

doi:10.3788/gzxb20184706.0619002

基于多周期 MgO : PPLN 的内腔宽调谐 连续中红外光参量振荡器

邢爽, 于永吉, 王宇恒, 范灏然, 李玥, 金光勇

(长春理工大学 理学院 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 长春 130022)

摘 要:报道了一种内腔光参量振荡器, 该器件通过改变多通道 MgO : PPLN 极化晶体的极化周期和温度, 可以快速实现 3.2~4.1 μm 中红外参量光可调谐连续输出. 采用 1.064 μm 谐振腔与多光参量振荡腔折叠型复合结构, 考虑晶体热效应及宽范围调谐参量光振荡过程中光斑模式匹配, 通过对两个子腔谐振结构的数值模拟分析, 确定最佳腔型结构参数. 基于该谐振腔结构, 实验研究了多周期 MgO : PPLN 晶体的温度和极化周期对参量光波长的影响, 实验中克服了 MgO : PPLN 晶体在 3.8~4.1 μm 中红外波段较为严重的本征吸收以及量子亏损导致的效率降低问题, 获得 2.78~4.18 μm 中红外激光连续调谐输出, 调谐范围达 1.399 μm . 在 3.2 μm 、3.5 μm 、3.8 μm 、4.1 μm 四个典型波长下实现了参量光输出, 功率分别为 1.72 W、1.39 W、0.79 W 和 0.442 W, 对应转化效率分别为 7.17%、5.4%、3.1% 和 1.84%.

关键词: 固体激光器; 中红外激光; 内腔式光学参量振荡器; MgO : PPLN; 宽调谐; 连续波

中图分类号: O437.4; TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)06-0619002-9

Wide Tunable Continuous-wave Mid Infrared Intra-cavity Optical Parametric Oscillator Based on Multi-period MgO : PPLN

XING Shuang, YU Yong-ji, WANG Yu-heng, FAN Hao-ran, LI Yue, JIN Guang-yong

(Jilin Key Laboratory of Solid Laser Technology and Application, School of Science,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A tunable continuous-wave (CW) internal cavity pump optical parametric oscillator (OPO) based on multi poled period MgO : PPLN was reported. The 3.2~4.1 μm wide tuning mid-infrared parametric light was obtained in real time by changing the poled periods and temperature. The thermal effect and spot modes matching during OPO's wide tuning process were considered. It used a folded type doubly cavities which consisted of 1.064 μm resonator and optical parametric oscillator. The optimum parameters of the cavity structure was determined on account of the numerical simulation and theoretical analysis results. The theoretical simulation of tuning characteristics of OPO was carried out. Based on this structure, the effect of temperature and polarization period on output wavelength was experimentally investigated. It overcame the sever absorption and the quantum loss of MgO : PPLN in the 3.8~4.1 μm mid-infrared band. Continuous wide range tunable output of 2.78~4.18 μm in mid-infrared radiation was achieved. The tuning range was up to 1.399 μm . The output power of 3.2 μm , 3.5 μm , 3.8 μm and 4.1 μm parametric light was 1.72 W, 1.39 W, 0.79 W and 0.442 W, the corresponding conversion efficiency was 7.17%, 5.4%, 3.1%, 1.84% and 1.72 W.

Key words: Solid state laser; Mid-infrared; Intra-cavity optical parametric oscillator; MgO : PPLN; Wide

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61505013), 吉林省科技厅自然基金 (No. 20160101331JC), 吉林省科技厅人才团队 (No. 20170519007JH), 吉林省科技厅青年基金 (No. 20150520103JH) 和吉林省科技厅重点科技攻关 (No. 20170204046GX) 资助

第一作者: 邢爽 (1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为全固态激光器. Email: xingshuangsec@163.com

导师 (通讯作者): 于永吉 (1983-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为固体激光及其非线性频率变换. Email: 36880280@163.com

收稿日期: 2018-01-22; **录用日期:** 2018-02-28

<http://www.photon.ac.cn>

Tuning; Cotinuous-wave

OCIS Codes: 190.4970; 190.4410; 270.4180; 140.4780

0 引言

3~5 μm 波段中红外激光在大气窗口处具有较低的吸收和散射,被广泛应用于光电信息对抗、大气环境监测和光谱学^[1-3],其中 3.8~4.1 μm 中红外激光波长位于中红外探测器强吸收波段,相比于 3.2~3.6 μm 波段在激光制导、雷达、通信等军事方面有着更加重要的应用价值和研究意义^[4-6].目前,能够实现覆盖 3.8~4.1 μm 长波中红外波段连续激光输出的技术途径主要有半导体级联量子阱激光器和光参量振荡激光器.其中,级联量子阱激光器具有阈值低、量子效率高、线宽窄等优点,并且能够实现集成化和小型化^[7-8].但是,现阶段级联量子阱激光器技术发展还不成熟,存在一些突出问题,如制作工艺要求苛刻,阈值电流密度大、环境温度适应性差、输出功率低、光束质量差等,极大制约了该项技术的推广应用.尽管光参量振荡激光器无法达到结构的高度集成化和小型化,但在环境适应性、输出性能,尤其在宽谱段波长调谐方面,拥有级联量子阱激光器不具备的技术优势^[9-10].

在不同类型光参量振荡器(Optical Parametric Oscillator, OPO)中,依托技术较为成熟的 1.064 μm 固体激光器直接抽运准相位匹配光学参量振荡器(QPM-OPO),利用准相位匹配非线性光学频率变换技术结合温度控制,是实现中红外激光可调谐输出广为采用的技术方法^[11-13].在 QPM-OPO 腔型结构设计方面,相比于结构繁琐的外腔式 OPO,内腔结构是将 OPO 谐振腔置于基频光谐振腔内,抽运光振荡反复通过非线性晶体,增加有效长度,且腔内能量密度较高,有利于提高系统转换效率^[14].英国 D.J.M.Stothard 等人,采用内腔折叠腔结构,基于 PPLN 非线性晶体,利用 LD 端面泵浦 Nd:YVO₄~1 064 nm 作为泵浦源,LD 功率 1 W 时,在中红外闲频光波长为 3.66 μm 处获得的最大输出功率为 70 mW^[15].天津大学丁欣课题组采用相似的内腔结构,用 LD 光纤模块对 Nd:YVO₄ 进行直接泵浦产生 1.064 μm 基频光,在 21.4 W 的泵浦功率下,得到 3.66 μm 的闲频光,功率为 1.54 W^[16].中国科学院福建物质结构研究所的苏辉等人,用 808 nm LD 泵浦 Nd:YVO₄,采用 V 型腔结构,通过改变 MgO:PPLN 的极化周期和温度,获得 2.2~3.7 μm 中红外激光连续输出,在此调谐范围内获得最高 650 mW 的闲频光输出^[17].

虽然,现阶段 QPM-OPO 可实现对参量光一定范围的调谐,但多为 3.6 μm 附近波段中红外激光输出,鲜有输出中红外激光波长达到 3.8~4.1 μm 波长范围的宽谱段调谐报道.本文以多周期 MgO:PPLN 极化晶体为变频介质,通过针对宽调谐的内腔连续 OPO 腔型结构设计,获得了 2.78~4.18 μm 宽调谐中红外激光输出,实现了 3.8~4.1 μm 这一重要应用波段的全覆盖,在 3.2 μm 、3.5 μm 、3.8 μm 、4.1 μm 四个典型波长下实现参量光输出功率分别为 1.72 W、1.39 W、0.79 W 和 0.442 W,转换效率分别达到 7.17%、5.4%、3.1 和 1.84%.

1 实验装置

基于准相位匹配技术的 MgO:PPLN 连续波内腔光参量振荡器(ICSRO)实验装置见图 1.

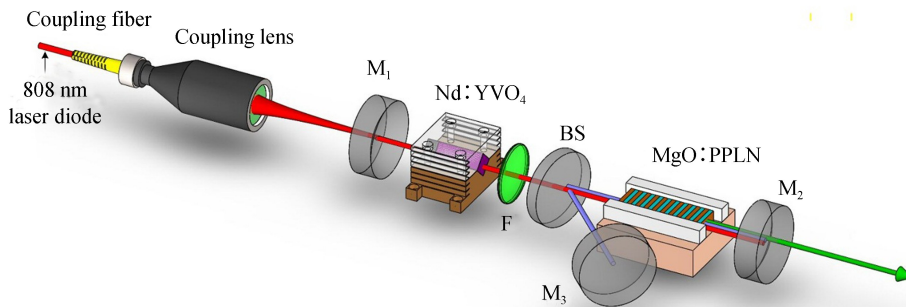


图 1 实验装置

Fig.1 Schematic diagram of experiment setup

抽运源采用德国 DILAS 半导体激光公司生产的中心波长 808 nm、最高输出功率 80 W 的光纤耦合模块,传输光纤芯径为 400 μm ,数值孔径(NA)为 0.22,经 1:1.5 耦合镜组聚焦后抽运单端键合连续生长型

Nd:YVO₄晶体.Nd:YVO₄为沿 a 轴切割的晶体,尺寸 3 × 3 × (4+16) mm³,Nd³⁺离子掺杂浓度 0.25%,两个端面镀有 808 nm 和 1 064 nm 增透膜,晶体侧面包裹一层铝箔,外侧涂抹适量导热硅脂,与特制紫铜热沉紧密贴合并卡在其中,通过外部水冷机循环制冷进行温度控制,水冷机控温精度达到 ±0.01℃.

谐振腔由 1.064 μm 抽运激光谐振腔和光参量振荡腔两个子腔组成,腔镜 M₁ 和 M₂ 构成 1.064 μm 基频光谐振腔,激光介质 Nd:YVO₄晶体靠近抽运端.M₂、15°偏转镜 BS 和 M₃ 构成光参量振荡腔,目的是通过引入折叠支路,使光参量振荡腔内的参量光光斑尺寸能够得到控制,不受限于激光谐振腔结构,腔镜镀膜情况见表 1.

表 1 腔镜镀膜情况

Table 1 The parameters of cavity mirror coating

Identifier	Material	Coating parameter
M ₁	K9	808 nm@HT,1.064 μm@HR
F	K9	1.064 μm@HT
BS	CaF ₂	1.064 μm@HT,1.4~1.7 μm,3.1~4.2 μm@HR,15°Coating
M ₂	CaF ₂	1.064 μm,1.4~1.7 μm@HR,3.1~4.2 μm@HT
M ₃	CaF ₂	1.064 μm,1.4~1.7 μm@HR,3.1~4.2 μm@HR

将多周期 MgO:PPLN 晶体放置在两个谐振子腔的交叠区域,多周期极化晶体上存在多个极化周期,通常可以有几个到几十个周期,如图 2 所示,可以采用周期和温度相结合的方式实现波长调谐.选用尺寸为 1×8.6×50 mm³的多周期结构 MgO:PPLN 晶体,非线性晶体参数见表 2.共 7 个周期结构(Λ = 28.5 μm、29 μm、29.5 μm、30 μm、30.5 μm、31 μm、31.5 μm).实验中,周期极化晶体 MgO:PPLN 固定于 HCP 公司生产的 OV50 温控器内,温控器调节精度为 0.1℃,温控器下方连接于大恒光电生产的 GCD-202050M 电控伺服平移台,通过平移台的伺服控制实现不同极化周期切换,平移台最大移动速度可达 40 mm/s,因此不同周期期间的切换时间可控制在 μs 量级.通过温度器调节 MgO:PPLN 晶体温度以及 MgO:PPLN 相对基频光入射位置进而控制参量光波长变化,可使用型号为 FITR-C-25-120-F 的傅里叶变换红外光谱仪测量中红外激光的输出频谱.

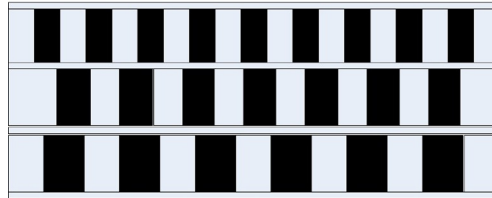


图 2 多周期 MgO:PPLN 结构

Fig.2 Diagram of multi period MgO:PPLN structure

表 2 非线性晶体参数

Table 2 The parameters of nonlinear crystal

MgO:PPLN	
Poled period	28.5~31.5 μm
Size	50 L×8.6 W×1 Tmm ³
Doubleend coating	AR@1.064 μm & 1.42~1.68 μm & 2.9~4.24 μm

2 内腔谐振结构优化设计

为了得到在整个宽调谐谱段内均适用的腔型参数,满足宽调谐内腔中红外激光器的工作需求,并使激光器紧凑化小型化,对内腔连续泵浦 QPM-OPO 进行腔型设计及优化.

对于内腔 MgO:PPLN-OPO 而言,激光晶体的热效应补偿和两个子腔内振荡光斑的模式匹配,决定着参量光输出功率、光束质量、稳定性等表征系统性能的重要指标.内腔谐振结构设计及其腔型参数优化与此密切相关,采用界稳腔法^[18]测量得到 Nd:YVO₄晶体热焦距可以等效成 122~787 mm 的正薄透镜,图 3 的谐振腔简化分解为 1.064 μm 激光谐振腔和光参量振荡腔.

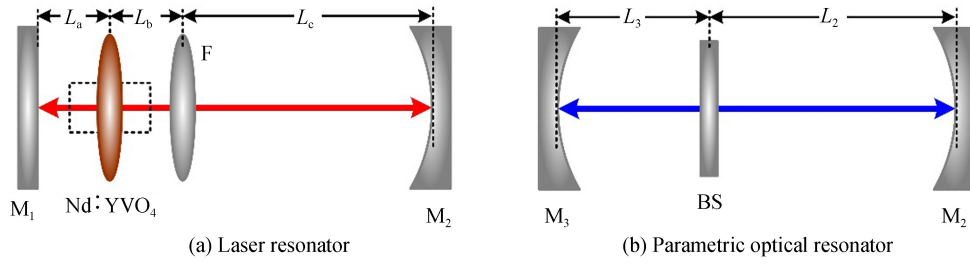


图 3 内腔 MgO:PPLN-OPO 谐振腔分解图

Fig.3 Intra-cavity MgO:PPLN-OPO cavity decomposition diagram

在 M_1 与 M_2 组成的激光谐振腔中,引入透镜 F 实现谐振腔整个泵浦范围的热稳定,靠近 Nd:YVO_4 输出端放置,通过 F 焦距的设定,对整个泵浦范围起到“光学锁定”作用,并且形成对 MgO:PPLN 的聚焦,提高泵浦功率密度.设 M_1 与 Nd:YVO_4 晶体左端面、 F 与 Nd:YVO_4 晶体右端面距离均为 10 mm ,全反镜 M_1 为平面镜,输出镜 M_2 为平凹镜($R=150\text{ mm}$),根据激光谐振腔 G 参数理论及高斯光束 ABCD 传输定律,以 Nd:YVO_4 晶体中心为参考面,兼顾考虑器件尺寸及 Nd:YVO_4 晶体折射率引起的光程变化,分别模拟得到不同 F 焦距、不同 L_c 长度条件下 Nd:YVO_4 晶体中心处基模光斑半径随热焦距的变化趋势,见图 4、图 5.当腔内晶体中心参考面处基模光斑半径趋向于无穷大时,传输光束已溢出谐振腔,谐振腔由稳区进入非稳区,即激光不再形成振荡.由图 4 可知, L_c 固定为 150 mm 时, Nd:YVO_4 热焦距的允许范围随 F 数值的变化明显,当 F 取到 200 mm 时,谐振腔已远远偏离了整个泵浦范围的工作稳定区,而当 F 固定在 150 mm 时,随着 L_c 长度的逐渐增大,曲线右移,即热焦距的允许范围越来越小,如图 5.因此,综合考虑谐振腔在整个泵浦区间的工作稳定性和泵浦光与 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 振荡光的光斑模式匹配(图 4、图 5 中点划线代表 808 nm 泵浦光斑半径),优化选取 $F=150\text{ mm}$, $L_c=150\text{ mm}$.

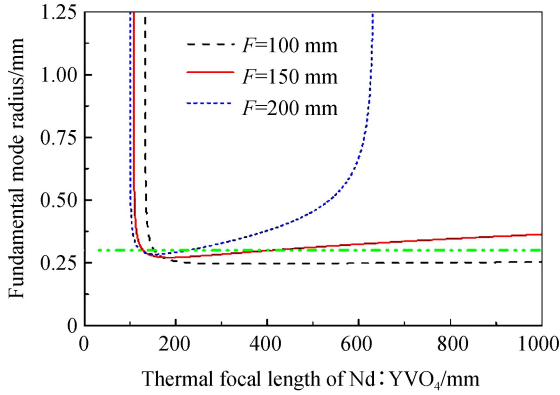


图 4 不同 F 焦距($L_c=150\text{ mm}$), Nd:YVO_4 晶体中心处基模光斑半径随热焦距的变化曲线

Fig.4 At different F ($L_c=150\text{ mm}$), fundamental mode radius in the centers of Nd:YVO_4 crystal versus thermal focal length

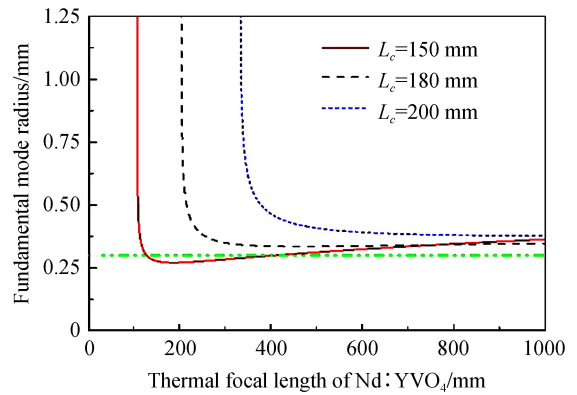


图 5 不同 L_c 长度($F=150\text{ mm}$), Nd:YVO_4 晶体中心处基模光斑半径随热焦距的变化曲线

Fig.5 At different L_c ($F=150\text{ mm}$), fundamental mode radius in the centers of Nd:YVO_4 crystal versus thermal focal length

对于 M_2 和 M_3 组成的光参量振荡子腔,由于 MgO:PPLN 需要放置在其与激光谐振子腔的交叠区域,为了最大限度利用 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 激光的注入功率密度,应使 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 振荡激光在交叠区域的束腰位置与信号光和闲频光在光参量振荡腔内的束腰位置基本重合,以 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 中红外闲频光为基准,选择 $1.47\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.75\text{ }\mu\text{m}$ 信号光进行共焦参数计算.

为了减少衍射损耗,还需保证振荡激光与参量光聚焦参数 $\xi=L/b$ 的高度匹配, L 为 MgO:PPLN 晶体长度, b 为共焦参数,表达式为

$$b_j = 2\pi n_j \omega_j^2 / \lambda_j \quad (1)$$

式中 n 为折射率, ω 为束腰半径, j 代表不同的泵浦激光与参量光.分析可知,首先应明确激光谐振子腔内的束腰位置及大小.根据确定的激光谐振子腔参数,选取热透镜焦距 $150\sim 600\text{ mm}$ 间隔 150 mm 作为研究对象,模拟得到如图 6 所示的激光谐振子腔内基模光斑分布.

由腔内基模光束传输曲线可以看出,不同热焦距对束腰位置及大小均会产生影响,以高泵浦功率下热焦距 150 mm 为参考,相应 1 064 nm 激光束腰位置为距输出镜 89 mm 处,束腰半径为 0.103 7 mm,则聚焦参数 $\xi_{1\,064\text{ nm}}=0.366\,7$ 。通过对腔长 L_2+L_3 和折叠尾镜曲率的优化,当 L_2 取 120 mm, L_3 取 45 mm, M_3 曲率半径与 M_2 同样设定为 $R=150$ mm 时,光参量振荡腔的腔内束腰位置距输出镜 88.5 mm,模拟得到的腔内基模光斑分布见图 7。

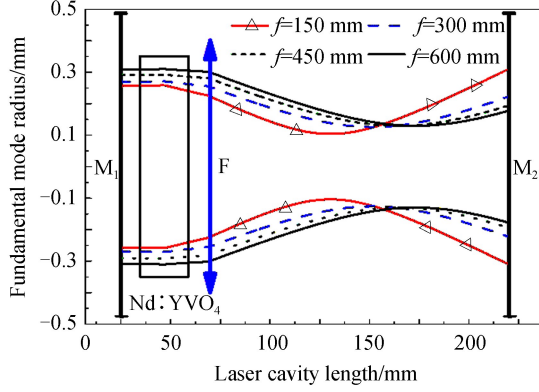


图 6 激光谐振子腔内基模光斑分布模拟

Fig.6 Simulated fundamental mode beam in the laser resonator

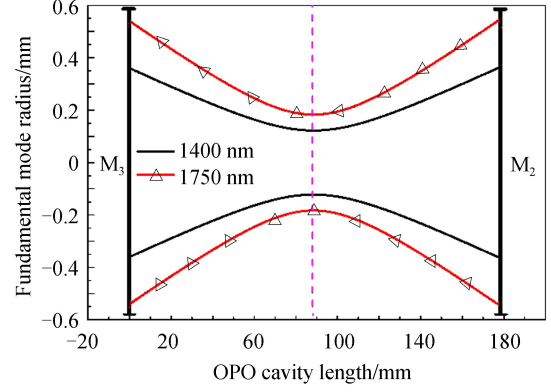


图 7 光参量振荡子腔内基模光斑分布模拟

Fig.7 Simulated fundamental mode beam in the multiple optical parametric oscillation cavity

参量光输出波段范围内,参量光的聚焦参数分别为 $\xi_{1.40\text{ }\mu\text{m}}=0.367\,5$, $\xi_{1.75\text{ }\mu\text{m}}=0.376\,9$,本部分选取的 1.40 μm 和 1.75 μm 信号光,在采用 MgO:PPLN 晶体进行频率变换时,分别对应 4.1 μm 和 2.7 μm 的闲频光,证明此腔型结构可实现宽调谐范围中红外闲频光输出,达到预期设计目的。

3 调谐理论研究

实验使用多周期 MgO:PPLN 非线性晶体实现参量光长波趋势宽范围调谐,与其他非线性光学过程相同,准相位匹配光参量振荡器必须同时满足能量守恒条件(式(2))和动量守恒条件(式(3))。

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i} \quad (2)$$

$$\omega_p n_p = \omega_s n_s + \omega_i n_i \quad (3)$$

式中, λ 为波长、 ω 为频率、 n 为折射率, p、s、i 分别表示泵浦光、信号光和闲频光.对于准相位匹配的光参量振荡器来说,需设定调节项 km ,以满足准相位匹配条件 $\Delta k=0$,即

$$\Delta k = \frac{1}{c} (n_p \omega_p - n_s \omega_s - n_i \omega_i - m \omega_\Lambda) = 0 \quad (4)$$

式中, $\omega_\Lambda = 2\pi c/\Lambda$, m 为准相位匹配阶数, Λ 为非线性晶体极化周期.则式(4)可转化为

$$\frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_s}{\lambda_s} - \frac{n_i}{\lambda_i} - \frac{1}{\Lambda} = 0 \quad (5)$$

根据 MgO:PPLN 晶体 e 偏振光色散方程(Sellmeier 方程)为

$$n_e^2 = a_1 + b_1 f + \frac{a_2 + b_2 f}{\lambda^2 - (a_3 + b_3 f)^2} + \frac{a_4 + b_4 f}{\lambda^2 - a_5^2} - a_6 \lambda^2 \quad (6)$$

式中, f 用温度 t 表示为

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

由式(2)~(7)可知,OPO 参量光输出波长是温度、极化周期和非线性晶体泵浦光波长的函数.因此,可以通过改变晶体温度、极化周期和泵浦波长来实现参量光的波长调谐.实验用 Nd:YVO₄ 晶体产生的 1.064 μm 基频光泵浦 MgO:PPLN,故泵浦光波长固定可通过改变温度与极化周期来调节参量光波长。

以 1.064 μm 激光作为泵浦光源,将掺 5% mol MgO 的 PPLN 晶体,各项特征参数取值代入式(2)~(7)后,可模拟出极化晶体在不同周期下 ($\Lambda = 28.5, 29, 29.5, 30, 30.5\text{ }\mu\text{m}$) 在 20~240 $^\circ\text{C}$ 区间内不同温度对应的参量光波长调谐曲线,如图 8 所示.控制晶体温度,可以实现高精度波长连续调谐,但可以看出温度调谐的范

围有限,且在实际操作中温度变化缓慢需要一定的时间,对调谐效率产生影响.

实验使用的极化晶体为多通道 MgO:PPLN 晶体,可以通过横向移动晶体来调节入射光经过晶体极化的周期通道位置实现波长调谐.以 Nd:YVO₄~1 064 nm 激光作为泵浦光源,MgO:PPLN 晶体的极化周期在 28~32 μm 范围内,当晶体工作温度分别在 25、50、100、150 和 200℃ 时模拟得到参量光波长调谐曲线,如图 9 所示.

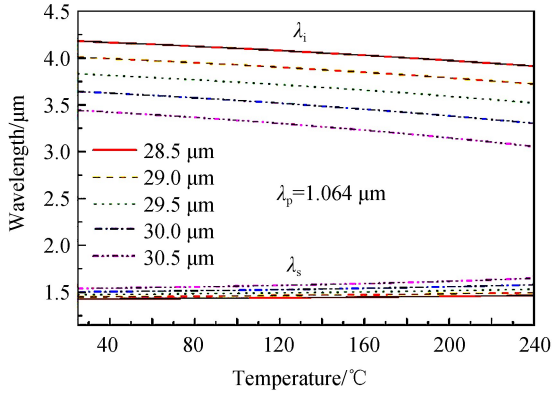


图 8 MgO:PPLN 晶体温度调谐曲线
Fig.8 Temperature tuning curve of PPMgLN crystal

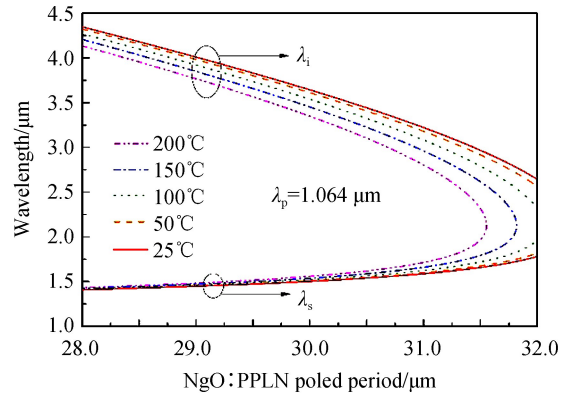


图 9 MgO:PPLN 晶体的极化周期调谐曲线
Fig.9 Polarization periodic tuning curve of MgO:PPLN crystal

模拟结果显示,利用晶体的极化周期调谐可以实现较宽的波长调谐范围,在 28~32 μm 极化周期范围内调谐宽度可接近 2 μm,但是对于多周期 MgO:PPLN 晶体,其极化周期是跳跃的,波长调谐呈阶跃性,为了实现宽范围的连续波长调谐输出,采用温度和周期调谐相结合的方式可以弥补各自的缺点,获得连续宽调谐激光输出.

4 实验结果

实验中增大泵浦功率至 OPO 参量光阈值,通过分别改变非线性晶体的极化周期、温控炉温度以及两种方法相结合,来实现光谱的长波、宽范围调谐,研究光参量振荡器的调谐特性和输出特性.

4.1 IOPO 周期调谐实验

实验中,调整基频光入射到晶体中的位置来改变晶体工作的极化周期,取 MgO:PPLN 晶体工作较为稳定的 $T=60^{\circ}\text{C}$ 的温度进行实验.采用 ARC 傅里叶光谱仪对 28.5~31.5 μm 范围内不同极化周期下中红外激光谱进行测试.将实验测量的结果与模拟调谐曲线值进行对比,如图 10 所示.调谐范围从 2.89 μm~4.145 μm 宽度达 1.255 μm.光谱仪测得最高波长为 4.145 μm 光谱图如图 11 所示.

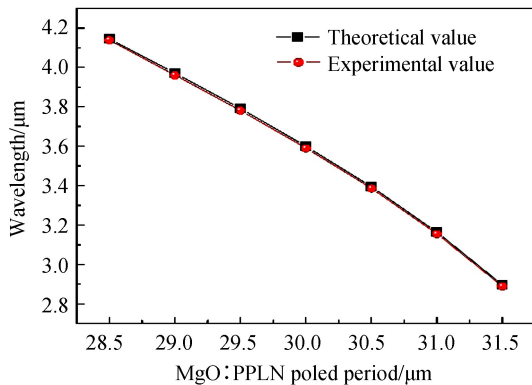


图 10 60℃ 时,闲频光输出波长随周期变化曲线
Fig.10 The output wavelength of parametric light versus periodic variation at 60℃

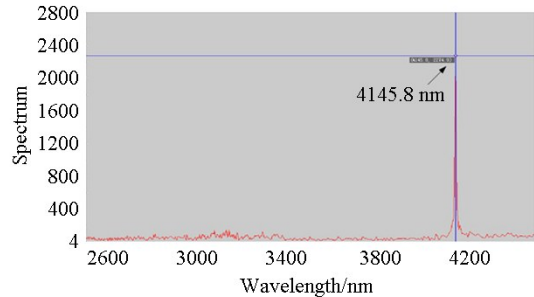


图 11 60℃, $\Delta=28.46 \mu\text{m}$, $\lambda=4145.8 \text{ nm}$ 时的光谱图
Fig.11 Spectrum at 60℃, $\Delta=28.46 \mu\text{m}$, $\lambda=4145.8 \text{ nm}$

实验发现,实验与理论计算结果高度吻合,但由于晶体极化周期为阶跃式变化,实际中并不能连续调谐参量光输出波长,而温度调谐的方式可以实现对参量光波长的连续高精度调控,所以进一步开展 MgO:

PPLN 晶体在不同工作温度下的波长调谐实验.

4.2 IOPO 温度调谐实验

在晶体各周期下调节温控炉温度,其他实验条件相同,分别在不同周期下选取 20~200℃ 之间不同温度点进行输出波长测试.使用傅里叶光谱仪测得中红外光谱如图 12 所示,图中曲线表示第 3 部分温度调谐理论模拟值,圆点表示不同温度下的实验值,可以看出理论值与实验值基本重合,证明通过控制温控器可实现 2.78~4.18 μm 波段全覆盖连续宽调谐,调谐范围较宽达到 1.399 μm.此过程中,理论值略高于实验测量值,且温度越高、周期越长越明显.分析其原因,在温度调谐过程中,伴随温度的不断上升导致 MgO:PPLN 晶体的热膨胀效应逐渐加重,同时,高功率泵浦入射到晶体中的基频光发散角的变化也会使得基频光在 MgO:PPLN 晶体中的光束轨迹发生改变,进而影响了极化周期长度的绝对值,这两方面因素导致实际调谐波长与理论值有一定偏差,尤其在高温区和较长极化周期条件下更为明显.

4.3 IOPO 参量光输出实验

结合两种调谐方法,对本文所重点研究的 3.2~4.1 μm 波段中红外激光进行实验研究,并达到良好实验效果.实验中具体可达到 2.78~4.18 μm 宽调谐,调谐范围达到 1.399 μm.均匀选取调谐范围内四个波长 ($\lambda=3.2 \mu\text{m}$ 、 $3.5 \mu\text{m}$ 、 $3.8 \mu\text{m}$ 及 $4.1 \mu\text{m}$) 参量光,利用傅里叶红外光谱仪对中红外激光的输出频谱进行测量,得到 OPO 的闲频光输出频谱如图 13 所示,从图中可看出,除闲频光的波峰之外没有其他的波峰产生.测量各个波长输出功率,计算转换效率,如图 14 和图 15.

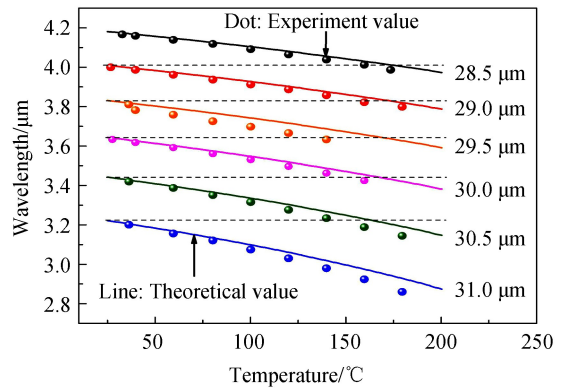


图 12 各周期下 OPO 温度调谐曲线

Fig.12 Temperature tuning curve of OPO under each polarization period

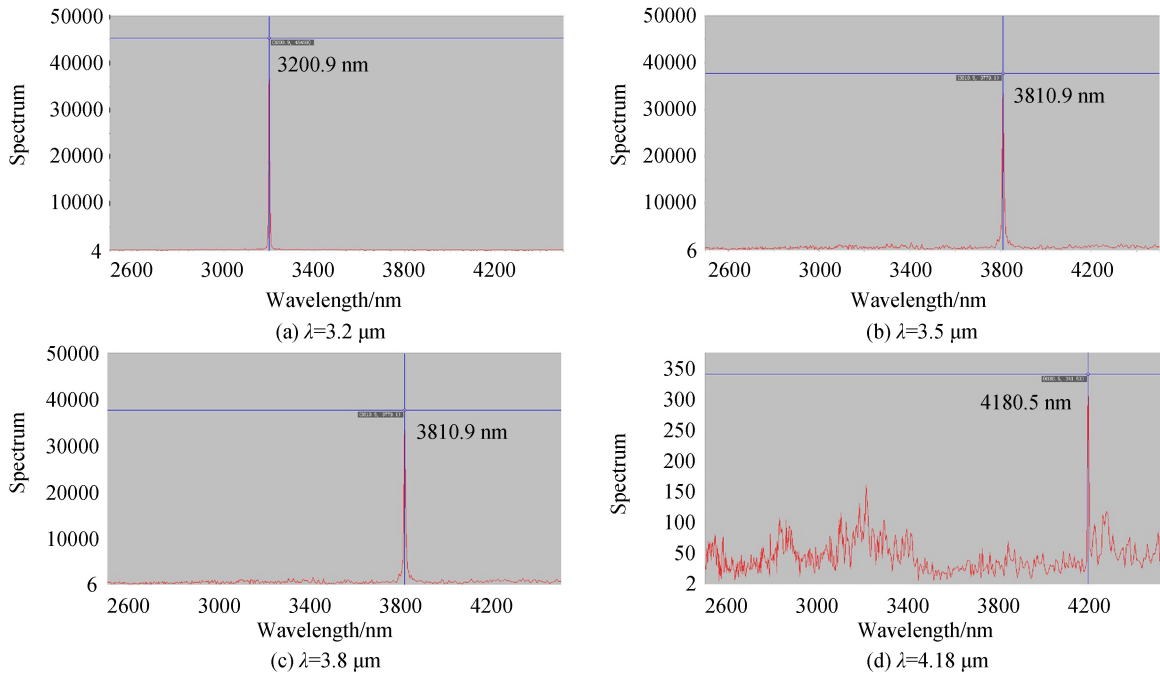


图 13 中红外激光光谱

Fig.13 Mid-infrared laser spectrum

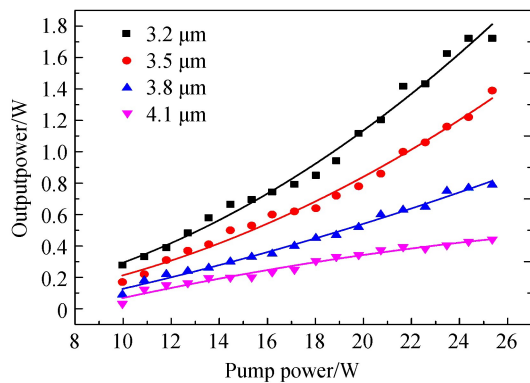


图 14 参量光输出功率随泵浦功率变化

Fig.14 Parametric optical output power versus pump power

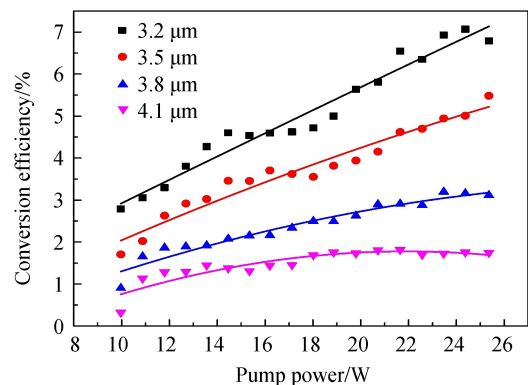


图 15 参量光转换效率随泵浦功率变化

Fig.15 Parametric light conversion efficiency versus pump power

实验可知,各波长参量光输出功率及转换效率随泵浦功率的增加而呈上升趋势,稳定输出波长范围宽广.在相同泵浦功率下,3.2~3.5 μm 输出功率及转换效率明显大于 3.8~4.1 μm 长波范围的对应值,在泵浦功率 24 W、 $\Lambda=31 \mu\text{m}$ 、 $T=34^\circ\text{C}$ 时,获得最大功率为 1.72 W 的 3.2 μm 中红外激光和功率为 0.442 W 的 4.18 μm 长波中红外激光输出,转化效率分别为 7.17% 和 1.84%,且在此区间内波长越长输出功率及转换效率越小.这是由于在波长超过 3.8 μm 后 MgO:PPLN 晶体的本征吸收的吸收率急剧增加,晶体的透过率降低,从能量的角度出发,每个能量为 $E_p=h\nu_p$ 的泵浦光子在 OPO 过程中变成一个信号光频率的光子 $E_s=h\nu_s$ 和一个闲频光频率的光子 $E_i=h\nu_i$,根据门雷-罗威关系,OPO 过程需满足能量守恒定律,即 $\frac{1}{\lambda_p}=\frac{1}{\lambda_s}+\frac{1}{\lambda_i}$. 并且,输出闲频光波长越长量子跃迁的亏损越大,导致闲频光输出功率随波长增大而有所下降.

5 结论

基于能够实现波长调谐的多周期 MgO:PPLN 晶体,采用连续泵浦内腔谐振的方式,实现了中红外参量光连续稳定输出,波长调谐范围宽广,覆盖 3.8~4.1 μm 这一重要波段.在宽调谐范围控制下,通过优化设计基频光谐振腔与光参量振荡腔折叠型复合结构,保障了宽范围调谐下的模式匹配,在此基础上,根据光参量振荡器的波长调谐理论,实验研究了 MgO:PPLN 晶体温度、极化周期对中红外参量光输出波长的影响,进一步提高参量光调谐范围,完成了 2.78~4.18 μm ,跨度 1.399 μm 的宽调谐参量光输出.在 3.2 μm 、3.5 μm 、3.8 μm 和 4.1 μm 四个典型波长下实现参量光的输出,功率分别为 1.72 W、1.39 W、0.79 W 和 0.442 W 对应转化效率为 7.17%、5.4%、3.1% 和 1.84%.实验结果表明,合理调控极化晶体的温度和周期,可以对中红外激光输出波长进行控制和宽范围调谐,对军事及民用领域都具有深远的应用价值.为进一步提高 3.8~4.1 μm 波段输出功率和转换效率,在未来工作中针对降低热效应和抑制逆转换进行研究,以满足更多应用需求.

参考文献

- [1] WANG Zi-jian, YU Yong-ji, ZHAI Rui-zhi, et al. A 100 kHz narrow-pulse-width mid-infrared optical parametric oscillator based on PPMgLN crystal[J]. *Russian Laser Research*, 2016, **37**(1): 97-101.
- [2] HAN Long, YUAN Li-gang, CHEN Guo, et al. 26 W mid-infrared solid-state laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(3): 29-34.
韩隆, 苑利钢, 陈国, 等. 26 W 中波红外固体激光器[J]. *中国激光*, 2015, **42**(3): 29-34.
- [3] 任钢, 中红外光参量振荡器及其应用技术的研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [4] TAN Gai-juan, XIE Ji-jiang, ZHANG Lai-ming, et al. Progress of mid-infrared solid-state laser[J]. *Chinise Optical*, 2013, **6**(4): 501-512.
谭改娟, 谢冀江, 张来明, 等. 中波红外激光技术最新进展[J]. *中国光学* 2013, **6**(4): 501-512.
- [5] LIU Jun, TANG Ping-hua, CHEN Yu, et al. Highly efficient tunable mid-infrared optical parametric oscillator pumped by a wavelength locked, Q-switched Er:YAG laser[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(16): 20812-20819.
- [6] DING Xin, ZHANG Shao-min, MA Hong-mei, et al. Continuous-wave mid-infrared intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate[J]. *Chinese Physics B*, 2008, **17**(01): 211-216.
- [7] BANDYOPADHYAY N, BAI Y, GOKDEN B, et al. Watt level performance of quantum cascade laser in room temperature continuous wave operation at 3.76 μm [J]. *Applied Physics Letter*, 2010, **97**: 131117 1-3.

- [8] GOKDEN B, BAI Y, BANDYOPADHYAY N, *et al.* Broad area photonic crystal distributed feedback quantum cascade lasers emitting 34 W at 4.36 μm [J]. *Physics Letters*, 2010, **97**: 131112 1-3.
- [9] ESPEN L, HELGE F, GUNNAR A, *et al.* A 22-watt mid-infrared optical parametric oscillator with V-shaped 3-mirror ring resonator[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(25): 26475-26483.
- [10] SHENG Quan, DING Xin, SHANG Ce, *et al.* Continuous-wave intra-cavity singly resonant optical parametric oscillator with resonant wave output coupling[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(25): 27953-27958.
- [11] VINCENT K, DAVID J, JEROME D, *et al.* Widely tunable optical parametric oscillator in a 5 mm thick 5% MgO:PPLN partial cylinder[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(6): 860-862.
- [12] TAO C, KAIHUA W, PEIREI J, *et al.* High-power multichannel PPMgLN-based optical parametric oscillator pumped by a master oscillation power amplification-structured Q-switched fiber laser[J]. *Applied Physics*, 2012, **51**(28): 6881-6885.
- [13] YU Yong-ji, CHEN Xin-yu, WANG Chao, *et al.* Experimental study of multiple optical parametric oscillator based on MgO:APLN and its evolution analysis of back conversion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(4): 151-157.
于永吉, 陈薪羽, 王超, 等. 基于 MgO:APLN 的多光参量振荡器实验研究及其逆转换过程演化分析[J]. 物理学报, 2015, **64**(4):151-157.
- [14] ESPEN L, HELGE F, GUNNAR A, *et al.* A 22-watt mid-infrared optical parametric oscillator with V-shaped 3-mirror ring resonator[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(25): 31-35.
- [15] STOTHARD D J M, EBRAHIMZADEH M, DUNN M H. Low-pump-threshold continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(24): 1895-1897
- [16] DING Xin, SHANG Ce, SHENG Quan, *et al.* Continuous-wave tunable intra-cavity single resonance optical parametric oscillator under 880nm in-band pumping and the inverse conversion[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(06): 82-87.
丁欣, 尚策, 盛泉, 等. 880nm 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**(06):82-87.
- [17] SU Hui, LI Zhi-ping, DUAN Yan-min, *et al.* Intra-cavity singly resonant optical parametric oscillator based on magnesium-doped periodically poled lithium niobate[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(6): 1404-1409.
苏辉, 李志平, 段延敏, 等. 基于掺镁周期极化铌酸锂晶体的内腔单共振连续可调谐光学参量振荡器[J]. 光学精密工程, 2013, **21**(6):1404-1409.
- [18] GENG Ai-cong, ZHAO Ci, BO Yong, *et al.* A method for measuring thermal focal length of LD-side-pumped laser crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(11): 6987-6991.
耿爱丛, 赵慈, 薄勇, 等. 一种测量二极管侧面抽运固体激光器热焦距的方法[J]. 物理学报, 2008, **57**(11):6987-6991.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No.61505013), Jilin Provincial Science and Technology Hall Natural Fund (No.20160101331JC), Jilin Provincial Science and Technology Department Personnel Team (No.20170519007JH), Jilin Science and Technology Hall Youth Fund (No. 20150520103JH), Jilin Science and Technology Department Key Technology Research (No. 20170204046GX)

引用格式: XING Shuang, YU Yong-ji, WANG Yu-heng, *et al.* Wide Tunable Continuous-wave Mid Infrared Intra-cavity Optical Parametric Oscillator Based on Multi-period MgO:PPLN[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6):0619002

邢爽,于永吉,王宇恒,等.基于多周期 MgO:PPLN 的内腔宽调谐连续中红外光参量振荡器[J].光子学报,2018,**47**(6):0619002