

doi: 10.3788/gzxb20124106.0708

KGW 晶体外腔式高功率 579 nm 喇曼黄光激光器

金辰杰^{a,b,c}, 李力飞^{a,c}, 任兆玉^{a,c}, 白晋涛^{a,b,c}, 白杨^{a,c}, 贺庆丽^b

(西北大学 a. 光子学与光子技术研究所暨光电技术与功能材料省部共建国家重点实验室培育基地;

b. 物理学系; c. 陕西省全固态激光及应用工程技术研究中心, 西安 710069)

摘 要:报道了 579 nm 高功率 KGd(WO₄)₂ 喇曼晶体外腔式喇曼黄光激光器的输出特性. 基于 808 nm 脉冲激光二极管侧面泵浦 Nd:YAG 陶瓷、腔内 BBO 电光晶体同步延迟调 Q 和 I 类临界相位匹配的 LBO 晶体腔外倍频方案, 并通过外腔式 KGW 晶体 Ng 轴二阶斯托克斯喇曼频移, 获得了 579.54 nm 黄光激光输出. 当脉冲信号重复频率为 1 kHz、532 nm 泵浦光最高平均功率为 5.02 W、脉冲宽度为 10.1 ns 时, 获得了最高平均功率 2.58 W、脉冲宽度 7.4 ns、峰值功率 348.6 kW 的 579.54 nm 二阶斯托克斯喇曼黄光激光输出; 532 nm 至 579.54 nm 的光-光转化效率为 51.4%、斜率效率为 54.8%, 光束质量因子 $M_{x-579.54}^2=5.829$ 、 $M_{y-579.54}^2=6.336$, 输出功率不稳定性小于 ±2.35%. 实验表明: 外腔式喇曼结构能够高效地获得喇曼黄光, 具有很高的光-光转化效率及良好的功率稳定性, 并通过脉冲 LD 结合同步延迟电光调 Q 可获得高重复频率、高平均功率、窄脉冲宽度和高峰值功率的黄光激光输出.

关键词:喇曼激光; 二阶斯托克斯; KGW 晶体; 黄光激光器

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)06-0708-5

0 引言

577 nm 黄色激光是人体氧血红蛋白的吸收峰波长^[1]. 目前, 利用受激喇曼散射 (Stimulated Raman Scattering, SRS) 获取喇曼 577 nm 波长附近的黄色激光器具有低成本、高光束质量、体积小等优点^[2-8], 已成为光动力疗法用于皮肤血管瘤、微静脉畸形等微创手术的首选激光源. 通过喇曼频移获得黄光激光光源的方法已有许多报道. 2005 年, R. P. Mildren 等人利用 Nd:YAG 激光晶体产生基频光, 经腔内倍频再泵浦喇曼晶体 KGd(WO₄)₂ 晶体 (KGW) 腔外喇曼频移, 获得平均功率 1.8 W, 波长 532 nm、555 nm、579 nm 和 606 nm 混合激光输出^[9-10]; 2011 年, J. Xia 等人利用 Nd:KGW 激光晶体产生基频光经腔内和频自喇曼, 获得平均输出功率 570 mW, 波长 561 nm 连续喇曼黄光输出^[5,8]; 2011 年, W. Liang 等人利用 Nd:YVO₄ 激光晶体产生基频光, 经腔内和频再经喇曼晶体 BaWO₄ 腔内喇曼频移, 获得平均功率 1.12 W, 波长 560 nm 连续拉姆黄光输出^[11]; 2011 年, Y. K. Bu 等人利用 Nd:YLF 产生基频光, 经倍频晶体 LBO 腔内倍频

再经 SrWO₄ 腔内喇曼频移, 获得平均功率 889 mW, 波长 579 nm 连续喇曼黄光输出^[12]. 然而上述报道多为内腔式结构, 激光晶体与喇曼晶体的热透镜效应会相互影响, 并进而影响谐振腔稳定性. 而外腔式喇曼激光器由于其外腔式结构特点, 可以有效地避免热效应的相互影响. 因此, 随着高质量喇曼晶体的发展, 全固态外腔式喇曼激光器受到广泛关注和研究. 其中, KGW 晶体因其具有较高的光学损伤阈值 (>10 GW/cm²)^[13] 和良好的导热系数 ($K_a=2.6$, $K_b=3.8$, $K_c=3.4$) 等优点, 成为外腔式喇曼的理想晶体. 目前, 关于波长 577 nm 左右的全固态外腔式喇曼激光器的报道主要集中在连续半导体激光 (LD) 泵浦的连续和高重复率的准连续激光器^[9-10], 输出功率基本在瓦级. 然而, 大多数报道都关注于提高黄光的输出功率, 峰值功率却只能达到几十千瓦.

Nd:YAG 陶瓷目前被认为是新一代杰出的激光介质, 不仅因其具有和 Nd:YAG 晶体相似的物理化学性质, 并且具有简单的制造工艺、较低的价格、较高的掺杂浓度和容易批量生产等优点, 被认为是有希望代替 Nd:YAG 晶体的新一代激光介质^[14].

基金项目:国家重点基础研究计划 (No. 2010CB434811) 和陕西省国际合作项目 (No. 2011KW19) 资助

第一作者:金辰杰 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为全固态激光器和非线性频率变换及其相关技术. Email: kjejkje@gmail.com

通讯作者:白杨 (1977-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为高功率光纤激光器、全固态激光器及其相关技术. Email: by@nwu.edu.cn

导 师:贺庆丽 (1960-), 女, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为光学薄膜及激光光动力技术. Email: heqingli@nwu.edu.cn

收稿日期:2011-12-29; **修回日期:**2012-01-16

本文使用脉冲 LD 侧面泵浦新型激光增益介质 Nd:YAG 陶瓷和同步延迟 BBO 晶体电光调 Q、LBO 晶体腔外倍频, 获得了 1 kHz、5 W 的高平均功率和 497 kW 高峰值功率的 532 nm 泵浦光, 在此基础上通过外腔式 KGW 晶体二阶斯托克斯喇曼频移方案, 获得了平均功率超过 2.58 W、脉冲宽度小于 8 ns、峰值功率超过 300 kW 的高平均功率、窄脉冲宽度和高峰值功率的千赫兹 577 nm 波长附近的黄光激光输出。

1 实验装置

全固态 579 nm 喇曼黄光脉冲激光器实验装置如图 1, M_1 镜和 M_2 镜构成 1 064 nm 基频激光谐振腔。平面镜 M_1 上镀制 1 064 nm 高反射膜 ($R > 99.8\%$), 平面镜 M_2 为 1 064 nm 输出镜, 通过实验, 最佳透过率为 $T = 67\%$ 。脉冲 LD 泵浦模块为侧面三向泵浦模块, 相邻的 LD 阵列之间的夹角为 120° , 脉冲方式泵浦, 泵浦脉冲重复频率在 1 Hz ~ 1 kHz 内可调。激光工作物质为多晶 Nd:YAG 陶瓷, 尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$, Nd^{3+} 掺杂浓度

1.2 at%, 激光棒的两个通光端面上镀制 1 064 nm 高透膜 (透射率 $T > 99.8\%$)。BBO 电光晶体尺寸为 $4 \times 4 \times 16 \text{ mm}^3$, 其两个通光端面镀制 1 064 nm 高透膜 ($T > 99.8\%$), 退压方式工作, $\lambda/4$ 波电压 (@1 064 nm) 为 $3.4 \pm 0.2 \text{ kV}$, 下降沿 $f < 10 \text{ ns}$, 延时在 30 ~ 300 μs 范围内连续可调, 重复频率在 1 Hz ~ 20 kHz 范围内可调。在 BBO 电光晶体和 LD 泵浦模块之间放置布儒斯特窗片, 窗片的直径为 20 mm、厚度为 2 mm, 镜面与谐振腔通光轴之间的夹角为 33.7° 。脉冲 LD 泵浦模块电源与 BBO 电光开关驱动同时与脉冲信号发生器连接, 由脉冲信号发生器向它们提供脉冲信号, 通过调节两个信号的延迟触发时间, 保证脉冲 LD 发射 808 nm 脉冲泵浦光与 BBO 晶体退压精确同步, 达到获得最窄脉冲宽度的目的。此外, 通过实验选择不同的腔长, 对比 1 064 nm 动态脉冲输出时, 发现在相同泵浦电流下, 腔长越短, 1 064 nm 基频光脉冲能量越大、脉宽越窄。因此在满足元件尺寸和方便调节的前提下, 1 064 nm 基频光谐振腔腔长选定为 145 mm。

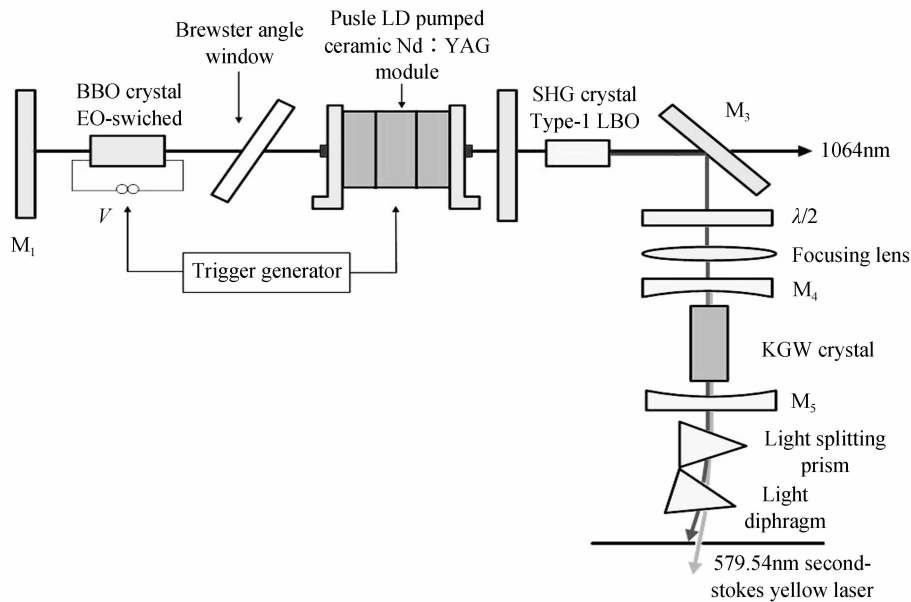


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

倍频晶体 LBO 采用一类临界相位匹配方式切割, 尺寸为 $4 \times 4 \times 14 \text{ mm}^3$, 最佳相位匹配角为 $\theta = 90^\circ$, $\phi = 11.2^\circ$, 晶体两个光学端面均镀有 1 064 nm 高透膜 (透射率 $T > 99.8\%$) 和 532 nm 高透膜 (透射率 $T > 99.5\%$)。晶体用铝箔包裹放置在通水的铝块中进行冷却, 水温控制在 $23.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

分光镜 M_3 镀有 1 064 nm 增透膜和 532 nm 高反膜, 在光轴上放置, 与光轴的夹角为 45° 。通过微调 532 nm $\lambda/2$ 波片, 保证 532 nm 激光的偏振状态

与 KGW 晶体 N_g 光轴方向平行。聚焦透镜的透射焦距为 100 mm, 两个光学端面上度有 532 nm 增透膜。

实验采用沿 b 轴切割的 $4 \times 4 \times 48 \text{ mm}^3$ 的 KGW 喇曼晶体, 晶体两端均镀制 500 ~ 600 nm 的高透膜 ($T > 99.8\%$ @ 500 ~ 600 nm)。 M_4 镜和 M_5 镜凹面曲率半径分别为 -150 mm 和 -200 mm, 与 KGW 晶体紧密排列以构成喇曼谐振腔。 M_4 镜上镀制 550 ~ 600 nm 高反膜 ($R > 99.8\%$, 550 ~ 600 nm)

和 532 nm 增透膜 ($R \sim 7\% @ 532 \text{ nm}$). M_5 镜上镀制 500~560 nm 高反膜 ($R > 95\% @ 500 \sim 600 \text{ nm}$) 和 579 nm 增透膜 ($R \sim 26\% @ 579 \text{ nm}$). 808 nm 脉冲 LD 侧面泵浦模块, I 型临界相位匹配倍频 LBO 晶体和 KGW 喇曼晶体是由 23°C 的外部循环水实施冷却, 温度控制准确度达到 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 以避免热透镜效应^[15-16]. 在实验中通过分光棱镜组将输出的 532 nm 绿光和 577 nm 黄光分开, 并通过小孔光阑只获得 577 nm 喇曼黄光输出.

在整个实验过程中, 使用美国相干公司的 FieldMax-TOP 型号功率计进行脉冲光功率测量, 使用美国 Tektronix TDS620B 型示波器测量激光脉冲宽度. 利用公式 $E = P_{\text{av}}/f$ 和 $P_{\text{peak}} = E/t_p$ (f 为重复率, t_p 为脉冲宽度), 可以计算出激光单脉冲的能量 E 和峰值功率 P_{peak} ^[17].

2 实验结果

实验通过 I 类临界相位匹配 $p(1064 \text{ nm}) + p(1064 \text{ nm}) \rightarrow s(532 \text{ nm})$ 得到 s 偏振态的 532 nm 泵浦光源. 最高平均功率 5.02 W, 脉冲重复率 1 kHz, 脉冲宽度 10.1 ns, 峰值功率 497.0 kW, 1064 nm 至 532 nm 的腔外倍频效率达到 18.5%.

实验中, 通过对 KGW 晶体底座的旋转调节及对 $\lambda/2$ 波片的微调, 使得 532 nm 泵浦光偏振方向平行于 KGW 晶体 N_g 光轴方向, 以选择 768 cm^{-1} 喇曼频移模式^[10]. 由海洋公司生产的 HR4000 型光谱仪测得输出激光光谱如图 2. 由图 2 可以看出, 输出激光主要由较弱的 555.46 nm 一阶斯托克斯光和较强 579.54 nm 二阶斯托克斯光组成.

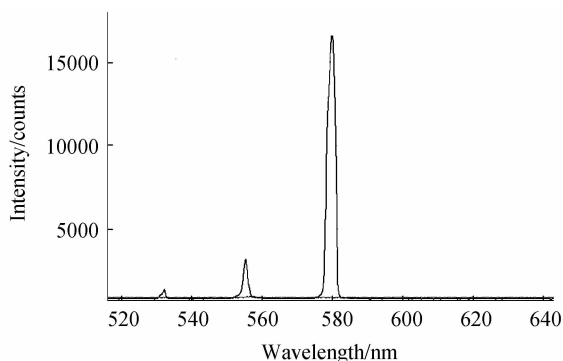


图 2 输出激光光谱
Fig. 2 Output laser spectra

图 3 为 579.54 nm 二阶斯托克斯光功率随输入的 532 nm 泵浦光功率的变化曲线. 由图可知, 579.54 nm 二阶斯托克斯光的泵浦光阈值功率为 257 mW, 在 532 nm 泵浦光最大平均功率为 5.02 W 时, 579.54 nm 最大的平均输出功率为 2.58 W, 532 nm 至 579.54 nm 的光-光转化效率 51.4%、斜

率效率 54.8%. 每隔 30 s 测量一次 579.54 nm 黄光激光的平均输出功率, 使用根均方误差方程 $\Delta \bar{P} = \left\{ \left[\sum_{i=1}^{120} (P_i - \bar{P})^2 \right] / n \right\}^{1/2}$, 测量 1 h 579.54 nm 输出功率不稳定性 $\Delta \bar{P} / \bar{P} < \pm 2.35\%$.

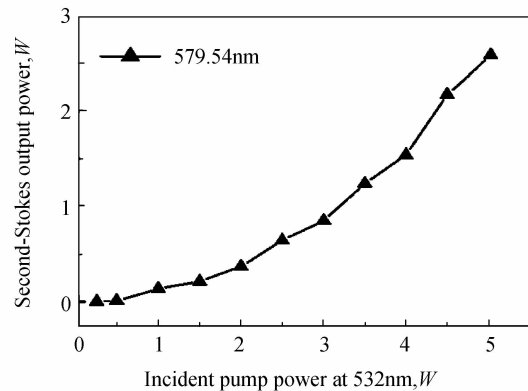


图 3 579 nm 平均输出功率随 532 nm 泵浦功率变化
Fig. 3 579 nm output power via 532 nm input power

图 4 为脉冲信号频率为 1 kHz 时, 测得的 579.54 nm 脉冲波形图. 实验中输出 579.54 nm 黄光脉冲宽度随着泵浦平均功率的提升而减小. 其原因主要是在固定重复频率条件下提高 LD 泵浦电流时, LD 的波长将与 Nd:YAG 陶瓷吸收峰发生偏移, 导致了 1064 nm 振荡阈值增大和脉冲宽度变窄, 从而致使 532 nm 倍频绿光和 579.54 nm 喇曼光脉冲宽度变窄. 因此, 当获得最大平均输出功率 2.58 W 时, 获得最小脉冲宽度 7.4 ns, 利用公式 $E = P_{\text{av}}/f$ 和 $P_{\text{peak}} = E/t_p$, 近似计算出峰值功率 348.6 kW.

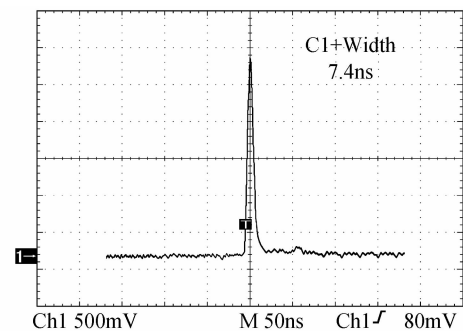


图 4 输出 579 nm 激光的脉冲波形
Fig. 4 Laser pulse of 579 nm laser

此外, 实验还使用美国 Photon Inc. 公司的 ModeScan1740 光束质量分析仪对 579.54 nm 喇曼黄光激光进行了光束质量测量. 图 5 为光斑质量及近场光束轮廓图. 在最大平均输出功率 2.58 W 时, 测得二阶斯托克斯光 579.54 nm 黄光的 M^2 因子为 $M_x^2-579.54 = 5.829$, $M_y^2-579.54 = 6.336$, 对应的 532 nm 泵浦光 M^2 因子为 $M_x^2-532 = 7.972$, $M_y^2-532 = 8.354$. 由于喇曼频移具有光束质量净化的作用^[18], 579.54 nm 二阶斯托克斯黄光激光的光束质量好于 532 nm 泵

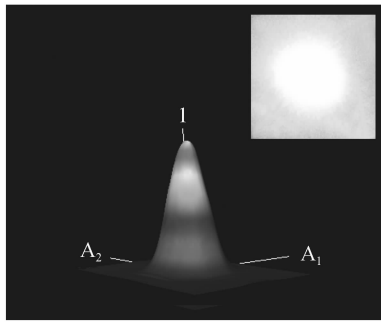


图 5 579 nm 黄激光的光斑质量

Fig. 5 Beam quality of 579 nm yellow laser

浦光的光束质量, 从上述 M^2 因子数据可以得到佐证。

3 结论

本文基于 808 nm 脉冲 LD 侧面泵浦 Nd : YAG 陶瓷, 腔内 BBO 电光晶体同步延迟调 Q 和 I 类临界相位匹配 LBO 晶体腔外倍频方案获得了平均功率 5 W、脉冲宽度 10 . 1 ns、重复频率 1 kHz 的 532 nm 泵浦光, 并通过腔外泵浦 KGW 喇曼晶体, 获得了一种简单有效的高功率、窄脉冲宽度、高峰值功率 577 nm 附近黄光激光输出的方案。当脉冲信号重复频率为 1 kHz、532 nm 泵浦光最大平均功率为 5.02 W 时, 获得了最高平均功率达到 2.58 W、脉冲宽度为 7.4 ns、峰值功率高达 348.6 kW 的 579.54 nm 二阶斯托克斯黄光激光输出, 平均功率不稳定性 $< \pm 2.35\%$, 532 nm 至 579.54 nm 光-光转化效率 51.4%、斜率效率 54.8%。在最高平均输出功率条件下, 测得 579.54 nm 黄光激光的光束质量因子为 $M_{x-579.54}^2 = 5.829$ 和 $M_{y-579.54}^2 = 6.336$ 。本文所讨论外腔式 KGW 喇曼激光, 可获得较高的脉冲重复频率, 较大的输出功率及良好的功率稳定性。因此可以很好地用于皮肤血管瘤和微静脉畸形等光动力治疗领域。

参考文献

- [1] ALSTCR T S, KOHN S R. Dermatologic lasers: three decades of progress [J]. *International Journal of Dermatology*, 1992, **31**(9): 601-610.
- [2] NIU Rong-lian, LIU Cheng-cheng, LIU Ying, *et al.* Thermal lensing effect of diode pumped Yb : KGd(WO₄)₂ based on convective heat transfer on the side surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 78-82.
牛荣莲, 刘成成, 刘莹, 等. 基于侧面热对流的 LD 泵浦 Yb : KGd(WO₄)₂ 热透镜效应研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(1): 78-82.
- [3] LI Yong-liang, YAO Jian-bo, HOU Zuo-feng, *et al.* LD pumped intracavity sum-frequency mixing continuous-wave yellow laser at 571.6 nm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **39**(4): 588-591.
李永亮, 姚建波, 侯作风, 等. LD 抽运腔内和频 571.6 nm 连续波黄光激光器[J]. *光子学报*, 2010, **39**(4): 588-591.
- [4] LIU Tian-hong, TAN Hui-ming, GAO Lan-lan, *et al.*

- Intracavity sum-frequency mixing with BIBO in 593 nm laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1195-1197.
- 刘天红, 檀慧明, 高兰兰, 等. BIBO 腔内和频 593 nm 激光器 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1195-1197.
- [5] ZHU Hai-yong, ZHANG Ge, ZHANG Yao-ju, *et al.* LD end-pumped c-cut Nd : YVO₄ laser at 589 nm generated by self-Raman conversion and frequency doubling [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(9): 094209.
朱海永, 张戈, 张耀举, 等. LD 端面抽运 c 切 Nd : YVO₄ 自喇曼倍频 589 nm 黄光激光研究 [J]. *物理学报*, 2011, **60**(9): 094209.
- [6] BU Yi-kun, ZHENG Quan, XUE Qing-hua, *et al.* Diode-pumped Nd : YVO₄ CW 593.5 nm yellow laser with LBO intracavity sum-frequency mixing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 801-804.
卜铁坤, 郑权, 薛庆华, 等. LD 泵浦 Nd : YVO₄/LBO 腔内和频连续黄光激光器 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(6): 801-804.
- [7] LEE A J, SPENCE D J, PIPER J A, *et al.* A wavelength-versatile, continuous-wave, self-Raman solid-state laser operating in the visible [J]. *Opt Express*, 2010, **18**(19): 20013-20018.
- [8] XIA J, LU Y F, ZHANG X H, *et al.* All-solid-state CW Nd : KGd(WO₄)₂ self-Raman laser at 561 nm by intracavity sum-frequency mixing of fundamental and first-Stokes wavelengths [J]. *Laser Phys Lett*, 2011, **8**(1): 21-23.
- [9] MILDREN R P, PASK H M, OGILVY H, *et al.* Discretely tunable, all-solid-state laser in the green, yellow, and red [J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(12): 1500-1502.
- [10] MILDREN R P, CONVERY M, PASK H M, *et al.* Efficient, all-solid-state, Raman laser in the yellow, orange and red [J]. *Opt Express*, 2004, **12**(5): 785-790.
- [11] BU Y K, TAN C Q, CHEN N. Continuous-wave yellow light source at 579 nm based on intracavity frequency-doubled Nd : YLF/SrWO₄/LBO Raman laser [J]. *Laser Phys Lett*, 2011, **8**(6): 439-442.
- [12] LIANG W, ZHANG X H, XIA J. Efficient continuous-wave laser at 560 nm by intracavity frequency summation of fundamental and first-stokes wavelengths in a Nd : YVO₄-BaWO₄ Raman laser [J]. *Laser Phys*, 2011, **21**(4): 667.
- [13] CERNY P, JELINKOVA H, ZVEREV P G, *et al.* Solid state lasers with raman frequency conversion. progress in quantum electron [J]. *Quantum Electron*, 2004, **28**(2): 113-143.
- [14] TAN Xue-chun, WU Zhi-chao, LIANG Zhu. 660 nm Single Wavelength Nd : YAG Ceramic Laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1762-1765.
谭雪春, 武志超, 梁柱. 660 nm 单一波长 Nd : YAG 陶瓷激光器 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(10): 1762-1765.
- [15] MASAKI Tsunekane, NOBORU Taguchi, HUMIO Inaba. Reduction of thermal effects in a diode-end-pumped, composite Nd : YAG rod with a sapphire end [J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(15): 3290-3294.
- [16] CHEN Yung-fu, KUO Hui-jean. Determination of the thermal loading of diode-pumped Nd : YVO₄ by use of thermally induced second-harmonic output depolarization [J]. *Opt Lett*, 1998, **23**(11): 846-848.
- [17] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. New York, USA: Springer Science+Business Media press, 2006: 474-478.
- [18] MURRAY J T, AUSTIN W L, POWELL R C. Intracavity Raman conversion and Raman beam cleanup [J]. *Opt Mater*, 1999, **11**(4): 353-371.

KGW External Resonator High Power 579 nm Raman Yellow Laser

JIN Chen-jie^{a,b,c}, LI Li-fei^{a,c}, REN Zhao-yu^{a,c}, BAI Jin-tao^{a,b,c}, BAI Yang^{a,c}, HE Qing-li^b

(a. *National Key Laboratory of Photoelectric Technology and Functional Materials (Culture Base)*,
Institute of Photonics & Photon-Technology; b. *Physics Department of Northwest University*; c. *Shaanxi Engineering
Technology Research Center for Solid State Lasers and Application, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

Abstract: The output characteristics of 579 nm high power resonator KGd(WO₄)₂ Raman yellow laser were reported. 579.54 nm yellow laser was generated based on 808nm pulse LD side-pumped ceramic Nd : YAG, BBO electro-optical Q-switched and type-I critical phase-matching LBO crystal extracavity frequency doubling project. With the 5.02 W, 10.1 ns and 1 kHz output power pumped at 532 nm, the laser produced high average power of 2.58 W and pulses of 7.4 ns duration second-Stokes wavelength at 579.54 nm. Conversion efficiency was 51.4% and slope efficiency was 54.8%. The beam quality factors M^2 of 579.54 nm were $M_{x-579.54}^2 = 5.829$, $M_{y-579.54}^2 = 6.336$ and power instability less than $\pm 2.35\%$. Experimental results indicate that external resonator Raman structure is an effective method for obtaining Raman yellow laser with its high optical-to-optical conversion and good power stability. Moreover, the additional usage of pulse LD with synchronous electro-optical Q-switch could generate high repetition rate, high average power, narrow pulse width and high peak power yellow laser.

Key words: Raman laser; Second-Stokes; KGW crystal; Yellow laser