

基于 ZnGeP₂ 光参量振荡器的长波红外双波段调谐实验研究

孟冬冬^{1,2}, 乔占朵¹, 高宝光^{1,2}, 王天齐¹, 樊仲维^{1*}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
2. 中国科学院大学光电学院, 北京 100049)

摘要: 文中报道了一种基于 ZnGeP₂ (ZGP) 的纳秒宽调谐长波红外光参量振荡器 (optical parametric oscillation, OPO)。采用重复频率 50 Hz、脉冲宽度小于 10 ns 的 1064 nm 基频光泵浦基于 II 类相位匹配 KTP 的光参量振荡器产生 2.1 μm 激光, 进而泵浦基于 I 类相位匹配的 ZGP 光参量振荡器产生 7~11 μm 长波红外输出。通过对 ZGP 的角度调谐获得了 2.815~2.963 μm 连续可调谐信号光, 对应闲频光波长连续可调谐范围为 7.82~9.08 μm。通过泵浦波长调谐的方式, 当采用 2107.13~2153.95 nm 范围内的激光泵浦 ZGP-OPO, 获得了信号光波长范围为 2.624~2.662 μm 和 2.745~2.956 μm 的连续可调谐输出, 对应闲频光范围为 7.94~9.07 μm 和 10.20~10.82 μm。闲频光波长为 8.03 μm、能量为 0.8 mJ 时, ZGP-OPO 的泵浦光至闲频光转换效率 9.4%。

关键词: 光参量振荡器; 长波红外激光; 连续可调谐; 双波段

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA2021G008

Experimental study on tunable characteristics of optical parametric oscillator based on ZnGeP₂ in long-infrared dual-band

Meng Dongdong^{1,2}, Qiao Zhanduo¹, Gao Baoguang^{1,2}, Wang Tianqi¹, Fan Zhongwei^{1*}

(1. The Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A widely tunable long-infrared optical parametric oscillator (OPO) based on ZnGeP₂ (ZGP) with nanosecond pulses output in dual bands was reported in this paper. As a fundamental laser of ZGP-OPO, KTP-OPO of 2.1 μm based on type II phase match was pumped by 1064 nm fundamental delivering <10 ns pulses at 50 Hz. Furthermore, the ZGP-OPO of 7-11 μm based on type I phase match was designed. Continuous-tunable signal wavelengths of 2.815-2.963 μm corresponding idle wavelengths of 7.82-9.08 μm was obtained using angle tuning of ZGP. Continuous-tunable signal wavelengths of 2.624-2.662 μm and 2.745-2.956 μm, which correspond the idle wavelengths of 7.94-9.07 μm and 10.20-10.82 μm respectively, were obtained using pump wavelengths tuning. The single-pulse energy was 0.8 mJ at 8.03 μm, pump to idler conversion efficiency was 9.4%.

Key words: optical parametric oscillation; long-infrared laser; continuous-tunable; dual-band

收稿日期: 2022-01-21; 修订日期: 2022-03-07

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB3602600)

作者简介: 孟冬冬, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事小型化固体激光器、光参量振荡器、激光探测及对抗等方面的研究。

通讯作者: 樊仲维, 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事短脉冲激光技术、精密光学仪器设计等方面的研究。

0 引言

ZnGeP₂ 晶体因具有高的非线性系数 ($d_{\text{eff}}=75 \text{ pm/V}$) 和良好的机械、热特性, 无论是在纳秒高平均功率输出, 还是在皮秒^[1]、飞秒的高峰值功率^[2] 光参量振荡器中, 都有着广泛的应用。在基于 ZGP 的纳秒 8~12 μm 长波红外光参量振荡器研究方面, 带内特征波长激光的平均功率、光束质量提升研究已经取得很多突破性进展, 如国内哈尔滨工业大学采用基于 ZGP 的光参量振荡、放大技术已经实现 10 W 以上、8.3 μm 的纳秒高平均功率输出^[3]。战场气体检测、工业有害气体检测等应用对中、长波段的激光光源有大量需求, 实际使用过程中要求其调谐波段尽量宽, 以实现对多种气体成份的检测^[4~7], 因此, ZGP-OPO 的波长调谐特性研究也具有较高的实用价值。2000 年, K. L. Vodopyanov 等人采用 Er, Cr, Tm:YSGG 产生的 2.93 μm 激光泵浦基于 I 类相位匹配 ZGP 的光参量振荡器获得了 3.8~12.4 μm 可调谐输出, 泵浦 II 类相位匹配 ZGP 光参量振荡器, 获得了 4~10 μm 可调谐输出^[8], 在 8.1 μm 输出时, 闲频光转换效率为 12.8%, 最大输出能量 1 mJ。2004 年, S. Haidar 等人采用 1.06 μm 激光器泵浦 KTP-OPO 产生的 2.02 μm 激光作为 ZGP-OPO 的基频光源, 在一类相位匹配条件下, 通过 ZGP 角度调节的方式, 获得了 5.5~9.3 μm 的连续可调谐输出^[9], 2.02~8 μm 转换效率为 8.25%, 8 μm 激光输出能量 1.3 mJ。2007 年, Katsuhiko Miyamoto 等人采用 KTP-OPO 的可调谐波长泵浦 ZGP-OPO, 实现了 5~10 μm 范围内的可调谐输出, 其中 8 μm 激光在 30 Hz 条件下输出能量 1.3 mJ^[10]。2008 年, Jiro Saikawa 等人通过大口径 PPMg LN 产生的 2.12 μm 激光与可调谐 LN-DFG 激光器产生的 2.6~4 μm 激光通过 ZGP 差频, 产生了 4.6~11.2 μm 连续可调谐激光。2014 年, S. Das 通过对 ZGP-OPO 泵浦调谐的方式, 获得了 3~7 μm 范围内可调谐输出^[11]。由以上研究现状可知, ZGP 在波长调谐方面的主要技术途径包括: 角度调谐、泵浦波长调谐和差频方式。为了获取连续可调谐的长波红外激光, 文中基于一套自主设计的 ZGP-OPO, 开展了角度调谐和泵浦波长调谐实验研究, 结合理论仿真曲线和实测数据, 给出了波长连续可调谐范围。

1 理论分析

ZGP 晶体是正单轴晶体 ($n_e > n_o$), 三波耦合过程中, I 类相位匹配条件可写为:

$$\frac{n_p^o}{\lambda_p} = \frac{n_s^{e(\theta)}}{\lambda_s} + \frac{n_i^{e(\theta)}}{\lambda_i} \quad (1)$$

ZGP 的 e 光折射率公式及 Sellmeier 方程^[12] 如下:

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

$$n_o^2 = 8.0409 + \frac{1.68625\lambda^2}{\lambda^2 - 0.40824} + \frac{1.288\lambda^2}{\lambda^2 - 611.05} \quad (3)$$

$$n_e^2 = 8.0929 + \frac{1.8649\lambda^2}{\lambda^2 - 0.41468} + \frac{0.84052\lambda^2}{\lambda^2 - 452.05} \quad (4)$$

同时, 三波相互作用需要满足能量守恒条件:

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i} \quad (5)$$

由以上方程, 结合文中实验, 计算泵浦光为 2128 nm 时, ZGP 的 I 类相位匹配曲线如图 1 所示。由图 1 可以看出, 当 ZGP 相位匹配角度改变时, 其输出信号光和闲频光的波长也随之改变。由以上方程也可以看出, 当其他条件不变, 泵浦波长改变时, 信号光和闲频光的波长也随之改变, 其仿真图在第 2.3.2 节实验分析部分一并给出。

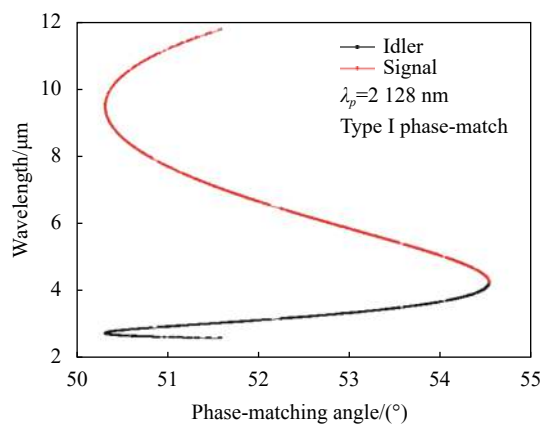


图 1 ZGP I 类相位匹配曲线

Fig.1 Type I phase matching curve of ZGP

2 实验方法及结果分析

长波红外激光波长调谐实验装置如图 2 所示, 实验装置由 50 Hz/1064 nm 基频光、隔离整形组件、KTP-OPO、2.1 μm 偏振分光及波长选择组件、ZGP-

OPO 组成。其中, 50 Hz/1 064 nm 激光经过隔离整形组件后泵浦 KTP-OPO 产生 2.1 μm 脉冲激光, 2.1 μm 激光经偏振分光及波长选择组件完成对非简并 KTP-OPO 输出的不同波长激光的选择分光, 进而经耦合透镜进入 ZGP-OPO 产生长波红外激光。波长调谐功能可充分利用由 KTP-OPO 角度调谐产生的双波长 2.1 μm 激光经过偏振分光选择后泵浦 ZGP-OPO, 结合 ZGP-OPO 的角度调谐特性, 实现较大范围的连续可调谐长波输出。实验中采用 PI 公司的 SP-2300 多光栅单色仪, 对输出的 2.1 μm 波长激光及 ZGP-OPO 的信号光波长进行精确测试。

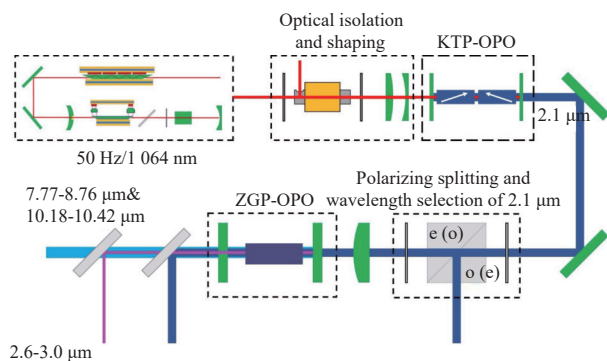


图 2 长波红外激光波长调谐实验装置图
Fig.2 Experimental setup of tunable LIR laser

2.1 50 Hz 窄脉冲基频光脉冲放大实验

该部分研究的目的是为后续的长波光参量振荡调谐研究提供基频光条件。采用电光调 Q 非稳腔结合一级放大的方式, 实现窄脉冲 50 Hz 纳秒脉冲输出及放大, 实验原理图如图 3 所示。

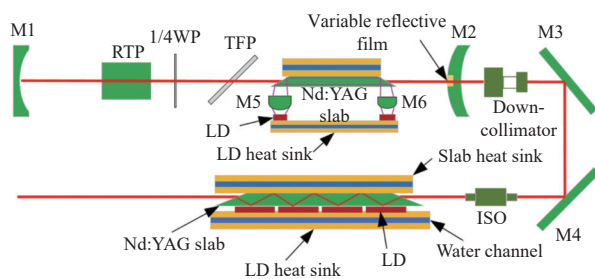


图 3 50 Hz 基频光脉冲放大实验装置
Fig.3 Experimental setup of fundamental light pulse at 50 Hz

图 3 中振荡级采用双端面泵浦模式。泵浦源为两个 6 Bar 的 QCW 模块, 泵浦结构示意图如图 4 所

示。最大工作电流 150 A、峰值功率 1 500 W。泵浦光经两个非球面透镜耦合, 通过两个端面反射进入振荡级板条介质。振荡级板条尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 33.92 mm, 端面 45 $^\circ$ 切割, 镀有 1 064 nm 增透膜和 808 nm 全反膜, 1 064 nm 激光在板条中以 Zig-Zag 方式传输。为了获得更为均匀的吸收和消除端面热效应, 激光介质由五段键合而成。从左至右, 分别为: YAG、Nd:YAG(0.4%)、Nd:YAG(1.0%)、Nd:YAG(0.4%)、YAG。M1 为 1 064 nm 凹面全反镜、M2 为凹凸变反射率高斯输出镜 (VRM), M1、M2 构成凹凸非稳腔, 以控制激光输出模式, 振荡级调 Q 采用加压电光调 Q 方式, 通过在谐振腔中加入电光晶体, 晶体上外加电压产生相位延迟, 结合波片和偏振器件实现对光路的关断和快速打开, 形成 Q 脉冲。M3、M4 为 45 $^\circ$ 1 064 nm 全反射镜, 实现对光路的折转。通过对泵浦参数与谐振腔参数设计, 振荡级产生的光束直径可控制在 2 mm, 经过约 1.5 倍扩束整形后, 经过光隔离器进入放大级板条, 放大级板条采用单面镀金的 4 mm \times 4 mm \times 52.4 mm Nd:YAG 板条, 通过焊接的方式固定在水冷热沉上, 板条泵浦源为 4 个 4 Bar 模块, 最大工作电流 150 A, 最高峰值功率 2 600 W。固定在水冷镀金铜热沉上, 可满足 50 Hz 的频率工作要求。

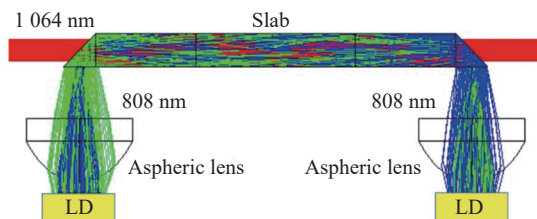


图 4 振荡级泵浦结构示意图
Fig.4 Schematic diagram of pump structure of oscillator

由于该设计目的是为光参量振荡器提供基频光泵浦, 因此需要重点考虑与光束质量相关的发散角设计, 发散角过大会引起相位失配。VRM 非稳腔不仅具有非稳腔小发散角输出的特点, 还可以消除非稳腔固有的衍射环和中心热点。

当激光器工作在 50 Hz, 振荡级注入电流为 90 A 时, 输出能量为 23 mJ。为了保证振荡级的热稳定性, 通过改变放大级电流提升 1 064 nm 基频光能量。放大级注入电流与输出能量关系如图 5 所示。当放大级注入电流从 70 A 升高至 95 A 时, 输出单脉

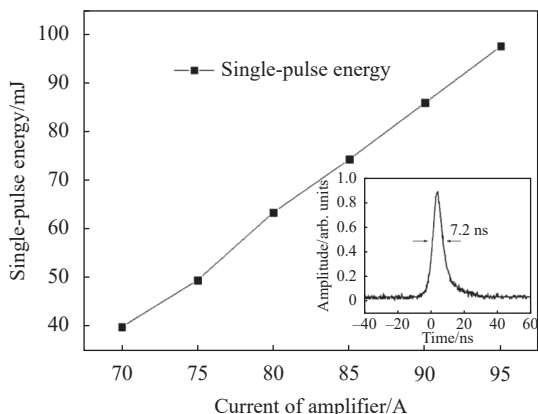


图 5 本振级能量 23 mJ 时放大级输出能量与注入电流关系

Fig.5 Output energy versus incident current as the single-pulse energy of oscillator is 23 mJ

冲能量从 40 mJ 升高至 97.6 mJ。

实验中通过 CCD 和 $f=300\text{ mm}$ 的透镜测量聚焦光斑不同位置的直径, 对光束质量进行测试, 测试结果为 $M^2=2.64$ 。

2.2 KTP-OPO 2.1 μm 输出实验

KTP 参量振荡实验装置图 6 所示。1064 nm 基频泵浦光经过二分之一波片 HWP-1 调整偏振状态后进入光隔离器 ISO, 使泵浦光通过光隔离器的能量最大; 从隔离器出来的泵浦光, 通过二分之一波片 HWP-2 进行偏振状态调整, 以使其与 KTP 的晶轴方向相匹配, 之后经过 M3、M4 组成的缩束镜组后进入 KTP 光参量谐振腔。M1 与 M2 为 OPO 谐振腔的腔镜, 其中 M1 镀 $HT>98\% @1064\text{ nm} \ \& \ HR>99.5\% @2128\text{ nm}$, M2 镀 $HR>99.9\% @1064\text{ nm} \ \& \ R=40\% @2128\text{ nm}$ 。KTP 尺寸为 $7\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 24\text{ mm}$, 两端镀 1064 nm 和 2128 nm 高透膜, 实验采用的是二类相位匹配, 切割角度为 $\theta=51.4^\circ, \varphi=0^\circ$ 。两块 KTP 反向使用, 可以消除其走离效应。2.1 μm 输出能量与 1064 nm 泵浦光能量的关系如图 7 所示, 当 1064 nm 泵浦光能量达到

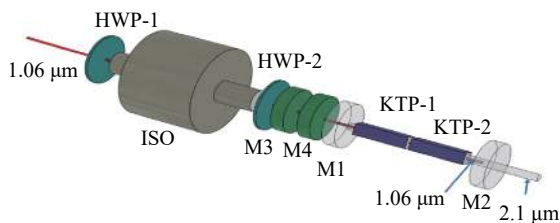


图 6 KTP-OPO 实验原理图

Fig.6 Experimental setup of KTP-OPO

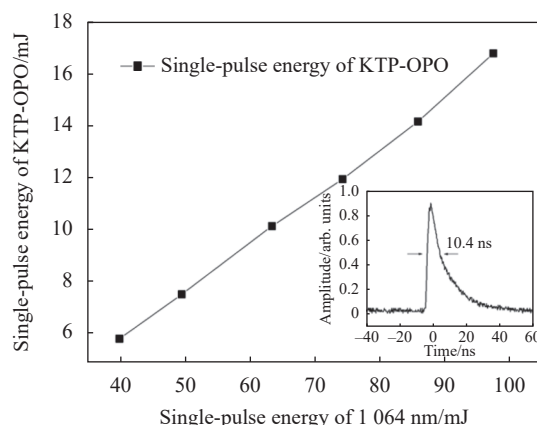
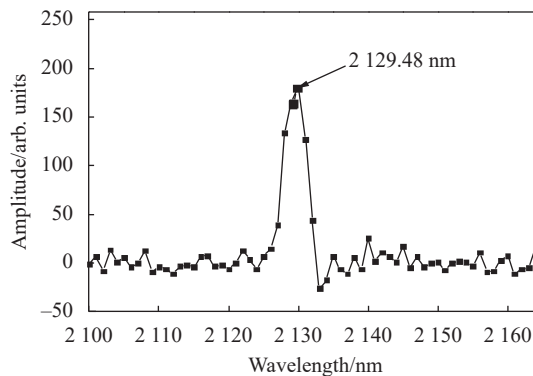


图 7 KTP-OPO 单脉冲能量与 1064 nm 基频光的关系

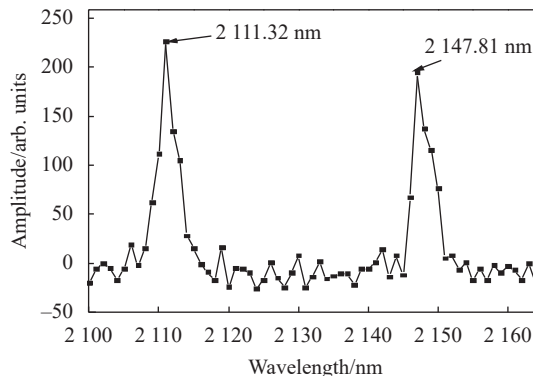
Fig.7 Single-pulse energy of KTP versus fundamental of 1064 nm

97.6 mJ 时, KTP-OPO 输出为 16.8 mJ。

通过调节 KTP 角度可以获得输出光的简并状态及两个波长的输出状态, 如图 8 所示, 图 8 (a) 为 KTP 角度调谐到简并状态条件的输出波长。图 8 (b) 为非简并状态的双波长输出。利用 KTP 角度调谐可以得



(a) KTP-OPO 简并输出波长
(a) Degenerate state wavelength of KTP-OPO



(b) KTP-OPO 非简并状态波长
(b) Nondegenerate state wavelength of KTP-OPO

图 8 KTP-OPO 输出波长特征

Fig.8 Characteristics of wavelength of KTP-OPO

2.10~2.16 μm 范围内多个波长作为下一级 ZGP 参量振荡腔的泵浦光, 以实现长波红外的波长调谐。

由于实验中 KTP-OPO 采用的为二类相位匹配, 所以其产生的信号光与闲频光偏振态互相垂直, 当 KTP-OPO 输出两个波长时, 短波长为 e 光, 偏长波长为 o 光。离开晶体后 e 光为垂直偏振, o 光为水平偏振。

2.3 ZGP-OPO 波长调谐实验

利用前节所述 KTP-OPO 腔产生的 2.1~2.16 μm 的光作为泵浦光。ZGP 参量振荡实验装置如图 9 所示。HWP-3 为波长为 2.1 μm 的二分之一波片, 可以旋转调节 KTP-OPO 输出参量光的偏振方向; PBS 为 2.1 μm 偏振分光棱镜, 水平偏振光透过, 垂直偏振光反射; HWP-4 为波长为 2.1 μm 的二分之一波片, 用来调节 2.1 μm 泵浦光的偏振方向; M5 为 2.1 μm 透镜, 用于调节泵浦光斑大小, 将 2.1 μm 泵浦光耦合至 ZGP-OPO。M6 为 ZGP-OPO 谐振腔的全反镜, 镀 HR@7-10.5 μm&HT@2-3.5 μm; ZGP 切割角度为 50°, 尺寸为 6 mm×6 mm×24 mm; M7 为 ZGP-OPO 谐振腔的输出镜, 镀 2.1~3.5 μm 高透和 7~10.5 μm 半反半透膜。

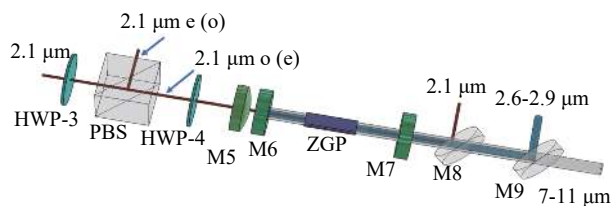


图 9 ZGP-OPO 实验原理图

Fig.9 Experimental setup of ZGP-OPO

当 HWP-3 为 0° 放置时, KTP-OPO 的 e 光被 PBS 反射, o 光透过 PBS, o 光 (长波) 作为 ZGP-OPO 谐振腔的泵浦光; 当 HWP3 为 45° 放置时, KTP-OPO 的 o 光被 PBS 反射, e 光透过 PBS, e 光 (短波) 经 HWP-4 波片调整偏振角度作为 ZGP-OPO 谐振腔的泵浦光。

2.3.1 ZGP-OPO 角度调谐实验

由于通过调谐 ZGP 的角度可以获得长波较大范围的调谐, 实验中, 将 KTP-OPO 调谐输出的 2149 nm 波长作为 ZGP-OPO 的泵浦波长不变时, 改变 ZGP 的角度, 波长变化结果如图 10 所示。横轴为相位匹配角, 纵轴为信号光和闲频光的波长。下方黑线和上方红线分别为信号光和闲频光波长。下方蓝色点为实测 ZGP-OPO 信号光波长, 上方紫色点为根据实测信

号光计算出来的闲频光波长。当 ZGP 角度从 51.2° 调谐到 50.3° 时, 测得信号光波长在 2815~2963 nm 范围内的多组数据。在 ZGP-OPO 的角度调谐实验中, 所测得信号光波长对应的闲频光波长在 7.82~9.08 μm, 在该范围内可实现信号光和闲频光的连续调谐。

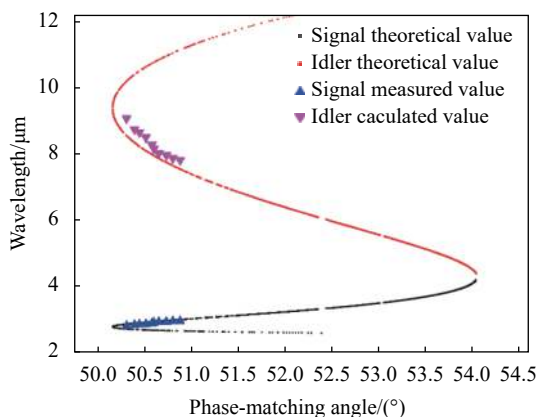


图 10 ZGP-OPO 角度调谐

Fig.10 Angle-tuning of ZGP-OPO

经 2 μm PBS 分光后, 由于两束 2.1 μm 光波长相距较近, 能量约为分光前的 1/2, 实验测得, 当经 PBS 后的泵浦波长为 2149 nm, 信号光输出波长为 2934 nm, 对应的闲频光波长为 8.03 μm 时, 对闲频光能量进行了测试, 测试结果如图 11 所示。当 2.1 μm 有效泵浦能量为 8.46 mJ 时, 长波 8.03 μm 输出能量 0.8 mJ, 对应转换效率约为 9.4%。

采用 VIGO 长波探测器和示波器对 8.03 μm 脉冲

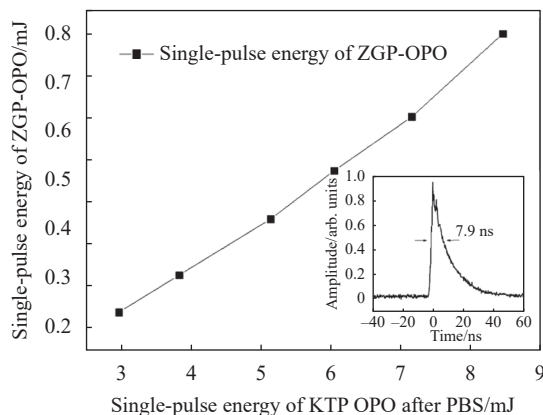


图 11 ZGP 单脉冲能量与泵浦光能量的关系

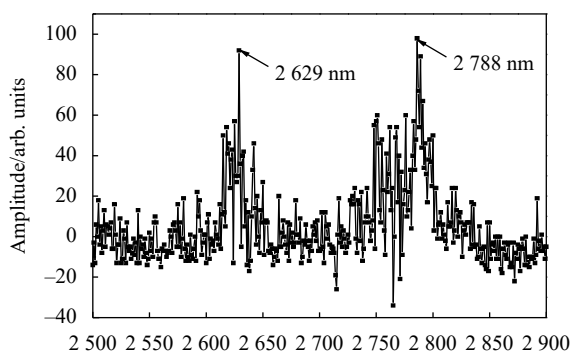
Fig.11 Relationship between the single-pulse energy of ZGP-OPO and the pump energy

宽度测试,单脉冲脉宽为 7.9 ns。

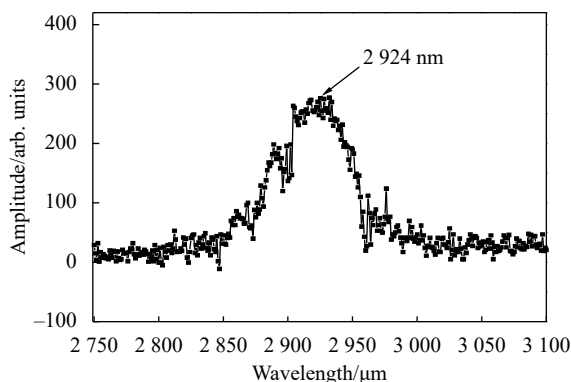
2.3.2 ZGP-OPO 泵浦波长调谐实验

在该线性腔 OPO 实验中,固定泵浦波长为 2 149 nm,通过 ZGP 的角度调节,获得了信号光波长在 2 815~2 963 nm、对应的闲频光波长在 7.82~9.08 μm 范围内的连续可调谐输出。为了获得更宽的长波波长输出范围,开展了泵浦波长调谐实验。

当泵浦光为 KTP-OPO 产生的较短波长时,ZGP 的信号光可以测得两个波长,如图 12 所示。该图为波长 2 111.32 nm 泵浦时,ZGP-OPO 腔输出的信号光为两个波长分别为 2 629 nm 和 2 788 nm,如图 12(a) 所示。当泵浦光波长切换为较长的 2 147.81 nm 时,ZGP 的信号光可以测得一个波长,如图 12(b) 所示。该图为波长 2 147.81 nm 泵浦时,ZGP-OPO 腔输出的信号光。此时只测到了一个信号光波长,波长为 2 924 nm。



(a) ZGP-OPO 信号光光谱 (2 111.32 nm 泵浦)
(a) Signal laser spectrum of ZGP-OPO
(Pump wavelength at 2 111.32 nm)



(b) ZGP-OPO 信号光光谱 (2 147.81 nm 泵浦)
(b) Signal laser spectrum of ZGP-OPO
(Pump wavelength at 2 147.81 nm)

图 12 不同泵浦波长时 ZGP-OPO 信号光光谱

Fig.12 Spectrum of signal of ZGP-OPO at different pump wavelengths

图 13 为理论仿真的波长调谐与实验测试结果的对比。横轴为泵浦光波长,通过 KTP-OPO 的角度调谐改变。纵轴为信号光和闲频光波长。上下两条曲线分别为理论仿真的闲频光波长调谐曲线与信号光波长调谐曲线。下曲线附近的点为实验测试到的 ZGP-OPO 输出的信号光的波长。位于上曲线上的突出显示点为根据实测信号光波长计算预测的闲频光波长应该出现的范围。上曲线附近的散点为根据实测信号波长计算出的闲频光波长。在这里也可以看出 2.1 μm 泵浦波长偏短时,通常可以测到两个信号光;泵浦光偏长时,只能测到一个波长的主要原因在于泵浦光偏长时,波长较短的信号光波长对应的长波红外波长过长,无法满足 ZGP-OPO 腔镜膜系输出,故不能起振,相应的较短的信号光也无法形成有效的参量振荡输出。

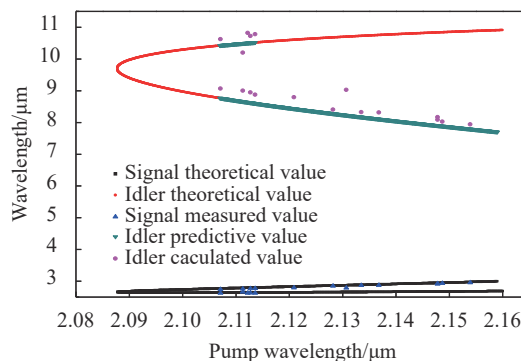


图 13 泵浦光波长调谐

Fig.13 Pump wavelength-tuning

该实验中,当泵浦波长从 2 107.13~2 153.95 nm 调谐时,信号光波长范围为 2 624~2 662 nm 和 2 745~2 956 nm,其对应的长波红外的波长连续调谐范围为 7.94~9.07 μm 和 10.2~10.82 μm 。实现了 7~11 μm 带内两个长波波段内的连续可调谐输出。

3 结 论

文中通过对 KTP-OPO 和 ZGP-OPO 的角度调谐、泵浦波长调谐的实验研究,获得了纳秒窄脉冲长波红外连续可调谐激光输出。具体采用 VRM 腔结合一级放大产生的 1 064 nm 基频光泵浦 KTP-OPO 获得了 2.10~2.16 μm 范围内的多个波长输出,将其作为 ZGP-OPO 的泵浦光。当 ZGP-OPO 泵浦光为 2 149 nm 时,仅采用角度调谐的方式,获得了 2.815~2.963 μm

连续可调谐信号光, 对应闲频光波长连续可调谐范围为 7.82~9.08 μm 。为进一步拓宽调谐范围, 采用了泵浦波长调谐的方式, 当采用 2107.13~2153.95 nm 范围内的激光泵浦 ZGP-OPO 获得了信号光波长范围为 2.624~2.662 μm 和 2.745~2.956 μm 的连续可调谐输出, 对应闲频光范围为 7.94~9.07 μm 和 10.20~10.82 μm 。其中, 当泵浦波长为 2149 nm、信号光输出波长为 2934 nm 时获得了对应长波 8.03 μm 窄脉冲纳秒激光输出, 2.1~8.03 μm 的转换效率为 9.4%。由于该实验中 ZGP-OPO 镀膜膜系限制, 未获得更宽范围的波长输出, 后续研究中将优化膜系, 以实现更宽范围内的长波红外激光连续调谐输出。

参考文献:

- [1] Dherbecourt J B, Godard A, Raybaut M, et al. Picosecond synchronously pumped ZnGeP₂ optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(13): 2197-2199.
- [2] Petrov V, Rotermund F, Noack F, et al. Femtosecond parametric generation in ZnGeP₂ [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(6): 414-416.
- [3] Qian C, Duan X, Yao B, et al. 11.4 W long-wave infrared source based on ZnGeP₂ optical parametric amplifier [J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30195-30201.
- [4] Webber M E, Pushkarsky M B, Patel C. Optical detection of chemical warfare agents and toxic industrial chemicals: Simulation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97: 113101.
- [5] Pushkarsky M, Webber M, Patel C. High-sensitivity high-selectivity detection of CWAs and TICs using tunable laser photoacoustic spectroscopy[C]//Proceedings of SPIE, 2005, 5732: 93-107.
- [6] Weibring P, Edner H, Svanberg S. Versatile mobile lidar system for environmental monitoring [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(18): 3583-3594.
- [7] Khorsandi A, Willer U, Wondraczek L, et al. In situ and on-line monitoring of CO in an industrial glass furnace by mid-infrared difference-frequency generation laser spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(35): 6481-6486.
- [8] Vodopyanov K L, Ganikhanov F, Maffetone J P, et al. ZnGeP₂ optical parametric oscillator with 3.8-12.4 μm tunability [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(11): 841-843.
- [9] Haidar S, Miyamoto K, Ito H. Generation of tunable mid-IR (5.5-9.3 μm) from a 2- μm pumped ZnGeP₂ optical parametric oscillator [J]. *Optics Communications*, 2004, 241(1-3): 173-178.
- [10] Miyamoto K, Abedin K M, Ito H. Wavelength-agile coherent tunable mid-IR ZGP-OPO source and its applications [C]//Proceedings of SPIE, 2007, 6582: 65820U.
- [11] Das S. Pump tuned wide tunable noncritically phase-matched ZnGeP₂ narrow line width optical parametric oscillator [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 69: 13-18.
- [12] Nikogosyan D N. Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey[M]. Berlin: Springer, 2005.