

Ho:YLF 激光泵浦的长波红外 ZnGeP₂ 光参量振荡器

魏磊^{1,2,3,4}, 吴德成^{1,3}, 刘东^{1,3}, 赵书云⁴, 陈国⁴, 李宝⁴, 方聪⁴, 韩隆⁴, 王英俭^{1,3*}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

³先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;

⁴华北光电技术研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015

摘要 以 2.05 μm Ho:YLF 激光器作为光源, 泵浦了长波 ZnGeP₂ 光参量振荡器, 实现了高效率、高重复频率的长波激光输出。激光器输出的峰值波长为 8.1 μm, 最大输出功率为 3.2 W@10 kHz, 泵浦激光到长波激光的光光转换效率为 12%, 斜效率为 19.3%, 激光单脉冲宽度为 27.11 ns, 单脉冲能量为 0.32 mJ, 单脉冲峰值功率为 11.8 kW, X 方向的光束质量因子为 4.5, Y 方向的光束质量因子为 4.2。

关键词 激光器; 长波红外激光; Ho:YLF; ZnGeP₂; 光参量振荡器

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0101002

1 引言

8~12 μm 波段处在大气层的透射窗口, 该波段激光可应用于气体成分检测和光电对抗等多个领域, 因此该波段的激光器逐渐成为研究热点之一。在该波段范围内, CO₂ 激光器作为传统的长波激光光源, 其输出波长主要位于 9~10 μm 范围内, 而且波长值为某些特定值。光参量振荡/放大(OPO/OPA)等非线性频率变换方法可调谐长波激光器的输出波长, 特别是随着性能优异的新型非线性晶体的出现, 长波红外激光器的输出波长不断向长波、甚长波方向拓展。

近年来, 国内外在长波红外激光材料非线性频率变换技术方面开展了很多研究, 尤其是硒化镉晶体(CdSe)和磷锗锌晶体(ZnGeP₂ 或 ZGP)等非线性材料及 OPO/OPA 等非线性频率变换技术取得了很多进展。2018 年, Wang 等^[1]以重复频率为 5 kHz、平均功率为 18.06 W 的 2.05 μm Ho:YLF 激光为光源, 泵浦了 CdSe 光参量振荡器, 获得了平均功率为 320 mW 的 10.20 μm 闲频光输出。2020 年, Chen 等^[2]以 2.1 μm 脉冲激光泵浦了 CdSe 光参量振荡器, 实现了 1.05 W 的 10.1 μm 长波激光, 光光转换效率达 4.69%, 光束质量因子分别为 2.25(X 方向)和 2.12(Y 方向)。2016 年, Fonnum

等^[3]以 Ho:YLF 脉冲激光为光源, 采用 V 型环形 ZnGeP₂ 光参量振荡谐振腔, 最终实现了 8 μm 激光输出, 单脉冲能量为 1.8 mJ, 光束质量因子为 2.6。2019 年, Liu 等^[4]以 100 W@10 kHz 的 Ho:YAG 激光为光源, 泵浦了 ZGP 光参量振荡器/放大器, 实现了平均功率为 12.6 W、中心波长为 8.2 μm、光光转换效率达 12.6% 的激光输出。2015 年, Yu 等^[5]采用 2.09 μm 的 Ho:YAG 脉冲激光, 泵浦了环形 ZnGeP₂ 光参量振荡谐振腔, 其中 ZnGeP₂ 晶体按 I 类匹配角切割, 最终激光输出波长为 8 μm, 光束质量因子为 1.2(X 方向)/1.22(Y 方向)。

本文采用 1.94 μm Tm:YAP 激光作为泵浦源, 以掺钕氟化钪晶体(Ho:YLF)为工作物质, 通过声光调 Q 和端面泵浦方案, 获得了 2.05 μm 的线偏振脉冲激光, 利用该激光泵浦长波 ZGP 光参量振荡器, 最终激光波长为 8.1 μm, 输出平均功率为 3.2 W@10 kHz。

2 实验装置

长波红外激光器结构如图 1 所示。Ho:YLF 激光器的泵浦光源为 Tm:YAP 连续激光, Tm:YAP 激光的输出波长峰值为 1.94 μm, 最大输出功率达 62 W, 光束质量因子为 2.06(X 方向)/2.12(Y 方向)。Ho:YLF 激光器谐振腔由入射镜 M₁、Ho:YLF

收稿日期: 2020-06-15; 修回日期: 2020-07-27; 录用日期: 2020-08-24

基金项目: 中国科学院大气光学重点实验室开放课题基金

*E-mail: wuj@aoifm.ac.cn

晶体、腔内过滤镜 M_2 、 $2.05\ \mu\text{m}$ 输出镜 M_3 和声光 Q 开关(Q -switch)组成。谐振腔采用平-凹稳定腔结构。 M_1 两面均为平面且镀制了 $1.9\sim 1.97\ \mu\text{m}$ 波段增透膜;此外,在 M_1 面向 $\text{Ho}:\text{YLF}$ 晶体的一面镀有 $2\sim 2.1\ \mu\text{m}$ 的全反膜。 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 激光经由第一光束整形系统和 M_1 后入射至 $\text{Ho}:\text{YLF}$ 晶体端面,通过调节第一光束整形系统,使 $\text{Ho}:\text{YLF}$ 晶体端面上的入射光斑平均直径为 $1.8\ \text{mm}$ 。 M_2 为平平镜,与光路呈 45° 角放置,为了防止经过 $\text{Ho}:\text{YLF}$ 晶体后残留的泵浦光又返回至 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 激光器,在 M_2 表面镀有 $2\sim$

$2.1\ \mu\text{m}$ 高反射(HR)和 $1.9\sim 1.97\ \mu\text{m}$ 高透射的双色膜层。 M_3 为平凹镜,凹面曲率半径为 $450\ \text{mm}$, M_3 上的膜层对 $2\sim 2.1\ \mu\text{m}$ 波段部分反射、部分透射,反射率为 85% 。 $\text{Ho}:\text{YLF}$ 晶体中的 Ho^{3+} 掺杂浓度为 1.5% (摩尔分数),沿 a 轴切割,晶体外形为 $\Phi 5\ \text{mm}\times 21.5\ \text{mm}$ 的平端面圆柱状结构,端面镀有高透射 $@1.9\sim 2.2\ \mu\text{m}$ 膜层。 $2\ \mu\text{m}$ 声光 Q -switch 的有效通光孔径 $\geq 2\ \text{mm}$,其晶体两通光端面镀有高透射 $@1.9\sim 2.2\ \mu\text{m}$ 膜层,驱动模块能够为 Q -switch 提供重复频率为 $1\sim 18\ \text{kHz}$ 的连续调谐的驱动控制信号。

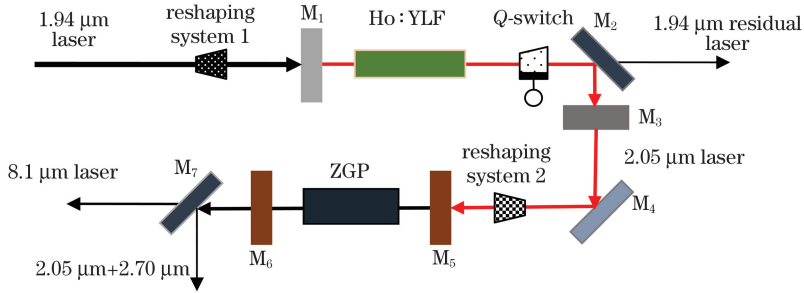


图 1 长波红外激光器结构

Fig. 1 Structure of long-wave infrared laser

反射镜 M_4 为平平镜,与 $2.05\ \mu\text{m}$ 光路呈 45° 放置,镜片表面镀有 $2\ \mu\text{m}$ 波段高反射 $@45^\circ$ 膜层, M_3 输出的 $\text{Ho}:\text{YLF}$ 激光经过 M_4 反射后进入第二光束整形系统,然后进入由 M_5 、 M_6 和 ZGP 晶体组成的 OPO 结构。调节第二光束整形系统参数,使 ZGP 光参量振荡器具有合适的振荡阈值和转换效率。ZGP 光参量振荡器采用平平腔和双谐振工作方式,入射镜 M_5 镀有 $2.05\ \mu\text{m}$ 高透膜及信频光和闲频光高反膜; M_6 所镀膜层对 $2.05\ \mu\text{m}$ 高透,在信频光和闲频光波段的透过率为 40% 。ZGP 晶体两端面镀有 $2.05, 2.70, 8.20\ \mu\text{m}$ 三波段高透膜层以减少参量光损耗。

为了保证实验装置稳定运行,需要对 $\text{Ho}:\text{YLF}$ 晶体、 Q -switch 和 ZGP 晶体等产生废热的光学元件进行控温,控温方式均采用水冷,其中 $\text{Ho}:\text{YLF}$ 晶体和 ZGP 晶体均采用铜热沉夹持,晶体与热沉的接触面上覆有厚度为 $0.2\ \text{mm}$ 的铜箔,晶体热沉和 Q -switch 的内部均有水流微通道结构,激光器运行时,保持微通道内有 $(20\pm 0.5)\ ^\circ\text{C}$ 的水流循环。

3 方案分析

3.1 $\text{Ho}:\text{YLF}$ 晶体的特性

$\text{Ho}:\text{YLF}$ 材料具有优秀的物理化学性能,其化

学性能稳定,热导率较高,抗光学损伤能力较强^[6]。此外, $\text{Ho}:\text{YLF}$ 晶体在紫外光谱区的吸收损耗小,具有较高的光存储容量。另外,YLF 材料的声子能量低,无辐射跃迁几率低,使 Ho 掺杂的 YLF 晶体同其他基质相比,更容易获得较高的转换效率。更为重要的是,YLF 材料的双折射特性使得 $\text{Ho}:\text{YLF}$ 激光能保持很好的线偏振特性,这有助于简化 $\text{Ho}:\text{YLF}$ 激光器的谐振腔结构。同时,YLF 特有的负折射率温度系数使 $\text{Ho}:\text{YLF}$ 晶体在高功率泵浦光抽运时具有更小的热透镜效应,有助于提高激光器工作的稳定性。

YLF 材料中掺杂的 Ho^{3+} 离子具有发射截面大 ($0.9\times 10^{-20}\ \text{cm}^2$) 和上能级寿命长 ($\sim 15\ \text{ms}$) 的特点^[7],这非常有利于上能级的储能,而且适合采用连续激光作为泵浦源。另外, Ho^{3+} 离子稳定的三能级结构非常适合调 Q 脉冲运转。综合来看, $\text{Ho}:\text{YLF}$ 晶体在高功率、高效率的 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出方面具有优良的性能, $\text{Ho}:\text{YLF}$ 激光器能够为长波光参量振荡器/放大器提供优质的泵浦光源。

图 2 为 a 轴 $\text{Ho}:\text{YLF}$ 晶体在 π/σ 偏振向的吸收和发射光谱,其在 π 偏振向的吸收峰位于 $1.94\ \mu\text{m}$,恰好与 b 轴 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 晶体的发射光谱吻合,因此,可以采用输出波长为 $1.94\ \mu\text{m}$ 的 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 激

光器泵浦 Ho:YLF, 实现中心波长为 2.05 μm 的激

光输出。

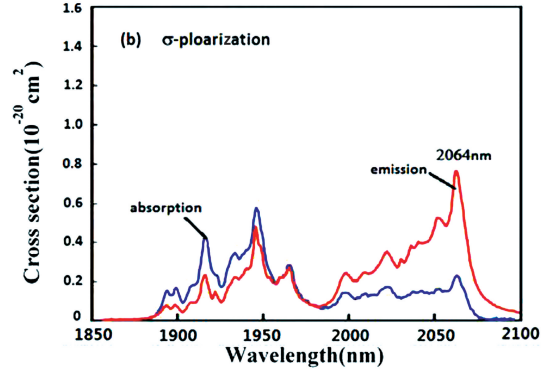
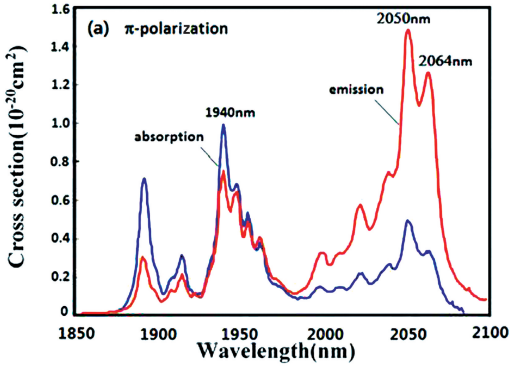


图 2 Ho:YLF 晶体的吸收谱和发射谱^[8]。(a)吸收谱;(b)发射谱

Fig. 2 Absorption and emission spectra of Ho:YLF^[8]. (a) Absorption spectra; (b) emission spectra

3.2 ZGP 及相位匹配

与其他的长波红外非线性晶体相比, ZGP 晶体的性能优势明显^[9-10], 包括透明范围宽(0.7~12 μm)、摩氏硬度高(5.5)、损伤阈值高(30 GW/cm²)、非线性系数大 [$d_{36} = (75 \pm 8) \text{ pm/V}$] 和热导率较高 [$\sim 0.35 \text{ W/(cm} \cdot \text{K)}$] 等。因此, 当研究人员希望通过非线性频率变换方式获得长波红外激光输出时, ZGP 晶体往往成为最佳选项。

图 3 显示了长度为 8 mm 的 ZGP 晶体(双端面抛光、未镀膜)在 1~14 μm 范围内的透射率曲线, 可以看出, 2.05 μm 位于晶体透射光谱的上升带, 因此较长的泵浦波长有利于提高透光率和激光转换效率; 晶体透光率在 8.3 μm 处开始出现断崖式下降, 直至 9 μm 左右触底反弹, 因此应当使激光输出波长避开 8.3~9 μm 范围, 否则难以获得理想的激光转换效率指标。

实现长波激光可调谐的可行方式有两个: 一是改变 ZGP 晶体的温度, 使通过晶体的参量光的折射率发生变化, 进而在新的相位匹配下获得新的输出波长, 然而晶体折射率随温度的变化过于缓慢, 因此调节晶体温度不是理想的波长调谐方式; 二是通过改变 ZGP 晶体的相位匹配角度来改变输出激光的波长, 可以通过改变晶体放置角度来改变泵浦光入射角, 进而实现晶体相位匹配角的调节, 这种方式简单可行, 因此调节晶体的相位匹配角成为首选的波长调谐方式。接下来要做的就是获得输出波长与相位匹配角之间的关系。

当波长为 λ 的激光在 ZGP 晶体内传播时, 激光在 ZGP 晶体内的折射率遵循椭球公式^[11]:

$$\frac{1}{n_e^2(\theta)} = \frac{\cos^2\theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_c^2}, \quad (1)$$

式中: θ 为光轴和晶体主轴之间的夹角; n_o 为 ZGP 晶体内部垂直光轴方向的折射率, n_c 为 ZGP 晶体内部沿光轴方向的折射率^[11]。

作为正单轴晶体, ZGP 对 o 光和 e 光的折射率^[11]分别为

$$n_o^2 = 4.473 + \frac{5.266 \times \lambda^2}{\lambda^2 - 0.134} + \frac{1.491 \times \lambda^2}{\lambda^2 - 662.6}, \quad (2)$$

$$n_c^2 = 4.633 + \frac{5.342 \times \lambda^2}{\lambda^2 - 0.143} + \frac{1.458 \times \lambda^2}{\lambda^2 - 662.6}. \quad (3)$$

ZGP 晶体内的三波相互作用过程遵循能量守恒公式:

$$\omega_p n_p = \omega_s n_s + \omega_i n_i, \quad (4)$$

式中: ω 为光的频率; n 为光在介质内的折射率; p 代表泵浦光; s 代表信频光; i 代表闲频光。

综合(1)~(4)式可以得出 2.05 μm 激光泵浦 ZGP 光参量振荡器时的相位匹配曲线。图 4 给出了

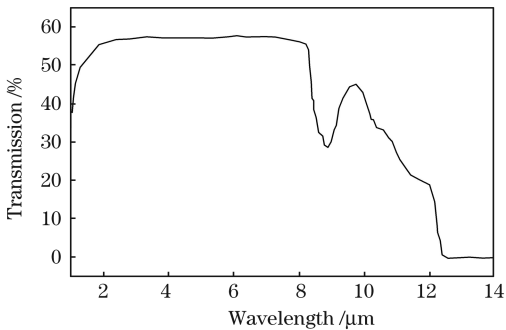


图 3 ZGP 晶体的透射光谱

Fig. 3 Transmission spectrum of ZGP crystal

基于目前的 ZGP 晶体加工水平, 经过退火和辐照等一系列工艺, ZGP 晶体在 2.05 μm 处的吸收系数不超过 0.1 db/cm⁻¹, 在 8 μm 处的吸收系数不超过 0.05 db/cm⁻¹。

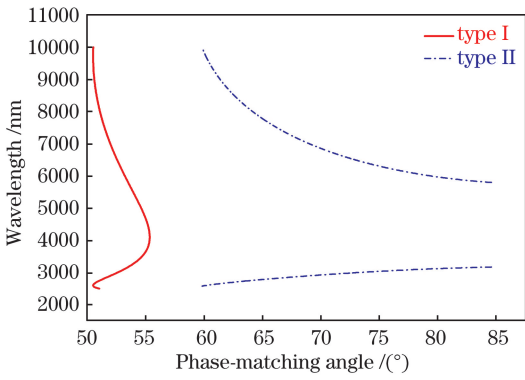


图 4 2.05 μm 激光源泵浦 ZGP 光参量振荡器的相位匹配曲线

Fig. 4 Phase-matching curve of ZGP OPO pumped by 2.05 μm laser

2.05 μm 激光泵浦 ZGP 光参量振荡器时的 I 类和 II 类相位匹配曲线。可以看出,要实现 8~10 μm 激光输出:当采用 I 类匹配方式时,ZGP 晶体的相位匹配角为 50.6°~51.0°;当采用 II 类匹配方式时,ZGP 晶体的相位匹配角为 59.8°~64.1°。

有效非线性系数是决定非线性频率变换器件运行效率的关键参数,对 ZGP 晶体而言,相位匹配的效果与相位角 θ 和方位角 φ 均有关,其中, θ 决定能否实现相位匹配,而 φ 决定有效非线性系数的大小。

图 5 所示是 ZGP 晶体的有效非线性系数曲面。可以看出,在 I 类匹配下,当 φ 值为 0 时能够得到更大的有效非线性系数。因此,为了获得更高的光光转换效率,ZGP 晶体应选择 I 类相位匹配方式。

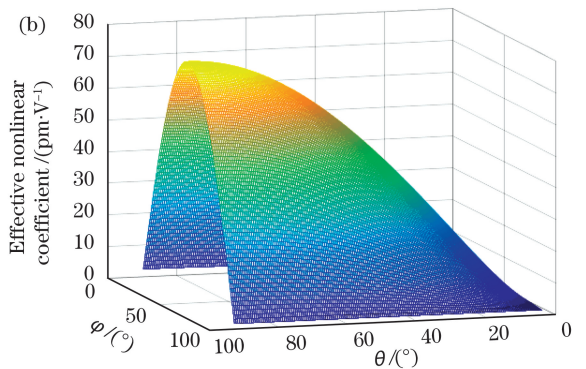
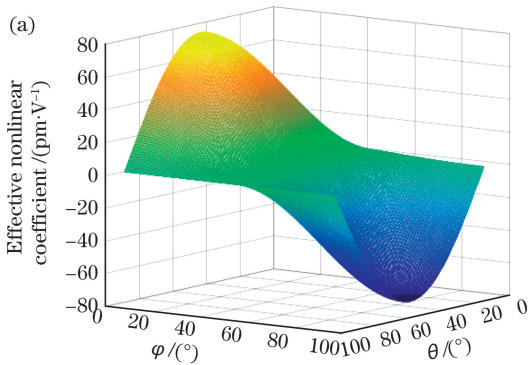


图 5 ZGP 晶体的有效非线性系数曲面。(a) I 类;(b) II 类

Fig. 5 Effective nonlinear coefficient surface of ZGP crystal. (a) Type I; (b) type II

4 实验结果及分析

4.1 长波激光输出功率

对长波激光的输出功率进行测试,结果如图 6 所示。当注入的 2 μm 脉冲激光的平均功率达到 10.5 W 时,激光器开始输出长波激光,当注入 26.68 W 的 2 μm 泵浦激光时,获得的长波激光的最高输出功率为 3.2 W,泵浦光到长波激光的转换效率为 12%,斜效率为 19.3%。观察图 6 曲线可知,当注入的 2 μm 激光的平均功率不超过 25 W 时,长波激光功率随 2 μm 激光功率的增大呈线性增大,当注入激光功率大于 25 W 时,长波激光功率的增大放缓。这是由于 2 μm 泵浦光与长波光参量振荡器的模式匹配发生了变化,一方面,随着 2 μm 激光输出功率的增加,其光束质量变差;另一方面,随着注入光参量振荡谐振腔的 2 μm 泵浦激光功率的增加,ZGP 晶体内的废热越来越多,ZGP 晶体的热透镜效应加剧,光参量振荡谐振腔模式发生变化。综合这些因素,长波激光功率的增大放缓。

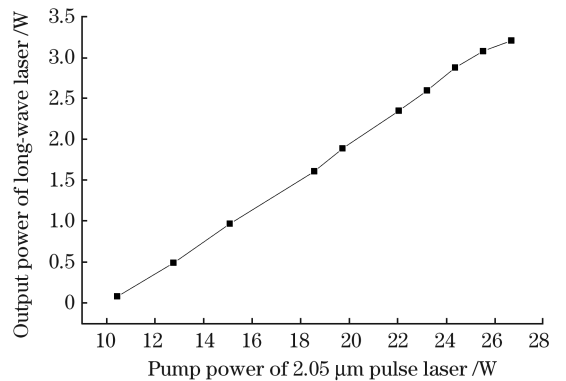


图 6 长波激光输出功率与 2.05 μm 激光泵浦功率的关系
Fig. 6 Relationship between output power of long-wave laser and pump power of 2.05 μm laser

4.2 长波激光输出光谱

使用光谱分析仪对输出平均功率为 3.2 W 时的长波激光的光谱进行测量,结果如图 7 所示,输出激光波长为 8.1 μm。根据图 4 中 ZnGeP₂ 晶体 I 类相位匹配曲线可知,要获得波长峰值大于 8.1 μm 的长波激光,可采用减小相位匹配角度的方法来实现。

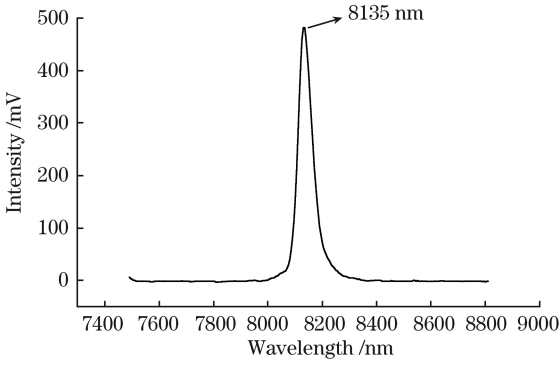


图 7 ZGP 光参量振荡器的输出光谱

Fig. 7 Output spectrum of ZGP OPO

4.3 长波激光光束特性

使用光束分析仪测量输出平均功率为 3.2 W 的长波激光的光束质量因子,测试方法选用聚焦透镜法,近场二维光斑数据如图 8 所示,经过测量, X 方向的光束质量因子为 4.5, Y 方向的光束质量因子为 4.2。平均功率为 3.2 W 的长波激光脉冲波形如图 9 所示,脉冲的重复频率为 10 kHz,脉冲宽度为 27.11 ns,激光单脉冲能量为 0.32 mJ,峰值功率为 11.8 kW。

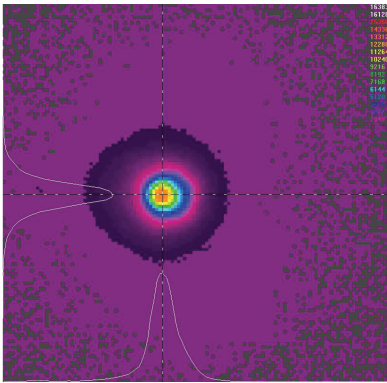


图 8 光斑强度分布

Fig. 8 Intensity distribution of laser spot

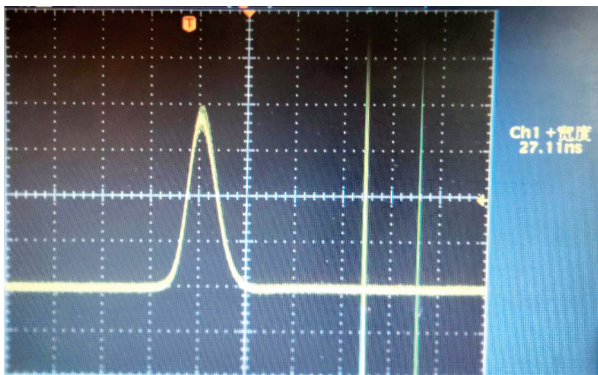


图 9 长波激光脉冲

Fig. 9 Long-wave laser pulse

5 结 论

讨论了长波红外激光工作方案,研究了 2 μm 波段激光晶体和长波红外非线性晶体的选择问题。采用水冷方式,最终输出平均功率为 3.2 W @ 10 kHz,光光转换效率达 12%,斜效率达 19.3%,光束质量因子为 4.5(X 方向)/4.2(Y 方向),激光波长峰值为 8.135 μm ,激光脉宽为 27.11 ns。验证了通过 2.05 μm Ho:YLF 激光泵浦长波 ZGP 光参量振荡器来获得高效率、高重复频率长波红外激光输出的可行性,为实现长波固体激光器工程化奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Wang J, Yuan L G, Zhang Y W, et al. Generation of 320 mW at 10.20 μm based on CdSe long-wave infrared crystal [J]. Journal of Crystal Growth, 2018, 491: 16-19.
- [2] Chen Y, Liu G Y, Yang C, et al. 1 W, 101 μm , CdSe optical parametric oscillator with continuous-wave seed injection [J]. Optics Letters, 2020, 45 (7): 2119.
- [3] Fonnum H, Bakklund A, Haakestad M W. Optical parametric oscillator at 8 μm with high pulse energy and good beam quality[C]//High-Brightness Sources and Light-Driven Interactions, March 20-22, 2016, Long Beach, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2016: MS4C.5.
- [4] Liu G Y, Chen Y, Yao B Q, et al. Study on long-wave infrared ZnGeP₂ subsequent optical parametric amplifiers with different types of phase matching of ZnGeP₂ crystals[J]. Applied Physics B, 2019, 125 (12): 233.
- [5] Yu K K, Liang Z Q, Yan X S. Experimental studies on beam quality-improving of 8 μm ZGP optical parametric oscillator [C] // 2015 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM), July 16-18, 2015, Changchun, China. New York: IEEE, 2015: 34-37.
- [6] Hemmer M, Sánchez D, Jelinek M, et al. 2- μm wavelength, high-energy Ho : YLF chirped-pulse amplifier for mid-infrared OPCPA [J]. Optics Letters, 2015, 40(4): 451-454.
- [7] Bachmann L, Craievich A F, Zzell D M. Crystalline structure of dental enamel after Ho : YLF laser irradiation[J]. Archives of Oral Biology, 2004, 49 (11): 923-929.
- [8] Walsh B M, Barnes N P, di Bartolo B. Branching ratios, cross sections, and radiative lifetimes of rare earth ions in solids: application to Tm³⁺ and Ho³⁺

- ions in LiYF_4 [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83(5): 2772-2787.
- [9] Zawilski K T, Setzler S D, Schunemann P G, et al. Increasing the laser-induced damage threshold of single-crystal ZnGeP_2 [J]. *JOSA B*, 2006, 23(11): 2310-2316.
- [10] Xia S X, Lei Z T, Wang M, et al. Growth and mid-infrared optical parametric oscillator of large ZnGeP_2 single crystals [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2011, 40(2): 541.
- 夏士兴, 雷作涛, 王猛, 等. 大尺寸 ZnGeP_2 晶体生长与中红外光参量振荡 [J]. *人工晶体学报*, 2011, 40(2): 541.
- [11] Han L, Yuan L G, Chen G, et al. 26 W mid-infrared solid-state laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0302004.
- 韩隆, 苑利钢, 陈国, 等. 26 W 中波红外固体激光器 [J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0302004.

Long-Wave Infrared ZnGeP_2 Optical Parametric Oscillator Pumped by Ho:YLF Laser

Wei Lei^{1,2,3,4}, Wu Decheng^{1,3}, Liu Dong^{1,3}, Zhao Shuyun⁴, Chen Guo⁴, Li Bao⁴, Fang Cong⁴, Han Long⁴, Wang Yingjian^{1,3*}

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Science Island Branch, Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China;

⁴Key Laboratory of Science and Technology on Solid-State Laser, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China

Abstract

Objective The 8–12 μm long-wave infrared laser is just within the transmission bands of atmosphere and widely used for gas composition detection and electro-optic countermeasure. As traditional long-wave lasers, CO_2 lasers can output lasers with a specific wavelength within the range of 9–10 μm . Beyond them, a long-wave infrared optical parametric oscillator (OPO) shows an enormous advantage because of its wavelength tuning. However, OPO-based lasers with wavelengths longer than 8 μm and high optical-to-optical conversion efficiency are still scarce. Herein, we construct a ZnGeP_2 OPO and experimentally test its long-wave infrared output. The experimental result shows that a long-wave laser with high conversion efficiency is obtained, which provides a reference to engineer the laser based on ZnGeP_2 OPO.

Methods The scheme of the OPO-based long-wave infrared laser pumped by a 2 μm laser is discussed, in which the selection of a 2 μm laser crystal and a long-wave infrared nonlinear crystal is included. In this scheme, the selected nonlinear crystal is ZnGeP_2 , and the selected pumping laser source is 2.05 μm Ho:YLF laser with a maximum output power of 27 W (10 kHz). The two end faces of the ZnGeP_2 crystal are polished and coated with an antireflection film at 2.05, 2.7, and 8.2 μm bands, which are the key processes for reducing the optical loss in the crystal and for reducing the risk of damage. The resonator of the ZnGeP_2 OPO is a flat cavity and the resonant mode is double resonance OPO. The Ho:YLF laser is linearly polarized, which is helpful for ZnGeP_2 OPOs to achieve a high optical-to-optical conversion efficiency. The Ho:YLF laser, pulsed using an acousto-optic Q-switch, is pumped by a Tm:YAP laser (CW) with a wavelength of 1.94 μm and a maximum output power of 62 W. Without damaging the elements of the Ho:YLF laser, the laser's repetition rate is minimized, the OPO's threshold is reduced, and the conversion efficiency is improved. The ZnGeP_2 crystal, Ho:YLF crystal, and Tm:YAP crystal are all wrapped in thin indium foils and placed in copper heat sinks to collect the heat absorbed by them. During the operation of the experimental apparatus, there is the water flow with 20 $^\circ\text{C}$ in the Q-switch and all heat sinks, and a microchannel structure for the water flow is indicated. Finally, the typical parameters of the long-wave infrared laser, including average power, wavelength, laser beam quality, repetition rate, and pulse duration, are measured.

Results and Discussions The laser experimental apparatus (corresponding to the scheme mentioned above)

achieves good experimental results with high power, efficiency, and repetition rate. The long-wave laser is generated when the $2.05\ \mu\text{m}$ pulsed laser with an average power of $10.5\ \text{W}$ is injected. The maximum output power of the long-wave laser is $3.2\ \text{W}$ when the $2.05\ \mu\text{m}$ pulsed laser with an average power of $26.68\ \text{W}$ is injected. Meanwhile, the corresponding optical-to-optical conversion efficiency is up to 12% and the slope efficiency is up to 19.3% . A spectrum analyzer is used to measure the spectrum of the long-wave laser with an output power of $3.2\ \text{W}$ and the peak wavelength of $8.135\ \mu\text{m}$ is disclosed. A CCD laser beam analyzer is used to measure the laser beam quality factor of the long-wave laser with an output power of $3.2\ \text{W}$. The focusing lens method is used for these measurements. After the measurements, the quality factor is 4.5 in the X direction and 4.2 in the Y direction. The laser parameters including repetition rate of $10\ \text{kHz}$ and pulse duration of $27.11\ \text{ns}$ are measured using a photoelectric detector. The simple calculation shows that the single pulse laser energy is $0.32\ \text{mJ}$ and the peak power is $11.8\ \text{kW}$.

Conclusions We verify that a ZnGeP_2 OPO is feasible to realize high efficiency and tunable long-wave laser output. First, the phase-matching mode and the phase-matching angle of the ZnGeP_2 crystal are analyzed and designed according to the principle that the output laser wavelength of a ZnGeP_2 OPO corresponds to its phase-matching angle. Second, to realize the $8\ \mu\text{m}$ laser, the ZnGeP_2 crystal is processed according to the above phase-matching angle. Third, the experimental apparatus is set up and the effect of the long-wave ZnGeP_2 OPO laser is verified, and the ZnGeP_2 OPO laser pumped by the $2.05\ \mu\text{m}$ Ho:YLF pulsed laser can generate a long-wave laser output with a specific wavelength, high efficiency, and high power. In the future, long-wave infrared lasers with wavelengths longer than $8\ \mu\text{m}$ can be achieved just by reducing the phase-matching angle of the ZnGeP_2 crystal (changing its cutting angle as an example) or reducing the incident angle of the pump laser.

Key words lasers; long-wave infrared laser; Ho:YLF; ZnGeP_2 ; optical parametric oscillator

OCIS codes 140.3460; 140.3480; 140.3540; 140.3580