克斯脉冲结束;3) 当腔内的一阶斯托克斯脉冲能量达到产生二阶斯托克斯脉冲的阈值时,一阶斯托克斯光脉冲衰减,二阶斯托克斯脉冲产生并迅速增长,直到一阶斯托克斯光脉冲能量低于二阶斯托克斯脉冲的阈值时,二阶斯

托克斯脉冲结束。所以实验测得的一阶斯托克斯光脉冲比抽运光脉冲窄,二阶斯托克斯光脉冲比一阶斯托克斯光脉冲窄。衰减的一阶斯托克斯光脉冲与输入的抽运脉冲相互作用,使抽运脉冲有少量的剩余,致使一阶斯托克斯脉冲后沿出现小的波包。实验可以通过降低输出镜对一阶斯托克斯光的反射率等来实现外腔拉曼激光器的良好运转。

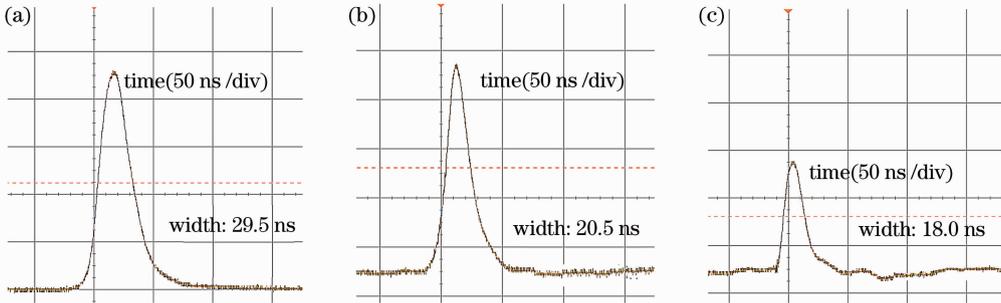


图 3 (a) 抽运光、(b)一阶斯托克斯光和(c)二阶斯托克斯光的脉冲波形图

Fig. 3 Temporal profiles of (a) pump pulse, (b) the first Stokes pulse and (c) the second Stokes pulse

3.2 PbWO₄ 固体拉曼放大器的输出特性

抽运光经过 P2 后变为线偏振光,偏振方向与 P2 的透光方向平行。在实验过程中,调节 P2,使入射到固体拉曼放大器中的抽运光能量最大。当待放大的拉曼光的单脉冲能量为 3.3 mJ 时,放大器的输出能量及相应的放大倍数随抽运能量的变化如图 4 所示。其中 l 表示凸透镜 f2 到晶体 PbWO₄ 2 的距离,实线是 l 为 20 cm 时对拉曼放大器输出的线性拟合,虚线是 l 为 24.5 cm 时的线性拟合。抽运脉冲能量在 15~55 mJ 范围内,放大后拉曼光的输出能量及其放大倍数随着抽运能量的增加而增加且呈线性增长。当 l 为 24.5 cm 时, l 更接近于 f2 的焦距,抽运光脉冲和待放大的拉曼光脉冲能更好地聚焦到 PbWO₄ 2 中,使耦合到晶体中的功率密度大,所以 l 为 24.5 cm 时的输出能量和放大率都要比 l

为 20 cm 时的大,当两束光的束腰位置相同且接近 PbWO₄ 2 的前端面时即可使输出能量最大,可以得到优化的 l 。过高的光功率可能使晶体损伤,为避免晶体损伤,实验中当 l 为 24.5 cm 时,抽运能量只增加到 40 mJ。当 l 为 20 cm 时,抽运脉冲能量为 50 mJ 时,实验测得放大后的拉曼光最大能量为 11 mJ,最大放大倍数为 3.3,且拉曼放大器输出的拉曼光的光束质量比外腔拉曼激光器产生的拉曼光的光束质量要好得多。为了提高放大倍数,可以考虑当 l 为 24.5 cm 时增加抽运脉冲能量或增大 l ,使抽运光和待放大的拉曼光在 PbWO₄ 2 的前端面耦合。由于钨酸铅晶体本身的脆性大,加工技术有限,所以实验所用的钨酸铅晶体尺寸较大,且在镀膜过程中晶体出现一些裂痕。若对晶体进行精加工,并优化 l ,增加抽运能量,实验效率还有很大的提升空间。

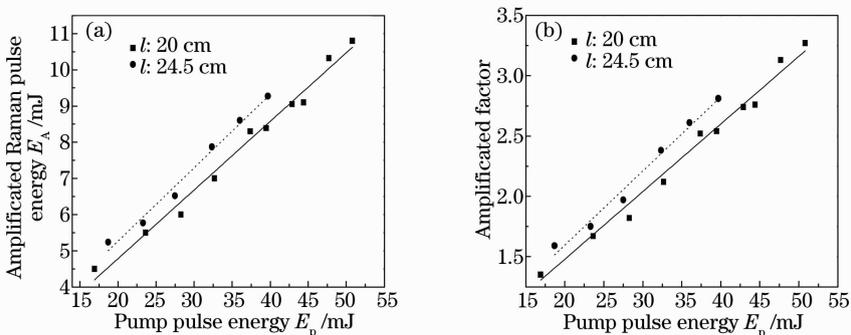


图 4 放大器的(a)输出能量及(b)放大倍数随抽运能量的变化

Fig. 4 (a) Amplified Raman pulse energy and (b) amplification factor with respect to pulse energy

4 结 论

本实验用 1064 nm 纳秒脉冲作为抽运源,研究了外腔 PbWO₄ 拉曼激光器和 PbWO₄ 固体拉曼放大器的输出特性。对于外腔 PbWO₄ 拉曼激光器,实验测量了一阶斯托克斯光脉冲和二阶斯托克斯光脉冲的输出能量及转换效率随抽运能量的变化并分析了其原因。当入射抽运能量为 40 mJ 时,实验测得 1178 nm 一阶斯托克斯光的最大转换效率为 13%,当入射抽运能量增加到 48 mJ 时,测得包括一阶斯托克斯光在内的总散射光的最大转换效率为 34%,得到 1324 nm 二阶斯托克斯光的最大转换效率为 23%。对于 PbWO₄ 固体拉曼放大器,实验得到的放大后的拉曼光的最大能量为 11 mJ,最大的放大倍数为 3.3。

参 考 文 献

- 1 E J Woodbury, W K Ng. Ruby laser operation in the near IR[J]. Proc IRE, 1962, 50(11): 2347—2355.
- 2 E O Ammann, C D Decker. 0.9-W Raman oscillator[J]. J Appl Phys, 1977, 48(5): 1973—1975.
- 3 T T Basiev, M N Basieva, A V Gavrilov, *et al.*. Efficient conversion of Nd:YAG laser radiation to the eye-safe spectral region by stimulated Raman scattering in BaWO₄ crystal[J]. Quantum Electron, 2010, 40(8): 710—715.
- 4 Wang Zhengping, Hu Dawei, Zhang Huaijin, *et al.*. External resonator SrWO₄ Raman laser excited by 1064 nm picosecond pulses[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 335—338.
王正平, 胡大伟, 张怀金, 等. 1064 nm 皮秒脉冲激发的外腔 SrWO₄ 拉曼激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 335—338.
- 5 G Eckhardt, D P Bortfeld, M Geller. Stimulated emission of Stokes and anti-Stokes Raman lines from diamond, calcite, and α -sulfur single crystals[J]. Appl Phys Lett, 1963, 3(8): 137—141.
- 6 A A Kaminskii, O Lux, H Rhee, *et al.*. New manifestations of $\chi^{(3)}$ nonlinear laser interactions in tetragonal LuVO₄ and YbVO₄ crystals attractive for SRS-converters and self-Raman lasers[J]. Laser Phys Lett, 2012, 9(12): 879—887.
- 7 Jing Xu, Chen Gao, Mao Rui. Investigation of characteristics of stimulated Raman scattering in Ba(NO₃)₂ crystal at ultraviolet wave band[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 1950—1955.
井旭, 陈高, 毛瑞. 硝酸钡晶体紫外波段受激拉曼散射特性研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 1950—1955.
- 8 Su Fufang, Zhang Xingyu, Wang Qingpu, *et al.*. Output properties of external resonator SrWO₄ Raman laser[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(5): 693—696.
苏富芳, 张行愚, 王青圃, 等. 外腔 SrWO₄ 拉曼激光器的输出特性[J]. 光学学报, 2006, 26(5): 693—696.
- 9 H B Shen, Q P Wang, X Y Zhang, *et al.*. 1st-Stokes and 2nd-Stokes dual-wavelength operation and mode-locking modulation in diode-side-pumped Nd:YAG/BaWO₄ Raman laser [J]. Opt Express, 2012, 20(16): 17823—17832.
- 10 Z J Liu, Q P Wang, X Y Zhang, *et al.*. A diode side-pumped KTiOAsO₄ Raman laser[J]. Opt Express, 2009, 17(9): 6968—6974.
- 11 Z H Cong, X Y Zhang, Q P Wang, *et al.*. The characteristics of intracavity Nd:YAG/KLu(WO₄)₂ Raman laser[J]. Laser Phys Lett, 2010, 7(12): 862—866.
- 12 R P Mildren, M Convery, 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.
- 13 S H Ding, X Y Zhang, Q E Wang, *et al.*. Highly efficient Raman frequency converter with strontium tungstate crystal[J]. IEEE J Quantum Electron, 2005, 42(1): 78—84.
- 14 S H Ding, X Y Zhang, Q E Wang, *et al.*. Theoretical and experimental research on the multi-frequency Raman converter with KGd(WO₄)₂ crystal [J]. Opt Express, 2005, 13(25): 10120—10128.
- 15 C Zhang, X Y Zhang, Q P Wang, *et al.*. Efficient extracavity Nd:YAG/BaWO₄ Raman laser[J]. Laser Phys Lett, 2009, 6(7): 505—508.
- 16 A Sabella, J A Piper, R P Mildren. Efficient conversion of a 1.064 μ m Nd:YAG laser to the eye-safe region using a diamond Raman laser[J]. Opt Express, 2011, 19(23): 23554—23560.
- 17 G M A Gad, H J Eichler. Highly efficient 1.3 μ m second-Stokes PbWO₄ Raman laser[J]. Opt Lett, 2003, 28(6): 426—428.
- 18 R Chipaux, M Géléoc. Optical anisotropy effects in lead tungstate crystals[R]. SCAN-9903010, 1998.
- 19 A A Kaminskii, H J Eichler, K Ueda, *et al.*. Properties of Nd³⁺-doped and undoped tetragonal PbWO₄, NaY(WO₄)₂, CaWO₄, and undoped monoclinic ZnWO₄ and CdWO₄ as laser-active and stimulated Raman scattering-active crystals[J]. Appl Opt, 1999, 38(21): 4533—4547.
- 20 Xi Kun, Ding Shuanghong, Zhang Jun, *et al.*. External resonator PbWO₄ Raman laser excited by 1064 nm nanosecond laser pulses[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0914003.
奚坤, 丁双红, 张俊, 等. 1064 nm 纳秒脉冲激发的外腔式 PbWO₄ 拉曼激光器[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0914003.
- 21 S Szatmari, F P Schafer. Generation of input signals for ArF Amplifiers[J]. Opt Soc Am B, 1989, 6(10): 1877—1883.
- 22 J H Glowina, M Kaschke, P P Sorokin. Amplification of 193-nm femtosecond seed pulses generated by third-order, nonresonant, difference-frequency mixing in xenon[J]. Opt Lett, 1992, 17(5): 337—339.
- 23 W E Van der Veer, R J Jvan Diest, A Donszelmann, *et al.*. Experimental demonstration of light amplification without population inversion[J]. Phys Rev Lett, 1993, 70(21): 3243—3246.
- 24 C Momma, H Eichmann, A Tunnermann, *et al.*. Short-pulse amplification in an F₂ gain module[J]. Opt Lett, 1993, 18(14): 1180—1182.
- 25 V Raghunathan, D Borlaug, R R Rice, *et al.*. Demonstration of a mid-infrared silicon Raman amplifier[J]. Opt Express, 2007, 15(22): 14355.
- 26 V A Lisinetskii, V A Orrlovich, H Rhee, *et al.*. Efficient Raman amplification of low divergent radiation in barium nitrate crystal [J]. Appl Phys B, 2008, 91(2): 299—303.
- 27 Xu Yang, Chen Meng, Li Zhengwei, *et al.*. Research of picosecond Raman amplifier in YVO₄ crystal [J]. Chinese J Lasers, 2010, 40(10): 1002005.
徐洋, 陈檬, 李政委, 等. 钽酸钇晶体皮秒拉曼放大器特性的研究[J]. 中国激光, 2010, 40(10): 1002005.
- 28 Cong Wang, Zhenghua Cong, Zhaojun Liu, *et al.*. Theoretical and experimental investigation of an efficient pulsed barium tungstate Raman amplifier at 1180 nm[J]. Opt Commun, 2014, 313: 80—84.