

超宽调谐(2.6 ~ 5 μ m)中红外皮秒脉冲激光的研究

买里克古丽·艾合买提, 达娜·加山尔, 杜力坤·苏来曼, 塔西买提·玉苏甫*
(新疆师范大学 物理与电子工程学院 新疆发光矿物与光功能材料研究重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 在超快脉冲激光中, 超宽调谐通常应用于超连续谱产生、光谱分析和调制等多个领域。文章利用皮秒脉冲同步泵浦技术, 搭建了一种基于 MgO:PPLN 晶体的“Z”形光参量振荡器, 通过具有扇形周期极化的晶体在中红外波段产生了高功率、波长超宽调谐(2.6 ~ 5 μ m)的皮秒脉冲激光源输出。该振荡器由五镜一晶体组成, 这五镜片的选择和精确调整是提高光参量振荡器输出性能的关键因素, 采用波长为 1.064 μ m 的 Nd:YVO₄ 皮秒脉冲激光源, 选择周期在 26 ~ 32 μ m 可调谐的 MgO:PPLN 晶体, 最大泵浦功率为 15W 时, 2.66 μ m、3.44 μ m 和 4.99 μ m 处获得了最大输出功率分别为 3.41W、2.78W 和 0.52W 的闲频光, 相应的光-光转换效率分别为 58%、55%、15%, 测量到中红外光谱谱宽为 2.37nm (2615nm)、 $\Delta\lambda = 1.87$ nm (3687nm)、 $\Delta\lambda = 1.30$ nm (4992nm), 观察到在没有任何窄化光学元件条件下长脉冲随波长光谱谱宽具有线性变窄的过程。在 2.6 ~ 4.5 μ m 波段的激光输出功率均大于 1W, 实现了高功率、波长超宽调谐的中红外皮秒激光的连续输出。窄谱宽超宽调谐中红外皮秒脉冲激光为超快过程研究和应用领域提供了一种强大的工具。通过优化波长调谐范围和脉冲宽度能够满足不同领域对中红外激光的高要求, 对推动相关领域的研究和发展至关重要。

关键词: 中红外激光; 同步泵浦光参量振荡器; MgO:PPLN 晶体; 波长宽调谐; 皮秒脉冲

中图分类号: O437.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-9659(2024)04-0020-06

2.5 ~ 5 μ m 中红外波段的皮秒脉冲激光对应许多分子的基本振动跃迁光谱, 在众多领域发挥着关键性作用, 如超快过程^[1]、时域光谱学^[2]、激光微加工^[3]、超连续谱产生^[4]等。可调谐性适用于检测多种不同振动频率的分子, 高功率能提高信噪比, 高重复频率有助于提高数据处理速度。2.5 ~ 5 μ m 中红外波段的皮秒脉冲激光在激光微加工中表现出色。由于其相关特性, 尤其是冷烧蚀效应的影响, 可以实现高精度、微纳尺度的加工, 为光学元件的制造和材料加工提供了新的可能性^[5-6]。窄谱宽的光源可用于高分辨率的光学成像和传感应用。这在地球观测、天文学以及工业和军事领域中均有实际应用, 例如高分辨率遥感和气象观测等。对于窄谱宽的中红外脉冲输出适当设计的激光谐振腔, 可以优化激光束的传播特性, 减小半高宽。通过精心设计和优化, 可以实现激光束半高宽的有效窄化, 提高激光系统的性能和适用性。

基于激光增益介质本身的性质, 2.5 ~ 5 μ m 波段的中红外激光很难直接发射。目前的量子级联激光器、铅盐二极管激光器和带间级联激光器可以提供中红外甚至远红外输出, 然而, 所输出的激光由于功率相对较低, 调谐范围有限, 限制其实际应用领域的普遍适用性^[7-9]。随着对中红外激光应用需求的不断增加, 宽调谐、高功率和高稳定性的中红外激光源的开发逐渐得到重视。基于非线性光学频率转换的二次谐波产生^[10]、和频产生^[11]、光参量振荡(Optical Parametric Oscillator, OPO)^[12-15]、光参量放大^[16]和受激拉曼散射^[17]等过程是实现激光波长扩展的重要技术, 其中光参量振荡技术凭借其波长可调谐、高输出功率以及适用于所有时间尺度等优良特性, 成了产生中红外连续可调谐激光的有效途径。近年来, 在采用不同泵浦源抽运 MgO:PPLN-OPO 中, 最常用的泵浦源为光纤激光器来泵浦 OPO 实现 3 ~ 4 μ m 中红外激光技术^[18-23]。然而在针对波长大于 3.8 μ m 的光纤泵浦中红外 OPO 的研究中, 泵浦光与闲频光之间存在较大的波长差会导致量子

[收稿日期] 2024-01-20

[修回日期] 2024-03-06

[基金项目] 国家自然科学基金项目(12264049; 11664041)。

[作者简介] 买里克古丽·艾合买提(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事中红外超短脉冲激光源方面研究, E-mail: 2442296828@qq.com.

* [通讯作者] 塔西买提·玉苏甫(1984-), 男, 教授, 主要从事非线性光学方面研究, E-mail: taxamat_84@sina.com.

亏损,致使变频效率偏低,与此同时PPLN晶体对中-远红外波段(大于4 μm)存在一定的光子吸收,导致目前的长波闲频光输出大多限制在1W左右。为了解决以上问题,除了光纤激光器泵浦皮秒OPO以外,Ruebel等人使用锁模Nd:YVO₄激光器泵浦MgO:PPLN-OPO,使用19mm的MgO:PPLN晶体,实现了3~5 μm 可调谐中红外输出,在4.5 μm 处的功率大于1W^[23]。另外,在以激光二极管阵列(LDA)泵浦Innoslab放大器为泵浦源搭建的皮秒MgO:PPLN-OPO中,Kezhen等人 and Han 等人在2015年开始报道了基于周期极化MgO:PPLN的单谐振可调谐中红外激光参量振荡器,在16W的同步泵浦功率和116.9MHz的脉冲重复频率下成功实现了从2688~3016nm、3362~4290nm的连续调谐,在3558nm处获得1.26W的功率,其转换效率可达30%以上^[24-25]。Wu等人在2022年使用空心光纤泵浦MgO:PPLN-OPO实现调谐范围在2559.1~3562.7nm的皮秒中红外激光输出^[26]。综上,通过不同泵浦方式泵浦MgO:PPLN晶体在实现高功率2.5~5 μm 中红外激光方面均有较好的表现。但输出功率和转换效率仍然较低,波长调谐范围只达4.5 μm ,无法满足其在各个相关领域的应用。

文章采用中心波长为1064nm、脉冲时间为15ps、重复频率为120MHz的全固态Nd:YVO₄激光器作为泵浦源(其最高平均输出功率为15W)泵浦MgO:PPLN-OPO,研究了信号光单谐振OPO的输出特性,设计五镜“Z”形腔,实现了宽调谐(2.6~5 μm)、高功率、高稳定同步泵浦光参量振荡器的运转。通过改变扇形MgO:PPLN晶体的周期(26~32 μm),实现了闲频光波长从2.6 μm 到4.9 μm 的宽调谐输出。在最大泵浦功率为15W时,2.66 μm 、3.44 μm 和4.99 μm 处闲频光的输出功率分别为3.41W、2.78W和0.52W,相应的光-光转换效率在2.66 μm 处约为58%,在3.44 μm 处约为55%,在4.99 μm 处约为15%。在没有任何光谱窄化元件的使用条件下测量到相应的谱宽为2.37nm(2615nm)、 $\Delta\lambda = 1.87\text{nm}$ (3687nm)、 $\Delta\lambda = 1.30\text{nm}$ (4992nm),实现了窄谱宽波长可宽调谐、高功率、高稳定性的中红外皮秒脉冲激光输出。这是基于同步泵浦MgO:PPLN-OPO的研究中,中红外波长可调谐范围最宽的一次报道。

1 理论分析

光参量振荡是一个较强的高频光子(泵浦光)被湮灭,同时产生两个低频光子的过程,其中频率较高的光波称为信号光,另一光被称为闲频光。当泵浦光达到阈值后满足振荡条件,信号光或闲频光在谐振腔中持续获得增益,实现参量放大。与纳秒脉冲OPO不同的是由于皮秒量级的泵浦光的脉冲非常短,谐振光无法在一个泵浦脉冲时间内形成多次振荡。对于中红外可调谐超快脉冲的产生,同步泵浦光参量振荡器(Synchronously Pumped Optical Parametric Oscillators)的出现有效解决了此问题,即控制腔长将参量脉冲在腔内往返一周的时间调制到与泵浦脉冲序列的周期一致,从而实现参量振荡。

同步泵浦光学参量振荡器与准相位匹配技术相结合,因其良好的输出性能已经发展成为获得可调谐中红外皮秒脉冲激光源的主流方法之一,并展现出可观的应用前景,引起人们极大的研究兴趣。在具有准相位匹配的非线性晶体中,铌酸锂(PPLN)晶体是一种常用的中红外非线性晶体,具有很高的有效非线性系数($d_{\text{eff}} \sim 17\text{pm/V}$)、透光区域可达~5 μm ,掺杂一定的MgO后可以提高晶体的损伤阈值。

文章所使用的是脉冲同步泵浦体制下的光参量振荡器,优化后的OPO设计为信号光单谐振的五镜“Z”形谐振腔。反射镜M2和M3的曲率半径为 $R2 = R3 = 150\text{mm}$,两镜之间距离为180mm;反射镜M4的曲率半径 $R4 = 500\text{mm}$,反射镜M1和M5是平面镜。所有镜片(M1~M5)均对1350~1700nm波段的近红外光(信号光)高反射,反射率为99.9%,对1064nm和2500~5000nm高透射,足以确保信号光在腔内单谐振。这五个镜片的选择和精确调整是确保光参量振荡器正常工作的关键因素,以实现所需的输出性能,如波长调谐范围、高功率和稳定性。与“X”形腔相比,“Z”形腔作为驻波腔,具有操作简单、易于调整的优点,非线性晶体上的基模光斑大小也易于控制。在超快脉冲OPO中对腔长的精准控制是实现同步泵浦光参量振荡器有效运转的关键,也是输出光稳定性提升的重要因素,通过调控腔长使谐振信号脉冲在腔内往返一次的时间与相邻泵浦脉冲时间间隔一致,可以实现OPO功率稳定性的提升。在本次实验中,OPO的物理腔长与120MHz的泵浦光重复频率相匹配,腔长为1250mm,其中腔镜M1被固定在位移平台上,用于手动微调腔长实现同步泵浦。信号光沿传输距离的光斑半径分布如图1所示,利用Matlaser软件模拟计算出晶体中心的信号光束腰半径为57 μm ,与泵浦光的光束尺寸相近($b_p \approx b_s$),从而达到更好的模式匹配,该高Q腔的设计可以在中红外波段产生高功率、高稳定性、波长宽调谐的皮秒激光输出。

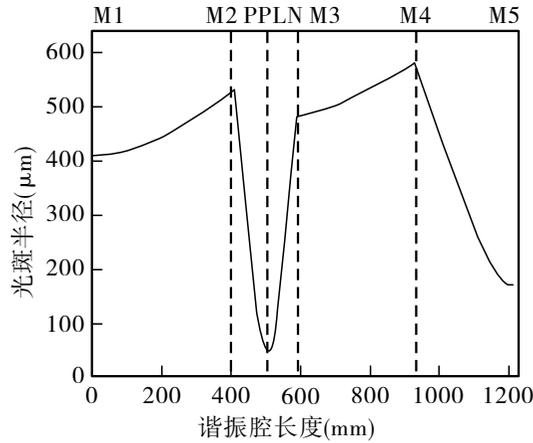


图1 信号光沿传输距离的光斑半径分布图

2 实验装置

基于扇形 MgO:PPLN 晶体宽调谐、高功率、中红外(2.6 ~ 5 μm)皮秒光参量振荡器的实验装置如图2所示。基于二极管泵浦 Nd:YVO₄晶体全固态皮秒国产激光器作为该光参量振荡器的泵浦源,其中心波长 1064nm,重复频率为 120MHz,脉冲时间为 15ps,平均功率为 15W。通过半波片与偏振分束器的组合,控制泵浦光的功率。采用第二个半波片使泵浦光的偏振态与晶体晶轴平行,实现“0”形相位匹配($e \rightarrow e+e$)使之满足最佳的匹配条件。泵浦光经过 $f = 125\text{mm}$ 的聚焦透镜到晶体中心的光斑大小为 60 μm ,基本保证泵浦光斑大小与 OPO 腔模大小的最佳模式匹配。将晶体安装在一个可控制平移台上,通过横向移动来改变晶体周期。与普通光栅结构的 MgO:PPLN 晶体相比,具有扇形结构的 MgO:PPLN 晶体确保了输出的光谱不再出现间断点,提供了参量光光谱连续输出的作用。晶体周期为 26 ~ 32 μm ,尺寸为 50mm \times 16mm \times 2mm,两端面对 1.064 μm (泵浦光)、1.3 ~ 2 μm (信号光)和 2.5 ~ 5 μm (闲频光)均镀增透膜层,泵浦、信号、闲频光在晶体中的通光长度为 $L = 50\text{mm}$ 、通光厚度为 $H = 2\text{mm}$ 、通光宽度为 $W = 16\text{mm}$,能够满足参量光在晶体中连续输入和输出。

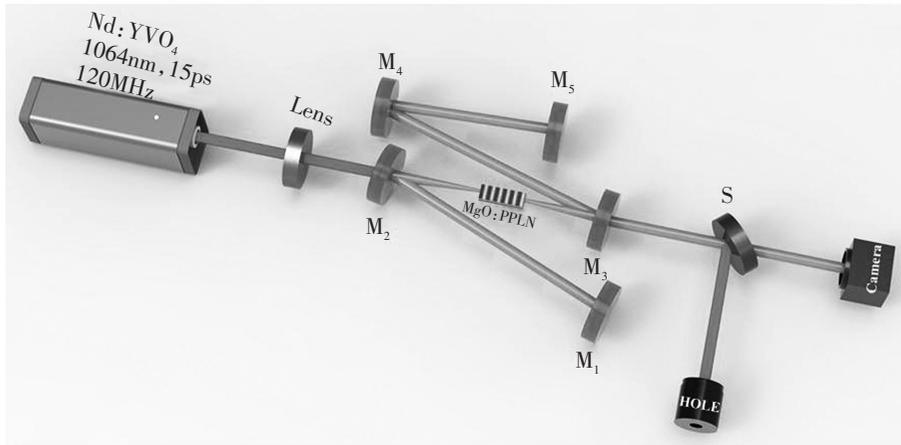


图2 皮秒同步泵浦光参量振荡器实验装置

3 分析与讨论

首先,利用光谱仪(SpectraProHRS-500)对 OPO 所能实现的波长调谐范围进行研究。在泵浦功率为 13.7W 时,将晶体温度固定在 30 $^{\circ}\text{C}$,通过改变晶体周期 26 ~ 32 μm ,实现了闲频光在 2.6 ~ 4.9 μm 可调谐中红外皮秒脉冲激光输出,波长调谐宽度为 2377nm, MgO:PPLN-OPO 的输出光光谱如图3所示。这是基于 MgO:PPLN 全固态同步泵浦的皮秒中红外激光源所获得的最宽波长调谐范围。插图显示了不同中心波长下闲频光场的光谱带宽,测量到的输出为 2.37nm(2615nm)、 $\Delta\lambda = 1.87\text{nm}$ (3687nm)、 $\Delta\lambda = 1.30\text{nm}$ (4992nm)。随

着波长的增长,谱宽在没有任何光谱窄化元件条件下,逐渐变窄,对于信号光单谐振的谐振腔而言,闲频光没有实现共振而直接出射到腔外。在准相匹配的 MgO:PPLN OPO 中,其输出的光谱带宽为 $0.5 \sim 0.6\text{nm}$ /波长,输出的光谱带宽与信号谐振 OPO 和 PPLN-OPO 之间的折射率差成反比。窄谱宽的中红外脉冲激光技术的关键特点之一是其狭窄的频谱分布。通过使用先进的激光器技术和调制方法,研究人员成功实现了中红外光的高度单色性和频率稳定性。这种窄谱宽特性使得中红外脉冲在光谱分析、分辨光谱结构等方面展现出明显的优势。

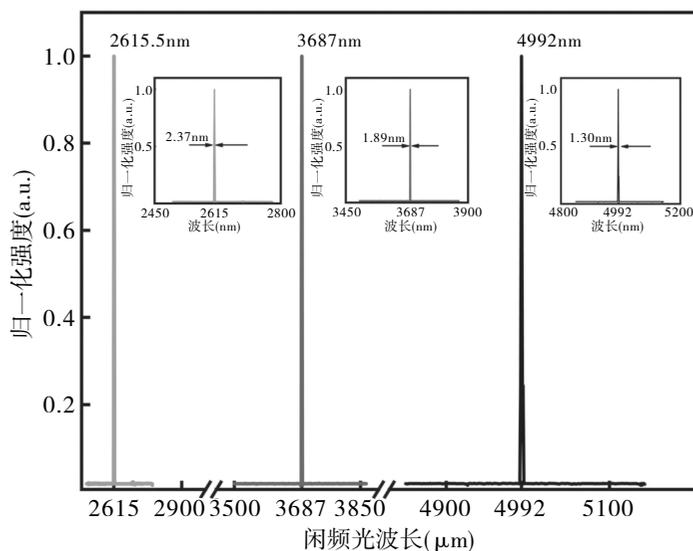
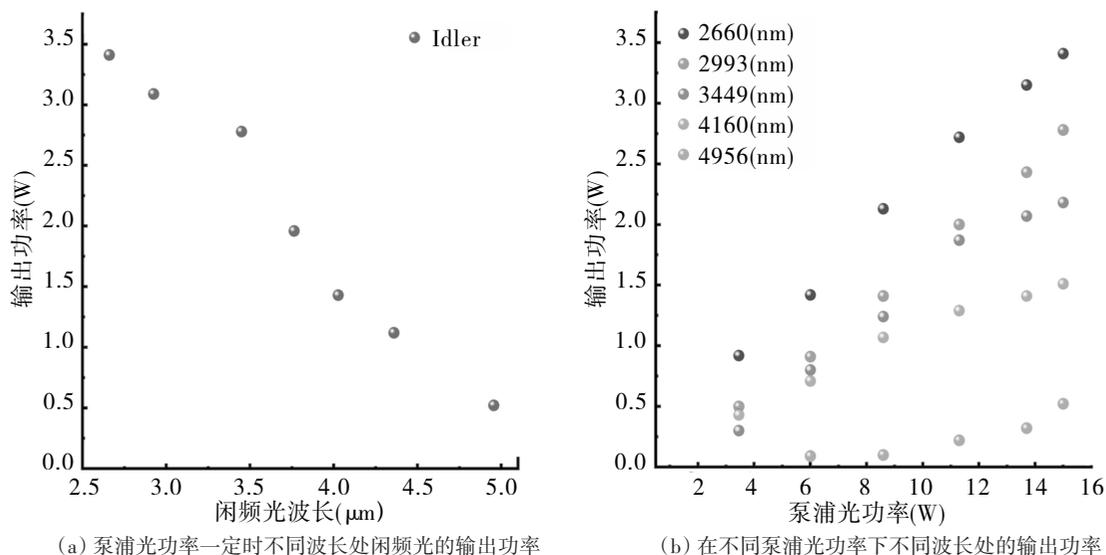


图3 闲频光的波长光谱图

其次,皮秒OPO的输出功率也是重要的输出特性,图4(a)为在泵浦功率一定时,OPO不同波长对应闲频光输出功率的散点图。从图中可以看出,在波长为 $2.66\mu\text{m}$ 时测得最大输出功率为 3.41W ,在 $2.6 \sim 4.5\mu\text{m}$ ($4.5 \sim 5\mu\text{m}$) 的调谐范围内获得了超过 1W (超过 522mW) 的输出功率。利用功率测量了不同波长处泵浦光功率与输出光功率之间的关系。当泵浦功率为 15W 时,在 $2.66\mu\text{m}$ 、 $3.44\mu\text{m}$ 和 $4.92\mu\text{m}$ 的闲频光波长下,测量到的最大闲频光输出功率分别为 3.41W 、 2.78W 和 0.522W ,相应的光-光转换效率在 $2.66\mu\text{m}$ 处为 58% ,在 $3.44\mu\text{m}$ 处为 55% ,在 $4.92\mu\text{m}$ 处约为 15% 。



(a) 泵浦光功率一定时不同波长处闲频光的输出功率

(b) 在不同泵浦光功率下不同波长处的输出功率

图4 中红外皮秒脉冲激光的输出功率

采用 Spiricon Pyrocam III 型号的热释电相机观测到中红外闲频光的空间分布,如图5所示。在波长调谐过程中,闲频光的空间分布均呈现中心强,向四周逐渐递减的近高斯模式分布。在超过 30min 的观察时间内,中红外闲频光表现出约小于均方根 2% (rms) 的时间能量稳定性。由于 MgO:PPLN 晶体对温度比较敏感,

通常会改变晶体温度或者调节晶体周期,从而实现波长的调谐。本研究保持晶体温度恒定,仅通过调谐晶体周期($26 \sim 32\mu\text{m}$),在中红外波段实现了宽调谐波长($2.6 \sim 5\mu\text{m}$)、高功率、高稳定性的皮秒脉冲激光输出,因为该高Q腔的输出耦合镜对信号光具有99.9%的反射率,导致信号光的输出非常低,后期可以通过调整腔镜参数,有望在近红外波段产生高功率、宽调谐波长的激光输出。

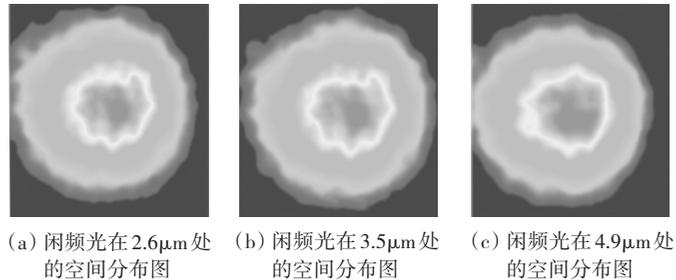


图5 中红外皮秒脉冲激光的输出光斑

4 结论

随着人们对中红外激光应用领域不断深入了解,中红外光参量振荡器的性能需求也将不断提高。文章使用同步泵浦原理设计了一种宽调谐、高功率中红外皮秒光参量振荡器,该皮秒OPO基于具有多周期的扇形MgO:PPLN晶体,周期为 $26 \sim 32\mu\text{m}$ 。这种信号光单谐振的高Q腔仅通过改变MgO:PPLN晶体周期,实现了波长范围为 $2.6 \sim 5\mu\text{m}$ 的连续可宽调谐中红外输出。最大泵浦功率为15W时,在闲频光波长在 $2.66\mu\text{m}$ 、 $3.44\mu\text{m}$ 和 $4.99\mu\text{m}$ 处的最大输出功率分别为3.41W、2.78W和0.52W,相应的光-光转换效率在 $2.66\mu\text{m}$ 处为58%,在 $3.44\mu\text{m}$ 处为55%,在 $4.99\mu\text{m}$ 处约为15%,测量到的输出为 2.37nm (2615nm)、 $\Delta\lambda = 1.87\text{nm}$ (3687nm)、 $\Delta\lambda = 1.30\text{nm}$ (4992nm)。在 $2.6 \sim 4.5\mu\text{m}$ ($4.5 \sim 5\mu\text{m}$)的调谐范围内实现了大于1W(超过522mW)输出,该振荡器的设计有望实现中红外波长可达 $5\mu\text{m}$ 以上的高功率激光输出。通过实验数据的分析和对比,发现在一定范围内适当提高泵浦光功率,优化光路结构,采用高性能参数的谐振腔镜,可以进一步提高OPO的输出稳定性和转换效率。高功率、波长宽调谐中红外皮秒脉冲激光的产生可以有效促进激光在光谱成像、环境监测、生命科学等领域的应用。

参考文献:

- [1] JURNA M, KORTERIK J, OFFERHAUS H, et al. Noncritical Phase-matched Lithium Triborate Optical Parametric Oscillator for High Resolution Coherent Anti-stokes Raman Scattering Spectroscopy and Microscopy[J]. Applied Physics Letters-APPL PHYS LETT, 2006, 89(25):251116.
- [2] DESCLOUX D, LAPORTE C, DHERBECOURT J B, et al. Spectrotemporal Dynamics of a Picosecond OPO based on Chirped Quasi-phase-matching[J]. Optics Letters, 2015, 40(02):280-283.
- [3] 叶君建, 谢志勇, 黄秀光, 等. 皮秒激光在激光状态方程靶制备中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(02):116-120.
- [4] 孙畅, 葛廷武, 李思源, 等. 67.9W 高功率全光纤白光超连续谱激光器[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(12):7-8.
- [5] TAKAHASHI F, MIYAMOTO K, HIDAI H, et al. Picosecond Optical Vortex Pulse Illumination Forms a Monocrystalline Silicon Needle[J]. Scientific Reports, 2016, 6(01):21738.
- [6] MASUDA K, SHINOZAKI R, SHIRAISHI A, et al. Picosecond Optical Vortex-induced Chiral Surface Relief in an Azo-polymer Film[J]. Journal of Nanophotonics, 2020, 14(01):016012.
- [7] IRINA T, SOROKINA, KONSTANTIN L. Vodopyanov, eds. Solid-state Mid-infrared Laser Sources[M]. Springer Science & Business Media, 2003.
- [8] SERGACHEV I, MAULINI R, BISMUTO A, et al. Gain-guided Broad Area Quantum Cascade Lasers Emitting 23.5W Peak Power At Room Temperature[J]. Optics Express, 2016, 24(17):19063-19071.
- [9] SPOTT A, STANTON E J, TORRES A, et al. Interband Cascade Laser on Silicon[J]. Optica, 2018, 5(08):996-1005.
- [10] DHOLAKIA K, SIMPSON N B, PADGETT M J, et al. Second-harmonic Generation and the Orbital Angular Momentum of Light[J]. Physical Review A, 1996, 54(05):R3742-R3745.
- [11] LI Y, ZHOU Z Y, DING D S, et al. Sum Frequency Generation with Two Orbital Angular Momentum Carrying Laser Beams[J]. JOSA B, 2015, 32(03):407-411.
- [12] MARTINELLI M, HUGUENIN J A O, NUSSENZVEIG P, et al. Orbital Angular Momentum Exchange in an Optical Parametric Oscillator[J]. Physical Review A, 2004, 70(01):013812.
- [13] MIYAMOTO K, MIYAGI S, YAMADA M, et al. Optical Vortex Pumped Mid-infrared Optical Parametric Oscillator[J].

- Optics Express, 2011, 19(13): 12220–12226.
- [14] YUSUFU T, TOKIZANE Y, YAMADA M, et al. Tunable 2- μm Optical Vortex Parametric Oscillator[J]. Optics Express, 2012, 20(21): 23666–23675.
- [15] YUSUFU T, TOKIZANE Y, MIYAMOTO K, et al. Handedness Control in a 2- μm Optical Vortex Parametric Oscillator[J]. Optics Express, 2013, 21(20): 23604–23610.
- [16] BAUMGARTNER R, BYER R. Optical Parametric Amplification [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1979, 15(06): 432–444.
- [17] LEE A J, OMATSU T, PASK H M. Direct Generation of A First-stokes Vortex Laser Beam from a Self-raman Laser[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12401–12409.
- [18] KOKABEE O, ESTEBAN-MARTIN A, EBRAHIM-ZADEH M. Efficient, High-power, Ytterbium-fiber-laser-pumped Picosecond Optical Parametric Oscillator[J]. Optics Letters, 2010, 35(19): 3210–3212.
- [19] KIENLE F, TEH P S, ALAM S U, et al. Compact, High-pulse-energy, Picosecond Optical Parametric Oscillator[J]. Optics Letters, 2010, 35(21): 3580–3582.
- [20] KUMAR S C, WEI J, DEBRAY J, et al. High-power, Widely Tunable, Room-temperature Picosecond Optical Parametric Oscillator based on Cylindrical 5%MgO:PPLN[J]. Optics Letters, 2015, 40(16): 3897–3900.
- [21] PARSA S, KUMAR S C, NANDY B, et al. Yb-fiber-pumped, High-beam-quality, Idler-resonant Mid-infrared Picosecond Optical Parametric Oscillator[J]. Optics Express, 2019, 27(18): 25436–25444.
- [22] 刘通, 汪晓波, 刘磊, 等. 基于周期极化掺镁铌酸锂晶体的中红外同步抽运皮秒光参量振荡器[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 16–20.
- [23] RUEBEL F, ANSTETT G, L' HUIILLIER J A. Synchronously Pumped Mid-infrared Optical Parametric Oscillator with an Output Power Exceeding 1 W at 4.5 μm [J]. Applied Physics B, 2011, 102(04): 751–755.
- [24] KEZHEN H, JING L, JIAN N, et al. Broadly Tunable MgO:PPLN Mid-infrared OPO Synchronously Pumped by Innoslab Amplifier[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(12): 121005.
- [25] HAN K Z, NING J, HE J L, et al. High-Efficiency Mid-Infrared Picosecond MgO:PPLN Single Resonant Optical Parametric Oscillator[J]. Chinese Physics Letters, 2015, 32(05): 054203.
- [26] WU Y, LIANG S, FU Q, et al. High-energy, Mid-IR, Picosecond Fiber-feedback Optical Parametric Oscillator[J]. Optics Letters, 2022, 47(14): 3600–3603.

Study of Ultra-wide Tuning (2.6 ~ 5 μm) Mid-infrared Picosecond Pulsed Laser

MAILIKEGULI·Aihemaiti, DANA·Jiashaner, DULIKUN·Sulaiman, TAXIMAITI·Yusufu*

(Xinjiang Key Laboratory for Luminescence Minerals and Optical Functional Materials, School of Physics and Electronic Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang, 830054, China)

Abstract: In ultrafast pulsed lasers, ultrawide tuning is usually applied in various fields such as supercontinuum generation, spectral analysis and modulation. In this paper, a "Z" type optical parametric oscillator based on MgO:PPLN crystals is constructed using picosecond pulsed synchronous pumping technology, and a high power, wavelength ultra-wide tuned (2.6 ~ 5 μm) picosecond pulsed laser source is generated at mid-infrared wavelengths by the crystals with sector-periodic polarization. The oscillator consists of five mirrors and one crystal, and the selection and precise tuning of these five mirrors are the key factors to improve the output performance of the optical parametric oscillator. An Nd:YVO₄ picosecond pulsed laser source with a wavelength of 1.064 μm is used, and a MgO:PPLN crystal with a tunable period in the range of 26 ~ 32 μm is selected. When the maximum pump power is 15W, the maximum output powers of 3.41W, 2.78 W and 0.52W are obtained at wavelengths of 2.66 μm , 3.44 μm and 4.99 μm , respectively, and the corresponding photon conversion efficiencies are 58%, 55% and 15%, respectively. The mid-infrared spectral widths of 2.37nm (2615nm), $\Delta\lambda = 1.87\text{nm}$ (3687nm), and $\Delta\lambda = 1.30\text{nm}$ (4992nm) were measured, and a linear narrowing of the long pulse with wavelength spectral widths was observed in the absence of any narrowing optics. The laser output powers in the 2.6 ~ 4.5 μm band are all greater than 1W, realizing the continuous output of a high-power, wavelength-ultra-wide, broadly tuned mid-infrared picosecond laser. The narrow spectral width ultra-wide tuned mid-infrared picosecond pulsed laser provides a powerful tool for ultrafast process research and application areas. The optimization of the wavelength tuning range and pulse width can meet the high demands of mid-infrared lasers in different fields, which is essential to advance the research and development in related fields.

Keywords: Mid-infrared laser; Synchronously pumped optical parametric oscillators; MgO:PPLN; Wavelength width tuning; Picosecond pulse