

文章编号: 1000-2618(2007)03-0286-04

# LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体拉曼自变频 人眼安全 1.52 μm 激光器

杜晨林<sup>1</sup>, 阮双琛<sup>1</sup>, 于永芹<sup>2</sup>, 李兆虎<sup>1</sup>, 王志超<sup>1</sup>

(1. 深圳大学电子科学与技术学院, 深圳 518060 2. 深圳大学物理科学学院, 深圳 518060)

**摘要:** 采用激光二极管端面泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体和声光调 Q 技术, 获得 1.34 μm 脉冲激光, 利用基质材料 YVO<sub>4</sub> 晶体的拉曼频移效应, 将 1.34 μm 激光转变为 1.52 μm (人眼安全激光), 获得最大平均输出功率 930 mW, 相应光-光转换效率为 3.4%, 激光器输出的最短单脉冲宽度为 15.6 ns, 最高峰值功率为 3.02 kW.

**关键词:** 拉曼激光器; 人眼安全激光; Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体

**中图分类号:** TN 24 **文献标识码:** A

拉曼激光器是基于受激的拉曼散射 (SRS stimulated Raman scattering) 效应, 通过它能够得到固体激光器不能直接发射的波长, 与传统液体和气体受激拉曼材料相比, 固体拉曼材料具有优良的机械和化学稳定性, 寿命长、增益高、热导率高, 可以高频率工作. 人眼安全 1.52 μm 全固态激光器在军事和民用上都有广阔的应用前景, 主要包括激光测距、目标指示、激光雷达、激光扫描成像、激光遥感以及环境传感与监测等, 尤其是应用于激光测距机系统, 其器件结构紧凑, 体积小, 成本低, 寿命长<sup>[1]</sup>. 目前获得 1.5 μm 波段主要有 3 种途径: 直接输出、光学参量振荡 (OPO, optical parametric oscillator) 和受激拉曼散射 (SRS). 直接输出利用 Er<sup>3+</sup> 掺杂材料在 1.5 μm 波段的谱线, 但属于三能级结构, 阈值较高, 增益和光-光转换效率较低. 文献 [2] 利用 LD 泵浦 Er<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup> 共掺杂磷酸盐钇玻璃获得 43 mW 的连续 1.5 μm 激光输出, 斜率效率为 10.2%, 但是转换效率却低于 5%. 利用光参量振荡技术获得 1.5 μm 波段激光, 结构较复杂. 文献 [3-4] 利用 LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体, 通过 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 和 KTP 光参量振荡, 获得了 1.56 W 和 1.2 W 的 1.57 μm 激光输出. Zendzian W 等利用 LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 x 切向 KTP

光参量振荡实现了 1.5 W 平均功率、4.5 ns 脉宽、重复频率为 40 kHz 的 1.57 μm 激光输出<sup>[5]</sup>.

目前利用受激拉曼散射产生 1.5 μm 波段激光的技术中, 激光介质和拉曼频移介质是独立的. 采用 1.06 μm Nd:YAG 激光器抽运高压甲烷气体 (拉曼介质) 可获得 1.54 μm 激光, 但由于受气体热击穿限制, 重复率器件须气体循环, 同时拉曼盒体积增大, 密封更困难, 严重限制了器件的工作重复率, 也难以进一步提高输出能量. 利用 Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 拉曼晶体将 1.32 μm Nd:YAG 激光转换到 1.56 μm 人眼安全波长, 是 20 世纪 90 年代发展起来的新技术, 克服了气体拉曼激光器的缺陷<sup>[1]</sup>. 掺 Nd<sup>3+</sup> 钒酸盐激光晶体 (如 Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:GdVO<sub>4</sub> 等) 具有发射截面大、吸收系数高、输出光为线偏振光等优点, 最适用于激光二极管泵浦的全固态激光器<sup>[6]</sup>. 尤其是, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体已经成为在 DPSSL 中应用最广泛的激光晶体. 然而, 关于掺 Nd<sup>3+</sup> 钒酸盐激光晶体的研究仅局限于 0.91 μm、1.06 μm 和 1.34 μm 波段激光产生方面. Kaminskii A A 报道了钒酸盐晶体 YVO<sub>4</sub> 和 GdVO<sub>4</sub> 具有优良的三阶 x<sup>(3)</sup> 非线性特性, 可以用作可见和近红外波段内高效的拉曼激光频移器<sup>[7]</sup>. 因此, 掺 Nd<sup>3+</sup> 钒酸盐激光晶体可以将激光介质和拉曼频移介质合二为一, 特别是在产

收稿日期: 2007-01-05 修回日期: 2007-03-15

基金项目: 广东省高等学校自然科学重点资助项目 (05Z019); 深圳大学科研启动基金资助项目 (200724); 深圳市科技计划资助项目 (200429)

作者简介: 杜晨林 (1976-), 男 (汉族), 河北省井陘县人, 深圳大学副教授、博士. E-mail: ckl@szu.edu.cn

通讯作者: 阮双琛 (1963-), 男 (汉族), 深圳大学教授、博士生导师. E-mail: scnuar@szu.edu.cn

生高效的 1.5 μm 波段激光方面更具有潜在的应用价值. 本文利用声光调 Q 技术和平凹谐振腔, 采用 LD 端面泵浦 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体产生 1.342 nm 激光, 同时利用激光晶体基质材料 YVO<sub>4</sub> 的拉曼频移效应, 获得了最大平均功率为 930 mW 的 1.52 μm 人眼安全激光输出.

## 1 实验装置

激光器实验装置如图 1. 泵浦源为光纤耦合输出的大功率半导体激光器, 光纤输出口径和数值孔径 (N.A.) 分别为 0.4 mm 和 0.22. 室温下的峰值波长在 808 nm 附近. 从光纤输出的泵浦光经过特定的光学聚焦系统, 在激光晶体前表面附近被聚焦成半径约为 200 μm 的泵浦光斑. 激光器谐振腔采用平凹腔结构, 腔长约为 125 mm. 泵浦端腔镜 M<sub>1</sub> 的曲率半径为 250 mm, 其前表面 (平面) 镀 808 nm 增透膜, 后表面 (凹面) 镀 808 nm 高透膜和 1.3~1.5 μm 高反膜 (反射率大于 99%). 平面输出镜 M<sub>2</sub> 镀 1.34 μm 高反膜, 对 1.52 μm 的光部分透射. 为了抑制激光晶体的 1.06 μm 谱线, M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 对 1.06 μm 的透过率均大于 90%. 激光晶体为 a 切向的、掺杂质量分数为 0.3% 和尺寸为 3 mm × 3 mm × 8 mm 的 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体, 两个通光端面均镀 808 nm 和 1.342 nm 增透膜. 为去除激光晶体在大功率泵浦下产生的大量的热量, 减小激光晶体的热效应, Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体侧面用铝箔包裹置于紫铜块内, 并用循环水冷却. 声光 Q 开关两端镀 1.34 μm 增透膜, 调制频率在 1~100 kHz 范围内连续可调.

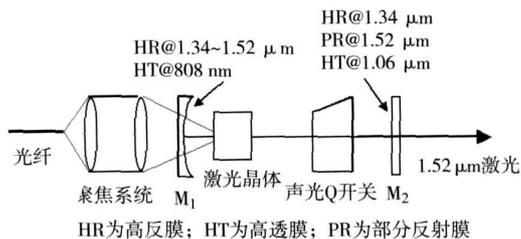


图 1 实验装置图

Fig 1 Schema of the experimental setup

## 2 实验结果及讨论

通过实验优化, 声光 Q 开关的重复频率和输出镜 M<sub>2</sub> 对 1.52 μm 的透过率分别被确定为 18.7 kHz

和 17.8%. 图 2 为由输出镜 M<sub>2</sub> 输出的激光平均功率与入射泵浦功率的关系. 在泵浦功率小于 22 W 时, 激光输出功率的斜效率非常小, 这是因为腔内的 1.34 μm 激光功率密度还没有达到能够通过拉曼频移产生 1.52 μm 谱线的阈值功率密度, 输出的激光仅仅是漏出谐振腔外的少量 1.34 μm 激光. 当泵浦功率高于 22 W 时, 1.34 μm 激光开始通过拉曼频移产生 1.52 μm 激光, 激光输出功率随泵浦功率迅速增大. 当泵浦功率为 27.6 W 时, 获得最大平均输出功率为 930 mW, 光-光转换效率为 3.4%. 由于实验中所使用的 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体没有镀 1.52 μm 增透膜, 所以谐振腔内的损耗没有减小到最低程度. 今后如果使用镀 1.52 μm 增透膜 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体, 相信一定能够大大提高转换效率.

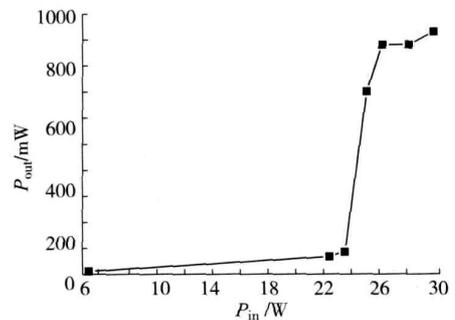


图 2 平均输出功率与泵浦功率的变化关系

Fig 2 Average output power versus incident pump power

利用光谱仪 (Advantest Q8384) 对输出激光的光谱进行了测试. 图 3 为在不同泵浦功率下输出激光的光谱图. 当泵浦功率为 20.9 W 时, 输出激光中刚刚有 1.52 μm 谱线产生, 此时激光输出功率为 67 mW, 但主要成分是 1.34 μm 谱线, 如图 3(a). 稍微增大泵浦功率到 21.9 W 时, 如图 3(b), 1.52 μm 谱线的强度便超过了 1.34 μm 谱线, 激光输出功率为 86 mW. 在泵浦功率为 27.6 W 时, 输出激光中基本上全部是 1.52 μm 谱线成分, 如图 3(c), 此时获得最大 1.52 μm 激光输出功率为 930 mW. 利用 InGaAs PN 光电探测器 (Newport 818-BB-35) 和 300 MHz 数字示波器 (Tektronix TDS 3032B) 对输出激光脉冲进行了探测. 图 4 给出了激光脉冲宽度和峰值功率随泵浦功率的变化关系. 在泵浦功率为 26 W 时, 分别获得 15.6 ns 的最短单脉冲宽度和 3.02 kW 的最高峰值功率, 单脉冲能量为 47 μJ. 图 5 与图 6 为此时的脉冲序列和单脉冲波形图.

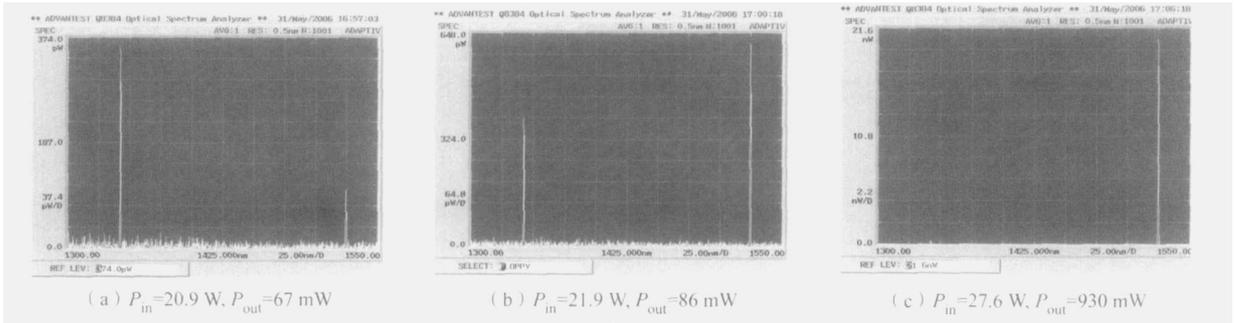


图 3 不同泵浦功率下输出激光的光谱图

Fig 3 Output spectra under different pump powers

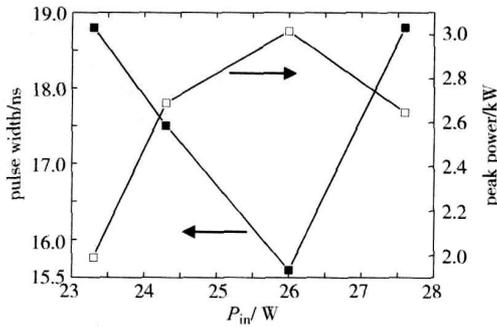


图 4 不同泵浦功率下，输出激光的脉冲宽度和峰值功率

Fig 4 Pulse width and peak power under different incident pump powers

结 语

在结构简单的平凹谐振腔中，利用 LD 端面泵浦 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体和声光调 Q 技术产生准连续脉冲 1.34 μm 激光，同时利用激光晶体基质材料 YVO<sub>4</sub> 的拉曼频移效应，将 1.34 μm 激光转变为 1.52 μm 波长人眼安全激光，分别获得的最大平均输出功率为 930 mW，最短单脉冲宽度为 15.6 ns，最高峰值功率为 3.02 kW。

参考文献:

- [1] 金 锋. 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
- [2] 柳祝平, 胡丽丽, 戴世勋, 等. LD 泵浦的 Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> 共掺杂磷酸盐钪玻璃激光性质 [J]. 发光学报, 2002, 23(3): 238-242
- [3] Chen Y F, Chen Y C, Chen S W, 等. 高功率高效的激光二极管泵浦 Nd: YVO<sub>4</sub>/KTP/C<sup>4+</sup>: YAG 被动调 Q 人眼安全激光器 [J]. 光通信, 2004, 234(1-6): 337-342 (英文版).
- [4] Chen Y F, Chen S W, Tsai L Y, 等. 高效亚纳秒被动调 Q Nd: GdVO<sub>4</sub> 激光器泵浦的腔内光参量振荡器 [J]. 应用物理 B, 2004, 79(7): 823-825 (英文版).
- [5] Zendzian W, Jabczynski J K, Wachulak P, 等. 高重复频率腔内泵浦 KTP 晶体 1572nm 光参量振荡器 [J]. 应用物理 B, 2005, 80(3): 329-332 (英文版).
- [6] 杜晨林, 于永芹, 张怀金, 等. Nd: GdVO<sub>4</sub> 的光谱性质及上转换发光实验研究 [J]. 深圳大学学报理工版, 2004, 21(2): 107-111
- [7] Kaninskii A A, Ueda K, Eichler H J 等. 四方晶系钒酸盐晶体 YVO<sub>4</sub> 和 GdVO<sub>4</sub>—新型高效的三阶非线性拉曼激光材料 [J]. 光通信, 2001, 194(1-3): 201-206 (英文版).

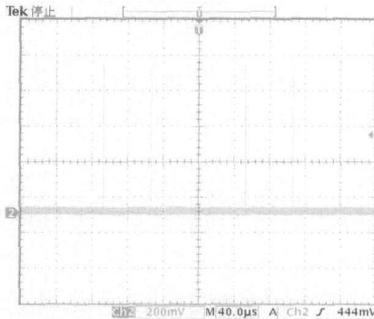


图 5 脉冲序列图

Fig 5 Stable pulse train

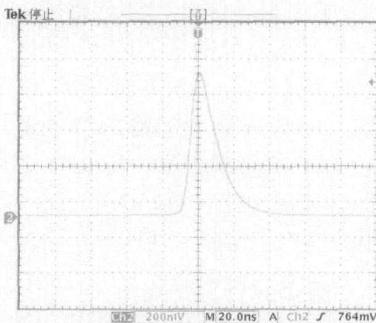


图 6 单脉冲波形图

Fig 6 Pulse profile at the incident pump power

Abstract 1000-2618(2007)03-0289-EA

# LD-pumped Raman self-frequency-shift eye-safe Nd: YVO<sub>4</sub> laser at 1.52 μm

DU Chen-lin<sup>1</sup>, RUAN Shuang-chen<sup>1</sup>, YU Yong-qin<sup>2</sup>,  
LI Zhao-hu<sup>1</sup>, and WANG Zhi-chao<sup>1</sup>

1) College of Electronic Science and Technology

Shenzhen University

Shenzhen 518060

P. R. China

2) College of Physics

Shenzhen University

Shenzhen 518060

P. R. China

**Abstract** The 1.34 μm pulsed radiation was generated with an acousto-optical Q-switched Nd: YVO<sub>4</sub> laser end-pumped by laser diode-array. Simultaneously it was converted into 1.52 μm radiation through Raman frequency-shift effect by YVO<sub>4</sub> crystal. The maximum average output power at 1.52 μm was obtained to be 930 mW, with the corresponding optical conversion efficiency of 3.4%. Additionally, the shortest pulse width and the highest peak power were obtained to be 15.6 ns and 3.02 kW, respectively.

**Key words** Raman lasers, eye-safe laser, Nd: YVO<sub>4</sub> crystals

## References

- [1] JN Feng. Development of eye-safe Raman lasers [J]. Development of Lasers and Optoelectronics, 2003, 40(6): 40-42 (in Chinese).
- [2] LIU Zhu-ping, HU Li-li, DAI Shi-xun, et al. Laser Properties of Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> co-doped erbium phosphate glass pumped by laser diode [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2002, 23(3): 238-242 (in Chinese).
- [3] Chen Y F, Chen Y C, Chen S W, et al. High power efficient diode pumped passively Q-switched Nd: YVO<sub>4</sub>/KTP/Cr<sup>4+</sup>: YAG eye safe laser [J]. Opt Commun, 2004, 234(1-6): 337-342.
- [4] Chen Y F, Chen S W, Tsai L Y, et al. Efficient sub-nanosecond intracavity optical parametric oscillator pumped with a passively Q-switched Nd: GdVO<sub>4</sub> laser [J]. Appl Phys B, 2004, 79(7): 823-825.
- [5] Zenzian W, Jabczynski J K, Wachuk P, et al. High repetition-rate intracavity-pumped KTP OPO at 1572 nm [J]. Appl Phys B, 2005, 80(3): 329-332.
- [6] DU Chen-lin, YU Yong-qin, ZHANG Hua-rjin, et al. Spectroscopic characterization and upconversion luminescence of a new laser crystal Nd: GdVO<sub>4</sub> [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2004, 21(2): 107-111 (in Chinese).
- [7] Kaminskii A A, Ueda K, Eichler H J, et al. Tetragonal vanadates YVO<sub>4</sub> and GdVO<sub>4</sub>—new efficient X(3) materials for Raman lasers [J]. Opt Commun, 2001, 194(1-3): 201-206.

【中文责编: 坪 梓; 英文责编: 卫 栋】