

doi:10.3788/gzxb20164509.0914003

# 基于 MgO : PPLN 晶体差频产生的宽调谐 中红外连续激光光源

张泽宇<sup>1,3</sup>, 朱国申<sup>2</sup>, 汪伟<sup>1,3</sup>, 段弢<sup>1</sup>, 杨松<sup>2</sup>, 郝强<sup>2</sup>, 韩彪<sup>1,3</sup>, 谢小平<sup>1</sup>, 曾和平<sup>2</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 教育部光学仪器与系统工程研究中心  
上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 分别以 1 083 nm 和 1 550 nm 波段的窄线宽连续光源为泵浦光和信号光, 搭建基于掺 MgO 周期铌酸锂晶体(MgO : PPLN)准相位匹配原理的差频非线性效应产生中红外激光实验系统. 根据系统温度和信号光波长调谐特性进行实验研究. 在泵浦光波长固定条件下改变信号光波长, 实现了窄线宽宽调谐中红外连续闲频激光输出, 波长覆盖范围为 3 547.6~3 629.1 nm. 当波长为 1 082.8 nm 的泵浦光和波长为 1 549.7 nm 的信号光功率分别放大到 2.8 W 和 3.5 W 时, 对波长为 3 597.0 nm 的中红外闲频光输出进行长时间功率扫描监测, 得到最大功率为 3.2 mW, 功率抖动引起不稳定性小于±1.6%的高稳定的中红外窄线宽激光输出. 该研究结果可为设计和研制多波长窄线宽中红外光源提供参考.

**关键词:** 非线性光学; 宽调谐中红外; 差频产生; 准相位匹配原理; 周期性极化晶体

中图分类号: O437

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)09-0914003-6

## Difference Frequency Generation Wildly Tunable Continuous Wave Mid-infrared Radiation Laser Source Based on a MgO : PPLN Crystal

ZHANG Ze-yu<sup>1,3</sup>, ZHU Guo-shen<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>1,3</sup>, DUAN Tao<sup>1</sup>,

YANG Song<sup>2</sup>, HAO Qiang<sup>2</sup>, HAN Biao<sup>1,3</sup>, XIE Xiao-ping<sup>1</sup>, ZENG He-ping<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Shanghai for Science and Technology, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, Engineering Research Center of Optical Instrument and System (Ministry of Education), Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Shanghai 200093, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China)

**Abstract:** The continuous-wave Mid-Infrared Radiation (Mid-IR) was experimentally obtained by difference frequency quasi-phase-matching in a MgO-doped periodically poled LiNbO<sub>3</sub> crystal (MgO : PPLN), which the narrow linewidth light sources with 1 083 nm and 1 550 nm were used as pump light and signal light, respectively. Moreover, the multiple mid-IR wavelengths were realized by adjusting the signal wavelength and using the temperature controlling on a MgO : PPLN. The wavelength tuning region is around 3 547.6 nm to 3 629.1 nm. A maximum mid-infrared radiation power of 3.2 mW at 3 597.0 nm is generated when the optical power of signal and pump lights are amplified to 3.5 W and 2.8 W respectively. The power jitter of mid-infrared output is less than ±1.6% after along time test

**基金项目:** 国家自然科学基金(No. 61231012)和中国科学院创新基金(Nos. CXJJ-15Q064, CXJJ-14-M09)资助

**第一作者:** 张泽宇(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空间光通信传输与处理. Email: zhangzeyu@opt.ac.cn

**导 师:** 谢小平(1976-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为超高速光子网络与空间激光通信技术. Email: xxp@opt.ac.cn

**通讯作者:** 段弢(1980-), 女, 副研究员, 博士, 主要研究方向为非线性光学及激光通信技术. Email: duantao@opt.ac.cn

**收稿日期:** 2016-03-28; **录用日期:** 2016-05-13

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

recording. This study can be used as a reference for the design and development of narrow line width multi-wavelength continuous-wave infrared light source.

**Key words:** Nonlinear optics; Wildly tunable infrared laser; Difference frequency generation; Quasi-phase-matching; Periodically poled crystal

**OCIS Codes:** 140.3070; 190.0190; 190.7070; 160.3730

## 0 引言

3~5  $\mu\text{m}$  中红外波段是大气的一个传输“窗口”，该波段窄线宽激光对大雾、烟尘等具有较强的穿透力，在大气污染探测、激光遥感、自由空间光通信和精密光谱测量等领域具有广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。对于自由空间光通信而言，3.8  $\mu\text{m}$  附近的中红外波段的激光和1.55  $\mu\text{m}$  波段激光都是大气窗口，具有较低的大气吸收，但是由于3.8  $\mu\text{m}$  波段的激光具有低的大气散射和强的抗大气湍流能力，因而更适合自由空间光通信<sup>[5-6]</sup>，是国内外激光领域研究热点之一。

基于不同激光产生机理出现的多种中红外光源如量子级联激光器、铅盐激光器、色心激光器、离子掺杂光纤激光器以及参量振荡器等<sup>[7-10]</sup>在现阶段存在如需低温制冷、激光线宽宽、无跳模运转范围小、价格昂贵等问题，在实际应用中具有一定的局限性。另一方面，基于非线性光学材料(Quasi Phase Matching, QPM)技术的中红外差频产生(Difference Frequency Generation, DFG)激光光源<sup>[11-14]</sup>，具有结构简单、调谐方便、室温运转和无阈值限制、输出光束质量好、波长可达3.8  $\mu\text{m}$ 最佳大气窗口等优良特性，受到了广泛关注，已成为当前气体光谱检测应用和自由空间光通信的主流光源。

对于非线性光学差频晶体，掺 MgO 周期性铌酸锂晶体(Periodically Poled Lithium Niobate, PPLN)具有非线性系数高、抗损伤阈值高、通光光谱范围宽、尺寸大、均匀性好的特点，是实现中红外光学差频转换的理想非线性材料。对连续输出的中红外激光开展了大量的理论实验研究，但对基于块状 PPLN 晶体的 DFG/QPM 中红外光源，由于光斑尺寸与晶体长度之间存在制约，使得 DFG 的转换效率仍然较低(一般不高于0.2%/W)，直接 DFG 转换中红外激光的输出功率通常低于毫瓦量级<sup>[15]</sup>，难以满足高灵敏度检测或自由空间光通信的需求。

本文基于光功率放大的1 083 nm 和1 550 nm 两个波段光源组合，采用 MgO:PPLN 晶体 DFG 中红外激光闲频系统，根据 QPM 的激光系统的理论，分析了温度和信号光波长匹配关系及中红外闲频光转换效率影响因素，建立了基于 MgO:PPLN 晶体 QPM 原理的宽调谐 DFG 中红外激光实验系统，根据系统温度和信号光波长调谐特性进行实验研究，在固定泵浦光波长1 082.8 nm 条件下通过改变信号光波长，实现了宽

调谐窄线宽中红外连续闲频激光输出，为设计和研制宽调谐窄线宽中红外光源提供参考。

## 1 理论模型

由高频的泵浦光和低频的信号光混频产生差频光，差频是光场在非线性晶体中发生的三波混频二阶非线性频率下转换过程。假定光波沿  $z$  方向传播，从麦克斯韦方程组三波混频电场方程出发，当共线光束在非线性周期结构的 PPLN 晶体中传播时，通过非线性极化率，每个波耦合到其它两个波，平面波介质中的三波相互作用谐波分量的耦合波方程<sup>[16]</sup>为

$$\begin{cases} \frac{dE(\omega_1, z)}{dz} = \frac{i\omega_1 d_Q}{n_1 c} E(\omega_3, z) E^*(\omega_2, z) e^{i\Delta k z} \\ \frac{dE(\omega_2, z)}{dz} = \frac{i\omega_2 d_Q}{n_2 c} E(\omega_3, z) E^*(\omega_1, z) e^{i\Delta k z} \\ \frac{dE(\omega_3, z)}{dz} = \frac{i\omega_3 d_Q}{n_3 c} E(\omega_1, z) E(\omega_2, z) e^{-i\Delta k z} \end{cases} \quad (1)$$

式中， $d_Q = \frac{2}{m\pi} d_{\text{eff}}$  为有效非线性系数， $d_{\text{eff}}$  表示 QPM 中实际利用的晶体非线性系数。 $m(=1, 3, 5, \dots)$  为 QPM 的阶数，即在晶体中每隔奇数倍的相干长度极性反转一次， $\Delta k$  为三波在传播过程中的波矢相位失配， $\omega_i (i=1, 2, 3)$  分别代表泵浦光、信号光、闲频光的频率， $n_i (i=1, 2, 3)$  分别代表泵浦光、信号光、闲频光的折射率， $c$  代表光在真空中速率。

在稳态小信号近似情况下，在三波混频过程中，近似认为高频泵浦光和低频信号光的光波场强不发生改变，在三波相互作用过程中视为常量，高斯光束近似下，闲频光功率表示为<sup>[17]</sup>

$$P_i = \frac{4\omega_1^2 k_2 d_Q^2 L}{\epsilon_0 \pi c^3 n_1 n_2 n_3 (1 + \mu)} \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot h(\mu, \xi) \cdot \text{sinc}^2(\Delta k L / 2) \quad (2)$$

式中， $L$  为三波在晶体中的作用长度， $h(\mu, \xi)$  为聚焦参量，描述了光束的耦合效率<sup>[16, 18]</sup>，表示聚焦后光束焦斑大小和有效作用长度对转换后的闲频光功率的影响， $\mu$  为入射波矢量的比， $\xi$  是有效作用长度与入射光束共焦参量的比。由式(2)可以看到，闲频光转换效率正比于晶体的有效非线性系数的平方，三波作用晶体有效长度，泵浦光功率和信号光功率乘积，以及 sinc 函数因子的平方。

由式(2)可知，采用长的非线性晶体，高的泵浦光和信号光功率，较大的聚焦参量可获得高的非线性频率功率。选取较长的非线性晶体，在激光功率不超过非

线性晶体损伤阈值情况下尽可能高的输入获得较高的空闲激光输出. 聚焦参量表明如果泵浦激光和信号激光经透镜聚焦后光斑尺寸相差太大,就不能充分进行非线性转换. 泵浦激光和信号激光聚焦光斑的相互匹配即聚焦参量的好坏对转换效率具有重要影响.

另一方面,利用周期极化晶体实现 QPM,需要对晶体的自发极化方向进行周期性调制,在有效非线性系数中引入一个空间调制函数,即在晶体中每隔奇数倍的相干长度极性反转一次. QPM 条件下相位失配为

$$\Delta k = k_1 + k_2 - k_3 - k_m \quad (3)$$

式中,  $k_i = \frac{2\pi n_i}{\lambda_i}$  ( $i=1,2,3$ ) 分别为泵浦光、信号光、闲频光波矢量,  $\lambda_i$  ( $i=1,2,3$ ) 分别为泵浦光、信号光与空闲光在真空中的波长,  $k_m = \frac{2\pi m}{\Lambda}$  为周期性极化引入的附加相移,  $\Lambda$  为周期性反转畴的极化周期. QPM 的匹配极化反转周期为  $\Lambda = 2mL_c$ , 其中相干长度  $L_c =$

$$\frac{\pi}{k_3 - k_2 - k_1}.$$

由式(3)可知,在 DFG 激光工作时的相位匹配条件应满足  $\Delta k=0$ , 实际操作中只要固定入射抽运光波长  $\lambda_1$ , 通过改变铌酸锂晶体的温度  $T$ , 可以实现对变化的信号光波  $\lambda_2$  和对应的闲频光波  $\lambda_3$  调谐输出.

掺 MgO 周期极化铌酸锂具有高的抗损伤阈值能力, 高非线性系数, 是负单轴晶体, 属于  $e+e \sim e$  匹配关系, 透光范围为  $0.4 \sim 5 \mu\text{m}$ . 在 QPM 技术中通过选择合适的极化反转周期结合温度调谐改变晶体的折射率以优化相位匹配条件, 最佳匹配温度可以通过晶体折射率的塞耳迈耶尔方程来确定. 式(3)中, 折射率由 e 光折射率的塞耳迈耶尔方程表示为<sup>[19-20]</sup>

$$n_e^2 = a_1 + b_1 f + \frac{a_2 + b_2 f}{\lambda^2 - (a_3 + b_3 f)^2} + \frac{a_4 + b_4 f}{\lambda^2 - a_5} + a_6 \lambda^2 \quad (4)$$

式中  $f = (T - 24.5)(T + 570.82)$ ,  $T$  为晶体温度, 单位为  $^\circ\text{C}$ ,  $\lambda$  为光波波长,  $a, b$  为折射率参量, 各参量具体取值见表 1, 其中, MgO 掺杂浓度为 5 mol% PPLN 晶体对应的 Sellmeier 方程中的系数值.

表 1 掺杂浓度为 5 mol% 铌酸锂晶体对应的 Sellmeier 方程参量

Table 1 Parameter of 5 mol% MgO-doped LiNbO<sub>3</sub> in Sellmeier equation

Refractive index	Parameter value
$a_1$	5.756
$a_2$	0.098 3
$a_3$	0.202 0
$a_4$	189.032
$a_5$	12.52
$a_6$	$1.32 \times 10^{-2}$
$b_1$	$2.860 \times 10^{-6}$
$b_2$	$4.700 \times 10^{-8}$
$b_3$	$6.311 \times 10^{-8}$
$b_4$	$1.516 \times 10^{-4}$

## 2 实验研究

采用 MgO:PPLN 晶体 QPM 原理的 DFG 中红外激光系统如图 1. 泵浦光为由单波长激光器产生的固定波长为 1 083 nm, 平均功率为 107 mW, 线宽小于 20 kHz 的窄线宽连续激光. 信号光为波长可调谐的激光器产生的中心波长为 1 550 nm、平均功率为 152 mW、线宽小于 1 kHz 的窄线宽连续激光, 分别进入掺镱光纤功率放大器及掺铒光纤功率放大器, 放大器均由 976 nm 半导体激光器提供泵浦能量, 通过调节 976 nm 半导体激光器的输出功率控制放大后 1 550 nm 信号光和 1 083 nm 泵浦光获得低噪声和高输出功率. 实验中泵浦激光和信号激光都各自经光隔离器 (Isolator, ISO) 防止回光对激光器的损伤以保护激光器, 光纤型偏振控制器 (Polarization Controller, PC) 控制其偏振态, 将光束偏振方向控制到与光轴方向平行, 以满足在非线性晶体内 e 型相位匹配关系. 放大的 1 083 nm 泵浦光和 1 550 nm 信号光经宽带 1 080/1 550 nm 高功率阈值波分复用器 (Wavelength Division Multiplexer, WDM) 实现合束共轴传输, 共轴

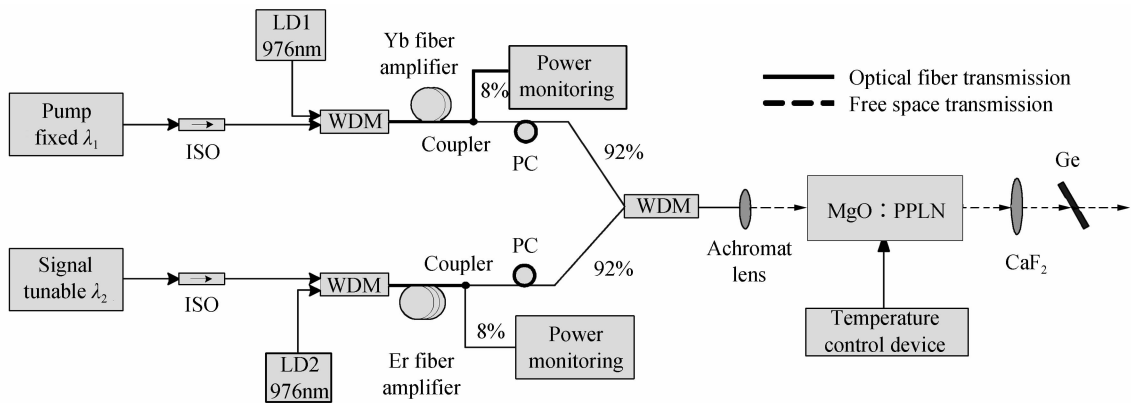


图 1 差频非线性效应中红外激光系统原理  
Fig. 1 Schematic of DFG-based MIR

的信号光和泵浦光再通过聚焦耦合系统(CFC-5X-C, thorlabs)耦合进入 MgO:PPLN 晶体进行非线性变换,聚焦耦合系统由焦距 4.6 mm,焦点位置可调的带尾纤无色散透镜(Achromat Lens)构成,实现聚焦后的泵浦激光和信号激光在非线性晶体中的焦点位置精确控制,优化泵浦激光和信号激光聚焦光斑的相互匹配即式(2)中的聚焦参量,保证 DFG 中红外闲频光最佳的转换效率。

非线性 MgO:PPLN 晶体(PPMCLN 5 mol% Bulk, HCP)几何尺寸为 50 mm×1.5 mm×1 mm,极化周期为 30.41  $\mu\text{m}$ ,通光面对输入和输出三波段增透镀膜。晶体放置在温控炉内,温控炉温度调节范围为 20 $^{\circ}\text{C}$ ~200 $^{\circ}\text{C}$ 、温度控制准确度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。温控炉置于五维精密调整平台上,以便于晶体位置调节。产生的中红外闲频光由焦距 100 mm 的 GaF2 透镜准直输出,经截至波长为 2500 nm 的长通滤波器(Ge 镜)滤除剩余泵浦光和信号光,至功率计和中红外光谱仪进行功率检测和光谱测量。

### 3 结果分析

中心波长为 1 082.8 nm 的泵浦光和中心波长为 1 549.7 nm 的信号光,功率分别放大到 2.8 W 和 3.5 W。将设定晶体最佳温度为 52.7 $^{\circ}\text{C}$ ,调节 PC 优化泵浦光和信号光的偏振态方向,同时调节过聚焦耦合系统优化聚焦后的信号光和泵浦光在非线性晶体中的焦点大小及位置,利用图 1 所示的 DFG 中红外光源系统获得中红外闲频激光最佳输出。

通过光谱分析仪(OSA205, Thorlabs)的检测端测量放大前、放大后的窄线宽输入的泵浦光、信号激光光源光谱。该光谱仪可测波长范围为 1.0~5.6  $\mu\text{m}$ ,光谱分辨率为 0.25  $\text{cm}^{-1}$ 。通过图(1)1×2(8:92)光耦合器的 8%一端作为检测端,实时检测放大后的信号光和泵浦光的功率、光谱。从图 2(a)中可见,中心波长为 1 082.8 nm 的泵浦光束放大后的线宽没有较大的变化,图 2(b)中,中心波长为 1 549.7 nm 的信号光功率放

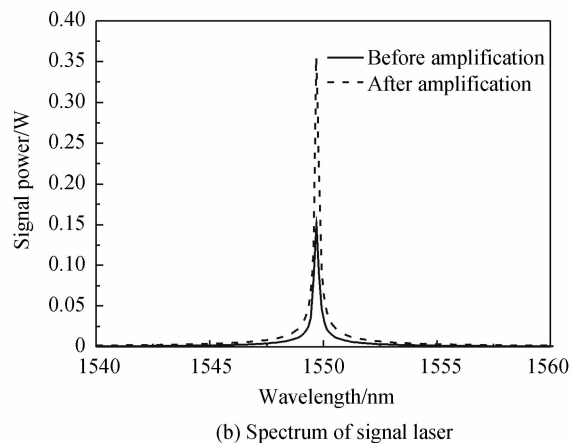
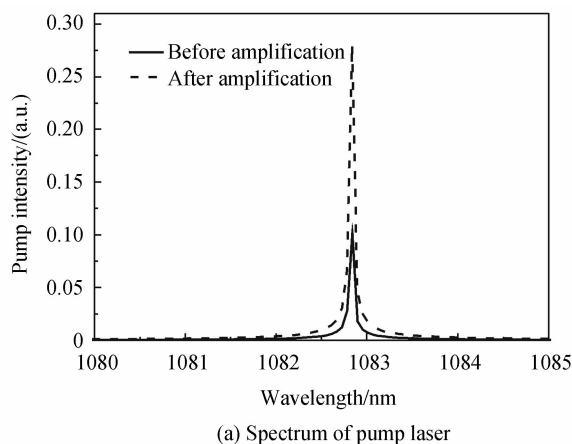


图 2 放大前、放大后的窄线宽泵浦光和信号激光光源光谱  
Fig. 2 Spectrum of narrow linewidth pump and signal laser source before and after amplification

大后光谱相对于放大前无明显展宽,输入端信号光与泵浦光的窄线宽保证了高效稳定的 DFG 过程,最终得到高质量的窄线宽中红外闲频激光输出。

QPM 技术中,为满足相位匹配条件,通过调谐非线性晶体温度改变晶体的折射率。最佳匹配温度由相位失配式(3)和晶体折射率式(4)确定。图 3 为固定输入信号光、泵浦光波长时,理论计算和实验测量的中红外闲频光输出归一化转换效率随非线性晶体控制温度时的相对变化曲线。实线是根据式(2)计算的理论结果,点实线是扫描温度变化量为 0.1 $^{\circ}\text{C}$ ,高灵敏度中红外功率计(S401C, Thorlabs)实时记录测量的实际匹配温度点。实验测量与理论计算结果曲线分布趋势基本一致,但是最佳温度理论值为 56.6 $^{\circ}\text{C}$ ,实验测量值为 52.7 $^{\circ}\text{C}$ ,整体相差约 4 $^{\circ}\text{C}$ ,这是由于理论计算时选取的表 1 中的塞耳迈耶尔方程系数与实际的非线性晶体存在一定偏差。根据实验测量值,晶体控制温度为 52.7 $^{\circ}\text{C}$ 时满足相位匹配,DFG 中红外闲频激光转换效率最高。

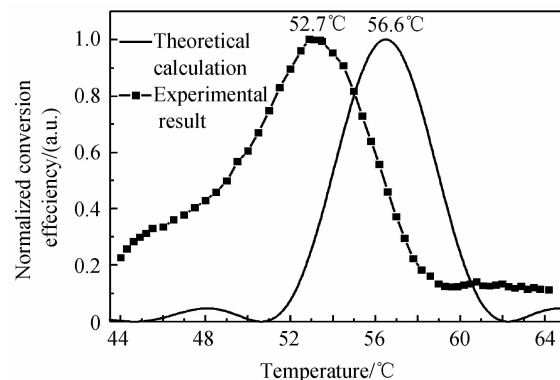


图 3 中红外闲频光输出归一化转换效率随 MgO:PPLN 晶体温度的相对变化

Fig. 3 Relative normalized conversion efficiency of generated idler MIR laser versus temperature of the MgO:PPLN

此外,实验研究了中红外闲频光的宽调谐输出.固定泵浦光中心波长为 1 082.8 nm,通过手动调整信号光的输出波长和 MgO:PPLN 晶体的控制温度,实现输出闲频光波长的调谐输出.图 4(a)中,当信号光波长分别为 1 543.4 nm、1 544.9 nm、1 546.5 nm、1 548.1 nm、1 549.7 nm、1 553.0 nm、1 556.2 nm、1 557.7 nm 时,通过晶体的温度扫描来测试最佳 QPM 值,实验结果表明当晶体的控制温度分别为 34.4℃、40.8℃、47.6℃、51.1℃、52.7℃、59℃、69.7℃、79.1℃ 时,输出的中红外闲频光中心波长分别为 3 629.1 nm、3 620.5 nm、3 611.7 nm、3 602.7 nm、3 597.0 nm、3 576.9 nm、3 559.8 nm、3 547.6 nm,功率计测量最大输出功率约 3.2 mW@3597 nm.从图 4(b)可以看到,受放大后信号光功率以及波长变换对信号在非线性晶体中焦点大小、位置等因素的影响系统输出的各波长中红功率存在一定的差异,最小的输出光功率为 1.9 mW@3 620.07 nm.从各波长的 DFG 中红外闲频光光谱图中看出光束的线宽无明显展宽,保持在窄线宽的水平.

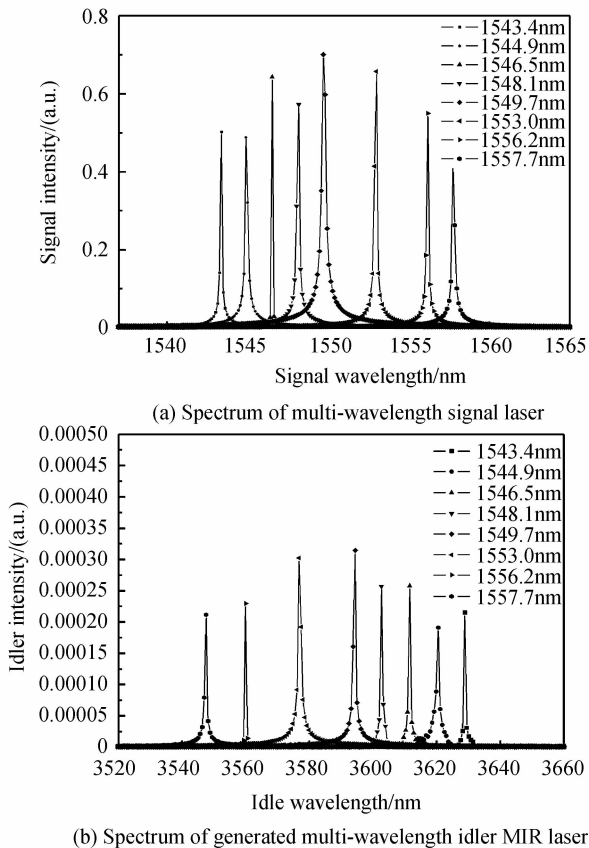


图 4 信号光波长的光谱及对应的中红外闲频光光谱  
Fig. 4 Spectrum of idler MIR laser versus spectrum of signal laser

测试了中红外激光输出功率的稳定度.放大后中心波长为 1 549.7 nm 的信号光功率为 3.5 W,中心波长为 1 082.8 nm 的泵浦光功率为 2.8 W,晶体的控制温度为 52.7℃ 时,输出 3 597.0 nm 中红外光功率约为

3.15 mW.通过高灵敏度中红外功率计连续 60 min 记录输出功率值,如图 5.中红外闲频光的输出最大功率为 3.20 mW,最小功率为 3.09 mW,平均功率为 3.15 mW,功率抖动引起的不稳定性小于 2.8%.

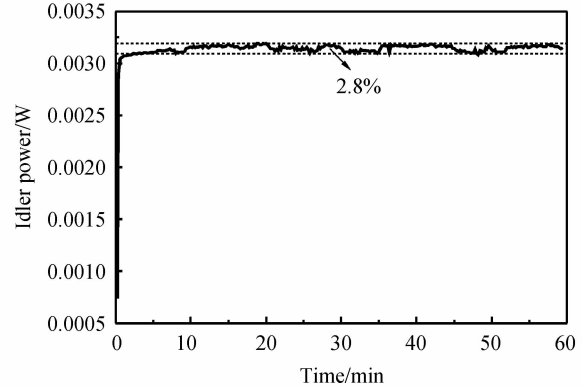


图 5 中红外激光输出功率随时间的稳定度测量  
Fig. 5 Power stability of generated multi-wavelength idler MIR laser versus time

## 4 结论

本文基于光功率放大的 1 083 nm 和 1 550 nm 两个波段光源组合,采用 MgO:PPLN 晶体 QPM 原理的 DFG 中红外激光闲频系统,根据 QPM 的激光系统理论,分析了 QPM 的温度和信号光波长匹配关系及中红外闲频光转换效率影响因素,搭建了基于 MgO:PPLN 晶体 QPM 原理的宽调谐 DFG 中红外激光实验系统.

根据系统温度和信号光波长调谐特性进行了实验研究,输出的中红外功率相对值随晶体温度变化的实验测量与理论计算结果曲线分布趋势基本一致.在固定泵浦光波长为 1 082.8 nm 条件下改变信号光波长,实现了宽调谐窄线宽中红外连续激光输出,输出波长范围为 3 547.6~3 629.1 nm.当输入波长为 1 082.8 nm,泵浦光和波长为 1 549.7 nm,信号光的功率分别放大到 2.8 W 和 3.5 W 时,对应 3 597.0 nm 波长的中红外闲频光输出进行了长时间功率扫描监测,得到的最大功率为 3.2 mW,功率抖动引起不稳定性小于 2.8% 的高稳定的中红外窄线宽激光输出.该研究结果可为设计和研制宽调谐窄线宽中红外光源提供参考.

## 参考文献

- [1] PETROV K, CURL R, TITTEL F. Compact laser difference-frequency spectrometer for multicomponent trace gas detection [J]. *Applied Physics B*, 1998, 66(5): 531-538.
  - [2] WANG Liu-san, CAO Zhen-song, WANG Huan, A widely tunable mid-infrared difference frequency generation laser and its detection of atmospheric water [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 188-193.
- 汪六三,曹振松,王欢.宽调谐中红外差频激光及大气水汽浓度探测[J].*光学学报*,2011,31(4):188-193.

- [3] CHEN Dong, ZHANG Bo-kun, HU Xie. Research on the high resolution trace gas detection based on the difference-frequency mid-infrared spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(6): 678-683.  
陈东,张伯昆,胡燮,等.基于差频中红外激光的痕量气体高分辨光谱检测研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(6): 678-683.
- [4] RICHTER D, WERT B, FRIED A, *et al.* High-precision CO<sub>2</sub> isotopologue spectrometer with a difference-frequency-generation laser source[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(2): 172-174.
- [5] MAHON R, BURRIS H, FERRARO M, *et al.* A comparative study of 3.6 $\mu$ m and 1.55 $\mu$ m atmospheric transmission[C]. SPIE, 2008, **6951**: 69510Q.
- [6] LUZHANSKY E, CHOA F, MERRITT S, *et al.* Mid-IR free-space optical communication with quantum cascade lasers [C]. SPIE, 2015, **9465**: 946512.
- [7] FRIED A, HENRY B, WERT B, *et al.* Laboratory, ground-based, and airborne tunable diode laser systems: performance characteristics and applications in atmospheric studies[J]. *Applied Physics B*, 1998, **67**(3): 317-330.
- [8] YU Y, ANTHONY J, CLAIRE F. Mid-infrared quantum cascade lasers[J]. *Nature Photonics*, 2012, **6**: 432-439.
- [9] FAIST J. Quantum cascade lasers[M]. Oxford University Press, 2013.
- [10] GAO Juan-juan, LI Xia, GAO Song, *et al.* High power mid-infrared supercontinuum generation in silica photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(2): 225-230.  
高娟娟,李夏,高松,等.石英光子晶体光纤中高功率中红外超连续谱的产生[J]. *发光学报*, 2015, **36**(2): 225-230.
- [11] MOMOSE T, WAKABAYASHI T, SHIDA T. Tunable-narrow linewidth continuous-wave mid-infrared light generation by difference frequency mixing[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1996, **13**(8): 1706-1712.
- [12] CHANG J, MAO Q, FENG S, *et al.* Widely tunable mid-IR difference-frequency generation based on fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**: 3486-3488.
- [13] KRZEMPEK K, SOBON G, ABRAMSKI K. DFG-based mid-IR generation using a compact dual-wavelength all-fiber amplifier for laser spectroscopy applications[J]. *Optics Express*, 2013, **21**: 20023.
- [14] JIANG Jian, CHANG Jian-Hua, FENG Su-Juan, *et al.* Mid-IR multiwavelength difference frequency generation laser source based on fiber lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(11): 7892-7898.  
蒋建,常建华,冯素娟,毛庆和,基于光纤激光器的中红外差频多波长激光产生[J]. *物理学报*, 2010, **59**(11): 7892-7898.
- [15] DENZER W, HANCOCK G, HUTCHINSON A, *et al.* Mid-infrared generation and spectroscopy with a PPLN ridge waveguide[J]. *Applied Physics B*, 2007, **86**(3): 437-442.
- [16] CHU T. Intracavity cw difference frequency generation by mixing three photons and using gaussian laser beams[J]. *Journal De Physique*, 1985, **46**(4): 523-533.
- [17] CORNELIA F, MARKUS W. Mid-IR Difference frequency generation[J]. *Topics Applied. Physics*, 2003, **89**: 97-143.
- [18] ZONDY J. The effects of focusing in type-I and type-II difference-frequency generations[J]. *Optics Communications*, 1998, **149**(s 1-3): 181-206.
- [19] GAY O, SACKS Z, GALUN E, *et al.* Temperature and wavelength dependent refractive index equations for mg-doped congruent and stoichiometric LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Applied Physics B*, 2008, **91**: 343-348.
- [20] JUNDT D. Temperature dependent sellmeier equation for the index of refraction, ne, in congruent lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 1997, **22**(20): 1553-1555.