

doi: 10.3788/gzxb20174608.0823004

# 环形腔 2.05 $\mu\text{m}$ 单谐振 KTP 晶体光参量振荡器研究

谢小兵<sup>1,2</sup>, 李世光<sup>1</sup>, 朱小磊<sup>1</sup>, 马秀华<sup>1</sup>, 董怡静<sup>1,2</sup>, 谢伟<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所 空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 针对大气 CO<sub>2</sub> 浓度探测差分吸收激光雷达的应用需求, 采用稳定环形腔和模式匹配设计, 搭建了一套单纵模 1 064 nm 激光泵浦的单谐振 KTP 晶体光参量振荡器, 获得高斜率转换效率、基横模的 2.05  $\mu\text{m}$  波长纳秒激光脉冲输出. 在 8 字形环形行波稳定腔中, 将 2 块 II 类相位匹配 KTP 晶体以走离补偿方式放置, 在 20 Hz 重复频率下, 当泵浦单脉冲能量达到 11 mJ 时, 获得了单脉冲能量为 2.4 mJ 的 2.05  $\mu\text{m}$  信号光输出, 脉宽约 24 ns, 斜率效率达到 53%. 2.05  $\mu\text{m}$  信号光光束质量因子在  $x$ 、 $y$  方向分别为 1.3 和 1.2.

**关键词:** 非线性光学; 光参量振荡器; 环形腔; 2  $\mu\text{m}$  激光器; KTP 晶体

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0823004-6

## Investigation on Ring-Cavity 2.05 $\mu\text{m}$ Single Resonant KTP Crystal Optical Parametric Oscillator

XIE Xiao-bing<sup>1,2</sup>, LI Shi-guang<sup>1</sup>, ZHU Xiao-lei<sup>1</sup>, MA Xiu-hua<sup>1</sup>, DONG Yi-jing<sup>1,2</sup>, XIE Wei<sup>1,2</sup>

(1 Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the application requirements of differential absorption lidar for atmospheric CO<sub>2</sub> concentration detection, a single-resonant KTP crystal optical parametric oscillator, pumped by a 1 064 nm single-longitudinal-mode laser, was built with stable ring-cavity and mode matching design, and nanosecond laser pulse output at 2.05  $\mu\text{m}$  wavelength was achieved with high slope conversion efficiency. In the stable ring cavity with a bow-tie configuration, two KTP crystals with type II phase-match condition cut were placed in walk-off-compensated arrangement. When the pump pulse energy reached 11 mJ at a repetition rate of 20 Hz, 2.4 mJ of laser pulse energy output at 2.05  $\mu\text{m}$  signal wavelength was obtained with pulse width of around 24 ns, and the corresponding slope efficiency was 53%. The 2.05  $\mu\text{m}$  signal laser beam quality factor in  $x$  and  $y$  directions were 1.3 and 1.2 respectively.

**Key words:** Nonlinear optic; Optical parametric oscillator; Ring cavity; 2  $\mu\text{m}$  laser; KTP crystal

**OCIS Codes:** 230.4910; 190.4410; 190.4971; 140.3070; 140.3580

## 0 引言

由于在生物医疗<sup>[1]</sup>、激光测距、相干测风雷达、光电对抗、大气遥测<sup>[2-3]</sup>以及中红外激光产生<sup>[4]</sup>等领域具有重要的应用价值, 2  $\mu\text{m}$  波段激光已经成为研究热点<sup>[5-6]</sup>. 尤其是近年来快速发展的大气 CO<sub>2</sub> 浓度探测差分吸收激光雷达<sup>[7-9]</sup>, 对于高效稳定的大能量 2.05  $\mu\text{m}$  纳秒脉冲全固态激光器的需求十分迫切. 采用技术成

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61505230)资助

第一作者: 谢小兵(1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为非线性频率变换技术. Email: xiexiaobing2008@126.com

导师: 朱小磊(1966-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为固体激光器技术及激光器应用系统. Email: xlzhu@siom.ac.cn

通讯作者: 李世光(1982-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为固体激光器及其非线性转换. Email: sgli@siom.ac.cn

收稿日期: 2017-03-30; 录用日期: 2017-05-09

<http://www.photon.ac.cn>

熟的  $1\mu\text{m}$  波段激光抽运非线性晶体外腔式光参量振荡器 (Optical Parametric Oscillator, OPO) 产生  $2.05\mu\text{m}$  激光<sup>[10-12]</sup>, 因具有阈值低、转换效率高、结构紧凑、元件全固化、输出波长可调谐等优点而引起广泛关注。

磷酸钛氧钾 (KTP) 晶体<sup>[13]</sup> 具有损伤阈值高, 非线性系数大, 走离角小, 易于生长等优点, 是目前  $2.05\mu\text{m}$  OPO 最常用的非线性晶体之一。国际上工作在  $2\mu\text{m}$  波段的 KTP-OPO 研究工作始见于 2002 年<sup>[12]</sup>, G. Arisholm 等用四块 KTP 晶体, 基于四个平镜的环形腔单谐振 OPO 振荡器, 获得了  $2.5\text{mJ}$  的  $2.06\mu\text{m}$  激光脉冲输出, 泵浦光-信号光转换效率约 25%, 光束质量因子  $M^2$  小于 1.4。两年后, 该研究小组<sup>[14]</sup> 在  $1.06\mu\text{m}$  激光双程抽运平-平腔单谐振 KTP-OPO 振荡器中, 获得  $1.9\text{mJ}$  的  $2.08\mu\text{m}$  激光输出, 对应泵浦光-信号光转换效率为 24%, 光束质量因子  $M^2$  小于 3.4, 激光输出重复频率为 10 Hz。2014 年, S. Verma 等<sup>[15]</sup> 利用  $2\text{mJ}$ , 10 kHz,  $1064\text{nm}$  Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器泵浦平-平腔简并 KTP-OPO 振荡器, 得到  $0.7\text{mJ}$  的  $2128\text{nm}$  脉冲激光输出, 总转换效率为 35%, 脉宽 7 ns 左右。近年来国内研究者采用 KTP 作为非线性晶体在  $2\mu\text{m}$  波段光参量振荡器的研究也取得了显著成果。2012 年, 孟冬冬等<sup>[16]</sup> 研究了基于  $1.06\mu\text{m}$  板条激光器抽运的  $2.12\mu\text{m}$  平-平腔 KTP-OPO 振荡器, 在 20 Hz 的重复频率下,  $2.12\mu\text{m}$  激光输出能量达到  $39\text{mJ}$ , 总转换效率为 29.2%, 脉宽约 7 ns。2015 年, 王子健<sup>[17]</sup> 等报道了 50 kHz,  $1.06\mu\text{m}$  声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器泵浦的  $2.1\mu\text{m}$  平-平腔 KTP-OPO 振荡器, 实现了单脉冲能量约  $6.5\mu\text{J}$  的  $2.1\mu\text{m}$  激光输出, 脉宽约 17.8 ns。2016 年, 本课题组<sup>[18]</sup> 用重复频率为 400 Hz 的  $1.06\mu\text{m}$  单纵模脉冲激光抽运平-平腔单谐振 KTP-OPO 振荡器, 在泵浦脉冲能量为  $5\text{mJ}$  时, 获取单脉冲能量为  $0.9\text{mJ}$  的  $2.05\mu\text{m}$  激光输出, 脉冲宽度约 3.7 ns, 对应泵浦光-信号光转换效率为 18%, 光束质量因子  $M^2$  优于 3.0。

国内针对  $2\mu\text{m}$  波段的 OPO 研究工作主要集中在驻波腔 KTP-OPO 振荡器, 而对于环形腔结构的 KTP-OPO 输出特性研究鲜见公开报道。尽管驻波腔 OPO 具有结构紧凑、腔长短阈值低、输出能量高等特点, 但同时存在输出光谱宽、能量稳定性差等不足, 尤其在以种子注入实现单纵模输出时易受到脉冲光的反馈干扰。而环形腔 KTP-OPO 振荡器独特的单向行波腔结构, 可以减小谐振腔内脉冲光的后向反馈, 显著降低种子光的损伤风险<sup>[19-20]</sup>, 提高输出稳定性和可靠性。

本文以单纵模  $1064\text{nm}$  脉冲 Nd:YAG 激光器作为泵浦源, 设计了基于 8 字形行波稳定环形腔单谐振 KTP 晶体光参量振荡器, 将两块尺寸一样的 KTP 晶体以走离补偿串联放置, 研究不同输出耦合条件下的光-光转换效率变化规律。在重复频率为 20 Hz, 泵浦单脉冲能量约  $11\text{mJ}$  时, 实验获得  $2.05\mu\text{m}$  信号光最大单脉冲能量输出为  $2.4\text{mJ}$ , 脉冲宽度约 2 ns, 对应信号光的光-光转换效率为 22%, 斜率效率高达 53%, 信号光光束质量因子  $M^2$  在水平方向和垂直方向分别为 1.3 和 1.2。

## 1 实验装置设计

实验所用的非线性晶体 KTP 采用 II 类临界相位匹配方式切割, 切角为  $\theta=52.7^\circ$ ,  $\phi=0^\circ$ , 设计匹配温度为 300 K, 外形尺寸为  $5\text{mm}\times 5\text{mm}\times 20\text{mm}$ , 两个通光端面镀  $1064\text{nm}$ 、 $2051\text{nm}$  和  $2212\text{nm}$  增透膜。相应的偏振匹配为:  $1064\text{nm}(\text{o})\rightarrow 2051\text{nm}(\text{o})+2212\text{nm}(\text{e})$ 。KTP 晶体通过铝箔包裹压在热沉上实现传导散热。

### 1.1 环形腔设计分析

常用的行波环形腔可分为三镜腔、四镜腔和六镜腔。考虑到四镜腔结构比六镜腔结构稳定性好, 而像散效应又比三镜腔结构小, 且腔型结构参量设计具有更大的自由度, 因此, 实验采用四镜腔结构设计。为充分发挥四镜腔的限模特性, 设计采用对称 8 字形行波环形腔结构, 如图 1。两块曲率半径均为  $R$  的平凹镜  $M_1$ 、 $M_2$  与两块平镜  $M_3$ 、 $M_4$  构成稳定腔结构, 两凹镜中心连线放置走离补偿的 KTP 晶体对。对应图 1 结构, 腔参量选取存在关系为

$$\cos 2\alpha = \frac{L_1 + L_3}{2L_2} \quad (1)$$

式中,  $L_1$  为两平凹镜间距,  $L_2$  为对称臂长,  $L_3$  为两平镜间距,  $\alpha$  为振荡光在凹镜上的入射角。忽略晶体的热效应, 将环形腔等效成周期性薄透镜序列, 利用往返矩阵分析谐振腔的模式和稳定性。设定从环形腔内任意

一点出发的光线往返矩阵具有  $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ , 则该处的振荡基横模光束半径  $\omega_s$  可表示为<sup>[21]</sup>

$$\omega_s^2 = \frac{\lambda B}{\pi \sqrt{1 - \left(\frac{A+D}{2}\right)^2}} \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为腔内振荡的信号光波长, 初始值为 2.051 μm. 相应的谐振腔稳定性因子可表征为

$$g_1 g_2 = \left| \frac{A+D}{2} \right| \quad (3)$$

由于腔内振荡光束斜入射到两个凹面反射镜上, 因而存在像散, 造成腔内信号光在子午面与弧矢面上的振荡模尺寸大小不一样, 离轴放置的平凹镜在子午面的反射焦距  $f_{\text{merid}}$  与弧矢面的反射焦距  $f_{\text{sagit}}$  表达式为<sup>[21]</sup>

$$f_{\text{merid}} = \frac{R}{2} \cos \alpha \quad (4)$$

$$f_{\text{sagit}} = \frac{R}{2 \cos \alpha} \quad (5)$$

实验设计环形谐振腔时, 为减小像散并兼顾结构紧凑, 通过对谐振腔各镜间距、相对角度及平凹镜曲率半径等参量的迭代优化, 最后给出如下的腔参量设计: 凹镜曲率半径  $R=660$  mm,  $L_1=64$  mm,  $L_2=51$  mm,  $L_3=24$  mm, 入射角  $\alpha=15^\circ$ , 总腔长 190 mm. 此时, 谐振腔稳定性因子  $g_1 g_2$  在子午面和弧矢面大小分别为 0.49 和 0.52, 腔稳定性处于稳定区中间区域. 图 2 给出了环形腔内不同位置处基横模光斑半径变化分布的理论仿真结果, 可以看出, 腔内两平镜连线中心和两凹镜连线中心分别存在一个束腰, 并且两凹镜连线中心处振荡模光斑分布均匀性更好, 因此将两块 KTP 晶体对称置于两凹镜连线的中心处, 该处子午面和弧矢面的振荡基横模束腰半径分别为 337 μm 和 342 μm.

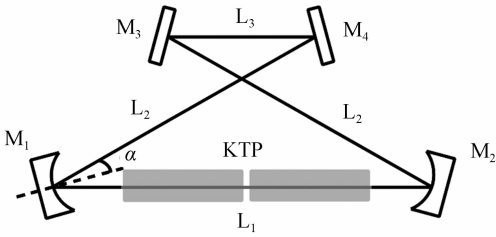


图 1 环形腔结构

Fig. 1 Structure of ring cavity

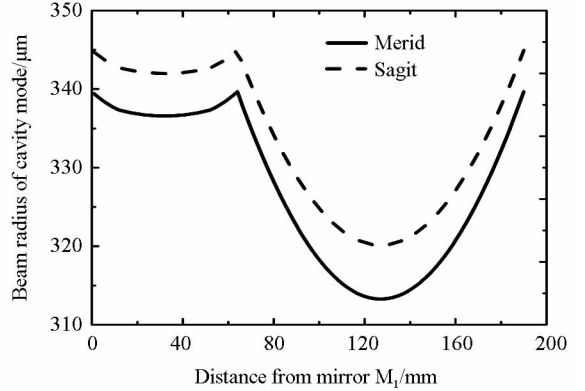


图 2 腔模光斑半径分布

Fig. 2 Beam radius distribution of cavity mode

## 1.2 实验装置

实验采用的 8 字形环形腔单谐振 KTP-OPO 装置如图 3, 输出耦合平凹镜  $M_1$  对泵浦光高透, 对信号光部分透过; 平凹镜  $M_2$  与两平镜  $M_3$ 、 $M_4$  均对信号光高反、泵浦光高透, 对空闲光透过率大于 50%, 以实现 OPO 单谐振运转, 泵浦源为自行研制的 20 Hz 1 064 nm 单纵模脉冲全固态激光器<sup>[22]</sup>, 脉宽约为 29 ns, 其脉冲波形如图 4(a). 输入环形腔的泵浦单脉冲能量通过半波片 (Half Wavelength Plate, HWP) 与偏振分束器 (Polarization Beam Splitter, PBS) 组成的衰减器实现 0~11 mJ 可调, 由 PBS 反射的竖直偏振泵浦光满足相位匹配要求. 使用焦距为  $f=500$  mm 的平凸透镜将泵浦光聚焦到 KTP 晶体处, 用 CCD 测得晶体中心处的泵浦光斑直径约为 685.8 μm, 如图 4(b), 泵浦光与理论仿真的腔内信号光振荡基横模匹配良好.

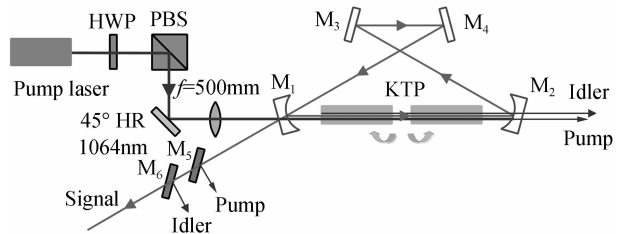
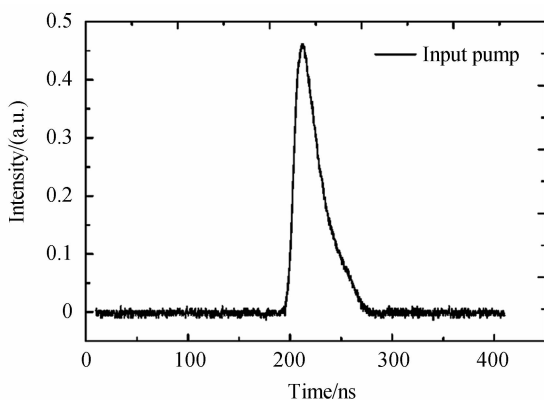
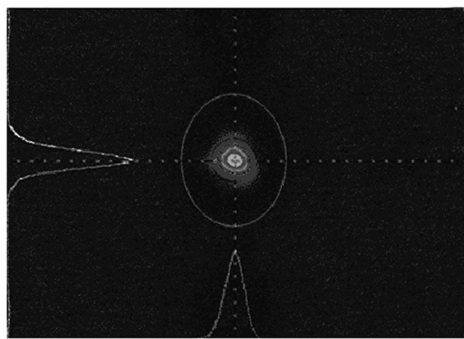


图 3 OPO 实验装置

Fig. 3 OPO experimental setup



(a) Input pump laser pulse profile



(b) Pump laser beam profile in the center of crystal

图4 输入泵浦光脉冲波形及晶体中心处泵浦光斑

Fig. 4 Input pump laser pulse profile and beam profile in the center of crystal

为对 OPO 输出的信号光性能进行准确测试, OPO 信号光输出光路中插入分光镜  $M_5$  ( $45^\circ$ 高反泵浦光、高透信号光) 和  $M_6$  ( $45^\circ$ 高反空闲光、高透信号光), 以有效滤除光路中混杂的空闲光和剩余泵浦光.

## 2 实验结果与讨论

实验中, 首先比较了耦合输出镜对信号光透过率分别为 23% 和 30% 时 OPO 输出  $2.05 \mu\text{m}$  信号光脉冲能量和泵浦光-信号光转换效率的变化规律, 测得的实验结果如图 5.

在同一输出耦合率条件下, 环形腔 OPO 振荡输出信号光脉冲能量随着输入泵浦光脉冲能量的增加而呈线性增大趋势, 泵浦光-信号光的转换效率也随着腔内注入泵浦能量的增加而提高. 在输出镜透过率为 30% 时, 环形腔 OPO 的斜率效率可达到 53%, 阈值泵浦脉冲能量约为 6.6 mJ, 相应的阈值泵浦功率密度为  $122 \text{ MW}/\text{cm}^2$ . 在最高泵浦输入约 1.67 倍阈值泵浦脉冲能量 (即 11 mJ) 时, 实测 OPO 输出的  $2.05 \mu\text{m}$  信号光单脉冲能量最高为 2.4 mJ, 对应最大泵浦光-信号光转换效率约 22%.

然后将输入腔内的泵浦脉冲能量保持在 11 mJ, 实验对 OPO 输出信号光脉冲能量进行长时间监测, 测试结果如图 6. 在 44 min 的监测时间内,  $2.05 \mu\text{m}$  信号光脉冲输出能量平均值约为 2.4 mJ, 能量起伏的均方

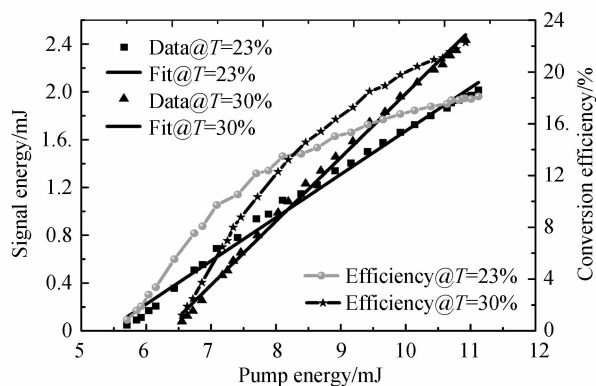


图5 输出信号光能量、泵浦光-信号光转换效率与输入泵浦脉冲能量关系

Fig. 5 Output signal laser energy and pump-to-signal conversion efficiency versus input pump laser energy

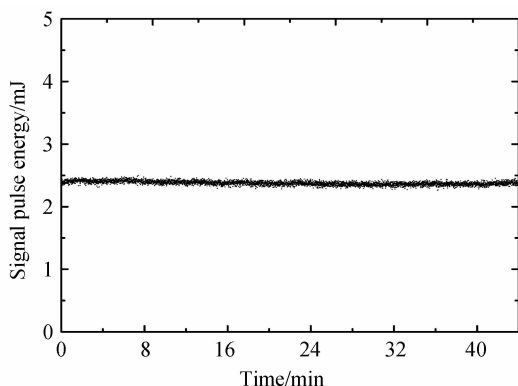


图6 信号脉冲能量稳定性

Fig. 6 Stability of signal pulse energy

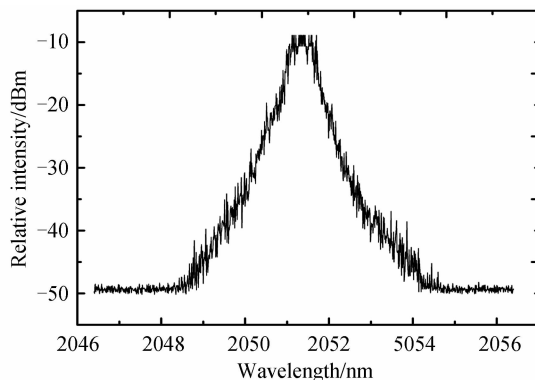


图7 输出信号光光谱

Fig. 7 Output signal laser spectrum

根(Root Mean Square,RMS)为 1%左右,可见 OPO 信号光脉冲输出能量具有较好的稳定性. OPO 单谐振输出能量抖动小的结果也从侧面反映了行波稳定腔的良好限模特性.

使用 YokoGaWa AQ6375(分辨率 0.05 nm)光谱仪对 OPO 输出光谱特性进行测量,测得信号光中心波长为 2 051.35 nm,光谱线宽 0.74 nm. 由腔参量可得谐振腔纵模间隔约为 0.019 nm,因此,可以估算 OPO 输出包含的纵模数接近 39 个. 图 7 是实验探测到的信号光光谱分布. 采用 Newport 公司的 2  $\mu\text{m}$  InGaAs 光电探测器(818-BB-51F,12.5 GHz)测量了环形腔 OPO 输出信号光脉冲的时间特性,脉冲波形测量结果如图 8,输出信号光脉宽约 24 ns,略窄于泵浦脉冲宽度.

使用 Spiricon 公司的中红外 CCD(PV-IV-C-A)测量激光光斑强度分布特性,并用双曲线拟合法对 OPO 输出的 2.05  $\mu\text{m}$  信号光的光束质量进行了测量,测量透镜焦距为  $f=400$  mm. 实验得到信号光水平方向和垂直方向的光束质量因子  $M^2$  分别为 1.3 和 1.2,腔内振荡的信号光束腰直径在水平和垂直方向分别为 546.8  $\mu\text{m}$ 和 538.9  $\mu\text{m}$ , $M^2$  测量结果和信号光远场光斑强度分布如图 9. 可见,鉴于行波稳定环形腔固有的限模特性,自由运转的环形腔 OPO 以近似基横模方式运转,输出的 2.05  $\mu\text{m}$  信号光近似为 TEM<sub>00</sub> 高斯光束,并且腔内信号光在两个正交方向的光斑大小接近,实验结果验证了两块 KTP 晶体在水平方向的走离效应得到了充分补偿.

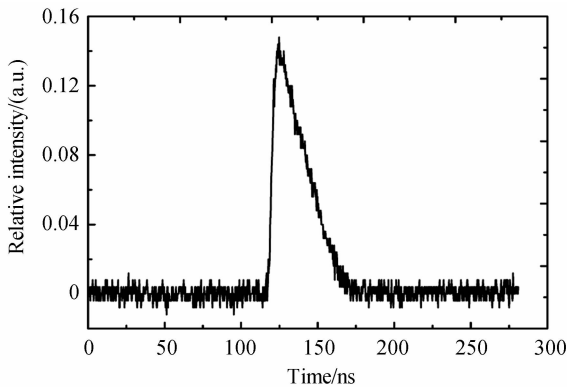


图 8 输出信号光脉冲波形

Fig. 8 Pulse profile of output signal laser

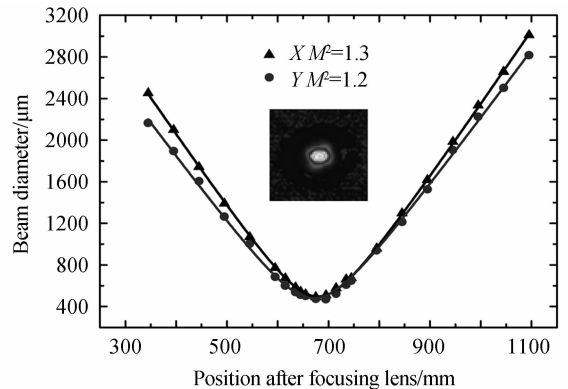


图 9 输出信号光光束质量与远场光斑

Fig. 9 Output signal laser beam quality and beam profile in far field

### 3 结论

用单纵模 1 064 nm 纳秒脉冲全固态激光器作为泵浦源,在优化设计单谐振 8 字形环形腔 KTP-OPO 振荡器中,成功实现 2.05  $\mu\text{m}$  波长输出. 在重复频率为 20 Hz,泵浦脉冲能量为 11 mJ 时,得到最大单脉冲能量为 2.4 mJ,脉宽约 24 ns,对应泵浦光-信号光转换效率为 22%,OPO 输出斜率效率高达 53%,信号光在水平方向和垂直方向的光束质量因子  $M^2$  分别为 1.3 和 1.2. 该装置有望利用种子注入技术实现高效率单纵模窄线宽的 2.05  $\mu\text{m}$  波长的 OPO 输出,并可通过光参量放大进一步提升脉冲能量,以满足机载和星载大气 CO<sub>2</sub> 浓度探测差分吸收激光雷达系统的要求.

#### 参考文献

- [1] WEI Tao, SUN Chuan-yang, XUE Bo-xin, *et al.* The efficacy and safety of 2 $\mu\text{m}$  continuous laser in the treatment of high-risk patients with benign prostatic hyperplasia[J]. *Lasers in Medical Science*, 2017, **32**(2): 351-356.
- [2] SINGHU N, WALSHB M, YU J, *et al.* 20 years of Tm: Ho:YLF and Lu:LF laser development for global winds measurements[C]. *Advanced Solid State Lasers*. Optical Society of America, 2014; ATH3A. 1.
- [3] BARRIAJ B, DHERBECOURT J, RAYBAUT M, *et al.* Transmitter for multispecies DIAL sensing of atmospheric water vapor, methane and carbon dioxide in the 2 $\mu\text{m}$  range[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics; Applications and Technology*. Optical Society of America, 2014; JTU4A. 52
- [4] WANG Li, YANG Jing-wei, CAI Xu-wu, *et al.* 2.09  $\mu\text{m}$  nanosecond holmium laser pumped ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(1): 0102008.  
王礼,杨经纬,蔡旭武,等. 2.09  $\mu\text{m}$  纳秒钬激光抽运的磷锗锌光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2014, **41**(1): 0102008.
- [5] ZHU Ya-chen, LAN Ge, LI Tong, *et al.* 2 $\mu\text{m}$  KTiOAsO<sub>4</sub> optical parametric oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2059-2063.

- 朱雅琛, 兰戈, 李彤, 等. 脉冲式  $2\mu\text{m}$   $\text{TiOAsO}_4$  光参变振荡器[J]. 光学学报, 2007, **27**(11): 2059-2063.
- [6] JI En-cai, LIU Qiang, NIE Ming-ming, *et al.* High-slope-efficiency  $2.06\mu\text{m}$  Ho : YLF laser in-band pumped by a fiber-coupled broadband diode[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(6): 1237-1240.
- [7] REFAAT T F, SINGH U N, YU J, *et al.* Double-pulse  $2\text{-}\mu\text{m}$  integrated path differential absorption lidar airborne validation for atmospheric carbon dioxide measurement[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(15): 4232-4246.
- [8] GIBERT F, EDOUART D, CANAC C, *et al.*  $2\text{-}\mu\text{m}$  Ho emitter-based coherent DIAL for  $\text{CO}_2$  profiling in the atmosphere[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(13): 3093-3096.
- [9] LI Lei, ZHANG Bin, YIN Ke, *et al.* 1 mJ nanosecond all-fiber thulium-doped fiber laser at  $2.05\mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(14): 18098-18105.
- [10] DENG Hua-rong, ZHANG Long, XIE Yu-zhou, *et al.* Low threshold  $2\mu\text{m}$  laser based on optical parametric oscillator using PPMgLN[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(7): 0702014.  
邓华荣, 张龙, 谢宇宙, 等. PPMgLN 用于光参量振荡实现低阈值  $2\mu\text{m}$  激光[J]. 中国激光, 2013, **40**(7): 0702014.
- [11] RAYBAUT M, SCHMID T, GODARD A, *et al.* High-energy single-longitudinal mode nearly diffraction-limited optical parametric source with 3 MHz frequency stability for  $\text{CO}_2$  DIAL[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(13): 2069-2071.
- [12] ARISHOLM G, LIPPERT E, RUSTAD G, *et al.* Efficient conversion from 1 to  $2\mu\text{m}$  by a KTP-based ring optical parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(15): 1336-1338.
- [13] KOECHNER W. Solid-state laser engineering (six revised and updated edition)[M]. New York: Springer, 2010, 649-651.
- [14] ARISHOLM G, NORDSETH  $\phi$ , RUSTAD G, *et al.* Optical parametric master oscillator and power amplifier for efficient conversion of high-energy pulses with high beam quality[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(18): 4189-4197.
- [15] VERMA S, MISHRA C, KUMAR V, *et al.* Generation of  $2.1\mu\text{m}$  wavelength from degenerate high gray track resistant potassium titanyl phosphate optical parametric oscillator[J]. *Pramana*, 2014, **82**(2): 227-231.
- [16] MENG Dong-dong, TANG Gang-feng, SHEN Zhao-guo, *et al.*  $2.12\mu\text{m}$  laser pumped by zig-zag slab[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(5): 991-995.  
孟冬冬, 唐刚锋, 沈兆国, 等. Zig-Zag 板条泵浦的  $2.12\mu\text{m}$  激光器[J]. 应用光学, 2012, **33**(5): 991-995.
- [17] WANG Zi-jian, JIN Guang-yong, YU Yong-ji, *et al.*  $2.1\mu\text{m}$  optical parametric oscillator based on high-repetition Q-switch Nd : YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(9): 2638-2642.  
王子健, 金光勇, 于永吉, 等. 高重频声光调 Q Nd : YVO<sub>4</sub> 激光器  $2.1\mu\text{m}$  光参量振荡器[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(9): 2638-2642.
- [18] XIE Xiao-bing, LI Shi-guang, ZHU Xiao-lei, *et al.* Characteristics of single resonant nanosecond pulse optical parametric oscillator with output wavelength of  $2.05\mu\text{m}$ [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(12): 1208002.  
谢小兵, 李世光, 朱小磊, 等.  $2.05\mu\text{m}$  单谐振纳秒脉冲光参量振荡器特性研究[J]. 中国激光, 2016, **43**(12): 1208002.
- [19] LONG Qi-qiang, ZHONG Kai, HONG Guang-lie, *et al.* Investigation on eye-safe ring-cavity KTP optical parametric oscillator with seed injection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0614003.  
龙启强, 钟凯, 洪光烈. 种子注入环形腔人眼安全 KTP 参变振荡器的研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(6): 0614003.
- [20] LI Shi-guang, LI Huan-huan, MA Xiu-hua, *et al.* Nanosecond optical parametric oscillator with walkoff-compensating crystals[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(12): 3249-3253.  
李世光, 李环环, 马秀华, 等. 走离补偿结构的纳秒脉冲光参量振荡器[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(12): 3249-3253.
- [21] 吕百达. 激光光学[M]. 3<sup>rd</sup>, 北京: 高等教育出版社, 2003, 386-392.
- [22] WEI Dai-kang, MA Xiu-hua, ZHU Ren, *et al.* High energy single-frequency double-pulse hybrid MOPA system[J]. *Laser Physics Letters*, 2015, **12**(9): 095004.