

磷化锗锌波导传输损耗测试与光差频产生

苗雨琇, 杨雪梅, 胡 波, 梁厚昆*

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 二阶非线性频率转换的片上中红外激光器因具备超短脉冲输出、宽带可调谐、设计简单、转换高效、阈值低等优点, 近年来备受关注。因此, 亟需探索开发新的 $\chi^{(2)}$ 波导平台来实现高效且宽带可调谐的长波红外激光产生。分别使用法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 谐振腔法和截断法测试了磷化锗锌 (ZnGeP_2) 波导在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处和 $2.4\ \mu\text{m}$ 处的基模传输损耗。实验结果表明, ZnGeP_2 (ZGP) 波导在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处的横电模 (TE) 和横磁模 (TM) 传输损耗分别为 0.1731 、 $0.1998\ \text{dB/cm}$; 在 $2.4\ \mu\text{m}$ 处的 TE 模传输损耗为 $0.8\ \text{dB/cm}$ 。在此传输损耗条件下, 基于波长可调谐的 $2.4\ \mu\text{m}$ 波段飞秒泵浦源与 $2.8\ \mu\text{m}$ 波段信号源, 在相位匹配角度为 48.4° 的 ZGP 波导内进行了光差频实验, 实现了 $7\sim 10\ \mu\text{m}$ 波长范围内的闲频光可调谐输出, 为基于双折射晶体的集成化中红外激光器的实现提供了重要指导。

关键词: 中红外激光; 光差频; 传输损耗; ZnGeP_2 波导; 法布里-珀罗腔; 截断法

中图分类号: O437 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240429

引用格式: MIAO Yuxiu, YANG Xuemei, HU Bo, et al. Measurement of transmission loss and generation of optical difference frequency in ZnGeP_2 waveguide[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(2): 20240429.

苗雨琇, 杨雪梅, 胡波, 等. 磷化锗锌波导传输损耗测试与光差频产生[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(2): 20240429.

0 引 言

中红外激光的光谱范围为 $2.5\sim 25\ \mu\text{m}$, 其涵盖了 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 两个大气传输窗口和大多数分子的指纹吸收峰, 在分子识别、大气传感、空间通信和疾病诊断等领域展现出巨大的应用潜力^[1-5]。片上集成化中红外激光器因其占地面积小、能耗低、转换效率高优势成为近些年来中红外激光领域的一大发展方向。而基于非线性频率转换的片上集成化中红外激光器因其可实现超短脉冲输出、宽带可调谐等优势成为近些年来研究人员的关注重点^[6]。特别地, 得益于材料二阶非线性效应远大于三阶非线性响应的物理特性, 基于二阶非线性频率转换的片上集成化中红外激光器具备设计简单、转换高效、阈值低等诸多优势。

作为先进的高性能光源, 该类型集成化中红外激光器近三年来受到了国内外的广泛关注。在这其中, 基于周期极化晶体的集成化中红外激光器是其中的

佼佼者^[7-8], 典型代表包括周期极化铌酸锂晶体 (Periodically Poled Lithium Niobate Crystal, PPLN)、取向图案化碲化镓晶体。2018 年, DIDDAMS S A 教授课题组^[9]基于重频为 $100\ \text{MHz}$ 的 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段飞秒光梳, 在微米尺度量级的 PPLN 波导中, 基于脉冲内差频 (Intrapulse Difference Frequency Generation, IPDFG) 技术, 实现了 $4\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段可调谐中红外光频梳产生, 输出功率达到 $100\ \mu\text{W}$, 揭示了 PPLN 波导优异的参量转换能力; 在此基础上, DIDDAMS S A 教授课题组^[10]通过将重频为 $10\ \text{GHz}$ 的 $1.5\ \mu\text{m}$ 飞秒光梳注入到 Si_3N_4 波导中, 在光谱展宽的同时利用孤子自压缩技术, 将 $1.5\ \mu\text{m}$ 泵浦光梳脉冲宽度进一步压缩到 $15\ \text{fs}$, 随后成功在 PPLN 波导中基于 IPDFG 实现了重频达 $10\ \text{GHz}$ 的中红外光频梳产生。2022 年, 斯坦福大学 FEJER M M 教授课题组^[11]通过优化 PPLN 波导的尺寸, 对 PPLN 波导的整体色散进行设计, 优化波导的群速度色散和群速度失谐特性, 实现了 $1.7\sim 2.7\ \mu\text{m}$

收稿日期: 2024-11-13; 修订日期: 2024-12-19

作者简介: 苗雨琇, 男, 硕士生, 主要从事中红外超快激光方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 梁厚昆, 男, 教授, 博士, 主要从事中红外超快激光、随机激光方面的研究。

波段高效率参量转换输出。同年, MARANDI Alireza 教授课题组 LEDEZMA Luis、SEKINE Ryoto、GUO Qiushi 等人同样利用色散优化的 PPLN 波导和准相位匹配技术^[12], 利用 1045 nm 光纤锁模激光器(重复频率为 250 MHz, 脉冲宽度为 75 fs)作为泵浦源, 脉冲宽度为 35 fs 的 2090 nm 激光作为信号源, 在仅为 6 mm 长的 PPLN 波导中实现了 50 dB/cm 的片上 OPA(Optical Parametric Amplification)增益, 2 μm 处增益带宽大于 600 nm。相较于 PPLN 波导而言, 取向图案化的砷化镓晶体波导也是近些年来研究人员的关注重点, 其光谱透射范围达 20 μm , 远超过 PPLN 晶体透射窗口上限(5 μm), 有效非线性系数高达 96 pm/V, 是产生长波红外激光输出的理想集成化平台。2022 年, 法国诺曼底大学的 BECHEKER Rezki 等人首次基于 OP-GaAs 波导平台实现了 9~12 μm 的 OPG (Optical Parametric Generation)^[13], 这是基于 $\chi^{(2)}$ 非线性波导的片上集成化长波红外光源的首次展示, 但未提及波导的耦合损耗和转换效率。可以说, 受限於现阶段微纳制备工艺水平, 基于该类型波导平台即准相位匹配晶体波导平台的高效率长波红外激光器还未见报道。因此, 亟需探索开发新的 $\chi^{(2)}$ 波导平台来实现高效率、宽带可调谐、长波红外激光产生。2023 年, 利用光学抛磨、晶圆胶合、激光直写等成熟技术手段, 基于双折射相位匹配机制的晶体波导 ZGP(ZnGeP₂) 波导被实现, 并在此基础上, 实现了量子转换效率高达 74%^[14] 的 6~11 μm 波段宽带中红外飞秒激光产生, 这为基于非线性频率转换的集成化中红外激光器的发展带来了新的发展机遇。

文中基于 F-P 腔法和截断法对所设计和制作的相位匹配角度为 48.4° 的 ZnGeP₂ 波导的传输损耗进行了较为详细的测试, 并在此基础上, 进行了基于 ZGP 波导的光差频产生实验, 实验中通过调节泵浦光和信号光的波长, 实现了宽带可调谐长波红外激光输出, 验证了该 ZGP 波导的实用性和可靠性。

1 ZGP 波导传输损耗测试

1.1 法布里-珀罗腔法波导损耗测量原理

ZGP 波导的端面经过了研磨与抛光, 每个端面都可以充当一个反射镜, 同时端面严格垂直于光传输方向, 以确保波导在耦合过程中形成理想的 F-P 腔。光

经过 F-P 腔后的传递函数由公式 (1) 给出^[15]:

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{\eta T^2 \exp(-\alpha)}{(1 - R \exp(-\alpha)) + 4R \exp(-\alpha) \sin^2(\varphi/2)} \quad (1)$$

式中: I_t 为出射光强; I_0 为入射光强; R 为腔界面反射系数; T 为腔界面透射系数; α 为传输强度衰减系数; φ 为延迟相位, $\varphi = 2\beta L$, β 为波导中的传播常数, L 为波导的长度; η 为耦合效率。不同波长的光决定了在干涉图样中不同的相位差。当波长发生变化时, 干涉条件随之改变, 使得原本对应于某一条纹的光在新的波长条件下不再满足干涉条件, 从而条纹出现位置的移动。波长在法布里-珀罗干涉法中通过影响光的相位差和干涉条件, 决定了干涉条纹的形成和分布。因此可以通过改变注入到 ZGP 波导中的传输光波长的方法来调制相位, 获得法布里-珀罗干涉条纹。通过条纹对比度可直接求解波导光传输损耗。其中衰减系数由公式 (2) 给出:

$$\alpha = \frac{1}{L} \log_e \left(\frac{RK}{1 - \sqrt{1 - K^2}} \right) \quad (2)$$

式中: K 为对比度, $K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$, $I_{\max}$ 为最大出射光强, $I_{\min}$ 为最小出射光强。由波导的有折折射率 n_{eff} 得到波导各端面形成的菲涅耳反射系数 $R = \left(\frac{n_{\text{eff}} - 1}{n_{\text{eff}} + 1} \right)^2$ 。

1.2 实验波导表面轮廓以及粗糙度表征

实验采用的波导长度为 8.5 mm 与 6.6 mm, 其典型轮廓扫描电镜显微图像如图 1(a) 所示。为了进一步量化 ZGP 样品表面粗糙度, 研究中使用激光显微镜 (Olympus, OSL5000) 对 ZGP 波导进行了三维表征。基于 20 倍显微物镜, 选择波导样品测量区域面积约为 643 $\mu\text{m} \times 644 \mu\text{m}$, 测量得到的凹槽的宽度和深度分别为 30.5 μm 和 54.4 μm , 如图 1(b)~1(d) 所示。另外, 为了准确表征凹槽侧壁的微观轮廓和粗糙度, 将 ZGP 波导倾斜 30°, 在平行于微槽的方向上, 对侧壁的粗糙度进行了多次测量, 其中一条侧壁粗糙度测量结果为 0.596 μm 。此外通过对八个凹槽的测量, 获得的平均侧壁粗糙度为 0.595 μm , 标准差经计算为 0.051 μm 。由此可以看出, 基于激光直写技术制作的 ZGP 波导样品具备较好的表面光洁度, 且沿着波导长度方向具备良好的宽度一致性, 为基于 F-P 腔法的传输损耗表征提供了可能性。另外, 较小的表面粗糙度也预示着较小的波导散射损耗。

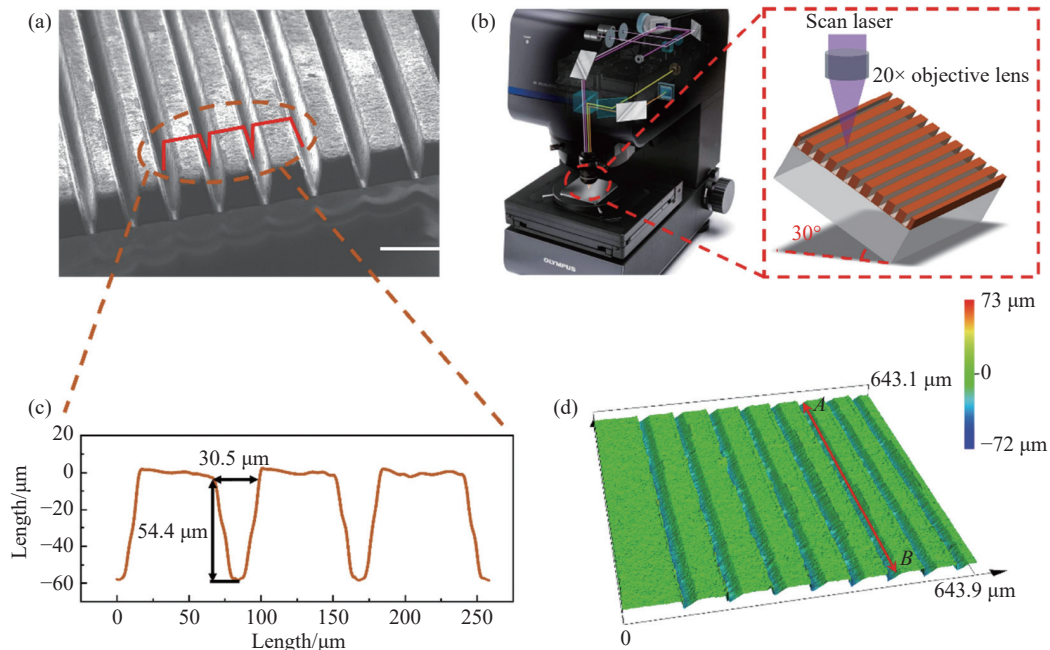


图1 波导表面轮廓以及粗糙度的表征。(a) $\chi^{(2)}$ ZGP 波导的电子扫描图像; (b) 30°倾斜的 ZGP 波导对于凹槽侧壁的轮廓测量图, 测量仪器: 激光显微镜 (Olympus, OSL5000); (c) $\chi^{(2)}$ ZGP 波导的实测截面图; (d) $\chi^{(2)}$ ZGP 波导的三维表面轮廓图

Fig.1 Characterization of waveguide surface profile and roughness. (a) Electron scanning image of $\chi^{(2)}$ ZGP waveguide; (b) Profile measurement of a ZGP waveguide with a 30° tilt for the side wall of the groove, measured by laser microscope (Olympus, OSL5000); (c) Measured cross-section of $\chi^{(2)}$ ZGP waveguide; (d) Three-dimensional surface profile of $\chi^{(2)}$ ZGP waveguide

1.3 法布里-珀罗腔法测量波导损耗实验装置与结果

F-P 腔法具有非接触式测量的特点, 极大程度上可以保护波导不被损伤与污染。高精度测量的优点使得多组干涉条纹的测量容错大大增加, 保证了测量结果的可靠与稳定。在此基础上, 基于 F-P 腔法对 ZGP 波导在 1.55 μm 处的传输损耗进行了测试, 损耗测量实验装置如图 2(a) 所示。实验中采用中心波长为 1.55 μm 可调谐连续激光作为光源, 偏振由光纤起偏器控制, 起偏器输出端由保偏光纤将连续激光注入到 ZnGeP_2 波导中, 再由单模光纤接收, 最后使用高灵敏度的光功率计记录功率变化。其中, 光纤与波导的耦合情况可通过连接电脑的 CCD 进行观察。1.55 μm 可调谐光源采用康冠光电 KG-TLS 型可调谐激光器 (C-Band ITU 1 GHz Tunable Laser), 信道间隔参数固定为 1 GHz, 经计算波长调节步进为 0.008 nm。实验过程中, 分别对两块长度分别是 8.5 mm 以及 6.35 mm 的 ZGP 直波导进行测试, 通过改变入射光的波长, 在光功率计上记录不同波长的透射功率, 得到的 TE 偏振下和 TM 偏振下的 F-P 腔输出响应样条曲线如图 2(b)~2(c) 所示。经计算, 6.35 mm 波导所对应的

1.55 μm 波段 TE 与 TM 模的光传输损耗分别为 0.163 9、0.196 3 dB/cm。8.5 mm 波导所对应的 1.55 μm 波段 TE 与 TM 模的光传输损耗分别为 0.182 3、0.203 4 dB/cm。展现了 ZGP 波导在 1.55 μm 波段良好的模式传输能力, 为后续基于近红外激光泵浦和 ZGP 波导的中红外激光产生奠定了基础^[16]。

1.4 截断法测量波导损耗实验装置与结果

考虑到 ZGP 晶体的禁带宽度, 研究人员通常采用 2 μm 波段激光器来泵浦 ZGP 波导, 但由于缺乏高性能的 2 μm 波段单频激光器, 无法利用 F-P 腔法实现对 ZGP 波导在 2 μm 波段的传输损耗测试, 实验中选择采用截断法对 ZGP 波导在 2 μm 波段的传输损耗进行测试。截断法^[17]的基本原理是在同一测试条件下, 通过测量两个不同长度波导样品的插入损耗来推断波导样品的传输损耗, 测量装置示意图如图 3 所示。截断法得益于简易的测量原理, 与其他方法相比具有对测量环境与波导尺寸较好的适应性。而且在较大的波导尺寸范围内, 高强度的光信号往往带来更佳的测量信噪比。在此基础上分别将长度为 8 mm 和 10 mm 的两个波导样品放入测试光路中, 输入泵浦

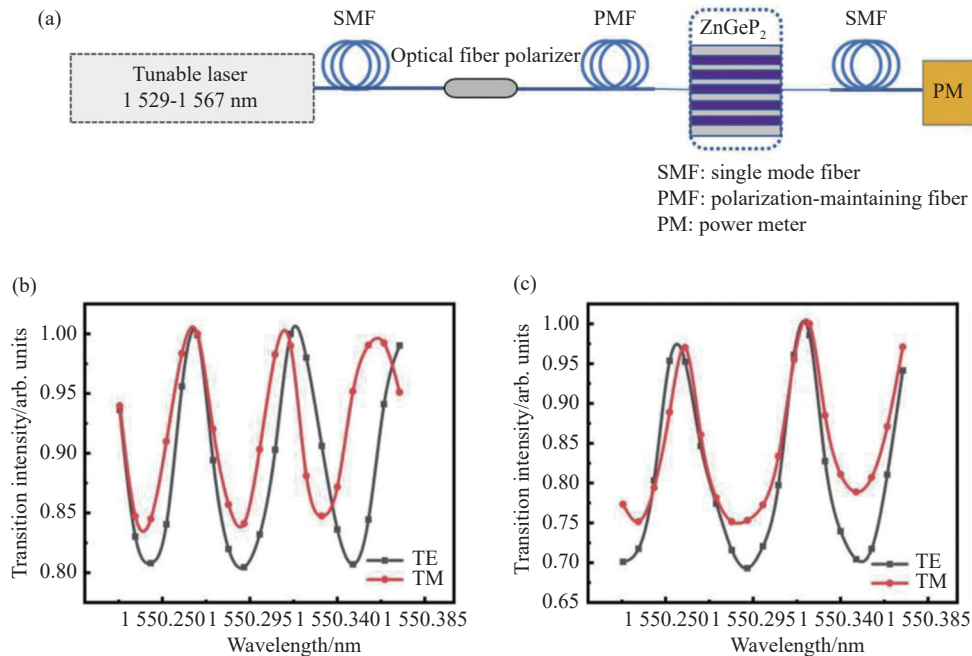


图 2 F-P 腔损耗测量实验装置与测试结果。(a) 传输损耗实验装置图; (b)~(c) 在 TE 和 TM 偏振下 8.5 mm 和 6.6 mm ZGP 样品测量透射 F-P 干涉图
Fig.2 F-P cavity loss measurement experimental device and test results. (a) Transmission loss experimental device diagram; (b)-(c) Transmission F-P interferogram for 8.5 mm and 6.6 mm ZGP samples measured at TE and TM polarization

光 ($2.4\ \mu\text{m}$) 功率设置为 60 mW, 由于采用空间耦合方式, 存在耦合误差等误差因素, 因此, 为了精确测试插入损耗, 对于每个波导样品, 通过五次重复测量, 得到 10 mm 和 8 mm 波导的平均插入损耗分别为 10.24 dB 和 10.08 dB。由此, 可以计算出, 在 TM 偏振下, ZGP

波导在 $2.4\ \mu\text{m}$ 泵浦波长下的传输损耗 (包括散射损耗) 为 0.8 dB/cm, 揭示了所制作 ZGP 波导良好的传输性能。

2 基于 ZGP 波导的光差频产生

为进一步验证 ZnGeP_2 波导平台的实用性, 这里展示了基于 ZnGeP_2 波导的光差频产生实验, 实验装置图如图 4(a) 所示。实验装置主要由充当泵浦光和信号光的两个输出波长可调谐的光参量放大 (OPA) 光源, 以及 ZnGeP_2 ($\theta=48.4^\circ$, $\varphi=0^\circ$) 波导三部分组成。为了实现基于波导的非线性频率转换, 这里采用的相位匹配条件为 I 型相位匹配, 即 $\omega(\text{泵浦光})+\omega(\text{信号光})\rightarrow\omega(\text{闲频光})$ 。其中泵浦光和信号光的输出波长调谐范围分别为 $2.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 和 $2.8\sim 3.8\ \mu\text{m}$, 脉冲宽度为 300 fs, 重复频率为 500 kHz, 泵浦光和信号光的输出光谱分别如图 4(b)~4(c) 所示。泵浦光与信号光通过硅片进行合束, 硅片以相对于泵浦光的 74° 布儒斯特角摆放, 其导致垂直偏振态的泵浦光经过硅片后损耗为 1.4 dB。之后通过焦距为 40 mm (L1) 的 CaF_2 透镜聚焦进 ZGP 波导中, 差频产生的长波红外激光即闲频光首先经过具有 $2\sim 13\ \mu\text{m}$ 增透涂层的 ZnSe ($f=25\ \text{mm}$)

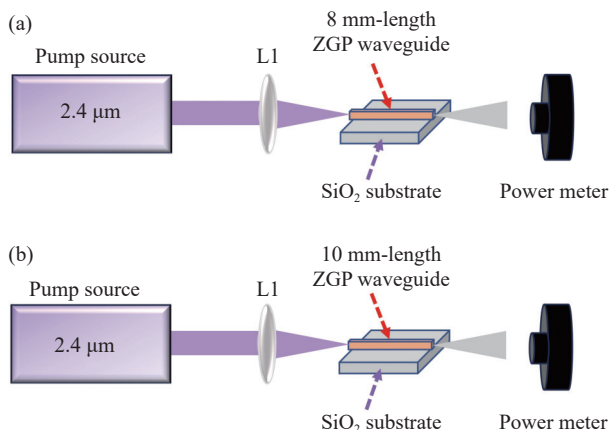


图 3 截断法测传输损耗实验装置。(a) 8 mm ZGP 波导传输损耗实验装置; (b) 10 mm ZGP 波导传输损耗实验装置

Fig.3 Experimental device for measuring transmission loss by truncation method. (a) 8 mm ZGP waveguide transmission loss experimental device; (b) 10 mm ZGP waveguide transmission loss experimental device

透镜进行准直,之后经过截止波长为 $4.5\ \mu\text{m}$ 的长通滤波器 (LPF), 滤除其中残余的泵浦与信号光。接着用芯径为 $500\ \mu\text{m}$ 的空芯 MIR 光纤 (OptoKnowledge

HF500 MW) 收集闲频光, 并用配备液氮冷却碲化汞探测器 (Judson, DMCT16-De01) 的光栅扫描单色仪 (Zolix Omni- λ 500 i) 对收集的闲频光进行光谱分析。

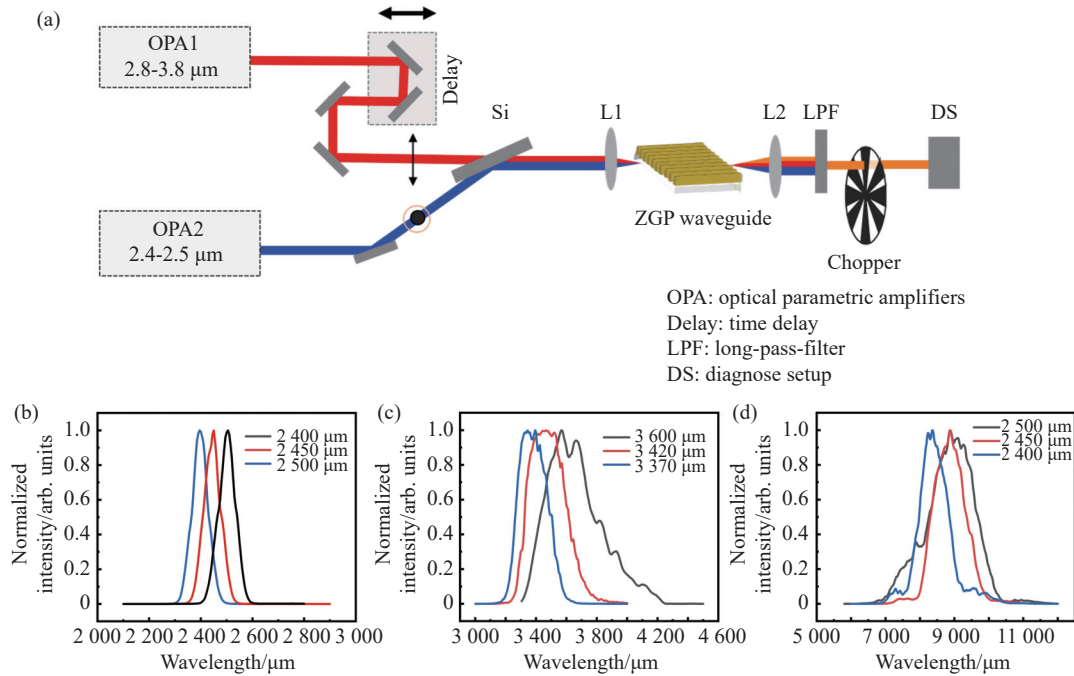


图4 基于 ZGP 的光差频实验装置与长波中红外产生结果。(a) 基于 ZnGeP_2 波导的光差频实验装置; (b) $2.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 可调谐泵浦光谱; (c) $3.37\sim 3.6\ \mu\text{m}$ 可调谐信号光谱图; (d) 覆盖范围为 $7\sim 10\ \mu\text{m}$ 的闲频光谱图, 标注为闲频光对应的泵浦

Fig.4 Optical difference frequency experiment device based on ZGP and long-wave mid-infrared produce results. (a) Optical difference frequency experiment device based on ZnGeP_2 waveguide; (b) $2.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ tunable pump spectra; (c) $3.37\sim 3.6\ \mu\text{m}$ tunable signal spectra; (d) Idle frequency spectra covering a range of $7\sim 10\ \mu\text{m}$, labeled as idle light corresponding to the pump

在实验中, 由于 ZGP 波导的相位匹配角度是固定的, 需要通过改变泵浦光波长和相应的信号光波长来实现波长可调谐的闲频光的输出。如图 5(a)~5(c) 所示, 根据 ZGP 晶体的 Sellmeier 方程计算出了相位匹配角度为 48.4° 的 ZGP 波导分别在泵浦光波长在 2.4 、 2.45 、 $2.5\ \mu\text{m}$ 的相位匹配曲线。可以看出, 当

泵浦光波长在 $2.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 范围调谐时所对应的闲频光输出范围覆盖 $7\sim 11\ \mu\text{m}$ 。在光差频实验中, 固定相位匹配角度为 48.4° 的 ZGP 波导后对泵浦光与信号光进行波长调谐, 实验结果同样产生了与仿真相对应闲频光的典型值, 闲频光输出光谱如图 4(d) 所示。由图 4(d) 可以看出, 其波长可调谐范围为 $7\sim 10\ \mu\text{m}$ 。这

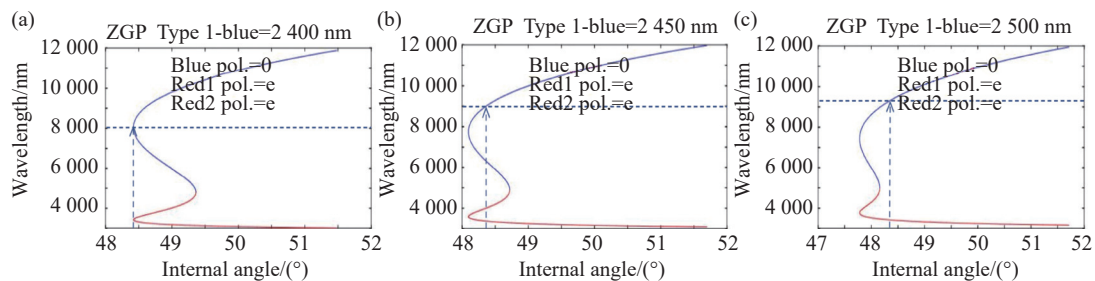


图5 三种不同泵浦波长下的 I 型 ZGP 波导相位匹配曲线。(a) $2.4\ \mu\text{m}$; (b) $2.45\ \mu\text{m}$; (c) $2.5\ \mu\text{m}$

Fig.5 The phase matching curve of a type I ZGP waveguide is plotted for three different pump wavelengths. (a) $2.4\ \mu\text{m}$; (b) $2.45\ \mu\text{m}$; (c) $2.5\ \mu\text{m}$

表明了所设计 ZGP 波导在参量转换方面的优异能力。

3 结 论

文中报道了一个基于 ZnGeP_2 且具有良好传输特性的微米脊波导平台。该波导平台在 $1.5\ \mu\text{m}$ 和 $2.4\ \mu\text{m}$ 波长下的低传输损耗可以满足片上集成中红外激光器的传输需求。且得益于 ZGP 在中红外波段良好的透明窗口, 实验中基于该波导平台进行光差频, 获得的闲频光可以实现在 $7\sim 10\ \mu\text{m}$ 的覆盖与高效调谐。该 ZGP 波导对基于双折射晶体的集成化中红外激光器的搭建具有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] MURAVIEV A V, SMOLSKI V O, LOPARO Z E, et al. Massively parallel sensing of trace molecules and their isotopologues with broadband subharmonic mid-infrared frequency combs [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(4): 209-214.
- [2] WILLER U, SARAJI M, KHORSANDI A, et al. Near-and mid-infrared laser monitoring of industrial processes, environment and security applications [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(7): 699-710.
- [3] WANG L, MIZAIKOFF B. Application of multivariate data-analysis techniques to biomedical diagnostics based on mid-infrared spectroscopy [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2008, 391: 1641-1654.
- [4] NIKODEM M, WYSOCKI G. Chirped laser dispersion spectroscopy for remote open-path trace-gas sensing [J]. *Sensors*, 2012, 12(12): 16466-16481.
- [5] HE Linzhen, TIAN Kan, YANG Xuemei, et al. Development and application of mid-infrared high-energy, high-power, few-cycle optical parametric chirped pulse amplifier (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20210396. (in Chinese)
- [6] ZHANG Dunxiang, HU Bo, YANG Xuemei, et al. Research progress of on-chip nonlinear mid-infrared lasers (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(7): 20240186. (in Chinese)
- [7] LIAN Y, TIAN W, SUN H, et al. High-efficiency, widely tunable MgO: PPLN optical parametric oscillator[C]// Photonics. MDPI, 2023, 10(5): 505.
- [8] WUEPPEN J, NYGA S, JUNGBLUTH B, et al. $1.95\ \mu\text{m}$ -pumped OP-GaAs optical parametric oscillator with $10.6\ \mu\text{m}$ idler wavelength [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4225-4228.
- [9] KOWLIGY A S, LIND A, HICKSTEIN D D, et al. Mid-infrared frequency comb generation via cascaded quadratic nonlinearities in quasi-phase-matched waveguides [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1678-1681.
- [10] KOWLIGY A S, CARLSON D R, HICKSTEIN D D, et al. Mid-infrared frequency combs at 10 GHz [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3677-3680.
- [11] MISHRA J, JANKOWSKI M, HWANG A Y, et al. Ultra-broadband mid-infrared generation in dispersion-engineered thin-film lithium niobate [J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 32752-32760.
- [12] LEDEZMA L, SEKINE R, GUO Q, et al. Intense optical parametric amplification in dispersion-engineered nanophotonic lithium niobate waveguides [J]. *Optica*, 2022, 9(3): 303-308.
- [13] BECHEKER R, BAILLY M, IDLAHCEN S, et al. Optical parametric generation in OP-GaAs waveguides pumped by a femtosecond fluoride fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(4): 886-889.
- [14] HU B, YANG X, WU J, et al. Highly efficient octave-spanning long-wavelength infrared generation with a 74% quantum efficiency in a $\chi^{(2)}$ waveguide [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 7125.
- [15] DE Rossi A, ORTIZ V, CALLIGARO M, et al. Measuring propagation loss in a multimode semiconductor waveguide[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(7): 073105.
- [16] HU B, CHEN L, YANG X, et al. Continuous-wave long-wavelength infrared difference-frequency generation in ZGP driven by near-infrared fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(4): 1101-1104.
- [17] HUNSPERGER R G. Integrated Optics[M]. Berlin: Springer Verlag, 1995.

Measurement of transmission loss and generation of optical difference frequency in ZnGeP₂ waveguide

MIAO Yuxiu, YANG Xuemei, HU Bo, LIANG Houkun*

(School of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract:

Objective On-chip integrated mid-infrared lasers have emerged as a significant developmental direction in the field of mid-infrared lasers in recent years, attributed to their compact footprint, low energy consumption, and high conversion efficiency. In particular, on-chip integrated mid-infrared lasers based on nonlinear frequency conversion have garnered considerable attention from researchers due to their capabilities for ultra-short pulse output and broadband tunability. Notably, the advantageous physical property that the second-order nonlinear effects of materials vastly exceed their third-order nonlinear responses endows on-chip integrated mid-infrared lasers based on second-order nonlinear frequency conversion with numerous benefits, including straightforward design, high conversion efficiency, and low threshold levels. However, the current limitations in micro-nano fabrication techniques have resulted in a lack of reports on high-efficiency long-wave infrared lasers utilizing waveguide platforms of this type, specifically quasi-phase-matched crystal waveguides. Consequently, there is an urgent need to explore and develop new $\chi^{(2)}$ waveguide platforms to facilitate the generation of high-efficiency, broadly tunable long-wave infrared lasers. Furthermore, this experiment involved a detailed assessment of the transmission loss of the designed ZnGeP₂ waveguide, which features a phase-matching angle of 48.4°, and successfully generated long-wave infrared laser output through optical difference frequency generation.

Methods Distinct loss measurement systems were established based on the principles of the Fabry-Pérot (F-P) cavity method and the truncation method (Fig.2-Fig.3) to conduct comprehensive assessments of the transmission loss of the designed ZnGeP₂ waveguide, which possesses a phase-matching angle of 48.4°. Building upon these measurements, an experimental setup for optical difference frequency generation was developed utilizing two tunable optical parametric amplifier (OPA) sources as the pump and signal light (Fig.4). The wavelengths of the pump and signal lights were adjusted to achieve broadband tunable long-wave infrared laser output. Finally, the phase-matching curve for the ZnGeP₂ waveguide corresponding to the phase-matching angle of 48.4° was calculated using the Sellmeier equation for the ZnGeP₂ crystal, facilitating the validation of the optical difference frequency generation experiments.

Results and Discussions The characterization of the waveguide's surface profile and roughness (Fig.1) confirms the quality of the waveguide fabrication. The results from loss tests conducted using both the Fabry-Pérot (F-P) cavity method and the truncation method indicate that the transmission losses for the ZnGeP₂ (ZGP) waveguide are 0.173 1 dB/cm and 0.199 8 dB/cm for the transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) modes, respectively, at a wavelength of 1.55 μm . Additionally, the TE mode transmission loss at 2.4 μm is recorded as 0.8 dB/cm. These findings demonstrate the excellent mode transmission capability of the ZGP waveguide in the 1.55 μm wavelength range, thereby establishing a foundation for subsequent mid-infrared laser generation based on near-infrared laser pumping and ZGP waveguides. Under these transmission loss conditions, the optical difference frequency generation experiments with the ZGP waveguide achieved tunable idle frequency output within the wavelength range of 7 to 10 μm (Fig.4). This output range encompasses typical values derived

from the phase-matching curve calculated using the Sellmeier equation for pump wavelengths of 2.4 μm , 2.45 μm , and 2.5 μm (Fig.5). These results indicate the exceptional capabilities of the designed ZGP waveguide in parametric conversion applications.

Conclusions A micron ridge waveguide platform based on ZnGeP_2 with robust transmission characteristics has been designed. The low transmission losses observed at wavelengths of 1.5 μm and 2.4 μm fulfill the transmission requirements for on-chip integrated mid-infrared lasers. Furthermore, exploiting the excellent transparency window of ZnGeP_2 in the mid-infrared spectrum, the experiments conducted on this waveguide platform successfully achieved optical difference frequency generation, resulting in idle frequency output that is efficiently tunable across the range of 7 to 10 μm . The findings related to this ZGP waveguide provide significant reference value for the development of integrated mid-infrared lasers utilizing birefringent crystal technology.

Key words: mid-infrared laser; optical difference frequency; transmission loss; ZnGeP_2 waveguide; Fabry-Perot cavity; truncation method