

激光与光电子学进展

MgO:PPLN 光参量振荡特性及参量优化

王睿, 汪水兰, 蒋星晨, 程德华, 岱钦*

沈阳理工大学理学院, 辽宁 沈阳 110159

摘要 模拟分析了在不同入射泵浦光半径下 MgO:PPLN 晶体的热分布, 考虑晶体在工作时中心轴线附近产生的温度升高现象, 引入晶体升温参数 t , 分析优化了晶体温度调谐曲线。实验中研究了 MgO:PPLN 光参量振荡 (OPO) 的逆转换现象, 分析了腔镜的参量光反射率和最佳泵浦超阈值倍数的关系, 讨论了晶体长度对 OPO 光-光转换效率的影响。通过优化实验, 在温度范围为 30~190 °C 内, 测得信号光波长连续变化区间为 1568.9~1659.8 nm, 当泵浦功率为 1.12 W、脉冲重复频率为 15 kHz、温度为 90 °C 时, 得到最大平均功率为 110 mW、波长为 1595 nm 的近红外激光输出。

关键词 光参量振荡; 温度调谐; 光-光转换效率; 逆转换

中图分类号 O437

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230519

MgO:PPLN Optical Parametric Oscillation Characteristics and Parameter Optimization

Wang Rui, Wang Shuilan, Jiang Xingchen, Cheng Dehua, Dai Qin*

School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, Liaoning, China

Abstract In this study, the heat distributions of MgO:PPLN crystals under different incident pump optical radii are simulated and analyzed. Considering the temperature rise phenomenon near the central axis of the crystal during operation, the crystal heating parameter t is added to optimize the crystal temperature tuning curve. The inverse conversion phenomenon of MgO:PPLN optical parametric oscillation (OPO) is experimentally analyzed. Furthermore, the relationship between the parametric light reflectance of the cavity mirror and the optimal pump super-threshold multiple is investigated, and the effect of crystal length on the OPO conversion efficiency is analyzed. By optimizing the experiments, the continuous change range of the signal light wavelength in the temperature range of 30–190 °C is measured to be 1568.9–1659.8 nm. At a pump power of 1.12 W, repetition frequency of 15 kHz, and temperature of 90 °C, the obtained near-infrared laser output is 1595 nm with a maximum average power of 110 mW.

Key words optical parametric oscillation; temperature tuning; optical-to-optical conversion efficiency; inverse conversion

1 引言

镁掺杂周期性极化铌酸锂 (MgO:PPLN) 晶体具有较高的有效非线性系数和损伤阈值, 在激光非线性频率变换技术中得到了广泛使用^[1-4]。Sellmeier 方程是用来计算波长有关的折射率方程, ShaiEmanueli 等测量了磷酸钛氧钾 (KTP) 和砷酸钛氧钾 (KTA) 晶体在温度为 25~200 °C、波长为 532~1585 nm 范围内的晶体折射率, 并给出二者随温度变化的 Sellmeier 方程^[5]。但 Sellmeier 方程在使用过程中没有考虑晶体本身在工作时的温度变化, 在实际实验中当入射功率逐渐增大时, 晶体受激光加热的效果也更加显著^[6]。杨

建峰等^[7]在倍频实验中发现, 入射功率不断增加, 晶体需要的实际匹配温度反而下降, 说明晶体对参量光产生吸收, 使得晶体内部温度升高, 从而会对相关输出结果造成影响, 用传统 Sellmeier 方程在计算相关参数时会与实际值存在误差。同时, 激光光束能量一般呈高斯分布, 晶体温度呈横向梯度变化, 会引起晶体折射率的横向梯度变化, 产生热透镜效应^[8]。Hodgson 等研究表明, 热导率和热光系数的大小随温度发生改变, 对应的径向关系也随之发生变化。2018 年哈尔滨工业大学王红丽等^[9]基于 LD 端面泵浦掺钕钇铝石榴石 (Nd:YAG) 激光器存在的模式匹配效率和热焦距进行了理论研究, 提出了一种易于使用的测量方法来获

收稿日期: 2023-01-16; 修回日期: 2023-02-27; 录用日期: 2023-03-27; 网络首发日期: 2023-04-07

通信作者: *daiqin2003@126.com

得不对称动态稳定腔的焦距。另外,在光参量振荡(OPO)过程中,信号光和闲频光会获得增益,当振幅密度与泵浦光接近时,泵浦光能量明显衰减^[10]。当能量达到一定程度时,信号光和闲频光不再得到增益,反而会使泵浦光被放大,此时能量由参量光流向泵浦光,发生逆转换现象^[11]。逆转换过程是影响 OPO 效率的重要因素,对光-光转换效率的影响较为明显。

本文采用波长为 1064 nm 的激光器作为泵浦光, MgO:PPLN 作为非线性晶体,搭建了紧凑的单谐振直腔结构。针对晶体吸收参量光造成温度升高的现象,模拟分析在不同入射泵浦光半径下 MgO:PPLN 晶体的热分布,在 Sellmeier 方程中引入晶体升温参数 t , 分析优化了晶体温度调谐曲线。理论分析了谐振腔透射率和晶体长度对 OPO 光-光转换效率的影响。通过实验参数优化,获得连续变化的波长为 1568.9~1659.8 nm 的信号光输出。

2 热效应理论分析

为了研究 MgO:PPLN 晶体在工作时产生的热量对激光输出的影响,建立晶体热分布模型^[12]。

对 MgO:PPLN 晶体而言,在直角坐标系下建立晶体单端泵浦的热传导方程^[13]为

$$K_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + q(x, y, z) = 0, \quad (1)$$

$$q(x, y, z) = \frac{2\alpha\eta_h P_m}{\pi\omega_p^2} \exp\left[-2\frac{(x-a/2)^2 + (y-b/2)^2}{\omega_p^2}\right] \exp(-\alpha z), \quad (2)$$

式中: $K_x=K_y=K_z=4.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 分别为晶体高度、宽度、长度方向上的热传导系数; $q(x, y, z)$ 为晶体热源; α 为晶体的吸收系数, $\alpha=0.034 \text{ cm}^{-1}$ ^[14]; $P_m=8 \text{ W}$ 为晶体的注入功率; ω_p 为泵浦的光斑半径; a 为晶体厚度; b 为晶体宽度; η_h 为热转换系数, $\eta_h=0.32$ 。

将晶体边界温度设为 0°C , 其场分布 $u(x, y, z)$ 的初始条件和边界条件为

$$\begin{aligned} u(0, y, z) &= 0; u(a, y, z) = 0 \\ u(x, 0, z) &= 0; u(x, b, z) = 0 \\ \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} &= 0; \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \end{aligned}, \quad (3)$$

计算时选取晶体尺寸为 $10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 泵浦光输出波长为 1064 nm, 光斑半径选取 0.3、0.5、0.7 mm, 对热传导方程进行求解, 模拟得到单端注入功率时的晶体端面中心温度分布, 如图 1 所示。

由图 1 可知, 在相同的泵浦功率下, 泵浦光斑半径为 0.3 mm 时晶体中心轴线附近最高温度为 296.3 K, 泵浦光斑半径为 0.7 mm 时晶体中心轴线附近最高温度为 295.7 K, 晶体温度分布有所下降, 但晶体中心轴线与边缘仍存在一定的温度梯度。

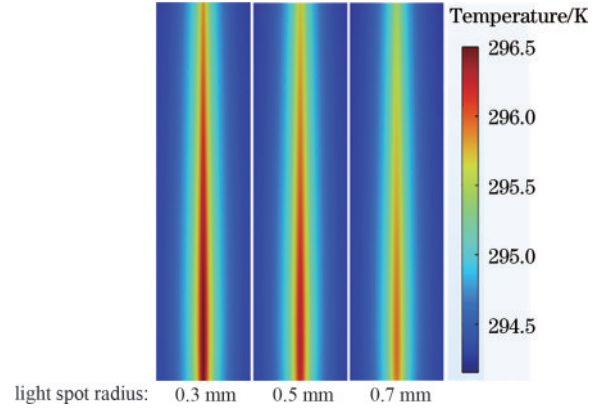


图 1 不同光斑泵浦下 PPLN 晶体端面处中心温度分布
Fig.1 Distribution of central temperature at the end face of PPLN crystal under different spot pumping

如图 2 所示, 在晶体工作过程中, 随着泵浦光不断通过, 晶体在激光通过部分会累积热量, 与晶体边缘位置产生温度差, 这会导致晶体内各点的折射率不同, 产生热透镜效应。热透镜效应将会影响谐振腔稳定性、输出功率和光束质量等性能, 因此需分析晶体的热焦距, 计算公式为

$$f_{th} = \frac{\pi K \omega_p^2}{\xi P_m (dn/dT)} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right], \quad (4)$$

式中: K 为热导率; ξ 为泵浦功率转换为热的效率, $\xi=0.32$; $dn/dT=7.6 \times 10^{-5}$ 为晶体的热光系数^[15], n 为折射率, T 为温度; P_m 为泵浦功率; l 为晶体的长度。

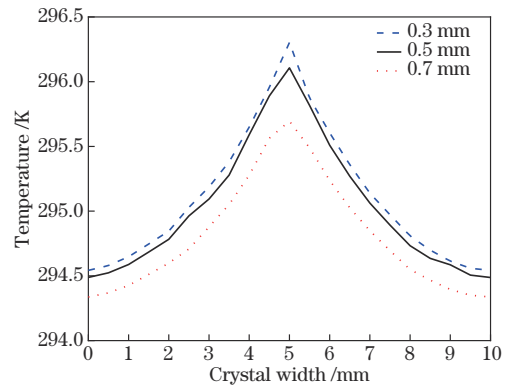


图 2 不同泵浦光斑下晶体横截面温度曲线
Fig.2 Temperature curve of crystal cross-sectional under different pump spots

以泵浦光斑半径 0.3、0.5、0.7 mm 作为理论值, 模拟结果如图 3 所示。

如图 3 所示, 当泵浦功率相同时, 随着泵浦光斑半径的增大, 热焦距越大, 热透镜效应越不显著, 对后续系统产生的影响越小, 根据 MgO:PPLN 晶体尺寸和损伤阈值^[16], 最终将泵浦光斑半径确定为 0.5 mm 左右。

对温度调谐相位匹配量 Δk 进行分析, 考虑到晶体热效应导致的温度影响, Δk 可表示为

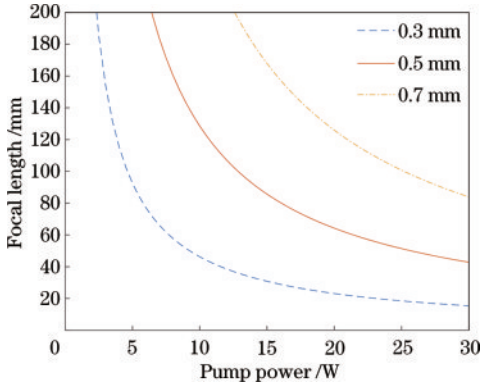


图3 不同入射泵浦光斑下的热焦距

Fig. 3 Thermal focal lengths at different incident pump spots

$$\Delta k = \left[\frac{n_{p1}(T)}{\lambda_{p1}} - \frac{n_{s1}(T)}{\lambda_{s1}} - \frac{n_{i1}(T)}{\lambda_{i1}} - \frac{1}{\Delta} \right], \quad (5)$$

式中: $n_{p1}(T)$ 、 $n_{s1}(T)$ 、 $n_{i1}(T)$ 分别为泵浦光、信号光和闲频光考虑热效应升温之后的三波折射率; λ_{p1} 、 λ_{s1} 、 λ_{i1} 为泵浦光、信号光和闲频光考虑热效应升温后的三波波长; Δ 为晶体的极化周期。

对 Sellmeier 方程进行相应的调整:

$$n_{e1}^2 = a_1 + b_1 f + \frac{a_2 + b_2 f}{\lambda^2 - a_3^2} + \frac{a_4 + b_3 f}{\lambda^2 - a_5^2} - a_6 \lambda^2, \quad (6)$$

$$f(T) = (T + t - 24.5)(T + t + 570.82), \quad (7)$$

式中: $a_1 \sim a_6$ 、 $b_1 \sim b_3$ 为计算 MgO:PPLN 晶体折射率的相关参数; n_{e1} 为考虑升温后 e 光的折射率, 在原有方程中引入晶体升温 t , 晶体的三波折射率和对应的 Sellmeier 方程均发生了一系列的变化, 必须重新考虑晶体的极化周期, 才能满足相位匹配过程中相位失配量 $\Delta k = 0$ 。

图 4 为 Sellmeier 方程与考虑热效应温度调谐曲线的对比。图 4 中两条曲线在信号光、闲频光波段均存在一定偏差。晶体的折射率对温度敏感, 轻微的温度变化就会对折射率产生影响, 尤其在大能量注入情况下, 晶体对参量光吸收产生的热量通常不能忽略^[13]。

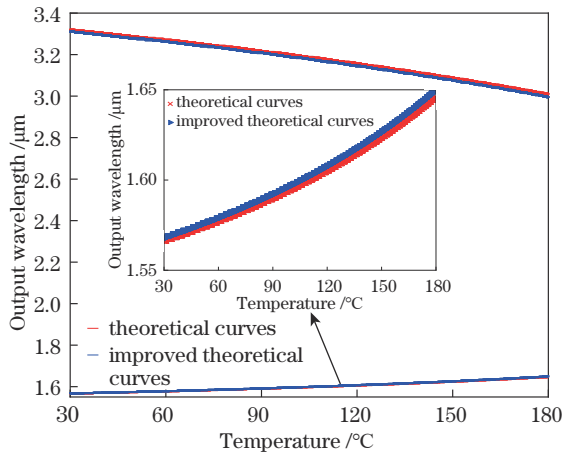


图4 考虑热效应的温度调谐曲线对比。插图: 信号光波段

Fig. 4 Comparison of temperature tuning curves considering thermal effects. Insert: signal wavelength

3 PPLN 光参量振荡实验优化

激光器实验光路图如图 5 所示。泵浦源采用端面泵浦掺钕钒酸钇(Nd:YVO₄)声光调 Q 激光器, 选定重复频率为 15 kHz, 脉冲宽度约为 75 ns, 最大输出功率为 8.3 W, 光束质量良好。波长为 1064 nm 的泵浦光经过 45° 反射镜 M1、M2 后进入光隔离器, 以免反射对泵浦激光光路造成损坏。泵浦光通过耦合系统, 焦距为 75 mm, 光斑半径约为 0.5 mm。OPO 采用直腔结构, M3、M4 采用平行平面腔。M3 的 S1 面镀有 1064 nm 增透膜, S2 面镀有 1064 nm 高透膜, 1570 nm 高反膜; M4 镀有透射率为 25% 的 1570 nm 部分反射膜, 1064 nm 全反膜。MgO:PPLN 扇形晶体的极化周期 Δ 为 27.7~32.4 μm , 晶体尺寸为 10 mm \times 1 mm \times 40 mm, 在晶体的两端均镀有泵浦光、信号光、闲频光波段的增透膜。filter 参数为 780~2500 nm 高透射率、可见光和中红外波段截止的滤光片。

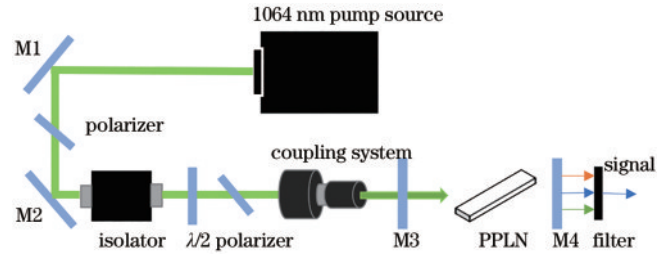


图5 实验光路示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the experimental optical path

当单谐振 OPO 稳定运行时, 满足相位匹配条件, 即 $\Delta k = 0$, 单谐振 OPO 的总光-光转换效率 η 为

$$\eta = \sin^2(\Gamma'_0 l), \quad (8)$$

式中: $\Gamma'_0 = \left[\frac{\mu_0 c}{2n_s} \sigma_i \sigma_p I_s(0) \right]^{1/2}$ μ_0 为真空磁导率, c 为光速, n_s 为信号光折射率, σ_i 为闲频光介质电导率, σ_p 为泵浦光介质电导率, $I_s(0)$ 为信号光初始光强 (OPO 中取随机噪声); l 为晶体长度。

考虑 OPO 腔镜对信号光的反射率 R_1 、 R_2 , 增加的信号光光子 ΔI_s 可表示为

$$\Delta I_s = I_s(0)(1 - R_1 R_2). \quad (9)$$

由曼利-罗关系可知^[17], 每湮灭一个泵浦光子, 会产生一个信号光子和一个闲频光子, 可表示为

$$\Delta I_s = \frac{\omega_{s1}}{\omega_{p1}} \left[1 - \left(\frac{\Delta k}{2\Gamma'_0} \right)^2 \right] I_p(0) \sin^2(\Gamma'_0 l), \quad (10)$$

式中: ω_{s1} 为信号光的频率; ω_{p1} 为泵浦光的频率。

联立式 (9)、式 (10) 泵浦光强和泵浦光阈值 I_p^{th} 的关系可改写为

$$I_p(0) = I_p^{\text{th}} \sqrt{R_2} \frac{(\Gamma'_0 l)^2}{\sin^2(\Gamma'_0 l)}. \quad (11)$$

定义泵浦超阈值倍数 N 为入射泵浦光强度与单谐振 OPO 起振的阈值泵浦光强度之比, 其与光-光转换效率之间的关系可表示为

$$N = \sqrt{R_2} \frac{(\Gamma'_0 l)^2}{\sin^2(\Gamma'_0 l)}. \quad (12)$$

由式(12)可知, 泵浦光光强持续提升并不会使参量光光强持续增加, 当泵浦光强达到一定程度时, 就会产生逆转换现象, 从而降低参量光的光-光转换效率。

模拟了不同谐振腔参量光反射率对最佳泵浦超阈值倍数的影响, 如图 6 所示。随着谐振参量光反射率的增加, 对应的最佳泵浦超阈值倍数也不断增加, 可以看出光-光转换效率与泵浦超阈值倍数存在最佳匹配值。高信号光反射率可以降低 OPO 建立的阈值, 但不利于提高光-光转换效率。相反, 低信号光反射率能够提高光-光转换效率, 也会提高阈值泵浦功率。

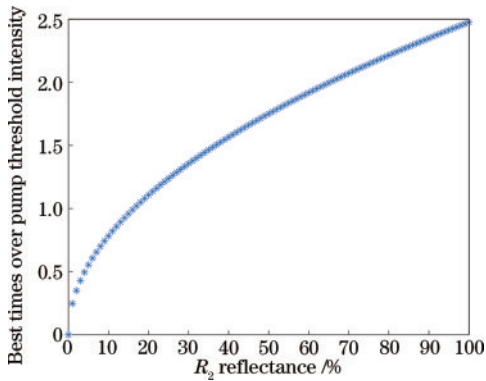


图 6 R_2 反射率与最佳泵浦超阈值倍数的关系

Fig. 6 Relationship between R_2 reflectance and optimal pump superthreshold multiple

模拟了在不同晶体长度下光-光转换效率与泵浦光强的关系曲线, 如图 7 所示。晶体的长度越长, 泵浦光强在较低水平就能获得最大光-光转换效率。随着

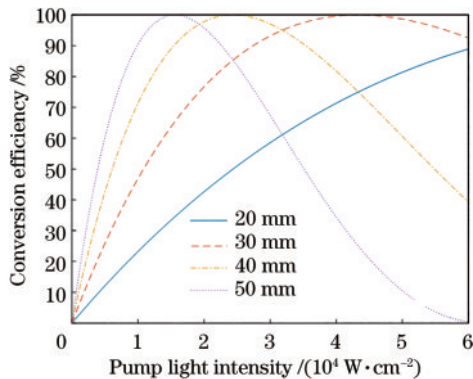


图 7 不同晶体长度下转换效率与泵浦光强的关系

Fig. 7 Relationship between conversion efficiency and pump light intensity under different crystal lengths

泵浦光强的提高, 达到最大转换效率后, 能量开始流向泵浦光发生逆转换现象。较短的晶体因达到最大转换效率所需的泵浦光强较高, 在相同泵浦光强条件下, 与较长的晶体相比, 不容易出现逆转换现象。合适的晶体长度能够减弱逆转换现象对转换效率的影响。

根据上述理论, 综合考虑泵浦阈值、转换效率以及激光器、实验设备等因素, 实验选取反射率 R_2 为 75% 的输出镜、长度为 40 mm 的晶体。

实验测试了信号光输出功率和光-光转换效率随泵浦功率的变化, 如图 8 所示。由图 8 可知, 随着泵浦功率的增加, 信号光的输出功率和光-光转换效率开始呈上升趋势, 在入射泵浦功率为 1.12 W 时, 泵浦光的脉宽为 71 ns, 信号光输出波长为 1594.9 nm, 谱线宽度约为 3 nm, 此时达到最大输出功率 110 mW, 光-光转换效率为 9.82%。随后, 输出功率和光-光转换效率开始下降。实验中产生参量光的泵浦阈值功率为 0.63 W, 理论值未考虑到晶体内部的损耗以及光束在传播中的损耗, 在对应超阈值倍数为 2.13 时, 达到最高光-光转换效率, 泵浦功率值应为 1.34 W, 实验测得此时泵浦功率值为 1.12 W。

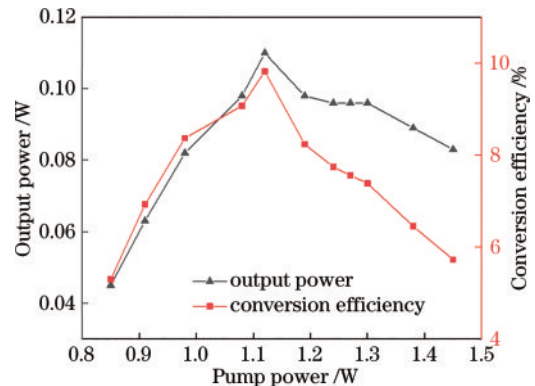


图 8 15 kHz 重复频率下信号光输出功率和光-光转换效率随泵浦功率的变化

Fig. 8 Optical output power and optical-optical conversion efficiency of the signal change with the pump power at the repetition rate of 15 kHz

使用近红外光谱仪 (NIRQUEST) 测量 PPLN-OPO 信号光调谐波长, 测得信号光波长连续变化区间为 1568.9~1659.8 nm, 对比实验测量数据与传统温度调谐曲线和考虑晶体热效应后的温度调谐曲线。

图 9 为实验结果与温度调谐理论曲线对比图。在温度较低时, 两条曲线与实验实测值的偏差较小; 在温度较高时, Sellmeier 方程曲线与实验测量值存在一定的偏差, 考虑热效应后温度调谐曲线与实验结果吻合较好。

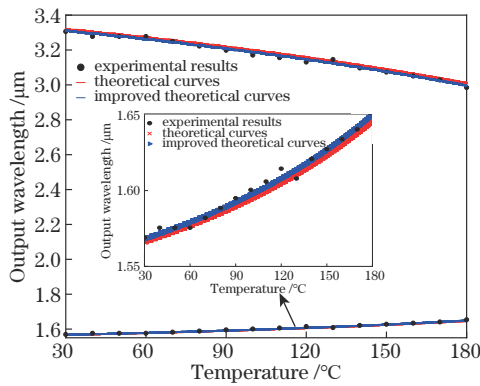


图9 实验结果与温度调谐曲线对比图。插图:信号光波段
Fig.9 Comparison of experimental results with temperature tuning curve. Insert: signal wavelength

4 结 论

研究了 MgO:PPLN 的热效应和逆转换现象,模拟分析了在不同入射泵浦光半径下 MgO:PPLN 晶体的热分布,在 Sellmeier 方程引入晶体升温参数 t ,优化了晶体温度调谐曲线。在理论上,研究了 MgO:PPLN-OPO 过程中产生的逆转换现象,讨论了谐振腔透射率和晶体长度对 OPO 转换效率的影响。对 MgO:PPLN-OPO 进行优化,实验采用高重复 1064 nm 激光作为泵浦光, MgO:PPLN 作为非线性晶体。温度范围为 30~190 °C 时,测得信号光波长连续变化区间为 1568.9~1659.8 nm,实验结果与理论分析结果吻合。

参 考 文 献

- [1] 邓华荣,张龙,谢宇宙,等. PPMgLN 用于光参量振荡实现低阈值 2 μm 激光[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702014.
Deng H R, Zhang L, Xie Y Z, et al. Low threshold 2 μm laser based on optical parametric oscillator using PPMgLN [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(7): 0702014.
- [2] 黄佳裕,林海枫,闫培光. 高效率宽调谐扇形 MgO:PPLN 中红外光参量振荡器[J/OL]. 红外与激光工程, 2022: 1-6[2022-12-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20221008.1035.004.html>.
Huang J Y, Lin H F, Yan P G. Highly efficient, widely tunable fan-out MgO:PPLN mid-infrared optical parametric oscillator[J/OL]. Infrared and Laser Engineering, 2022: 1-6[2022-12-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20221008.1035.004.html>.
- [3] 蒋星晨,程德华,崔建丰,等. 高转换效率 1.47 μm PPLN 光参量振荡器[J]. 沈阳理工大学学报, 2023, 42(2): 56-60.
Jiang X C, Cheng D H, Cui J F, et al. 1.47 μm PPLN optical parametric oscillator with high conversion efficiency [J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2023, 42(2): 56-60.

- [4] Sané S S, Bennetts S, Debs J E, et al. 11 W narrow linewidth laser source at 780 nm for laser cooling and manipulation of Rubidium[J]. Optics Express, 2012, 20(8): 8915-8919.
- [5] 孔辉,卞进田,叶庆,等. BaGa₄Se₇与 KTiOAsO₄光参量振荡产生中红外激光性能对比[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(6): 20190423.
Kong H, Bian J T, Ye Q, et al. Comparison of mid-infrared laser generated by optical parametric oscillation of BaGa₄Se₇ and KTiOAsO₄[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(6): 20190423.
- [6] 王挺峰,汤伟,邵俊峰,等. 高重复频率 CO₂ 激光重复频率大小对 HgCdTe 晶体温升及损伤特性影响分析[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0206006.
Wang T F, Tang W, Shao J F, et al. Analysis of temperature and damage characteristics of HgCdTe crystal on repetition frequency of CO₂ laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0206006.
- [7] 杨建峰,杨保东,高静,等. 1560 nm 连续光半导体激光器经 PPLN 倍频及经啁啾吸收光谱稳频[J]. 量子光学学报, 2010, 16(1): 41-47.
Yang J F, Yang B D, Gao J, et al. 1560 nm CW diode laser frequency doubling by using PPLN crystal and frequency locking via rubidium absorption spectroscopy [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2010, 16(1): 41-47.
- [8] 陈慧敏,李家泽. 一种测量动态热焦距的方法[J]. 激光与红外, 2004, 34(4): 264-265.
Chen H M, Li J Z. The dynamic measurement of the thermal focal distance[J]. Laser & Infrared, 2004, 34(4): 264-265.
- [9] Wang H L, Wang Y L, Zhang H K, et al. Determination of thermal focal length under different depths of focus in asymmetrical flat-flat dynamically stable resonators[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 106: 12-17.
- [10] 丁欣,尚策,盛泉,等. 880 nm 共振抽运连续波内腔单谐振光学参量振荡器及其逆转换[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602008.
Ding X, Shang C, Sheng Q, et al. Continuous-wave tunable intra-cavity single resonance optical parametric oscillator under 880 nm in-band pumping and the inverse conversion[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0602008.
- [11] 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): 024215.
Liu J H, Liu Q, Gong M L. Back conversion in optical parametric process[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(2): 024215.
- [12] 唐奔流. 光力和光热效应的有限元分析方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
Tang B L. Research on finite element analysis method of optical force and photothermal effects[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [13] 刘贺言. 人眼安全 1.5 μm 高重复自光参量振荡器研究

- [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- Liu H Y. Study on eye-safe 1.5 μm high repetition rate self-optical parametric oscillator[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [14] 蔡小天, 李霄, 赵国民. 光参量振荡器中的晶体温度引起的光束质量劣化[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1219001.
- Cai X T, Li X, Zhao G M. Beam quality deterioration caused by crystal temperature in optical parametric oscillator[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1219001.
- [15] 徐丽伟. 高峰值功率 PPMgLN 中红外固体激光器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- Xu L W. High peak power PPMgLN mid-infrared solid-state laser research[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [16] 马彬, 侯志强, 焦宏飞, 等. 脉冲激光损伤阈值测量技术及光学元件损伤性能[J]. 光学精密工程, 2022, 30(21): 2805-2826.
- Ma B, Hou Z Q, Jiao H F, et al. Pulsed laser-induced damage threshold measurement and damage performance of optical components[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(21): 2805-2826.
- [17] 吕百达, 龚正烈. Manley-Rowe 关系[J]. 量子电子学, 1985, 2(3): 276-278.
- Lü B D, Gong Z L. Manley-Rowe relation ship[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1985, 2(3): 276-278.