

基于 BaGa₄Se₇ 晶体的中红外辐射源稳定性实验研究

李楠^{1,2,3}, 李惟帆^{2,3,4}, 祁峰^{1,2,3,4}, 姚吉勇⁵, 郭丽媛^{2,3}, 路远^{1,2,3}

(1. 沈阳航空航天大学 电子信息工程学院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 辽宁省太赫兹成像感知重点实验室, 辽宁 沈阳 110169;

3. 中国科学院沈阳自动化所光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110069;

4. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169; 5. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190)

摘要:在实际应用中,光源的输出能量稳定性影响着光源在各种应用中的可靠性和性能,如激光治疗、光谱分析、光电对抗以及光成像等领域。本文首先对光学参量振荡器(OPO)系统从激光泵浦源、谐振腔结构和非线性晶体三个方面对输出能量稳定性进行分析。实验方面,使用 BaGa₄Se₇ (BGSe) 晶体搭建脉冲激光泵浦的 3~8 μm 中红外 OPO 辐射源,从激光泵浦源和 OPO 系统两部分对输出能量波动性进行了详细的测量和分析。当输入泵浦能量为 30 mJ, 正入射输出 4.5 μm 波长时,平均能量为 2.151 mJ, 标准差为 56.49 μJ, 计算 RMS 波动为 2.62%。根据分析得出,随着激光增益的提高和腔损耗的减小,输出脉冲的波动减小。该研究为不同应用场景下 BGSe 晶体的红外辐射源的工作参数的选择提供了有益的指导。

关键词:中红外激光; BaGa₄Se₇; 光参量振荡器; 稳定性; 方均根波动

中图分类号: O437; TN248 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.05.004

Experimental study of the stability of a mid-infrared radiation source based on BaGa₄Se₇ crystals

LI Nan^{1,2,3}, LI Wei-fan^{2,3,4}, QI Feng^{1,2,3,4}, YAO Ji-yong⁵, GUO Li-yuan^{2,3}, LU Yuan^{1,2,3}

(1. School of Electronic Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Key Laboratory of Liaoning Province in Terahertz Imaging and Sensing, Shenyang 110169, China;

3. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;

4. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;

5. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In practice, the output energy stability of a light source affects the reliability and performance of the light source in various applications, such as laser therapy, spectral analysis, photoelectric countermeasures, and optical imaging. In this paper, the output energy stability of the optical parametric oscillator (OPO) system is first analyzed from three aspects, laser pumping source, resonant cavity structure and nonlinear crystal. Experimentally, a pulsed laser-pumped 3~8 μm mid-infrared OPO radiation source is constructed using a BaGa₄Se₇ (BGSe) crystal, and the output energy fluctuation is measured and analyzed in detail from both the laser pumping source and the OPO system. When the input pump energy is 30 mJ and the positive-incidence output is 4.5 μm, the average energy is 2.151 mJ with a standard deviation of 56.49 μJ, and the calculated RMS fluctuation is 2.62%. According to the analysis, it is concluded that the fluctuation of the output pulse decreases with the increase of the laser gain and the decrease of the cavity

基金项目: 雄安新区科技创新专项项目 (No. 2022XAGG0181); 辽宁省“兴辽英才”计划项目 (No. XLYC2007074); 中国科学院青年创新促进会资助项目 (No. 2023206) 资助。

作者简介: 李楠, 女, 硕士研究生, 主要研究方向为红外激光产生及探测技术。E-mail: 229753331@qq.com

收稿日期: 2023-11-03; **修订日期:** 2023-12-04

loss. This study provides a useful guide for the selection of operating parameters of infrared radiation sources with BGS_e crystals in different application scenarios.

Keywords: mid-infrared laser; BaGa₄Se₇; optical parametric oscillation; stability; root mean square fluctuation

1 引言

中红外波段包含了 3 ~ 5 μm 和 8 ~ 14 μm 两个重要的大气窗口,覆盖大量原子和分子的吸收峰,在军用及民用领域有着非常重要的应用,如医学诊断^[1-2]、红外对抗^[3]、光谱分析^[4]、气体痕量分析^[5]等领域。BaGa₄Se₇ (BGS_e) 晶体于 2010 年由中科院理化所成功研制。该晶体在透明度范围(0.47 ~ 18 μm),带隙(2.64 eV),损伤阈值(100 MW/cm² @ 1064 nm),二阶非线性系数($d_{23} \approx 20$ pm/V)等方面性能良好^[6],这使其为中红外激光的产生和应用提供了新的可能。基于该晶体的光学参量振荡器(BGS_e-OPO)系统具有调谐范围宽、转换效率高、输出能量稳定等优点,近年来受到了广泛的研究^[7-12]。在实际应用中,辐射源工作的波长范围、可调谐性、能量稳定性、线宽和功率等都是影响应用的重要指标。其中,辐射源的输出能量稳定性在许多领域都非常重要,如精密加工和激光治疗领域,输出能量的稳定性直接影响着加工和治疗的精度和效果;在光学成像和光谱分析中,稳定的光源可以提供准确的信号和可靠的测量结果;在光通信和光纤传输领域,光源的稳定性对于保持信号质量和传输距离的稳定性至关重要。

根据国家标准^[13],衡量固体激光器输出脉冲能量稳定性用不稳定性标准差表示,即一段时间内所有脉冲能量的均方根与能量平均值的比值,本文称为方均根(RMS)波动。因此,在实验中记录一段时间内输出脉冲能量,计算输出脉冲能量的 RMS 波动数值,用来衡量输出能量稳定性。尽管目前商用 1 μm 激光器的稳定性很好,可实现能量 RMS 波动优于 1%,但由于 OPO 系统对晶体的非线性相互作用和外部环境因素的敏感性,使得利用非线性光学频率变换技术产生的中红外输出的能量稳定性不可避免地变差^[14-16]。

在之前的研究中^[9],正入射输出 4.5 μm 闲频光时,能量 RMS 波动为 3.37%。为了进一步改善输出能量稳定性,本文首先对 OPO 系统进行了稳定性分析,主要从激光泵浦源、谐振腔结构和非线性晶体三个方面对其进行了详细的讨论和分析。实验上,基于 BGS_e 晶体搭建了脉冲激光泵浦的 3 ~ 8 μm

可调谐 OPO 系统。从激光泵浦源和 OPO 系统两个方面,对辐射源的输出能量稳定性进行了深入研究。具体而言,我们对 OPO 系统的增益与损耗关系对输出稳定性的影响进行了详细的分析。本文研究结果对中红外光源工作参数的选择具有指导意义,根据实际应用的不同需求,选择不同工作参数。

2 OPO 系统稳定性分析

2.1 激光泵浦源

激光泵浦源对于 OPO 系统的稳定性至关重要。泵浦光能量的波动会直接影响中红外输出的稳定性。选择能量稳定性更好的激光泵浦源可以改善 OPO 系统的输出性能。此外,激光器内部结构的不稳定性和外部环境的影响也会增加泵浦光能量的波动。因此,在使用激光器时,选择适合的工作环境和冷却装置是很重要的。此外,泵浦光的线宽、重复频率、脉冲宽度和光束质量等因素也会对 OPO 系统的输出稳定性产生影响。

纳秒激光器泵浦 OPO 系统的高增益往往导致线宽较宽、频率不稳定或多纵模运转等问题。通过种子注入技术可以有效压缩泵浦光线宽,实现准单频运转,从而减小 OPO 系统的输出能量波动^[17-18]。此外,泵浦光的脉冲宽度和重复频率也会影响能量稳定性。增加泵浦光强度可减小脉冲宽度和脉冲能量波动^[19]。降低激光器的重复频率可以使相邻周期之间的相互作用减弱,减小泵浦光能量波动^[20-21]。

2.2 谐振腔结构

尽管 OPO 结构已经发展了几十年,但对其稳定性的研究仍不完善。根据谐振腔的增益模式,OPO 系统可分为双谐振和单谐振结构。双谐振 OPO 系统中,输出镜对闲频光施加了往返相位,导致输出能量波动较大。为了实现稳定运转,一般采用单谐振结构^[22]。在单谐振 OPO 系统中,根据输出镜对泵浦光的透过率还可以分为单通式与双通式。在双通式谐振腔中,泵浦光两次经过非线性光学晶体,导致输出能量波动较大^[23]。单谐振系统又可分为内腔和外腔结构。内腔 OPO 系统腔内泵浦光能量密度高,容易引起高阶非线性效应使能量波动变大^[24-25]。相比之下,外腔 OPO 腔内泵浦光能量密度较低,输出能量波

动相对较小。根据腔型结构可以分为线性腔和环形腔两类。由于单谐振线性腔中信号光在腔内往返两次通过非线性晶体,在反向通过时可能会导致逆转换,导致系统输出能量波动增强。在单谐振环形腔中,泵浦光、信号光与闲频光在腔内只通过一次非线性晶体,降低了逆转换的可能^[26]。

2.3 非线性晶体

非线性晶体吸收信号光和闲频光(统称为参量光)会导致热效应,如热透镜、热自锁和热致光波导等^[27-31]。这些热效应会影响 OPO 系统的阈值、能量转换效率、输出稳定性和光束质量。除此之外,还存在着其他二阶、三阶或更高阶的非线性效应,如级联 OPO、逆转换和受激拉曼散射等。其中,逆转换是影响输出转换效率、稳定性和光束质量的关键因素,且很难消除。为了降低热效应以及其余非线性效应,在连续或高重频运转中,可以采取一些措施,例如使用优化的输出耦合镜替代信号光全反镜、减小腔内信号光能量密度;选择具有较小吸收系数的非线性晶体、调整非线性晶体长度、以及进行优化制冷等方法。

3 实验装置

为了进一步研究泵浦源、OPO 系统增益与损耗关系对输出稳定性的影响。实验搭建了脉冲激光泵浦的中红外 OPO 系统。根据前文对 OPO 系统稳定性的分析,我们在实验中采用了单通单谐振式 OPO 系统。实验装置如图 1 所示,系统由 Nd:YAG 调 Q 激光器(1064 nm、10 Hz、10 ns)作为泵浦源,泵浦光使用分束比为 3:1 的分束片进行分束,其中透射光束用来监测泵浦光能量稳定性,反射光束通过光隔离器(Isolator)后,经望远镜系统(TS)将光束进行整形和准直至 $1/e^2$ 直径约为 3 mm,并在望远镜系统和 OPO 系统之间加入半波片(HWP)和偏振分束立方体(PBS),调节半波片角度,改变泵浦光的偏振方向和强度,进而调节输入谐振腔的泵浦光能量。

BGSe 晶体尺寸为 10 mm × 7 mm × 15 mm,切割角分别为 $\theta = 52^\circ$ 和 $\phi = 0^\circ$,采用 I 类相位匹配($o \rightarrow e + e$),并在 $x-z$ 面通过旋转晶体实现波长调谐。图 1 中:M1 为分束片;M2、M3 为 1064 nm 高反镜;腔镜 M4 以玻璃为基底,镀膜参数为 1180 ~ 1600 nm 高反、1064 nm 高透;腔镜 M5 以 CaF₂ 为基底,镀膜参数为 1250 ~ 1600 nm 高反、3 ~ 8 μm 高透。为了消除泵浦光能量波动产生的影响,因此在实验设计

中加入监测路,分别使用两个能量计对泵浦光的脉冲能量(Newport 919E-10-20-250)与系统输出闲频光的脉冲能量(Newport 919E-0.1-12-25 K)同步进行测量,便于对输入能量与输出能量波动关系进行观察。为了确保实验的准确性,防止泵浦光和信号光混入探测器导致测量不准确,在能量探测器的前面放置一片定制滤光片 FI,镀膜参数为 1064 nm & 1450 ~ 1750 nm 高反、3 ~ 8 μm 增透,以及一片锗(Ge)片用于完全滤净泵浦光和信号光。

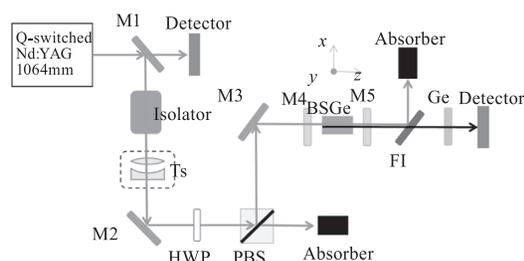


图 1 Nd:YAG 调 Q 激光泵浦 BGSe-OPO 实验装置

Fig. 1 Nd:YAG Q-switched laser pumped BGSe-OPO experimental device

4 实验结果分析与讨论

4.1 泵浦激光器稳定性

为保证激光器的输出稳定和可靠,在使用前需要进行预热。在预热过程中,激光器会逐渐升温,直到达到稳定的工作温度。图 2 为激光器不同工作时间内输出脉冲能量波动特性。根据波动特性曲线,可以发现激光器在刚出光时能量波动较大,随着运行时间的增加,能量逐渐稳定并在约 2 h 左右达到最佳状态;但随着运行时间超过 3 h, RMS 波动超过 1% 并缓慢变差,但仍优于刚出光时。这可能是由于激光器运行时间的增加导致内部温度增加,激光器的散热系统并不能消除全部热量,引发热效应现象,导致激光器输出激光能量波动增大。

在激光器产生不同能量脉冲时,测量脉冲能量 RMS 波动。图 3(a)为不同能量对应的脉冲时间波形(图中曲线从上至下依次为输出能量为 230、500、600 mJ 时,对应脉冲时间波形),脉冲能量越高,脉冲宽度越小。图 3(b)为激光器输出不同能量时 RMS 波动。可以发现,在一定范围内,随着激光脉冲宽度的减小,脉冲能量波动减小。一般情况下,激光器的输出能量越大越稳定,但在特定条件下,如高损耗、热效应和非线性效应等情况下,输出能量较大的激光器可能会出现不稳定性。因此,在实际应用中,需要根

据实际情况选择适合的激光器输出脉冲能量。为了防止当激光器达到最佳输出效果时,输出脉冲能量过大,导致系统元件损坏,因此我们使用 3 : 1 分束片将输出脉冲能量衰减后再通过系统,同时透射光束作为监测路对泵浦激光器波动性进行监测。

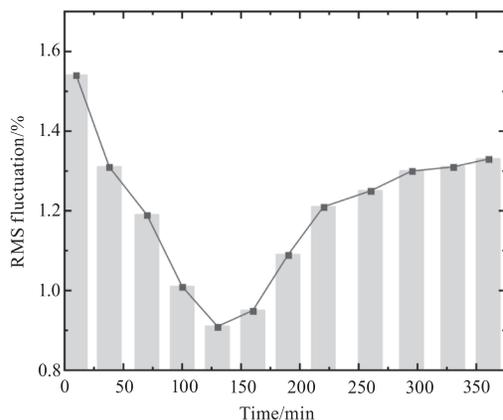
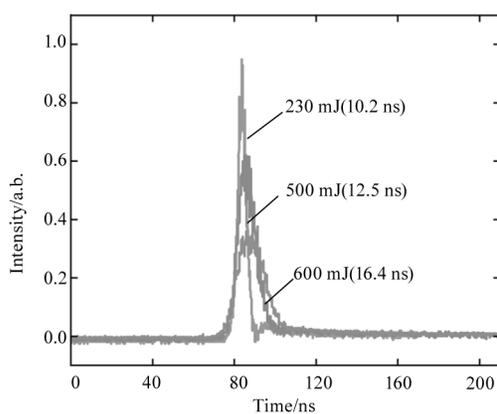
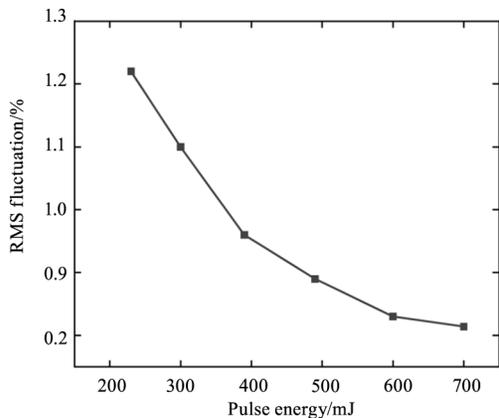


图 2 不同工作时间内激光器输出脉冲能量波动特性
Fig. 2 Fluctuation characteristics of laser pulse energy under different working hours



(a) 脉冲时间波形



(b) 泵浦光能量RMS波动

图 3 激光器输出不同能量

Fig. 3 Laser outputs different energies

为了避免泵浦源本身能量波动产生的稳定性影响,使用监测路对泵浦光波动情况进行监控,间接实

现对泵浦光能量波动和输出闲频光能量波动的同步测量。当激光器能量 RMS 波动约为 1 % 时,在监测路和 OPO 系统前同步测量激光器输出能量和输入 OPO 系统的泵浦光能量。如图 4 为两种位置下测得能量波动情况,可以发现两种位置测得能量波动情况基本一致,因此,在实验中使用监测路能量波动代替描述 OPO 泵浦光能量波动,可以间接实现对泵浦光能量波动和输出闲频光能量波动的同步测量。

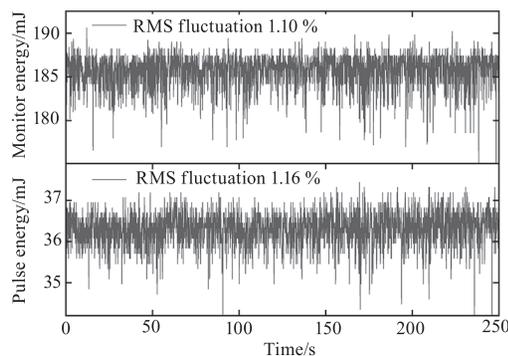


图 4 两种位置能量波动情况

Fig. 4 Energy fluctuations at two different positions

4.2 泵浦光正入射 BGS_e 晶体

固定 OPO 系统腔长为 30 mm 时,在不同输入泵浦光能量下连续记录 3000 个脉冲。如图 5 所示,当腔长固定情况下,输入泵浦光能量越大,OPO 系统增益越大,输出闲频光能量也随之增加,并且更加稳定。这可能是由于泵浦光能量刚达到 OPO 系统阈值时,此时腔内增益较低,增益和损耗两者竞争激烈,导致输出能量波动大,稳定性差;当泵浦光能量逐渐增加,腔内增益远大于损耗,输出能量波动减小,稳定性提高。为了排除激光器本身能量波动影响,我们在插图中使用闲频光与泵浦光 RMS 波动的比值进行描述,更加准确描述输出能量随泵浦能量变化的波动特性。

固定输入泵浦能量为 26 mJ,在不同的腔长下连续记录 3000 个脉冲。如图 6 所示,当输入泵浦能量固定情况下,OPO 系统腔长越短,腔内损耗越小,输出闲频光能量也会随之增加,并且更加稳定。同样地,在插图中使用 RMS 波动比值对波动特性进行准确描述。可以发现当 OPO 系统腔长为 50 mm 时,泵浦光能量波动轻微增大,导致系统输出能量波动增大,而我们在插图中使用 RMS 波动比值的处理方法,消除了此时泵浦能量波动导致的影响,使输出能量随 OPO 腔长变化的波动特性更直观。

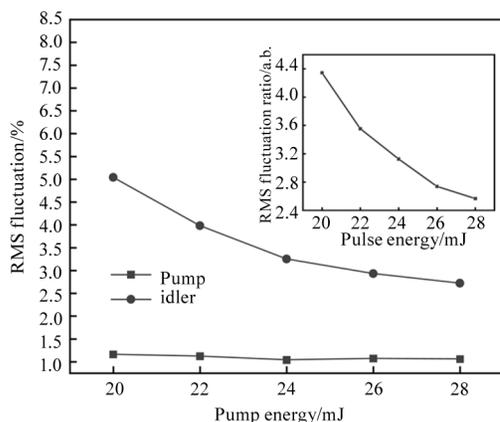


图5 不同泵浦光能量时,输出闲频光能量 RMS 波动
Fig. 5 RMS fluctuation of output idler energy at different pump energy

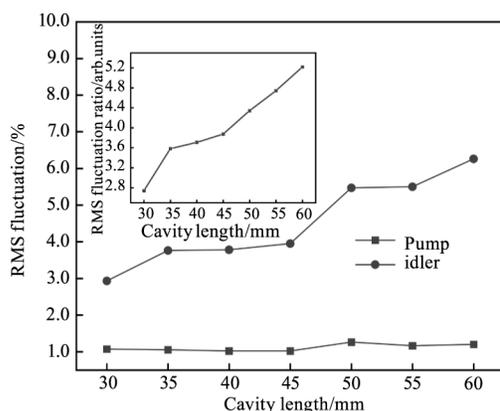


图6 不同腔长时,输出闲频光能量 RMS 波动
Fig. 6 RMS fluctuation of idler energy at different cavity lengths

4.3 波长调谐输出

通过控制高精度电动旋转台调整 BGS_e 晶体角度进行波长调谐,并使用光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6370D)测量信号光波长,然后根据能量守恒关系计算出相应的闲频光波长。当 BGS_e 晶体旋转角度(外部入射角)为 -19.5°~4.5°时,获得波长为 3.0~8.0 μm 的闲频光。输出闲频光能量特性曲线如图 7(a)所示,输出能量在 4 μm 附近输出能量最高。随着旋转角度增加,反射损耗增大,输出能量降低。当向长波方向调节时,输出闲频光的波长越长,光子能量越低,同样的量子转换效率下能量转换效率降低,因此导致 4.5~8.0 μm 波段能量下降趋势快于 3.0~4.5 μm 波段。

固定 OPO 系统腔长为 30 mm 时,分别将输入泵浦能量固定在 26、28 以及 30 mJ(RMS 波动约为 1.1% 左右),旋转晶体角度分别为 -19.5°、-15.5°、-10.5°、-4.0°、0°、4.5°和 16.0°。相应的,输出闲频光波长分

别为 8.0、7.0、6.0、5.0、4.5、4.0 和 3.0 μm。如图 7(b)为在不同泵浦能量下调谐时,输出闲频光能量 RMS 波动。当输入泵浦能量为 30 mJ 时,正入射输出能量 RMS 波动为 2.62%,该数值在之前研究^[9]的基础上取得了显著的提升。因此,通过对激光泵浦源和 OPO 系统进行优化,可以有效改善输出能量的稳定性。

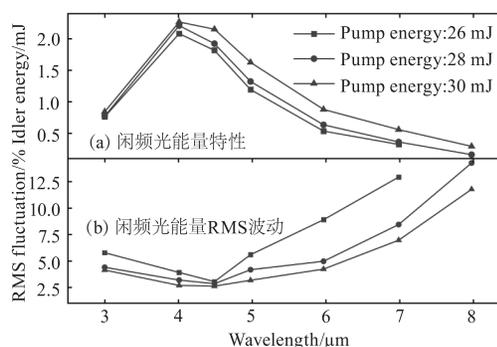


图7 不同泵浦能量下调谐时

Fig. 7 Tuning under different pump energies

根据结果分析,随着泵浦光能量增加,OPO 系统增益提高且波动性减小。当晶体正入射时,能量波动最小;当晶体调谐时,由于随着晶体旋转角度增加,损耗会增加,因此输出能量波动增大。总结来说,随着激光增益的提高和腔损耗的降低,输出脉冲的波动减小。

5 结论

在实际应用中,光源的输出能量稳定性一直是制约其应用的重要因素。在本文中,首先从激光泵浦源、谐振腔结构、非线性晶体三个方面对 OPO 系统稳定性进行了分析。随后,基于 BGS_e 晶体搭建了脉冲激光泵浦的可调谐中红外 OPO 辐射源,对其输出能量波动性进行了详细的测量和分析,包括不同泵浦能量、不同谐振腔长以及调谐时输出能量波动性。随着泵浦能量的增加或腔长的缩短,输出中红外能量增加,同时能量波动减小。当激光器 RMS 波动为 1.1%,系统 OPO 腔长 30 mm,泵浦光能量为 30 mJ 时,正入射输出能量 RMS 波动为 2.62%。当波长调谐时,随着晶体旋转角度增加,输出能量减小,同时能量波动增大。总结来说,随着激光增益的提高和腔损耗的减小,输出中红外脉冲的稳定性提高。

在实际应用中,根据不同的需求首先选择合适的泵浦源,如重复频率、线宽和输出能量等参数,同

时保持适宜的温度、湿度等外部环境。除此之外,进一步优化 OPO 系统,如优化晶体切割角度、晶体长度、改变腔体结构、使用腔内标准具、改善腔镜镀膜等措施,以产生符合需求的波长、能量和稳定性的输出。综合来说,本文为实际应用中红外辐射源系统及工作参数的选择提供了指导,以满足不同的应用需求。

参考文献:

- [1] Zhang Y, He Y, Liang S, et al. Non-invasive, opsin-free mid-infrared modulation activates cortical neurons and accelerates associative learning [J]. *Nature Communications*, 2021, 2730:12.
- [2] Sebiskveradze D, Bertino B, Gaydou V, et al. Mid-infrared spectral microimaging of inflammatory skin lesions [J]. *Biophotonics*, 2018, 11: e201700380.
- [3] Wang K X, Yao C F, Wu Y J, et al. Laser-interfered studies in HgCdTe infrared focal plane array detector by high-repetition-rate mid-infrared supercontinuum fiber laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 163:109433.
- [4] He Shaojie, Hu Yue, Lu Wei, et al. Research on screening methods for high-flow human infrared temperature measurement [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(6):797-801. (in Chinese)
何少杰, 胡月, 鹿玮, 等. 大流量人体红外测温筛查方法研究 [J]. *激光与红外*, 2021, 51(6):797-801.
- [5] Chen Zichong, Gao Zhihui, Cao Zhi, et al. Research on CO₂ gas concentration detection system based on mid infrared LED [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(11):1255-1258. (in Chinese)
陈子聪, 高致慧, 曹志, 等. 基于中红外 LED 的 CO₂ 气体浓度检测系统研究 [J]. *激光与红外*, 2012, 42(11):1255-1258.
- [6] Guo Liyuan, Ma Yong, Qi Feng, et al. Research progress on the application of non oxide crystals in long wave infrared light sources [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2021, 33(2):230-241. (in Chinese)
郭丽媛, 马勇, 祁峰, 等. 非氧化物晶体应用于长波红外光源的研究进展 [J]. *重庆邮电大学学报: 自然科学版*, 2021, 33(2):230-241.
- [7] Liu P X, Guo L Y, Qi F, et al. Large dynamic range and wideband mid-infrared upconversion detection with BaGa₄Se₇ crystal [J]. *Optica*, 2022, 9(1):50-55.
- [8] Guo L Y, Liu P X, Qi F, et al. High responsivity mid-infrared indirect detection based on nonlinear crystal BaGa₄Se₇ [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 131:104705.
- [9] Li W F, Cheng N J, Qi F, et al. Output characteristics of 3-8 μm mid-infrared source based on BaGa₄Se₇ crystal [J]. *Applied Optics*, 2023, 62:172-177.
- [10] Fu Qiaogiao, Liu Pengxiang, Qi Feng, et al. Experimental study on the detuning characteristics of parallel planar cavity optical parametric oscillators [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(24):155-160. (in Chinese)
付俏俏, 刘鹏翔, 祁峰, 等. 平行平面腔光学参量振荡器失谐特性实验研究 [J]. *中国激光*, 2022, 49(24):155-160.
- [11] Bian J T, Kong H, Ye Q, et al. Narrow linewidth BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator [J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20:041901.
- [12] Kang M Q, Deng Y, Yao J Y, et al. High power and efficient 4.43 μm BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator pumped at 1064 nm [J]. *Photonics*, 2022, 9:105.
- [13] 中国国家标准化管理委员会. 固体激光器主要参数测量方法, GB/T 15175-2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [14] Kreuzer L B. Single and multi-mode oscillation of the singly resonant optical parametric oscillator [J]. *Applied Physics Letters*, 1969, 15(8):263-265.
- [15] Sabouri S G, Khorsandi A, Ebrahim-Zadeh M. Power instability of singly resonant optical parametric oscillators: Theory and experiment [J]. *Optics Express*, 2012, 20(25):27442-27455.
- [16] Phillips C R, Fejer M M. Stability of the singly resonant optical parametric oscillator [J]. *JOSA B*, 2010, 27(12):2687-2699.
- [17] Long Qiqiang, Zhong Kai, Hong Guanglie. Research on seed injected circular cavity human eye safe KTP parametric oscillator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6):128-133. (in Chinese)
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):128-133.
- [18] He Y, Orr B J. Tunable single-mode operation of a pulsed optical parametric oscillator pumped by a multimode laser [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(27):4836-4848.
- [19] Pasandideh K, Rahbari M, Sadighi B. The effect of pulse-width of pumping pulse on the stability of distributed feed-

- back dye laser[J]. 2017, *Laser Physics*, 27:045001.
- [20] Wang Y, Gong M, Huang L. High-pulse-stability double-end continuous-grown YVO₄/Nd:YVO₄/YVO₄ acousto-optically Q-switched laser at high repetition rates[J]. *Laser Physics*, 2010, 20:1316 – 1319.
- [21] Ma Y, Zhu X, Yang L, Tong M, Norwood RA, Wei H, Chu Y, Li H, Dai N, Peng J, Li J, Peyghambarian N. Numerical investigation of GHz repetition rate fundamentally mode-locked all-fiber lasers[J]. *Optics Express*. 2019, 27(10): 14487 – 14504.
- [22] Liu Jianhui, Liu Qiang, Gong Mali. The inverse conversion problem in optical parametric processes[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(2): 348 – 352. (in Chinese)
刘建辉, 柳强, 巩马理. 光参量过程中的逆转换问题[J]. *物理学报*, 2011, 60(2): 348 – 352.
- [23] He Yixin. Research on key technologies of tunable medium and far infrared radiation sources[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. (in Chinese)
贺奕焮. 可调谐中远红外辐射源关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [24] Duan Y, Zhu H, Ye Y, et al. Efficient RTP-based OPO intracavity pumped by an acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1314 – 1317.
- [25] Jiao Z, Guo J, He G, et al. Narrowband intracavity MgO:PPLN optical parametric oscillator near degeneracy with avolume Bragg grating[J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, 56: 230 – 233.
- [26] Lin S T, Lin Y Y, Wang T D, et al. Thermal waveguide OPO[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1323 – 1319.
- [27] Bae I H, Moon H S, Kim S K, et al. Self-guided operation of singly resonant continuous-wave optical parametric oscillator based on bulk MgO-doped PPLN [J]. *Applied Physics B*, 2012, 106(4): 797 – 801.
- [28] Lin S T, Lin Y Y, Wang T D, et al. Thermal waveguide OPO[J]. *Opt. Express*, 2010, 18(2): 1323 – 1319.
- [29] Liu L, Wang X B, Li X, et al. Thermal-induced dephasing in mid-infrared continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(1): 24 – 28.
- [30] Vainio M, Peltola J, Persijn S, et al. Thermal effects in singly resonant continuous-wave optical parametric oscillators[J]. *Applied Physics B*, 2009, 94(3): 411 – 427.
- [31] Buse K. Light-induced charge transport processes in photorefractive crystals I: Models and experimental methods [J]. *Applied Physics B*, 1997, 64(3): 273 – 281.