中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

温度调谐$ZnGeP_2$长波红外光参量振荡器

田俊涛 李辉 赵莉莉 李志永 王海 刘松阳 许文宁 白进周 谭荣清

Tunable long-wave infrared optical parametric oscillator based on temperature-adjustable $ZnGeP_2$

TIAN Jun-tao, LI Hui, ZHAO Li-li, LI Zhi-yong, WANG Hai, LIU Song-yang, XU Wen-ning, BAI Jin-zhou, TAN Rong-qing

引用本文:
田俊涛, 李辉, 赵莉莉, 李志永, 王海, 刘松阳, 许文宁, 白进周, 谭荣清. 温度调谐$ZnGeP_2$长波红外光参量振荡器[J]. 中国光学, 2023, 16(4): 861−867. doi: 10.37188/CO.2022−0217
TIAN Jun-tao, LI Hui, ZHAO Li-li, LI Zhi-yong, WANG Hai, LIU Song-yang, XU Wen-ning, BAI Jin-zhou, TAN Rong-qing. Tunable long-wave infrared optical parametric oscillator based on temperature-adjustable $ZnGeP_2$[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 861-867. doi: 10.37188/CO.2022-0217

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2022−0217

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

远红外固体激光器研究进展

Research progress of far−infrared solid−state lasers

中国光学（中英文）. 2018, 11(6): 889 https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0889

国产化掺铥光纤激光振荡器性能研究

Investigation on the performance of a homemade thulium−doped fiber laser oscillator

中国光学（中英文）. 2019, 12(5): 1109 https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1109

声光偏转快调谐脉冲CO_2激光器实验研究

Experimental research on acousto−optic deflection rapid tuning pulsed CO_2 lasers

中国光学（中英文）. 2019, 12(2): 355 https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0355

ZnS:Cu电致发光电压传感器及其温度漂移补偿

ZnS:Cu electroluminescent voltage sensor and its temperature drift compensation

中国光学（中英文）. 2017, 10(4): 514 https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0514

高灵敏度下转换光学测温材料:$NaGd(WO_4)_2$:Yb^{3+}/Er^{3+}

Highly sensitive down−conversion optical temperature−measurement material: $NaGd(WO_4)_2$: Yb^{3+}/Er^{3+}

中国光学（中英文）. 2019, 12(3): 596 https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0596

移动地面站宽温度跟瞄系统信标接收镜头

Wide temperature range beacon receiver lens for tracking and aiming system of mobile ground station

中国光学（中英文）. 2018, 11(5): 790 https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0790

文章编号 2097-1842(2023)04-0861-07

温度调谐 $ZnGeP_2$ 长波红外光参量振荡器

田俊涛[1,2], 李 辉[1], 赵莉莉[1,2], 李志永[1,2], 王 海[1,2], 刘松阳[1,2], 许文宁[1,2], 白进周[1,2], 谭荣清[1,2*]
（1. 中国科学院空天信息创新研究院 激光工程中心, 北京 100094;
2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049）

摘要: 为了获得可调谐长波红外激光输出, 本文设计了一种基于 $ZnGeP_2$(ZGP)温度调谐的长波红外光参量振荡器。采用中心波长为 2097 nm 的 Ho:YAG 激光器泵浦不同相位匹配角的 ZGP 晶体, 通过改变晶体工作温度来研究 $ZnGeP_2$ 光参量振荡器 (ZGP-OPO) 的温度调谐特性。在 15~30 °C 温度范围内, 实现了 7.53~8.77 μm 分段可调谐长波激光输出, 总调谐宽度为 1.24 μm。整个调谐范围内, 输出功率大于 1.503 W, 当闲频光波长为 8.77 μm 时, 输出功率为 1.503 W, 斜率效率和光光转换效率分别为 12.19% 和 6.53%。实验结果表明, ZGP 温度调谐是实现连续可调谐长波红外激光输出的有效技术途径。本实验研究在可调谐长波固体激光器工程化领域具有潜在的应用价值。

关 键 词: 温度调谐; 光参量振荡器; $ZnGeP_2$; 长波
中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2022-0217

Tunable long-wave infrared optical parametric oscillator based on temperature-adjustable $ZnGeP_2$

TIAN Jun-tao[1,2], LI Hui[1], ZHAO Li-li[1,2], LI Zhi-yong[1,2], WANG Hai[1,2], LIU Song-yang[1,2], XU Wen-ning[1,2], BAI Jin-zhou[1,2], TAN Rong-qing[1,2*]
(1. *Laser Engineering Center*, *Aerospace Information Research Institute*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100094, *China*;
2. *School of Electronic*, *Electrical and Communication Engineering*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *rqtan@mail.ie.ac.cn*

Abstract: In order to realize tunable longwave infrared laser, we design a ZGP temperature tuned longwave infrared optical parametric oscillator. A Ho:YAG laser with the center wavelength of 2097 nm is used to pump ZGP crystals with different phase matching angles. The temperature adjustable properties of ZGP-OPO is researched by changing the operating temperature of crystal. The laser with a segment continuously tunable range of 7.53−8.77 μm is realized in the temperature range of 15−30°C, with a total tuning range of

收稿日期: 2022-10-18; **修订日期:** 2022-11-14
基金项目: 国家自然科学基金(No. 61875198, No. 61775212); 脉冲功率激光技术国家重点实验室开放基金(No. SKL2021KF04); 中国科学院仪器设备研制项目(No. YJKYYQ20210045)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61875198, No. 61775212); Open Foundation of State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (No. SKL2021KF04); Scientific Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences (No. YJKYYQ20210045)

1.24 μm. The output power of $ZnGeP_2$-Optical Parametric Oscillator(ZGP-OPO) is greater than 1.503 W over the entire tuning range. The output power is 1.503 W at the idler wavelength of 8.77 μm, and the corresponding slope efficiency and optical conversion efficiency are 12.19% and 6.53%, respectively. The experimental results show that temperature tuning of ZGP is an effective technical method to obtain continuously tunable long-wave infrared laser. This research has potential application value in the field of engineering of tunable long-wave laser.

Key words: temperature tunable; optical parametric oscillator; $ZnGeP_2$; long-wave

1 引 言

可调谐长波红外光源在有毒有害气体监测[1]、激光制导[2]、光电对抗[3]等领域具有较好的应用前景。目前主要的可调谐长波红外激光源主要包括 CO_2 激光器[4-5]、固体激光器[6-7]和量子级联激光器[8]。其中，CO_2 激光器体积较大，而且调谐范围小；量子级联激光器输出功率低。相比较而言，固体激光器具有体积小、调谐范围宽和输出功率高的特点。目前，光参量振荡是固体激光器实现可调谐长波红外输出的主要技术手段之一。

近年来，常用的长波非线性晶体主要有 $ZnGeP_2$ (ZGP)、CdSe、$BaGa_4Se_7$（BGSe）等晶体，而 ZGP 晶体由于其非线性系数和损伤阈值等有明显的优势，已经成为长波红外固体激光器的主要非线性晶体之一。目前，ZGP-OPO 已经实现了功率为 11.4 W，波长为 8.3 μm 的长波红外激光输出[9]，体现出较好的发展前景。而在可调谐 ZGP-OPO 研究方面，2004 年，Haidar S 等人[10]利用波长为 2.02 μm 的 KTP-OPO 作为泵浦源，通过旋转 ZGP 晶体，在 Ⅰ 类相位匹配条件下，获得了 5.5~9.3 μm 的闲频光输出。2020 年，刘高佑等人[11]利用波长为 2091 nm 的 Ho:YAG 激光器作为泵浦源，通过 ZGP 角度调谐，在 Ⅰ 类相位匹配条件下，获得了调谐范围为 9.2~10.7 μm 的闲频光输出。当输出波长为 9.8 μm 时，输出功率为 2.97 W。2022 年，田俊涛等人[12]通过谐振腔补偿技术和 ZGP 角度调谐，利用 Ho:YAG 激光器作为 ZGP-OPO 的泵浦源，在 Ⅰ 类相位匹配下获得了高效率可调谐长波红外激光输出，调谐范围为 8.02~9.15 μm。2014 年，Das S[13]利用调谐范围为 2.2~3.6 μm 的 KTA-OPO 作为泵浦源，获得了调谐范围为 3.7~7.0 μm 的闲频光输出。2022 年，孟冬冬等人[14]利用调谐范围为 2107.13~2153.95 nm 的 KTP-OPO 作为泵浦源，获得了调谐范围为 7.94~9.07 μm 的闲频光输出。

可以看出，目前有关可调谐 ZGP-OPO 的研究主要集中在角度调谐和泵浦波长调谐，而在 ZGP 温度调谐方面的研究较少。1980 年，Bhar G 等人[15]初步研究了基于温度色散特性的 ZGP 光参量振荡相位匹配特性，给出了不同温度下的 Sellmeier 方程参数值。2019 年，Ionina A A 等人[16]利用 CO 激光器作为泵浦源，实验研究了温度变化对 ZGP 和频产生的光谱调谐作用。可以看出，$ZnGeP_2$ 的温度调谐是控制非线性频率变换过程的主要手段之一。而且角度调谐过程中需要转动非线性晶体，因此对晶体尺寸具有一定的要求，同时晶体旋转会引起折射率损耗而降低输出功率，而且晶体旋转也增加了 ZGP-OPO 的工程化难度。泵浦波长调谐对泵浦源调谐能力和光轴稳定性要求较高。相比较而言，温度调谐只需要通过改变 ZGP 晶体的工作温度，在不转动晶体的条件下即可实现可调谐激光输出。因此，开展 ZGP-OPO 温度调谐特性研究，一方面拓展了长波 ZGP-OPO 的调谐方式，另一方面也对长波红外可调谐固体激光器的工程化应用具有重要意义。

本文研究了 ZGP-OPO 温度调谐特性，通过改变 ZGP 的工作温度，实现连续可调谐长波红外激光输出。实验中采用 Ho:YAG 激光器作为泵浦源，在 ZGP 相位匹配角分别为 51.3°、51.0°和 50.6°条件下，在 15~30 °C 范围内进行温度调谐实验研究，分别实现闲频光 7.53~7.67 μm、7.85~8.02 μm 和 8.45~8.77 μm 连续可调谐激光输出，总调谐范围为 1.24 μm。

2　实验装置

ZGP-OPO 长波激光器实验装置如图 1 所示，泵浦源采用声光调 Q 的 Ho:YAG 激光器，中心波长为 2097 nm，光谱宽度为 0.65 nm，最大输出功率为 23.03 W，脉冲宽度为 21.5 ns，重复频率为 10 kHz，光束质量因子小于 1.5。泵浦光经过焦距为 150 mm 的透镜 M1 聚焦之后，束腰位于 ZGP 晶体的中心位置，腰斑直径为 0.65 mm。实验中，ZGP-OPO 采用环形腔结构，谐振方式为信号光单谐振模式，OPO 谐振腔由 4 片平面镜组成，其中 M2、M3 和 M5 为泵浦光 2.1 μm 高透、信号光 2.6~2.8 μm 高反的 45°平面镜，M4 为信号光 2.6~2.8 μm 的输出镜，透过率为 18%。谐振腔物理腔长为 80 mm。闲频光和剩余的泵浦光直接从 M3 镜输出。镜 M6 为 2.1 μm 高反、闲频光 7.5~9.5 μm 高透 45°滤光片，用于过滤剩余的泵浦光，便于测量闲频光输出功率。ZGP 晶体的切割角分别为 θ=51.5°、φ=0°，ZGP 晶体的通光截面为 6 mm×6 mm，长度为 20 mm。ZGP 晶体两端镀有 2.1、2.6~2.8 和 7.5~9.5 μm 的增透膜。为了便于研究温度调谐特性，ZGP 晶体由铟箔包裹后置于通水的铜块中，水温由水冷机控制，温度设置范围为 15~30 °C，精度为 0.1 °C。

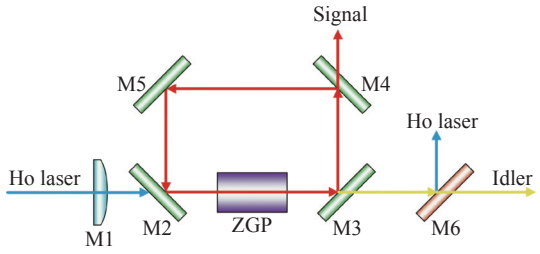

图 1　ZGP-OPO 实验装置图

Fig. 1　Experimental setup for ZGP-OPO

3　实验结果与讨论

ZGP 晶体属于正单轴晶体($n_e > n_o$)，在三波相互作用过程中，能量守恒定律和 I 类相位匹配条件分别为：

$$\frac{1}{\lambda_p}=\frac{1}{\lambda_s}+\frac{1}{\lambda_i}\quad , \tag{1}$$

$$\frac{n_p^o}{\lambda_p}=\frac{n_s^e(\theta)}{\lambda_s}+\frac{n_i^e(\theta)}{\lambda_i}\quad , \tag{2}$$

式中，λ_p, λ_s和λ_i分别为泵浦光、信号光和闲频光波长；n_p^o, $n_s^e(\theta)$和$n_i^e(\theta)$分别为泵浦光、信号光和闲频光波长对应的折射率。其中，折射率是温度T、波长λ和相位匹配角θ的函数。ZGP 晶体的 e 光折射率椭球公式和 Sellmeier[17] 方程分别为：

$$n_e^2(\theta)=\frac{n_o^2 n_e^2}{n_o^2\sin^2\theta+n_e^2\cos^2\theta}\quad , \tag{3}$$

$$n^2(\lambda,T)=A(T)+\frac{B(T)}{1-c/\lambda^2}+\frac{d}{1-f/\lambda^2}\quad . \tag{4}$$

式(4)中的参数值如表 1 所示。其中，参数$A(T)$和$B(T)$是温度T的函数。

表 1　Sellmeier 方程中的各参数值

Tab. 1　Parameter values in Sellmeier equations

Parameter	Value	
	n_e	n_o
$A(T)$	$5.23\text{-}6.4345\times10^{-4}T$ $+1.8373\times10^{-6}T^2$ $-4.9464\times10^{-9}T^3$	$4.4011+7.948\times10^{-5}T$ $+2.0697\times10^{-6}T^2$ $-6.3256\times10^{-9}T^3$
$B(T)$	$4.5037+1.2308\times10^{-3}T$ $-9.7765\times10^{-7}T^2$ $+4.6323\times10^{-9}T^3$	$5.1168+4.0214\times10^{-4}T$ $-1.0452\times10^{-6}T^2$ $+5.8067\times10^{-9}T^3$
c	0.15503	0.134894
d	1.56991	1.31394
f	706.750	603.937

实验中，ZGP 晶体热沉固定在旋转电机(调整精度：25″)上，通过电机旋转 ZGP 晶体来改变其相位匹配角，进而研究不同匹配角下的温度调谐特性。采用傅立叶变换红外光谱仪(分辨率：0.125 cm^{-1})对不同温度下 ZGP-OPO 输出的闲频光波长进行测量，不同相位匹配角下 ZGP-OPO 温度调谐实验和理论结果如图 2 所示，可以看出，测量得到的闲频光波长随温度的变化与理论计算值符合较好。

由图 2 可以看出，ZGP 晶体在 15~30 °C 温度变化范围内，当相位匹配角 θ 为 51.3°时，闲频光波长范围为 7.53~7.67 μm，调谐范围为 0.14 μm；当相位匹配角为 51.0°时，闲频光波长范围为 7.85~8.02 μm，调谐范围为 0.17 μm；当相位匹配角为

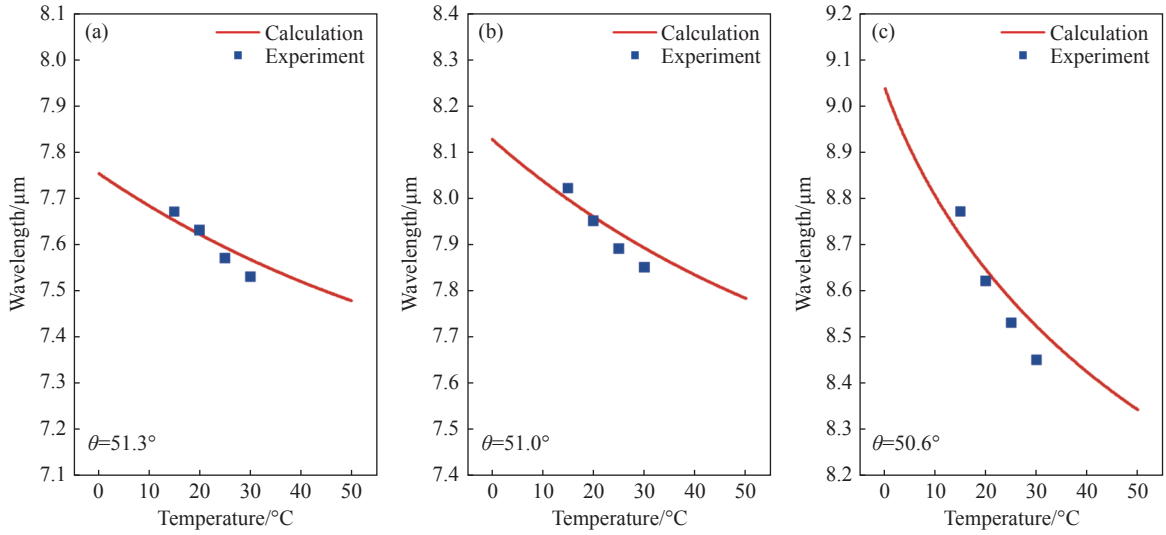

图 2 不同匹配角 θ 下计算的波长调谐曲线和测量的波长。(a) θ=51.3; (b) θ=51.0; (c) θ=50.6

Fig. 2 Calculated wavelength tuning curves and measured wavelengths at different matching angles. (a) θ=51.3; (b) θ=51.0; (c) θ=50.6

50.6°时, 闲频光波长范围为 8.45~8.77 μm, 调谐范围为 0.32 μm。因此, 在 51.3°~50.6°范围内, 在相同工作温度下, 相位匹配角越小, 闲频光输出波长越大; 而且在相同温度变化下, 相位匹配角越小, 对应的调谐范围越大。

根据文献 [12] 中的谐振腔补偿模型, 实验中, 设定 51.3°为 ZGP 晶体的初始位置, 当晶体分别旋转到匹配角为 51.0°和 50.6°的位置时, 谐振腔补偿量分别为 0.21 mm 和 0.45 mm。实验中通过谐振腔补偿技术得到了较高的闲频光输出功率。在泵浦功率为 23.03 W 时, 不同匹配角和温度下的闲频光输出功率如图 3(彩图见期刊电子版)所示。可以看出, 在 7.53~8.77 μm 范围内, 闲频光输出最小功率为 1.503 W, 最大功率为 1.882 W。闲频光输出功率的变化主要是由 ZGP 相位匹配角的变化引起的。相位匹配角越小, 对应的输出波长越大, 在 ZGP 晶体内的透过率依次降低, 输出功率越低。在同一相位匹配角下, ZGP 工作温度变化对闲频光输出功率的影响不大。

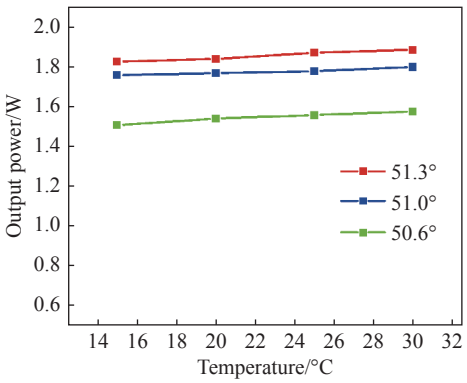

图 3 不同匹配角和温度下的输出功率

Fig. 3 Output powers at different matching angles and temperatures

当闲频光波长为 8.77 μm, 输出功率为 1.503 W 时, 在出光口处放置焦距为 256 mm 的平凸透镜, 通过 90/10 刀口法测量闲频光通过透镜后在不同位置处的光斑直径。通过高斯拟合得到光束质量因子 M^2, 如图 4(彩图见期刊电子版)所示。水平方向(x)和竖直方向(y)上的 M^2 值分别为 1.46 和 1.12。图 4 中插图部分是用红外相机 (Pyrocam III, Spiricon) 记录的相应的光斑图, 可见光束轮廓较好。

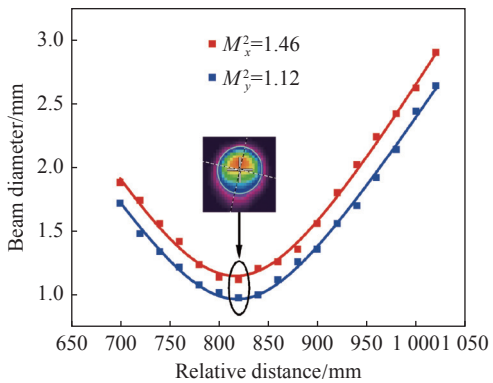

图 4 闲频光 8.77 μm 的光束质量和光斑

Fig. 4 Beam quality and spot of idler at the wavelength of 8.77 μm

如图 5(a) 所示, 当闲频光输出波长为 8.77 μm 时, ZGP-OPO 闲频光最高输出功率为 1.503 W, 斜率效率为 12.19%, 光光转换效率为 6.53%。图 5(a) 插图是在最高输出功率点处测量的脉冲波形, 其显示的脉冲宽度为 20.0 ns。同时, 该闲频光波长下输出功率不稳定度的测量结果如图 5(b) 所示, 25 min 的功率不稳定度(RMS)为 1.23%。

利用傅立叶变换红外光谱仪测量的不同相位匹配角和不同温度下的 ZGP-OPO 闲频光光谱如图 6(彩图见期刊电子版)所示。可以看出, 闲频光光谱宽度最小为 18.1 nm, 最大为 118.7 nm。当输出波长在 7.53~8.02 μm 范围内时, 闲频光光谱宽度均在 18.1~40.2 nm 之内, 其随温度变化不大。但是当输出波长大于 8.45 μm 时, 闲频光光谱宽度随着波长的增大而明显增加, 其中 8.77 μm 处的光谱宽度达到 118.7 nm。这是由于 ZGP 晶体的 I 类相位匹配在 9.7 μm 附近参量允许线宽值大(角度调谐曲线斜率绝对值大), 其光谱增益宽度达到 μm 量级, 因此当输出波长在 7.53~8.02 μm 范围内时, 其增益宽度随波长变化不大, 而当输出波长在 8.45~8.77 μm 范围内时, 光谱增益宽度随着波长增大而明显增大。

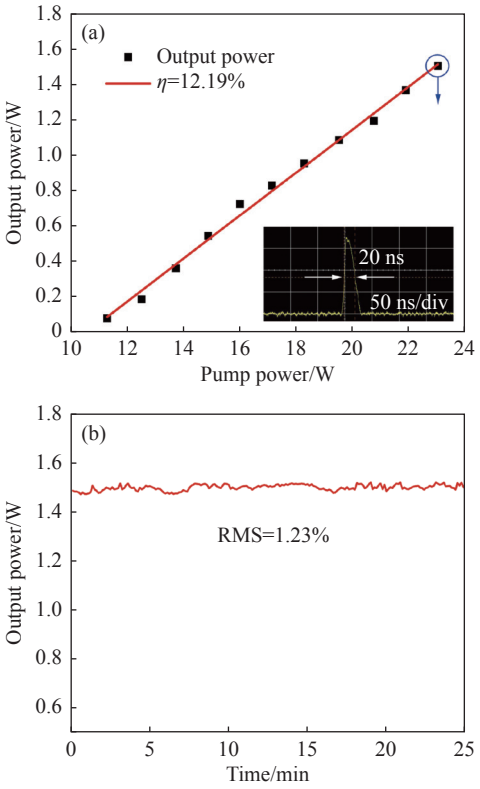

图 5　闲频光 8.77 μm 的输出特性。(a)输出功率和脉冲波形的关系; (b)功率不稳定度

Fig. 5　Output characteristics of idler with the wavelength of 8.77 μm. (a) Relationship between output power and pulse waveform; (b) power instability

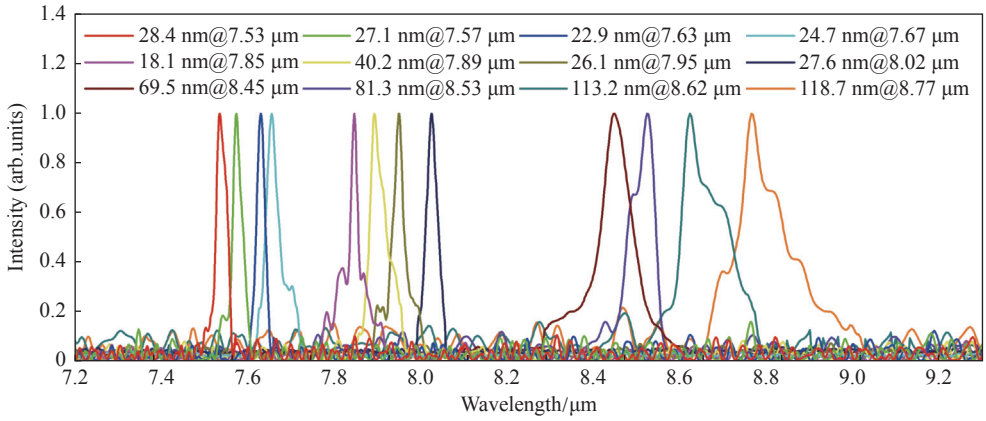

图 6　测量的 ZGP-OPO 闲频光光谱图

Fig. 6　Measured ZGP-OPO idler spectrum

4　结　论

本文通过研究 ZGP-OPO 的温度调谐特性, 获得了连续可调谐长波红外激光输出。采用中心波长为 2097 nm 的 Ho:YAG 激光器作为泵浦源, 当 ZGP 相位匹配角分别为 51.3°、51.0°和 50.6°时, 在 15~30 °C 范围内开展温度调谐特性研究, 分别实现闲频光 7.53~7.67 μm、7.85~8.02 μm 和 8.45~8.77 μm 连续可调谐长波红外激光输出, 总调谐宽度为 1.24 μm。在整个调谐范围内, 输出功率大于 1.503 W, 当闲频光波长为 8.77 μm 时, 输

出功率为 1.503 W，斜率效率为 12.19%，光光转换效率为 6.53%，水平方向和竖直方向上的光束质量分别为 1.46 和 1.12。研究结果表明 ZGP-OPO 温度调谐是实现可调谐长波红外激光的有效手段，并结合角度调谐实现更宽调谐范围的长波红外激光输出，为可调谐长波固体激光器的发展奠定了基础。

参考文献：

[1] MELKONIAN J M, ARMOUGOM J, RAYBAUT M, *et al*.. Long-wave infrared multi-wavelength optical source for standoff detection of chemical warfare agents[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(35): 11156-11166.

[2] 陈颖. 机载先进红外对抗技术发展思考[J]. 航天电子对抗, 2020, 36(1): 19-23.
CHEN Y. Development of airborne advanced infrared countermeasures technology[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2020, 36(1): 19-23. (in Chinese)

[3] SIJAN A. Development of military lasers for optical countermeasures in the mid-IR[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7483: 748304.

[4] LU Y, ZHU Z R, BAI J ZH, *et al*.. Generation of tail-free short pulses using high-pressure CO_2 laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(5): 051401.

[5] 潘其坤, 苗昉晨, 司红利, 等. 紧凑型波长自动调谐脉冲CO_2激光器[J]. 中国光学 (中英文), 2022, 15(5): 1007-1012.
PAN Q K, MIAO F CH, SI H L, *et al*.. Compact pulsed CO_2 laser with wavelength automatic tuning[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 1007-1012. (in Chinese)

[6] 姚宝权, 杨科, 密淑一, 等. 高功率Ho: YAG激光器及其泵浦的磷锗锌、硒镓钡和硒化镉中长波红外非线性光学频率转换研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101002.
YAO B Q, YANG K, MI SH Y, *et al*.. Research progress of high-power Ho: YAG lasers and its application for pumping mid-far-infrared nonlinear frequency conversion in ZGP, BGSe and CdSe crystals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(1): 0101002. (in Chinese)

[7] 李充, 谢冀江, 潘其坤, 等. 中红外光学参量振荡器技术进展[J]. 中国光学, 2016, 9(6): 615-624.
LI CH, XIE J J, PAN Q K, *et al*.. Progress of mid-infrared optical parametric oscillator[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 615-624. (in Chinese)

[8] 黄彦, 张宇露, 高志强, 等. 用于痕量气体检测的宽调谐外腔量子级联激光器研究[J]. 遥测遥控, 2019, 40(1): 20-27.
HUANG Y, ZHANG Y L, GAO ZH Q, *et al*.. Research on widely tunable external cavity quantum cascade lasers for trace gas detection[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2019, 40(1): 20-27. (in Chinese)

[9] QIAN CH P, DUAN X M, YAO B Q, *et al*.. 11.4 W long-wave infrared source based on $ZnGeP_2$ optical parametric amplifier[J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30195-30201.

[10] HAIDAR S, MIYAMOTO K, ITO H. Generation of tunable mid-IR (5.5 - 9.3 μm) from a 2-μm pumped $ZnGeP_2$ optical parametric oscillator[J]. *Optics Communications*, 2004, 241(1-3): 173-178.

[11] LIU G Y, CHEN Y, YAO B Q, *et al*.. 3.5 W long-wave infrared $ZnGeP_2$ optical parametric oscillator at 9.8 μm[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2347-2350.

[12] TIAN J T, LI ZH Y, ZHAO L L, *et al*.. Long-wave infrared $ZnGeP_2$ optical parametric oscillator with improved tunability by use of a cavity compensation technique[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(7): 076102.

[13] DAS S. Pump tuned wide tunable noncritically phase-matched $ZnGeP_2$ narrow line width optical parametric oscillator[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 69: 13-18.

[14] 孟冬冬, 乔占朵, 高宝光, 等. 基于$ZnGeP_2$光参量振荡器的长波红外双波段调谐实验研究[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 2021G008.
MENG D D, QIAO ZH D, GAO B G, *et al*.. Experimental study on tunable characteristics of optical parametric oscillator based on $ZnGeP_2$ in long-infared dual-band[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(5): 2021G008. (in Chinese)

[15] BHAR G, GHOSH G. Temperature dependent phase-matched nonlinear optical devices using CdSe and $ZnGeP_2$[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(8): 838-843.

[16] IONIN A A, KINYAEVSKIY I O, KLIMACHEV Y M, *et al*.. Temperature phase-matching tuning of nonlinear $ZnGeP_2$ crystal for frequency conversion under noncritical spectral phase-matching[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 102: 103009.

[17] GUHA S. Updated temperature dependent Sellmeier equations for $ZnGeP_2$ crystals (Conference Presentation)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10902: 1090210.

作者简介：

田俊涛(1993—), 男, 河南周口人, 博士研究生, 2018 年于中国石油大学(北京)获得学士学位, 主要从事可调谐长波红外固体激光器方面的研究。E-mail: tianjuntao518@163.com

谭荣清(1966—), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 研究员, 博士生导师, 1988 年于北京大学获得物理学学士学位, 1991 年、2001 年于中国科学院电子学研究所获得工学硕士、博士学位, 现任中国科学院空天信息创新研究院研究员, 主要从事激光器和激光技术及应用方面的研究。E-mail: rqtan@mail.ie.ac.cn