

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.03.01

基于 1.5 μm 全保偏掺铒光纤 MOPA 驱动的高功率中红外飞秒光学参量放大器

王煜, 武腾飞*, 韩继博

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 传统光学参量放大系统的应用效果长期受驱动源性能限制, 针对该问题, 设计了一种基于 1.5 μm 全保偏掺铒光纤主振荡功率放大(Master Oscillator Power-Amplifier, MOPA)系统驱动的高功率中红外光学参量放大器。采用中心波长为 3.27 μm 的连续波带间级联激光器作为种子源, 利用飞秒泵浦脉冲在周期极化铌酸锂晶体中对连续波种子光进行非线性切片与高效放大。实验结果表明: 在泵浦功率为 4.6 W 时, 产生了中心波长为 3.25 μm 、带宽为 36.4 nm、最高平均功率达 440 mW 的中红外飞秒脉冲输出。采用的 1.5 μm 泵浦方案, 有效避免了传统 1 μm 泵浦系统中存在的寄生可见光吸收及热透镜效应问题, 在确保极佳抗热损伤能力与更高量子转化效率的前提下, 配合长非线性晶体获得了极高的参量增益。此外, 射频频谱测试表明: 其基频信噪比优于 50 dB, 验证了该系统在高功率输出条件下仍具备优异的时频稳定性。该方案为发展高功率、紧凑型中红外飞秒光源提供了一条具有良好扩展潜力的技术路径。

关键词: 中红外; 光学参量放大; 飞秒激光; 周期极化铌酸锂; 主振荡功率放大; 掺铒光纤放大器; 连续波注入; 近简并参量过程

中图分类号: TB9; O43

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 03-0001-07

High-power mid-infrared femtosecond optical parametric amplifier driven by a 1.5 μm all-polarization-maintaining erbium-doped fiber MOPA

WANG Yu, WU Tengfei*, HAN Jibo

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The application effectiveness of traditional optical parametric amplification systems has long been limited by the performance of the driving source. To address this issue, a high-power mid-IR optical parametric amplifier is demonstrated using a 1.5 μm all-polarization-maintaining erbium-doped fiber master oscillator power amplifier (MOPA) system. The OPA is seeded by a 3.27 μm continuous-wave (CW) interband cascade laser, where the femtosecond pump pulses perform nonlinear slicing and efficient amplification of the CW seed within a periodically poled lithium niobate crystal. Experimental results demonstrate that at a pump power of 4.6 W, the system delivers mid-IR femtosecond pulses centered at 3.25 μm with a spectral bandwidth of 36.4 nm and a maximum average power of up to 440 mW. Notably, the 1.5 μm pumping scheme employed in this work fundamentally circumvents the bottlenecks of parasitic visible absorption and se-

收稿日期: 2026-04-25; 修回日期: 2026-05-10; 录用日期: 2026-05-28; 发表日期: 2026-06-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62475246)

引用格式: 王煜, 武腾飞, 韩继博. 基于 1.5 μm 全保偏掺铒光纤 MOPA 驱动的高功率中红外飞秒光学参量放大器[J]. 计测技术, 2026, 46(3): 1-7.Citation: WANG Y, WU T F, HAN J B. High-power mid-infrared femtosecond optical parametric amplifier driven by a 1.5 μm all-polarization-maintaining erbium-doped fiber MOPA [J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(3): 1-7.

vere thermal lensing inherently suffered by traditional 1 μm pumped architectures. Benefiting from this exceptional immunity to thermal damage and a higher quantum efficiency limit, massive parametric gain is successfully extracted by utilizing a long nonlinear crystal. Furthermore, radio-frequency spectral analysis reveals a signal-to-noise ratio exceeding 50 dB at the fundamental frequency, confirming that the system maintains superior time-frequency stability alongside its high-power performance. This architecture offers a highly scalable and robust technical paradigm for the development of compact, high-power mid-infrared femtosecond sources.

Key words: mid-infrared; optical parametric amplification; femtosecond laser; periodically poled lithium niobate; master oscillator power amplifier; erbium-doped fiber amplifier; continuous-wave seeding; near-degenerate parametric process

0 引言

突破相干中红外光源的功率负载极限与时频稳定性瓶颈,是精密光谱学、强场物理及宽带大气检测等领域的核心诉求^[1-5]。在众多产生中红外超快脉冲的技术方案中,基于掺镁(MgO)周期极化铌酸锂(Periodically Poled Lithium Niobate, PPLN)的光学参量放大(Optical Parametric Amplification, OPA)技术因其非线性系数高、调谐范围广而成为主流^[6-9]。然而,传统OPA系统的应用效果长期受限于驱动源的性能。占据主导地位的1 μm 波段飞秒泵浦源(如掺镱光纤激光器)在驱动PPLN产生3 μm 以上长波光时,虽然得益于群速度匹配具备产生超宽带脉冲的物理条件,但在向高平均功率扩展时面临着严峻的挑战:① 1 μm 强泵浦下的寄生倍频会产生能量极高的可见绿光,通过诱导多光子吸收引发剧烈的热透镜效应,甚至导致晶体的永久性光学损伤;② 较低的量子转化极限限制了能量转移的理论上限。上述热阻碍和低效转化问题共同限制了中红外OPA的性能提升^[10-13]。

近年来,将窄线宽连续波激光器如带间级联激光器(Interband Cascade Lasers, ICL)发出的光作为种子源注入OPA,被证明是提升中红外输出时频纯度的有效途径^[14-16]。这种配置摒弃了复杂的同步谐振腔,利用飞秒泵浦脉冲在时域上对连续波(Continuous-Wave, CW)信号进行增益门控,从而实现时序特征的完美复制。然而,若要彻底释放该方案的功率潜力,必须从非线性动力学的根源出发,寻求更优的泵浦波长。

针对上述问题,设计了一种基于1.5 μm 全保偏掺铒光纤主振荡功率放大(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)系统驱动的高功率、高稳定性中

红外飞秒OPA光源。通过优化级联放大链路,解决传统中红外光源在环境鲁棒性与系统紧凑化之间的矛盾,实现高效且极其稳定的超快脉冲输出。通过精确调制非线性晶体的相位匹配条件及热补偿机制,在保持飞秒级超短脉冲宽度的同时,显著提升中红外波段的平均功率。搭建1.5 μm MOPA驱动的高功率中红外飞秒光学参量放大器系统并开展实验,验证其应用效果。

1 实验原理、装置与方法

1.1 实验原理

基于OPA过程中的增益门控效应产生高功率中红外飞秒脉冲。当窄线宽的连续波种子光与超短飞秒泵浦脉冲在非线性晶体中空间重叠时,参量增益仅存在于飞秒泵浦脉冲的时间包络内,这种瞬态的非线性作用相当于一个超快的光学“门”,它能对输入的连续波种子进行时域切片,将其直接转化为与泵浦光脉宽相近的飞秒脉冲,并通过参量放大过程获得巨大的能量增益,从而同时继承连续光波段的可调谐性与泵浦光的超快时域特性。

此外,在相位匹配与增益管理方面,采用1.5 μm 波段的飞秒激光作为泵浦源驱动PPLN晶体产生3.25 μm 中红外激光。由于信号光与闲频光波长相近,该过程属于近简并参量放大。虽然1.5 μm 泵浦脉冲与中红外信号光之间存在固有的群速度失配,导致长晶体中的有效相位匹配带宽受到限制,但是得益于1.5 μm 泵浦对寄生热透镜效应的完全免疫,系统得以突破传统的热负载瓶颈。采用长达25 mm的PPLN晶体,获得了极大的参量增益,构成了本系统实现紧凑、高功率中红外输出的关键物理基础。

1.2 实验装置与方法

基于 $1.5\ \mu\text{m}$ MOPA 驱动的高功率中红外飞秒光学参量放大器实验装置如图1所示,其主要由全保偏掺铒光纤 MOPA 模块和中红外 OPA 模块两部分构成。

在 MOPA 模块中,采用1台自研的全保偏掺铒光纤飞秒光学频率梳作为种子源。种子激光脉冲首先被导入一段保偏色散补偿光纤中进行时域展宽,展宽后的皮秒脉冲随后进入预放大级。该级采用双向泵浦结构,由2台单模半导体激光器通过保偏隔离波分复用器将泵浦光耦合至一段高掺杂保偏掺铒光纤(型号为 Er80-4/125-HD-PM)中,实现脉冲能量的预放大。随后,预放大脉冲经泵浦合束器注入主放大级。主放大级以高功率多模泵浦作为驱动源,采用保偏铒镱共掺双包层光纤作为增益介质,将脉冲平均功率提升至瓦级以上。放大后的高功率脉冲经准直隔离器输出至空间光路,经透镜对扩束整形后,入射至一对平行放置的透射式衍射光栅(型号为 T1000C-32*20-94)进行

色散补偿与脉冲压缩。压缩后的高功率飞秒泵浦光经高反镜转折后注入 OPA 模块。

在 OPA 模块中,采用1台中心波长为 $3.27\ \mu\text{m}$ 、线宽小于 $3\ \text{MHz}$ 、最大功率 $6.8\ \text{mW}$ 的连续中红外 ICL 作为信号源。为实现泵浦光与种子光在非线性晶体内的最佳空间重叠,ICL 输出的连续光首先经过氟化钙透镜对进行光斑整形,随后 $1.5\ \mu\text{m}$ 飞秒泵浦光与 $3.27\ \mu\text{m}$ 连续种子光在双色镜处实现高精度合束,并由焦距为 $100\ \text{mm}$ 的透镜聚焦至非线性晶体中心。实验选用的非线性晶体是长度为 $25\ \text{mm}$ 的 MgO:PPLN ,其极化周期采用扇形渐变结构($31.5\ \mu\text{m}$ 至 $35.5\ \mu\text{m}$)。晶体被精密封装于安装在多轴平移台上的温控炉中,以便通过精确调节温度与晶体横向位置来满足准相位匹配条件。实验中通过精细调控 PPLN 晶体的工作温度,使其最佳相位匹配峰与 $3.27\ \mu\text{m}$ 连续波种子源精准重合,满足非线性转换的相位要求。经参量放大过程产生的中红外飞秒脉冲由透镜准直输出,并利用滤光片滤除残余的泵浦光和信号光,最终获得高纯度的中红外飞秒脉冲。

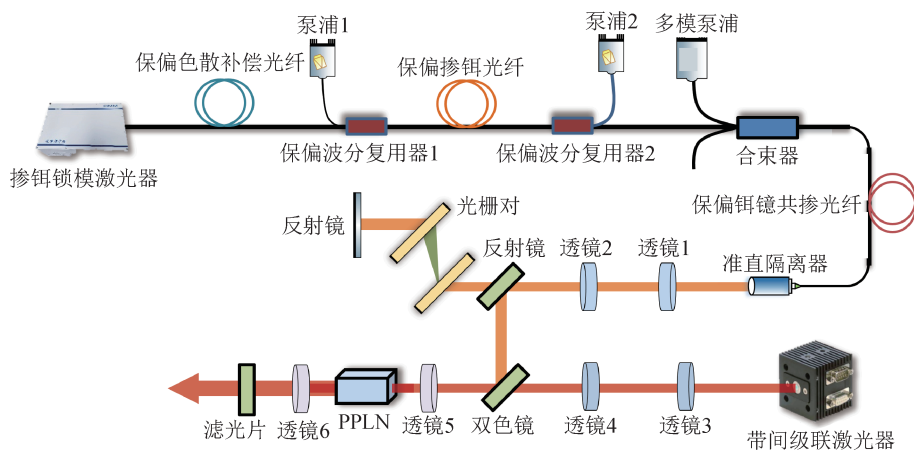


图1 基于 $1.5\ \mu\text{m}$ MOPA 驱动的高功率中红外飞秒光学参量放大器实验装置

Fig.1 Experimental setup of the high-power mid-infrared femtosecond optical parametric amplifier driven by a $1.5\ \mu\text{m}$ MOPA

2 实验结果与讨论

OPA 系统的非线性转换效率与输出稳定性在很大程度上取决于驱动泵浦脉冲的质量。因此,首先对 MOPA 系统前端的 $1.5\ \mu\text{m}$ 全保偏掺铒飞秒光纤振荡器的输出特性进行详细表征。 $1.5\ \mu\text{m}$ 飞秒光纤振荡器输出特性如图2所示,该振荡器输出光谱中心波长位于 $1560\ \text{nm}$ 附近,光谱半高宽(Full Width at

Half Maximum, FWHM)约为 $32.15\ \text{nm}$ 。为评估该振荡器的锁模稳定性,利用频谱分析仪测量其射频频谱。在 $0\sim 2000\ \text{MHz}$ 的宽泛扫频条件下,射频图谱展现出平坦且清晰的高阶谐波序列,未观察到由调 Q (Q 为品质因子)不稳定性或多脉冲运转引起的调制边带。其基频信号精准达到 $100.00\ \text{MHz}$,且信噪比超过 $50\ \text{dB}$,这表明该全保偏光纤种子源处于极度稳定的连续单脉冲锁模运转状态,能够

为后续功率放大与参量转换提供高度可靠的脉冲基准。

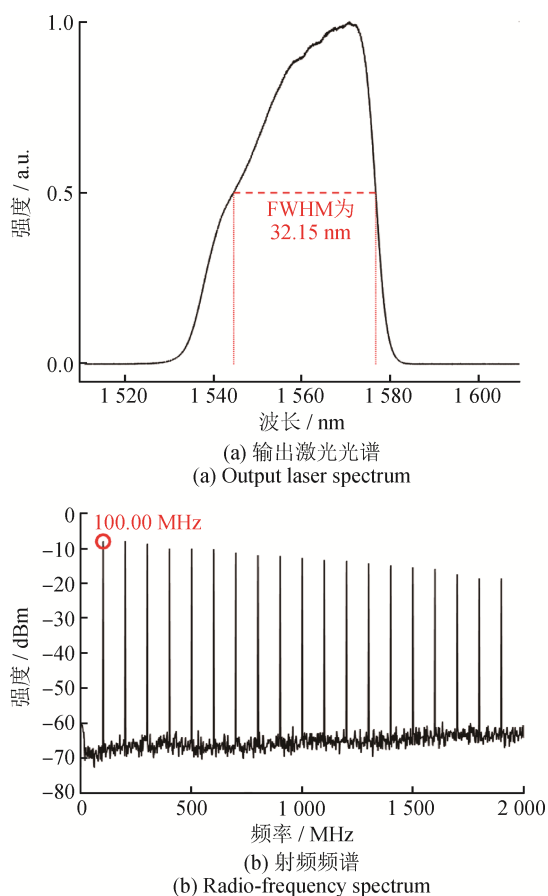


图2 1.5 μm 飞秒光纤振荡器输出特性

Fig.2 Output characteristics of the 1.5 μm femtosecond fiber oscillator

在MOPA模块中,将种子激光脉冲依次进行时域展宽、预放大和主放大,最后采用光栅对进行激光脉宽压缩。图3为MOPA模块放大和脉冲压缩阶段实验测量脉冲特性,可以看出:经脉宽展宽后的脉冲激光光谱保持了较为平滑的高斯分布,光谱出现了窄化,光谱宽度大约为15 nm,对应脉冲宽度大约为20 ps,有效降低了后续主放大过程中过度非线性效应的影响。随后采用主放大级进一步放大激光脉冲功率,如图3(c)所示,随着光纤中激光功率的迅速增加,主放大器输出光谱发生了一定程度的非线性展宽,并呈现多峰调制结构。最后,采用光栅对压缩放大后的激光脉冲的脉宽,当泵浦功率为20 W时,获得了最高输出激光功率4.6 W。利用自相关仪测得压缩脉冲自相关

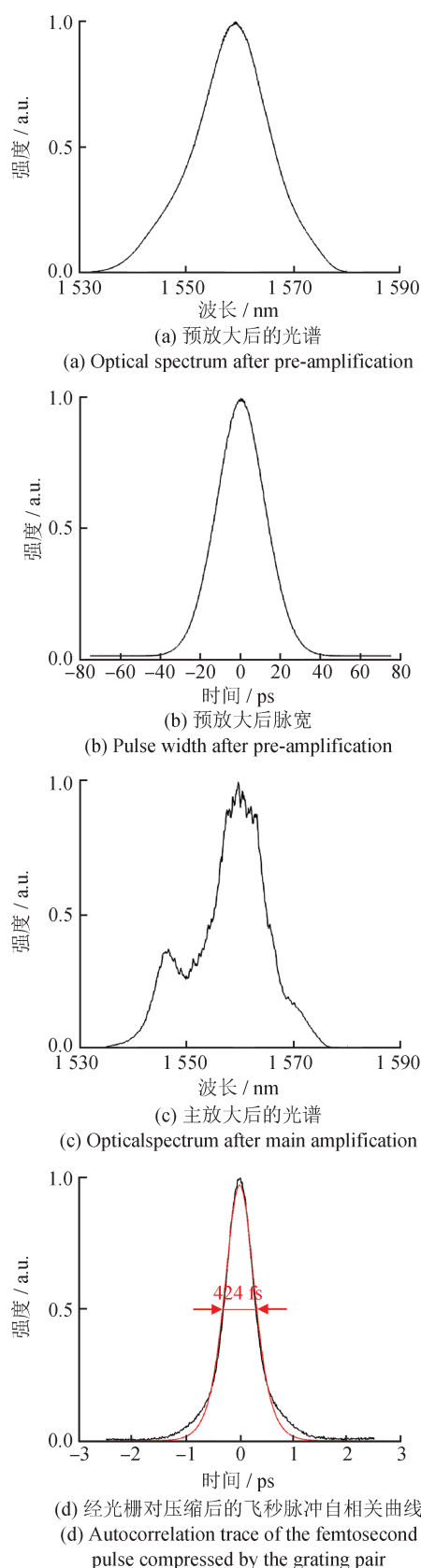


图3 MOPA模块放大和脉冲压缩阶段实验测量脉冲特性

Fig.3 Experimental characterization of the pulse evolution in a MOPA system during amplification and compression

曲线如图3(d)所示,其中,黑线为实验数据,红线为拟合曲线。采用双曲正割分布对实验数据进行拟合,分析结果显示:压缩后的激光脉冲宽度约424 fs。兼具高功率和百飞秒级脉宽的泵浦源,为高效驱动中红外参量放大奠定了坚实基础。

分别调整泵浦光和信号光光路中透镜对比例,将放大后的1.5 μm 泵浦光与3.27 μm 中红外连续信号光进行精确的空间模式匹配,然后通过焦距为100 mm的透镜聚焦至MgO:PPLN晶体中心。当MgO:PPLN晶体工作温度设为65 $^{\circ}\text{C}$,且晶体极化周期调节至34.6 μm 时,系统满足最佳准相位匹配条件,获得最高的中红外激光输出功率。OPA系统中红外输出功率随1.5 μm 泵浦功率变化曲线如图4所示,可以看出:随着泵浦激光功率增加,输出中红外信号光功率缓慢增加;当泵浦功率增加到2.8W时,进入高增益OPA区域的临界过渡点,中红外输出激光功率随泵浦功率快速增长,并表现出良好的线性增加趋势;当泵浦功率为4.6 W时,获得了最高中红外信号光输出功率(约440 mW),光-光转换效率约为9.5%。从当前的中红外输出功率曲线图可以预见,如果进一步增加泵浦激光功率,输出中红外信号光功率会进一步增加,其理论上边界将由PPLN晶体的材料损伤阈值,以及大信号深度耗尽状态下引发的非线性参量逆转换效应共同决定。文献[5]中传统的基于1 μm 泵浦驱动的中红外OPA系统在泵浦功率为2.85 W时,获得约210 mW中红外输出,光-光转换效率仅为7.3%。这主要是由于应用传统1 μm 泵浦方案时,在非线性PPLN晶体中极易通过寄生倍频产生绿光,进而引发强烈的多光子吸收与光折变效应。而本系统采用1.5 μm 泵浦方案,构成了近简并参量放大过程,不仅降低了量子缺陷,更从根本上有效抑制了寄生可见光(980 nm)吸收及热透镜效应。本方案功率、效率及高热稳定性上的量化提升,为精密光谱学等研究提供了一种更具鲁棒性与扩展潜力的光源路径。

在中红外激光输出功率达到最大时,利用傅里叶变换红外光谱仪(型号为FTMIR-L1-120-4TE)测得的中红外脉冲光谱如图5所示,其中心波长约为3.25 μm ,半高全宽为36.4 nm。从图5中可以

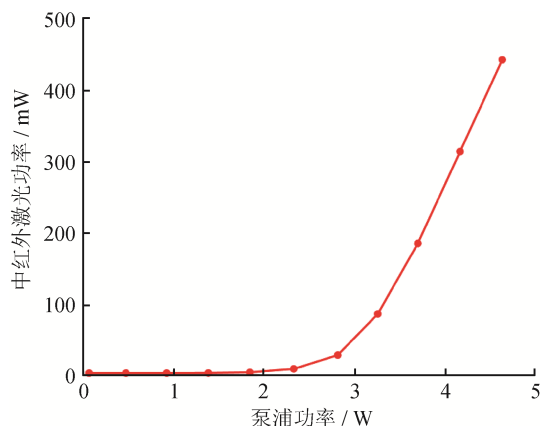


图4 OPA系统中红外输出功率随1.5 μm 泵浦功率变化曲线
Fig.4 Mid-infrared output power as a function of the 1.5 μm pump power in the OPA system

看出,在3.27 μm 处有一个尖锐窄带峰,其由剩余ICL信号产生,相较放大后的信号光中心波长出现了20 nm的波长偏移。这主要是因为当前的实验条件下,满足非线性相位匹配的增益峰值中心在3.25 μm 处,因此信号光中靠近增益峰值的光谱成分获得了更显著的放大,从而将输出光谱的中心波长牵引至3.25 μm 处。需要指出的是,本实验产生的36.4 nm光谱带宽相较传统1 μm 泵浦方案所产生的光谱带宽明显窄化^[7-9]。这主要是由于传统方案中使用的1 μm 泵浦光和3 μm 信号光的群速度高度匹配,可实现宽带相位匹配;而本研究使用的1.5 μm 泵浦光与3.25 μm 信号光存在一定的群速度失配,在长达25 mm的PPLN晶体中必然导致参量增益带宽的窄化。1 μm 泵浦虽具备宽带优势,却受限于极强的寄生绿光吸收引发的热透镜

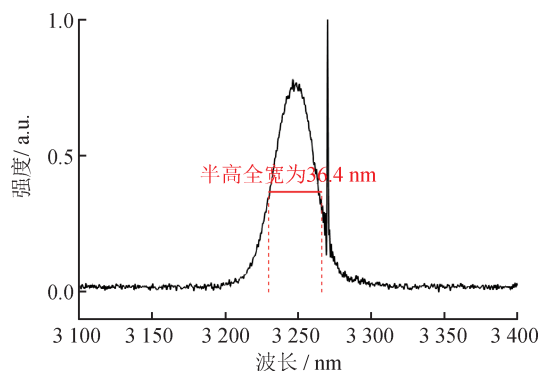


图5 OPA产生的高功率中红外脉冲光谱图
Fig.5 Optical spectrum of the high-power mid-infrared pulses generated by the OPA

效应以及较低的量子转化极限(约29%),极难向高平均功率扩展。而1.5 μm 泵浦不仅将量子效率上限提升至约46%,其寄生倍频产物更处于PPLN的高透窗口,从根本上避免了可见光诱导的热损伤。正是这种极低热负载优势,使本系统突破常规功率瓶颈,实现了440 mW的高平均功率输出。

采用高速中红外光电探测器(型号为PVI-4TE-5)结合频谱分析仪,测量输出中红外激光脉冲的射频频谱,结果如图6所示,基频信号精确达到100.00 MHz,信噪比超过50 dB,完美对应于前端振荡器的重复频率。这主要是因为OPA过程中,连续的中红外信号光仅在与极高瞬态强度的1.5 μm 飞秒泵浦脉冲发生时域重叠的瞬间才会获得强烈的参量增益,输出的中红外光在时域上完美复制了泵浦光的时序特征,转化为飞秒脉冲序列。从图6中还可以看到:高阶谐波的强度呈现出明显的衰减趋势,产生此现象的原因:实验中所采用的中红外光电探测器的响应带宽受限(约200 MHz),导致高频射频信号被探测器的电子学低通滤波效应所抑制。综上所述,搭建的高功率中红外飞秒光源具备极佳的光谱与时频稳定性,为未来开展高灵敏度痕量气体检测及宽带超快光谱学等前沿研究提供了理想的驱动光源。

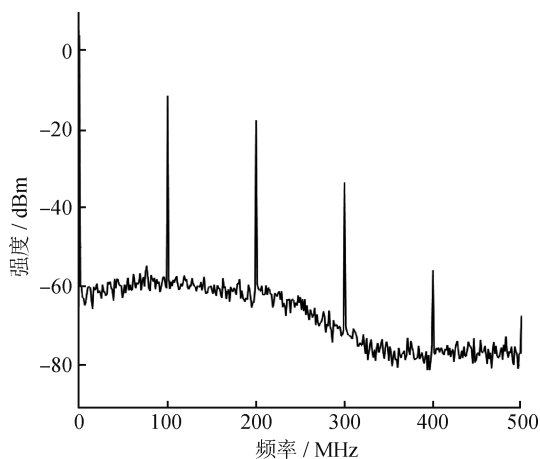


图6 中红外脉冲的射频频谱图
Fig.6 RF spectrum of the mid-infrared pulses

3 结论

本研究设计并实现了一种高功率、高时频稳定性的中红外OPA系统,采用全保偏掺铒光纤

MOPA产生的脉冲时长为424 fs的1.5 μm 激光作为泵浦源,采用功率为6.8 mW的3.27 μm 连续ICL激光作为信号光,在MgO:PPLN晶体中实现了高效的中红外激光输出。实验结果显示:尽管泵浦光与信号光间固有的群速度失配将参量带宽限制在36.4 nm,但长晶体与完全免疫热损伤的特性带来了极高的绝对参量增益,在4.6 W泵浦驱动下,系统成功获得了平均功率达440 mW、中心波长为3.25 μm 的飞秒脉冲输出,且输出功率曲线在实验泵浦条件下保持了极佳的线性增长,表明系统远未触及增益饱和或热回转极限。

本文不仅提供了一种紧凑、稳健的高功率中红外源设计方案,更揭示了通过长波泵浦体制调控以规避热效应换取高平均功率的有效路径,为开发下一代面向宽带双梳光谱、超快分子动力学分析等应用的高功率中红外驱动源提供了重要技术借鉴。

参考文献

- [1] YCAS G, GIORGETTA F R, BAUMANN E, et al. High-coherence mid-infrared dual-comb spectroscopy spanning 2.6 to 5.2 μm [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12 (4): 202-208.
- [2] CROWDER J G, SMITH S D, VASS A, et al. Infrared methods for gas detection [J]. *Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics*, 2006: 595-613.
- [3] COSSEL K C, WAXMAN E M, FINNERAN I A, et al. Gas-phase broadband spectroscopy using active sources: progress, status, and applications [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(1): 104-129.
- [4] 陈彩欣, 李思萱, 闫明, 等. 电光频率梳原理及其应用研究 [J]. *计测技术*, 2026, 46(1): 33-54.
CHEN C X, LI S X, YAN M, et al. Electro-optic frequency combs: theory and applications [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2026, 46(1): 33-54. (in Chinese)
- [5] SHI J, WONG T T W, HE Y, et al. High-resolution, high-contrast mid-infrared imaging of fresh biological samples with ultraviolet-localized photoacoustic microscopy [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(9): 609-615.
- [6] MALERBA M, ONGARELLO T, PAULILLO B, et al. Towards strong light-matter coupling at the single-resonator level with sub-wavelength mid-infrared nano-antennas [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(2): 021111.

- [7] CRUZ F C, MASER D L, JOHNSON T, et al. Mid-infrared optical frequency combs based on difference frequency generation for molecular spectroscopy [J]. Optics Express, 2015, 23(20): 26814–26824.
- [8] LIND A J, KOWLIGY A, TIMMERS H, et al. Mid-infrared frequency comb generation and spectroscopy with few-cycle pulses and $\chi^{(2)}$ nonlinear optics [J]. Physical Review Letters, 2020, 124(13): 133904.
- [9] HOGHOOGHI N, XING S, CHANG P, et al. Broadband 1-GHz mid-infrared frequency comb [J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 264.
- [10] LIU Y, ZHAO J, WEI Z, et al. High-power, high-repetition-rate tunable longwave mid-IR sources based on DFG in the OPA regime [J]. Optics Letters, 2023, 48(4): 1052–1055.
- [11] ZHOU G, CAO Q, KÄRTNER F X, et al. Energy scalable, offset-free ultrafast mid-infrared source harnessing self-phase-modulation-enabled spectral selection [J]. Optics Letters, 2018, 43(12): 2953–2956.
- [12] CAO Q, KÄRTNER F X, CHANG G. Towards high power longwave mid-IR frequency combs: power scalability of high repetition-rate difference-frequency generation [J]. Optics Express, 2020, 28(2): 1369–1384.
- [13] PENG D, GU C, ZUO Z, et al. Dual-comb optical activity spectroscopy for the analysis of vibrational optical activity induced by external magnetic field [J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 883.
- [14] GU C, ZUO Z, LUO D, et al. High-repetition-rate femtosecond mid-infrared pulses generated by nonlinear optical modulation of continuous-wave QCLs and ICLs [J]. Optics Letters, 2019, 44(23): 5848–5851.
- [15] GU C, ZUO Z, LUO D, et al. Passive coherent dual-comb spectroscopy based on optical-optical modulation with free running lasers [J]. Photonix, 2020, 1(1): 7.
- [16] JIANG W, QIN J, DAI R, et al. QCL-seeded femtosecond optical parametric amplifier operating beyond 4.5 μm [C]// Advanced Solid State Lasers. Optica Publishing Group, 2021: ATu4A. 4.

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一作者: 王煜(1991—), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为中红外飞秒光学频率梳与双梳光谱技术。



通信作者: 武腾飞(1983—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为超快精密测量技术。南航航天信息与材料物理工信部重点实验室学术委员会委员, 光学工程学会计量标准战略规划委员会委员。长期从事飞秒激光精密测量技术, 激光光量子探测等技术研究。先后荣获国防科技进步二等奖2项, 三等奖1项; 发表学术论文30余篇, 其中Q1区5篇; 授权发明专利32项。负责国家自然科学基金青年、面上和重点项目课题、仪器专项等项目。