

Nd:GYSGG/YVO₄ 双波长人眼安全波段内腔拉曼激光器

王 慧,张会峰,郭 涛

(空军航空大学 航空理论系,吉林 长春 130022)

摘要:以 Nd:GYSGG 晶体为激光增益介质, a 切割 YVO₄ 晶体为拉曼增益介质, 利用 Nd:GYSGG 晶体的双波长激光运转特性实现声光调 Q 1.5 μm 人眼安全波段双波长内腔拉曼激光器。为克服 Nd:GYSGG 晶体严重的热透镜效应对激光器功率的限制, 实验确定其同带泵浦吸收峰位置及吸收系数, 采用同带泵浦方式减轻热效应。吸收 882.9 nm 泵浦光功率 17.1 W 时, 在 20 kHz 的脉冲重复频率下获得 1.44 W 的 1.5 μm 双波长输出, 转换效率 8.4%, 光束质量因子 $M^2=2.4$; 棱镜分光测得其中 1 497 nm 和 1 516 nm 功率分别为 0.55 W 和 0.89 W, 二者脉冲宽度相近, 均为 15.3 ns 左右。与 808 nm 传统泵浦相比, 同带泵浦方式下激光器的输出功率及光束质量均得到明显提升。

关键词: 双波长激光器; 拉曼激光器; 人眼安全波段

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3512-05

Dual-wavelength eye-safe laser based on Nd:GYSGG/YVO₄ intracavity stimulated Raman conversion

Wang Hui, Zhang Huifeng, Guo Tao

(Development of Aviation Theory, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: A compact AO Q-switched dual-wavelength laser operated in 1.5 μm eye-safe region was demonstrated via stimulated Raman scattering of a -cut YVO₄ crystal within an end-pumped dual-wavelength Nd:GYSGG laser cavity. The in-band pumping absorption peak and coefficient were measured to conduct efficient pumping, thus overcoming the drawback of short thermal focal length of Nd:GYSGG crystal and scaling up the eye-safe output. 1.44 W of simultaneous output at 1 497 and 1 516 nm was obtained under absorbed pump power of 17.1 W at the pulse repetition rate of 20 kHz, corresponding to a conversion efficiency of 8.4%. The 1 497 nm and 1 516 nm fractions are 0.55 and 0.89 W, respectively, measured after split by a prism. The beam quality factor M^2 is 2.4 at the maximum output. Compared with 808-nm traditional pumping, both the laser output power and the beam quality are greatly improved.

Key words: dual-wavelength laser; Raman laser; eye-safe region

收稿日期:2015-04-12; 修订日期:2015-05-15

作者简介:王慧(1975-),女,副教授,博士,主要从事激光技术、光学检测和导航技术方面的研究。Email:315_wang_hui@sina.com

0 引言

双波长激光光源在差分吸收激光雷达和非线性光学频率变换,包括和频上转换产生可见光以及差频下转换产生中红外以至太赫兹波段辐射源等方面具有重要的应用背景,特别是 1.5 μm 附近波段激光具有人眼安全特性,其应用价值更为突出。目前产生相近双波长激光光源的常用方法如下。其一是依靠宽增益谱的激光增益介质直接发射双波长激光,常见增益介质包括掺 Yb、Er、Tm 等离子体的有源光纤以及钛宝石晶体、Li:SAF 晶体等固体增益介质^[1-4],通过对增益谱内两个不同波长分别给予正反馈,实现双波长激光的振荡输出。由于要对两个激光波长分别给予反馈,涉及到分光以及多个反射镜或光栅等元件,此类激光器的结构多比较复杂。另一种是非线性光学频率变换方法,通过近简并点的光学参量振荡器(OPO)以及双信号光设计的准相位匹配(QPM)OPO 实现双波长输出^[5-6],但近简并点 OPO 的稳定性往往难以保证,特殊设计的 QPM 周期极化晶体成本也非常高。此外,受激拉曼散射(SRS)是非线性光学频率变换技术中重要的一种^[7]。2012 年, Hongbin Shen 等人报道了在 Nd:YVO₄ 激光器腔内插入 GdVO₄ 晶体,利用两晶体不同的拉曼频移同时获得共 1.62 W 的 1 522 nm 和 1 524 nm 双波长斯托克斯光输出,转换效率 7.5%^[8]。

Nd:GYSGG 晶体是由中国科学院安徽光学精密机械研究所发明的新型激光晶体,其最初的用途在于抗辐射特性^[9-10];然而,在研究过程中,其双波长激光特性引起了激光技术领域研究人员的极大关注。2011 年, K. Zhong 等人报道了端泵 Nd:GYSGG 激光器获得 10.1 W 的 1 058 nm 和 1 061 nm 双波长激光输出^[11];此后,该组研究人员又报道了利用该晶体的 ⁴F_{3/2}→⁴I_{13/2} 跃迁产生 1 321 nm 和 1 336 nm 双波长激光输出的实验结果^[12]。文中报道以端泵声光调 Q Nd:GYSGG 晶体 1.3 μm 波段的双波长激光作为基频光, YVO₄ 晶体为拉曼增益介质,实现 1.5 μm 人眼安全波段的双波长斯托克斯光输出;考虑到 Nd:GYSGG 晶体热透镜焦距较小这一特性给高功率运转造成的障碍,对晶体 880 nm 附近的同带泵浦吸收峰及吸收系数进行测定并实现同带泵浦方式下激光器的高效运转;17.1 W 泵浦功率下,脉冲重复频率

20 kHz 时, 1 497 nm 和 1 516 nm 双波长斯托克斯光最高输出功率 1.44 W。

1 实验装置

图 1 为双波长拉曼激光器的实验装置示意图,其中泵浦源 LD 为光纤耦合输出的半导体激光器阵列,尾纤直径 400 μm,数值孔径(NA)0.22;使用两片焦距分别为 40 mm 和 50 mm、镀有 800~900 nm 增透膜($T>95\%$)的双凸透镜将泵浦光聚焦到激光增益介质 Nd:GYSGG 晶体中,泵浦光斑半径~250 μm。Nd:GYSGG 晶体切割方向为 <111>,尺寸 3 mm×3 mm×6 mm,掺杂浓度 1.1 at.%,晶体两端面均镀有 800~1 100 nm($T>95\%$)和 1 300~1 600 nm($T>99.8\%$)增透膜系。为获得 1.5 μm 人眼安全波段激光输出,采用一块尺寸为 3 mm×3 mm×20 mm 的 a 切割 YVO₄ 晶体作为拉曼增益介质, YVO₄ 晶体两端面同样镀有 800~1 100 nm($T>95\%$)和 1 300~1 600 nm($T>99.8\%$)增透膜系。实验中两块晶体均用铝箔包裹并置于铝制夹具中,夹具通循环水冷却,水温保持在 10℃。为实现调 Q 脉冲运转,提高受激拉曼散射转换效率,使用长 20 mm 的风冷声光 Q 开关(Gooch I-QS080 系列)对激光器进行主动调 Q, Q 开关两端面镀有 1 000~1 600 nm($T>99.5\%$)增透膜系,驱动超声波频率 80 MHz,功率 10 W,有效孔径 1 mm。平面全反镜 M1 和曲率半径 100 mm 的凹面输出镜 M2 构成 1.3 μm 基频激光和 1.5 μm 斯托克斯光共用的平凹谐振腔,其中 M1 镜镀 800~1 100 nm 防反($R<5\%$ @800~900 nm、 $R<30\%$ @1 064 nm)、1 300~1 600 nm 高反($R>99.5\%$)膜系,凹镜 M2 镀 1 300~1 400 nm 高反($R>99.5\%$)、1 500~1 600 nm 透过率~5%的膜系,谐振腔长 79 mm。

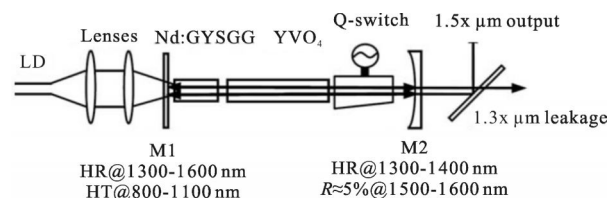


图 1 Nd:GYSGG/YVO₄ 双波长内腔拉曼激光器实验装置示意图

Fig.1 Schematic of the Nd:GYSGG/YVO₄ dual-wavelength eye-safe intracavity Raman laser

2 实验结果与分析

Nd:GYSGG 晶体的一个主要缺点在于其热透

镜焦距很短^[13],高泵浦功率下过短的热透镜焦距导致谐振腔不能工作在稳区之内,因而限制了激光器功率的提升。同带泵浦方式是减轻热负载的最有效方法之一^[14-15],目前关于 Nd:GYSGG 晶体激光输出的报道均采用 808 nm 传统泵浦方式,其同带泵浦的吸收峰和吸收系数尚没有相关报道。因此,首先分别使用两台发射线宽~2.5 nm 的光纤耦合输出半导体激光器作为泵浦源,通过控制温度改变其发射波长,对 Nd:GYSGG 晶体在 874~888 nm 范围内的吸收系数进行了测量,测量结果如图 2 所示。可以看出,Nd:GYSGG 晶体的同带泵浦吸收峰位于 882.9 nm,该 6 mm 长晶体样品对入射泵浦光的吸收百分比为 49.7%,对应峰值吸收系数 1.14 cm^{-1} 。考虑到 Nd:GYSGG 晶体的上能级寿命较长,参考文献[9]中给出掺杂浓度 2.4% 的晶体上能级寿命测量值仍长达 220 μs ,因此可进一步提高晶体的掺杂浓度以改善泵浦吸收,同时不会对激光效率带来明显的不利影响。

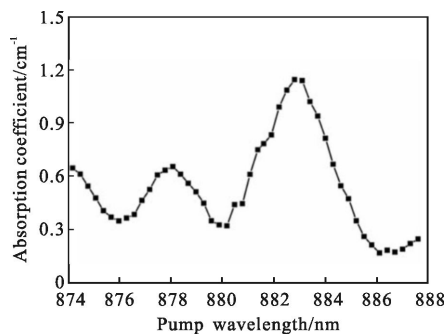


图 2 1.1 at.% 掺杂 Nd:GYSGG 晶体在 880 nm 同带泵浦吸收带附近的吸收系数

Fig.2 Absorption spectrum of the 1.1 at.% doped Nd:GYSGG crystal around 880 nm

确定同带泵浦吸收峰后,首先使用中心波长 882.9 nm 的半导体激光器阵列作为泵浦源对激光器的输出功率特性进行研究,图 3 给出利用 Molectron EPM1000 激光功率计测得的 $1.5 \mu\text{m}$ 双波长激光平均输出功率相对吸收泵浦功率的变化关系。在 882.9 nm 同带泵浦下, $1.3 \mu\text{m}$ 基频光的阈值~1.4 W。脉冲重复频率(PRF)10 kHz 和 20 kHz 时,SRS 阈值为 8.2 W 吸收泵浦功率,重频 30 kHz 时由于单脉冲能量的降低,SRS 阈值升至 9.1 W。实验中,在 PRF=20 kHz、吸收泵浦功率 17.1 W 时获得了最高平均输出功率

1.44 W,转换效率 8.4%,为避免晶体损伤,没有继续增加泵浦。在 10 kHz 和 30 kHz 的重频下,相同泵浦功率下的平均输出功率分别为 1.17 W 和 1.21 W。用刀口法测得最高输出功率 1.44 W 时其水平方向上的光束质量因子 $M^2=2.4$;记录其 5 min 内的功率不稳定度为 3.7%(均方根值)。同时,也进行了 808 nm 传统泵浦方式的对照实验,泵浦光输出尾纤参数以及泵浦光斑不变。传统泵浦方式下,SRS 阈值为 9.4 W 吸收泵浦功率,在所用的最高泵浦功率 12.9 W 下 $1.5 \mu\text{m}$ 斯托克斯光平均输出功率 0.63 W,此时 $M^2=3.3$,继续增加泵浦功率则输出功率发生下降,根据谐振腔稳定性判据可知此时 Nd:GYSGG 晶体中热透镜焦距已小于 60 mm。对照实验结果说明,与 808 nm 传统泵浦方式相比,同带泵浦方式大幅提升了热效应决定的泵浦功率上限,从而有助于获得更高的输出功率,同时也对输出光束质量起到了明显的改善作用。

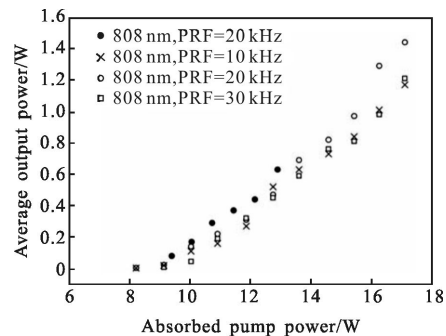


图 3 不同重频下 $1.5 \mu\text{m}$ 双波长激光平均输出功率相对吸收泵浦功率的变化关系

Fig.3 $1.5 \mu\text{m}$ dual-wavelength output powers as functions of absorbed pump power with different PRFs

需要说明的是,当吸收泵浦功率低于 10.9 W 时,尽管基频光的 1321 nm 和 1336 nm 两个波长均已起振,但由于 1321 nm 光功率相对较低未能达到 SRS 阈值,斯托克斯光仅有 1516 nm 单一波长输出;继续增加泵浦功率时,激光器才开始双波长运转输出。图 4 给出使用光谱仪 Yokogawa AQ6375 在最高输出功率 1.44 W 时采集到的光谱图,可以看出 1516 nm 斯托克斯光输出相比 1497 nm 处略高。利用棱镜分光测得 1.44 W 斯托克斯光输出中 1497 nm 和 1516 nm 分别占 0.55 W 和 0.89 W。

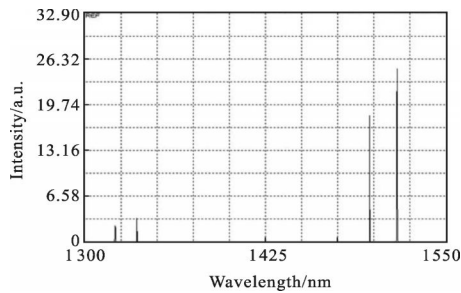


图 4 双波长拉曼激光器输出功率 1.44 W 时的输出光谱

Fig.4 Output spectrum of the dual-wavelength Raman laser at the maximum output power of 1.44 W

图 5 为使用光电探测器 New Focus Model 1621 和示波器 Tektronix DPO2024B 测得的分光后 1516 nm 斯托克斯光输出脉冲宽度相对吸收泵浦功率的变化关系。刚达到 SRS 阈值时, 1516 nm 斯托克斯光脉宽在 30 ns 左右, 其后随泵浦功率提高而逐渐变短, 10、20 和 30 kHz 重频下最短脉宽分别为 13.7、15.3 和 19.2 ns。1497 nm 输出在刚超过其 10.9 W 的 SRS 阈值时脉宽同样在 30 ns 附近, 随泵浦功率升高其在相同泵浦功率下的脉宽与 1516 nm 输出脉宽逐渐趋近, 吸收泵浦功率超过 13.6 W 后二者相差基本在 1 ns 以内。

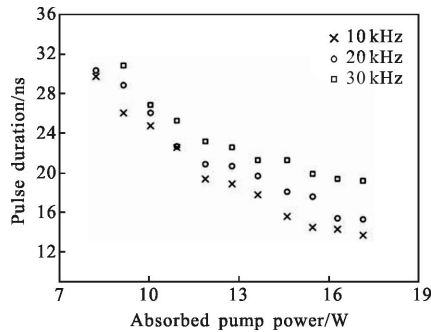


图 5 输出脉冲宽度相对吸收泵浦功率的变化关系

Fig.5 Output pulse duration as functions of absorbed pump power with different PRFs

3 结 论

基于 Nd:GYSGG 晶体的双波长运转特性, 以端泵声光调 Q Nd:GYSGG 激光器在 1.3 μm 波段的双波长激光作为基频光, 采用 YVO₄ 晶体作为内腔拉曼增益介质, 获得高效的 1.5 μm 人眼安全波段双波长斯托克斯光输出。为克服 Nd:GYSGG 晶体热透镜焦距较小不利于高功率运转的缺点, 实验确定了 Nd:GYSGG 晶体同带泵浦吸收带附近的吸收系数。吸收

882.9 nm 同带泵浦光功率 17.1 W 时, 获得脉冲重复频率 20 kHz、最高平均功率 1.44 W 的 1497 nm、1516 nm 双波长输出, 转换效率 8.4%, 光束质量因子 $M^2=2.4$ 。与 808 nm 传统泵浦方式相比, 同带泵浦方式有效提高了受热效应所限的泵浦功率, 从而提高输出功率和转换效率, 相应光束质量也得到改善。

参 考 文 献:

- [1] Bai Yangbo, Xiang Wanghua, Zu Peng, et al. Tunable two wavelengths linear-cavity Yb-doped fiber laser based on volume grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38 (11): 1102004(1-8). (in Chinese)
白扬博, 向望华, 祖鹏, 等. 基于体光栅的可调谐线型腔双波长掺镱光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2011, 38 (11): 1102004(1-8).
- [2] Xu Pan, Hu Zhengliang, Ma Lina, et al. Output power stability of dual-wavelength Erbium-doped fiber ring laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36 (6): 1347-1351. (in Chinese)
徐攀, 胡正良, 马丽娜, 等. 双波长环形腔掺铒光纤激光器输出的稳定性 [J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1347-1351.
- [3] Loas G, Romanelli M, Alouini M. Dual-frequency 780 nm Ti:Sa laser for high spectral purity tunable CW THz generation [J]. *IEEE Photonic Tech L*, 2014, 26 (15): 1518-1521.
- [4] Chen Changshui, Pan Tao, Zhang Yishi, et al. Dual wavelength and dual pulse Q-switched frequency doubling of tunable Cr:LiSAF laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36 (7): 1819-1821. (in Chinese)
陈长水, 潘涛, 张艺士, 等. 双波长双巨脉冲调 Q 倍频 Cr:LiSAF 激光器 [J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1819-1821.
- [5] Vainio M, Halonen L. Stable operation of a CW optical parametric oscillator near the signal-idler degeneracy [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(4): 475-477.
- [6] Ji F, Lu R, Li B, et al. High-average-power, high-repetition-rate dual signal optical parametric oscillator based on PPMgLN [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(5): 505-507.
- [7] Wang Zhengping, Hu Dawei, Zhang Huaijin, et al. External resonator BaWO₄ crystal Raman laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 683-686. (in Chinese)
王正平, 胡大伟, 张怀金, 等. 外腔式 BaWO₄ 拉曼激光器 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(4): 683-686.
- [8] Shen H, Wang Q, Zhang X, et al. Simultaneous dual-wavelength operation of Nd:YVO₄ self-Raman laser at 1524 nm and undoped GdVO₄ Raman laser at 1522 nm [J].

- Opt Lett*, 2012, 37(19): 4113–4115.
- [9] Luo Jianqiao. Growth and properties of new type of anti radiation crystal Nd:GYSGG and study on the conversion of Er, Er:GSGG and Yb:GSGG [D]. Hefei: Anhui Institute of Optical Precision Machinery, Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
罗建乔. 新型抗辐射晶体 Nd:GYSGG 的生长、性能及 Er、Er:GSGG、Yb:GSGG 的上转换研究[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2009.
- [10] Gao J, Zhang Q, Sun D, et al. Energy levels fitting and crystal-field calculations of Nd³⁺ doped in GYSGG crystal [J]. *Opt Comm*, 2012, 285(21–22): 4420–4426.
- [11] Zhong K, Yao J, Sun C, et al. Efficient diode-end-pumped dual-wavelength Nd, Gd:YSGG laser [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(19): 3813–3815.
- [12] Zhong K, Sun C L, Yao J Q, et al. Continuous-wave Nd:GYSGG laser around 1.3 μm [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(7): 491–495.
- [13] Zhong K, Sun C, Yao J, et al. Efficient continuous-wave 1053-nm Nd:GYSGG laser with passively Q-switched dual-wavelength operation for terahertz generation [J]. *IEEE J Quantum Elect*, 2012, 9(7): 491–495.
- [14] Cui Li, Hu Wenghua, Zhang Hengli, et al. Experimental study of 880 nm laser-diode end-pumped Nd:GdVO₄ laser with hybrid resonator at 1.34 μm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2404–2406. (in Chinese)
崔丽, 胡文华, 张恒利, 等. 880 nm LD 泵浦 Nd:GdVO₄ 混合腔激光器 1.34 μm 实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2404–2406.
- [15] Ding X, Fan C, Sheng Q, et al. 5.2-W high-repetition-rate eye-safe laser at 1525 nm generated by Nd:YVO₄-YVO₄ stimulated Raman conversion[J]. *Opt Express*, 2014, 22(23): 29121–29126.