

基于单谐振光参量振荡器产生 可调谐中红外双频激光的研究

李坤¹, 杨苏辉^{1,2}, 王欣^{1,*}, 李卓¹, 张金英¹

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081;

2. 精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081)

摘要:采用 1064 nm 双频连续激光泵浦基于周期极化铌酸锂晶体的单谐振光参量振荡器实现了双频中红外激光输出,通过调节晶体的温度和极化周期,实现了输出波长在 3~3.8 μm 范围可调谐. 双频中红外激光的拍频与泵浦光拍频相同,调谐范围为 125~175 MHz. 在泵浦光功率为 6.9 W,晶体极化周期 30 μm ,晶体温度 75 $^{\circ}\text{C}$ 时实现了 1.25 W 的双频中红外激光输出,泵浦光-闲频光的最高转换效率为 18.2%. 通过调节双频激光的功率比,可以改变输出中红外双频激光的调制深度.

关键词:激光;双频;中红外;光参量振荡器

中图分类号:0437 **文献标识码:**A

Tunable Mid-IR dual frequency laser based on a single-resonant optical parametric oscillator

LI Kun¹, YANG Su-Hui^{1,2}, WANG Xin^{1,*}, LI Zhuo¹, ZHANG Jin-Ying¹

(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronics Measurement Instrument and Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A Tunable Mid-IR dual frequency laser based on single-resonant optical parametric oscillator is presented. The mid-infrared wavelength tunability of 3~3.8 μm is achieved by adjusting the temperature and polarization period of MgO:PPLN crystal. When the pump power is 6.9 W and the temperature of the MgO:PPLN is 75 $^{\circ}\text{C}$, output power of 1.25 W is obtained. The highest optical-optical conversion efficiency of the idler light with respect to pump light is 18.2%. The beat note frequency is equal to the beat note frequency of the pump, which can be tuned from 125 to 175 MHz. The modulation index of the beat note of idle could be adjusted with different dual-frequency power ratio of pump.

Key words: laser, dual-frequency, mid-infrared, optical parametric oscillator

PACS: 42.55.-f,42.65.Yj,42.65.-k

引言

3~5 μm 中红外激光对烟雾、大气穿透力强,是大气传输窗口的波段,因此在红外激光制导、红外激光雷达、红外激光通信、激光定向红外干扰等军事领域具有重要的应用^[1-4]. 同时,3~5 μm 波段存在许多分子振动谱线,在光谱分析和环境质量监测领域

也具有重要的应用^[5-6]. 双频激光主要应用于相干探测领域,以双频激光的拍频信号为探测媒介,在保证高空间分辨率的同时具有更强的抗大气干扰能力^[7-9]. 因此,双频 3~5 μm 中红外激光是中红外相干激光雷达和差分吸收雷的重要激光源^[10-12].

目前双频激光器波长主要集中在近红外波段,双频 3~5 μm 中红外激光鲜有报道. 实现双频激光

收稿日期:2018-11-03,修回日期:2018-12-20

Received date: 2018-11-03, revised date: 2018-12-20

基金项目:国家自然科学基金(61741502,61835001,61875011,61205116)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61741502,61835001,61875011,61205116)

作者简介 (Biography): 李坤 (1992-),男,河南南阳人,博士研究生,主要研究领域为固体激光器、激光雷达. E-mail: likun0377@126.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: wangxin@bit.edu.cn

器的方法主要有塞曼效应^[13]、双折射效应^[14]、双轴双腔法^[15-17]、双纵模法^[18]、单频激光合成法^[19],但是很难直接产生双频中红外激光.光参量振荡器(OPO)转换效率高、光束质量好、结构简单、稳定性好,是实现中红外激光的主要方法^[20-21].2010年,山东大学J F Yang等人采用1.064 μm和1.3 μm同时泵浦基于KPA晶体的光参量振荡器,实现了1.9 μm和1.7 μm激光的输出^[22].2011年,浙江大学的Tao Chen等人通过泵浦非周期极化的级联铌酸锂晶体结构,由于光参量振荡及差频效应,实现了3.8 μm附近两个波长的输出^[23].本文采用单频激光器声光移频后与原单频激光合束的方式实现1064 nm双频激光,双频激光的频差由声光移频器控制.1064 nm双频激光经过光纤功率放大器实现高功率输出,通过泵浦基于MgO:PPLN晶体的信号光单谐振光参量振荡器,实现了双频中红外激光输出,波长在3~3.8 μm波段可调谐,双频频差在125~175 MHz连续可调,拍频稳定性可达到Hz量级,在相干探测领域具有较强的抗干扰能力.双频中红外激光的最大输出功率为1.25 W,泵浦光-闲频光最高转换效率18.2%.

1 双频光参量振荡理论分析

光学参量振荡的原理是在非线性频率变换过程中,每湮灭一个高频光子产生两个低频光子,在此过程中两个低频光获得增益.随着准相位匹配技术的发展,MgO:PPLN因具有大非线性系数和高损伤阈值等特性成为了最常用的中红外准相位匹配晶体,广泛应用于光参量振荡器中.基于周期极化晶体的光参量振荡器满足准相位匹配条件,泵浦光、信号光和闲频光在相互作用过程中同时需要满足能量守恒和动量守恒条件^[24].

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

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

其中, λ_p 、 λ_s 、 λ_i 分别是泵浦光、信号光和闲频光的波长, $n_p(T)$ 、 $n_s(T)$ 、 $n_i(T)$ 分别是泵浦光、信号光和闲频光在温度为 T 的晶体中的折射率, Λ 是晶体的极化周期.

铌酸锂晶体折射率与波长和温度的关系直接影响晶体的光学特性和热学特性.在铌酸锂晶体非线性系数最大的方向上(d_{33}),e光的表现最为理想.5% MgO掺杂的铌酸锂晶体中e光折射率与温度和

波长的关系为

$$n_e^2 = 5.756 + 2.86 \times 10^{-6}f + \frac{0.0983 + 4.7 \times 10^{-8}f}{\lambda^2 - (0.202 + 6.113 \times 10^{-8}f)^2} \quad (2a)$$

$$f = (T - T_0)(T + T_0 + 2 \times 273.16) = (T - 24.5)(T + 570.82) \quad (2b)$$

其中, λ 为真空中的波长,单位为μm, T 为晶体的温度,单位为℃.

1.1 四镜环型腔单谐振光参量振荡器的阈值和效率

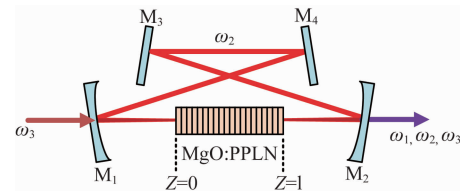


图1 四镜环型腔单谐振光参量振荡器
Fig. 1 The four-mirror circular cavity single resonant optical parametric oscillator

四镜环型腔单谐振光参量振荡器如图1所示,腔镜 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 对泵浦光 ω_3 和闲频光 ω_1 增透,对信号光 ω_2 高反($R > 99.8\%$),信号光在腔内单谐振,输出镜 M_2 输出的光含有泵浦光、闲频光和少量的信号光.腔镜对信号光的振幅反射系数为:

$$r_2 = \sqrt{R_2} \exp(-i\varphi_2/2) \quad (3)$$

其中, R_2 是腔镜 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 对信号光的反射率, $\varphi_2/2$ 是反射时的相位突变.

刚达到稳定振荡时,在晶体的前端面 $z=0$ 处,向前传播的信号光 ω_2 的复振幅为 $A_{20}(0)$,闲频光 ω_1 的复振幅为0,信号光传播到晶体的后端面 $z=l$ 时的复振幅为 $A_{20}(l)$.信号光 ω_2 继续向前传播,经过 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_1 反射回到初始位置 $z=0$ 处,传播过程中没有增益只有相位延迟,此时的信号光的复振幅和 $A_{20}(0)$ 相等才能保持稳定振荡.

完全相位匹配的情况下 $\Delta k=0$,可得输入端面内泵浦光 ω_3 在光斑中心处的能流密度为^[24]

$$[S_{30}^{\text{th}}(0)]_{\text{SRO}} = \frac{c^3 n_1 n_2 n_3}{16\pi^2 \omega_1 \omega_2 [\chi_{\text{eff}}^{(2)}] g_1 g_2} (1 - R_2^2) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 c n_1 n_2 n_3}{256\pi^5 d_{\text{eff}}^2 l^2 g_1 g_2} (1 - R_2^2) \quad (4)$$

其中, λ_1 、 λ_2 分别为闲频光和信号光的波长, d_{eff} 为晶体的有效二阶非线性系数, l 为晶体的长度, g_1 、 g_2 分别为闲频光和信号光的耦合因子,表示极化光波和同频的光在横截面的重合因子, c 为真空中的光

速, n_1 、 n_2 、 n_3 分别为闲频光、信号光、泵浦光在晶体中的折射率.

光纤功率放大器输出的激光为单横模激光, 可认为是高斯光束, 则实现光参量振荡时泵浦光的平均功率为

$$[P_{30}^{\text{th}}(0)]_{\text{SRO}} = [S_{30}^{\text{th}}(0)]_{\text{SRO}} \int_0^{\infty} \exp(-2r^2/w_3^2) 2\pi r dr$$

$$= \frac{\lambda_1 \lambda_2 c n_1 n_2 n_3 (1 - R_2^2) w_3^2 w_3^2}{256 \pi^4 d_{\text{eff}}^2 l^2 g_1 g_2} \frac{w_3^2}{2}, \quad (5)$$

其中, w_3 为泵浦光的束腰半径.

MgO:PPLN 晶体的有效非线性系数 $d_{\text{eff}} = 16 \text{ pm/V} = \frac{12}{\pi} \times 10^{-8} \text{ esu}$, 晶体的长度 $l = 50 \text{ mm}$, 腔镜对信号光的反射率 $R_2 = 0.998$, 泵浦光的束腰半径 $w_3 = 90 \text{ }\mu\text{m}$, 光参量振荡输出的激光为偏振光, 耦合因子 g_1 、 g_2 取 1, 不同极化周期下光参量振荡的阈值如图 2 所示, 晶体的极化周期越大, 温度越低, 光参量振荡的阈值越低.

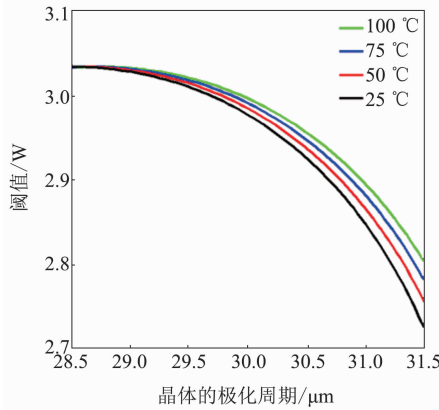


图 2 阈值和晶体极化周期的关系
Fig. 2 Threshold power versus crystal polarization period at different temperatures

平面波近似时, 光强在光束截面均匀分布则^[25]

$$\eta = \frac{S_{10}(l) + \Delta S_{20}}{S_{30}(0)} = \frac{\beta_0^2 - (\Delta k/2)^2}{\beta_0^2} \sin^2(\beta_0 l) \quad (6)$$

当完全相位匹配时 $\Delta k = 0$ 则

$$\eta = \sin^2(\beta_0 l) \quad (7a)$$

$$\frac{\sin^2(\beta_0 l)}{(\beta_0 l)^2} = \frac{S_{30}^{\text{th}}(0)}{S_{30}(0)} = \frac{P_3^{\text{th}}}{P_3} \quad (7b)$$

图 3 表示了转换效率和 P/P_{th} 变化曲线, 当 $P/P_{\text{th}} = 2.47$, $\eta_{\text{max}} = 100\%$. 理论效率的拟合曲线方程为:

$$\eta = -14.82e^{-2.563P/P_{\text{th}}} + 1.245e^{-0.08228P/P_{\text{th}}} \quad (8)$$

将上式在 $P/P_{\text{th}} = 0$ 处四阶泰勒展开为:

$$\eta = -14.81 + 37.86P/P_{\text{th}} - 48.64(P/P_{\text{th}})^2 + 41.56(P/P_{\text{th}})^3 - 26.63(P/P_{\text{th}})^4 \quad (9)$$

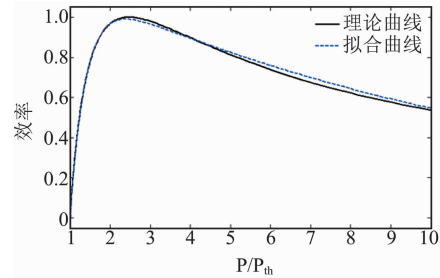


图 3 光参量振荡理论输出效率
Fig. 3 Theoretical efficiency of the OPO

1.2 双频激光参量振荡

双频激光的电场表达式为

$$E = E_a + E_b$$

$$= A_a \exp[i(\omega_a t + \varphi_a)] + A_b \exp[i(\omega_b t + \varphi_b)] \quad (10)$$

其中, A_a 、 A_b 、 ω_a 、 ω_b 、 φ_a 、 φ_b 分别是两频率激光的振幅、频率、相位.

双频激光的光强为

$$I = E \cdot E^*$$

$$= \{A_a \exp[i(\omega_a t + \varphi_a)] + A_b \exp[i(\omega_b t + \varphi_b)]\}$$

$$\cdot \{A_a \exp[-i(\omega_a t + \varphi_a)] + A_b \exp[-i(\omega_b t + \varphi_b)]\}$$

$$= A_a^2 + A_b^2 + 2A_a A_b \cos[(\omega_b - \omega_a)t + (\varphi_b - \varphi_a)]$$

$$= A_a^2 + A_b^2 + 2A_a A_b \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi) \quad (11)$$

其中, $\Delta\omega$ 、 $\Delta\varphi$ 分别为两频率激光的频差和相位差.

双频激光具有频率为 $\Delta\omega$ 的余弦调制信号.

调制深度为

$$m = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} = \frac{2A_a A_b}{A_a^2 + A_b^2} = \frac{2\sqrt{I_a I_b}}{I_a + I_b} = \frac{2\sqrt{I_a/I_b}}{1 + I_a/I_b} \quad (12)$$

由上式知, 双频激光的调制深度在时域可由交流部分的振幅与直流部分的比值表示, 调制深度受双频激光的功率比影响.

设双频激光两频率的功率比为 k , 则

$$p \propto I = [1 + k + 2\sqrt{k} \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi)] A^2 \quad (13)$$

式中, A 为相对振幅. 取光参量振荡的阈值功率为 3 W, 将式(13)代入式(9)可得输出激光功率的表达式(14a), 输出激光具有双频泵浦光的整数倍拍频,

拍频强度与泵浦光双频功率比和泵浦光的强度有关.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} &= P \times \eta \propto I \times \eta \\
 &= (-14.81 + 12.62A^2 - 5.40A^4 + 1.54A^6 - 0.33A^8)A^2 + (-14.81 + 50.48A^2 - 48.64A^4 + 24.63A^6 - 8.22A^8)A^2k + (12.62 - 48.64A^2 + 55.41A^4 - 32.88A^6)A^4k^2 + (-5.40 + 24.63A^2 - 32.88A^4)A^6k^3 + (1.54 - 8.22A^2)A^8k^4 - (-0.33)A^{10}k^5 + [(-29.62 + 50.48A^2 - 323.43A^4 + 12.31A^6 - 3.29A^8)A^2k^{1/2} + (50.48 - 97.28A^2 + 73.88A^4 - 32.88A^6)A^4k^{3/2} + (-32.43 + 73.88A^2 - 65.75A^4)A^6k^{5/2} + (12.31 - 32.88A^2)A^8k^{7/2} - 3.29A^{10}k^{9/2}] \cos(\alpha) + [(25.24 - 32.43A^2 + 18.47A^4 - 6.58A^6)A^4k + (-32.43 + 49.26A^2 - 32.88A^4)A^6k^2 + (18.47 - 32.88A^2)A^8k^3 - 6.58A^{10}k^4] \cos(2\alpha) + [(-10.81 + 12.31A^2 - 6.58A^4)A^6k^{3/2} + (12.31 - 16.44A^2)A^8k^{5/2} - 6.58A^{10}k^{7/2}] \cos(3\alpha) + [(3.08 - 3.29A^2)A^8k^2 - 3.29A^{10}k^2] \cos(4\alpha) - 0.66A^{10}k^{5/2} \cos(5\alpha)
 \end{aligned} \quad (14a)$$

$$\alpha = \Delta\omega t + \Delta\varphi \quad (14b)$$

泵浦光一定时,取 $A=1$, 泵浦光双频激光功率比不同时,输出激光的拍频频谱如图 4 所示,双频激光的功率比越接近 1:1,拍频强度越高.

双频功率比一定时,取 $k=1$, 泵浦光功率不同时,输出激光的拍频频谱如图 5 所示,泵浦功率较低时,输出激光的高阶拍频强度很低,可近似认为输出激光为双频激光;泵浦功率增加到一定程度时,出现高次拍频.

2 实验装置

实验原理如图 6 所示,采用 1064 nm 双频激光泵浦基于 MgO:PPLN 晶体的四镜环形腔信号光单谐振光参量振荡器. 泵浦光只通过谐振腔一次,可以有效抑制逆转换现象,防止产生的信号光和闲频光转换为泵浦光,降低转换效率. 单谐振光参量振荡器谐振腔内由于只存在信号光谐振,不存在信号光与闲频光的模式竞争,因此输出功率稳定性高.

1064 nm 双频种子源频是 Nd:YAG 单块非平面环形腔单频激光采用分束-声光移频-合束方式实现的频差可调的双频激光源,频差由声光移频器控制,

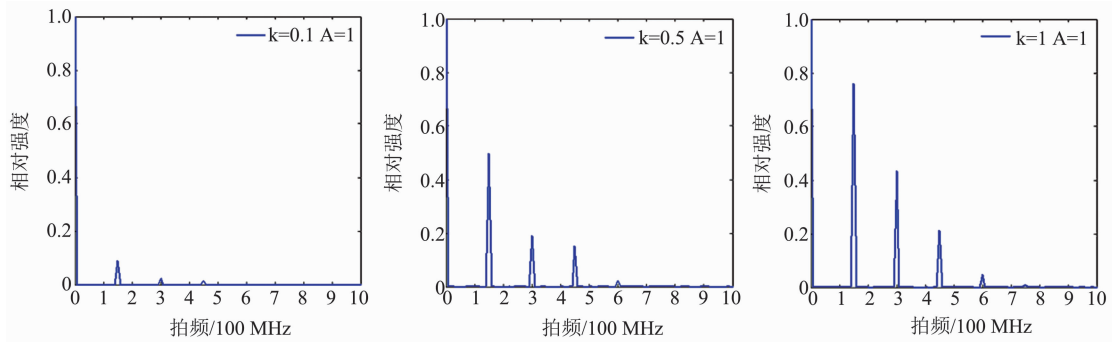


图 4 泵浦光不同双频功率比时输出光的拍频频谱

Fig. 4 Beat-note of the output light with different dual-frequency power ratios of the pump

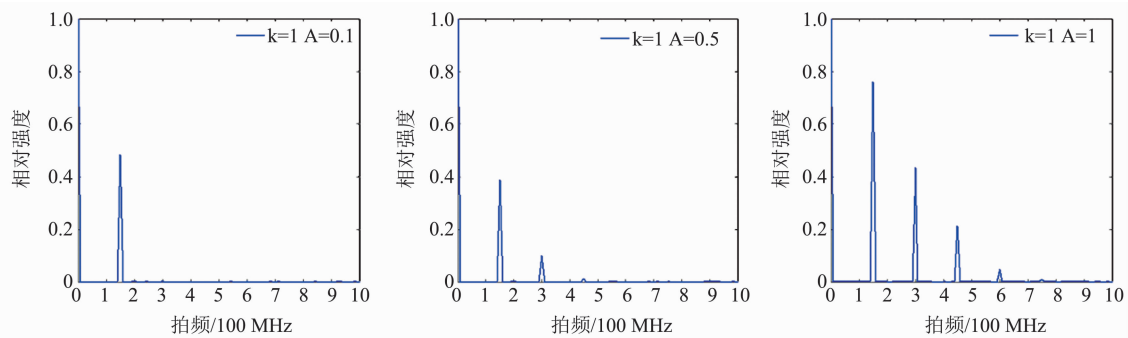


图 5 泵浦光不同功率时输出光的拍频频谱

Fig. 5 Beat-note of the output light with different pump powers

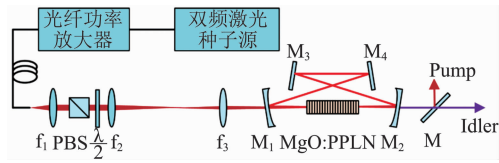


图 6 实验装置
Fig. 6 Experimental setup

调谐范围为 125 ~ 175 MHz. 10 mW 的双频种子光通过光纤功率放大器放大后, 输出激光功率为 10 W, 偏振消光比为 20 dB. OPO 环形腔的腔长为 720 mm, M_1 、 M_2 之间的距离为 220 mm, M_3 、 M_4 之间的距离为 130 mm, 平凹镜 M_1 、 M_2 的曲率半径为 150 mm, M_3 、 M_4 为平面镜. 1 064 nm 双频激光经由透镜组后聚焦在 MgO:PPLN 晶体中间位置, 束腰半径 $w_0 = 90 \mu\text{m}$, 满足环形腔最佳聚焦条件. MgO:PPLN 为 HC Photonics 公司生产的多周期晶体, 晶体尺寸为 50 mm × 8.7 mm × 1 mm, 晶体前后端面镀红外增透膜 (1 064 nm ($R < 1\%$)/1 400 ~ 1 750 nm ($R < 1\%$)/2 800 ~ 4 300 nm ($R < 10\%$)). 实验过程中, MgO:PPLN 晶体放置在温控炉中, 通过对晶体温度的控制可实现输出激光波长的可调谐, 温度控制精度为 0.1°C. 经过信号光单谐振光参量振荡器后, 闲频光由腔镜 M_2 输出, 经过锗片 M 滤除泵浦光和杂散波后输出中红外激光.

3 实验结果

3.1 双频中红外激光的拍频频谱和输出功率

MgO:PPLN 晶体的极化周期为 30 μm , 温度为 75°C, 双频泵浦光的频差为 150 MHz, 泵浦光双频功率比为 0.1:1, 泵浦光功率为 5.1 W, 采用中红外探测器测量闲频光拍频频谱如图 7(a) 所示, 近红外探测器测量腔镜 M_4 输出的信号光的拍频频谱如图 7(b) 所示, 闲频光和信号光的拍频均为 150 MHz, 与泵浦光的拍频相同, 未观测到高次拍频.

采用示波器观测泵浦光和闲频光的调制信号, 如图 8(a) 和 8(b) 所示, 泵浦光和闲频光的调制深度分别为 0.45 和 0.2, 改变泵浦光双频激光的功率比可改变调制深度, 双频中红外激光的调制深度可控. 当泵浦光功率高于阈值实现稳定光参量振荡时, 降低泵浦光双频功率比, 闲频光拍频信号强度降低, 当泵浦光的双频功率比降低到 0.005:1 时, 观测不到拍频信号. 由于泵浦光双频功率比过低时, 拍频信号十分微弱, 受限于设备的测试精度, 无法观测到拍

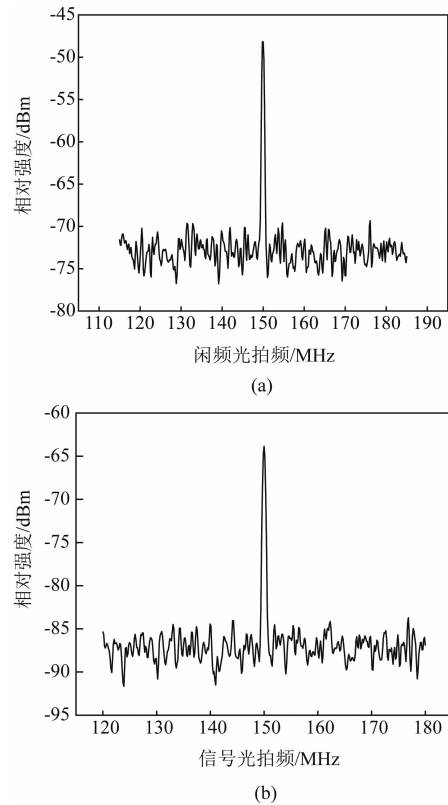


图 7 (a) 闲频光拍频, (b) 信号光拍频
Fig. 7 Beat-note of (a) the idler and (b) the signal light

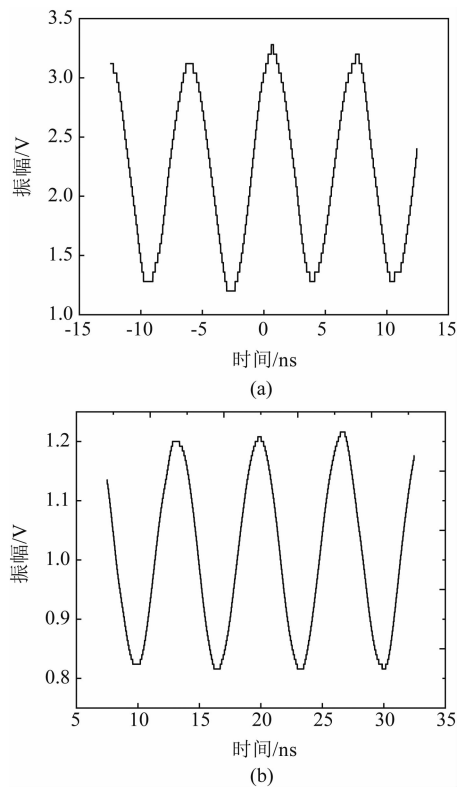


图 8 (a) 泵浦光的调制信号, (b) 闲频光的调制信号
Fig. 8 The modulated signal of (a) the pump and (b) the signal of idler

频信号.

采用频率计测量泵浦光拍频的稳定性如图 9 (a) 所示, 泵浦光拍频两分钟的稳定性为 2.67 Hz. 测量闲频光拍频的稳定性如图 9 (b) 所示, 闲频光拍频两分钟的频率稳定性为 3.38 Hz, 拍频稳定性较高, 可应用于相干探测领域. 由于谐振腔腔长稳定性和晶体热效应的影响, 闲频光的拍频稳定性略大于泵浦光的拍频稳定性.

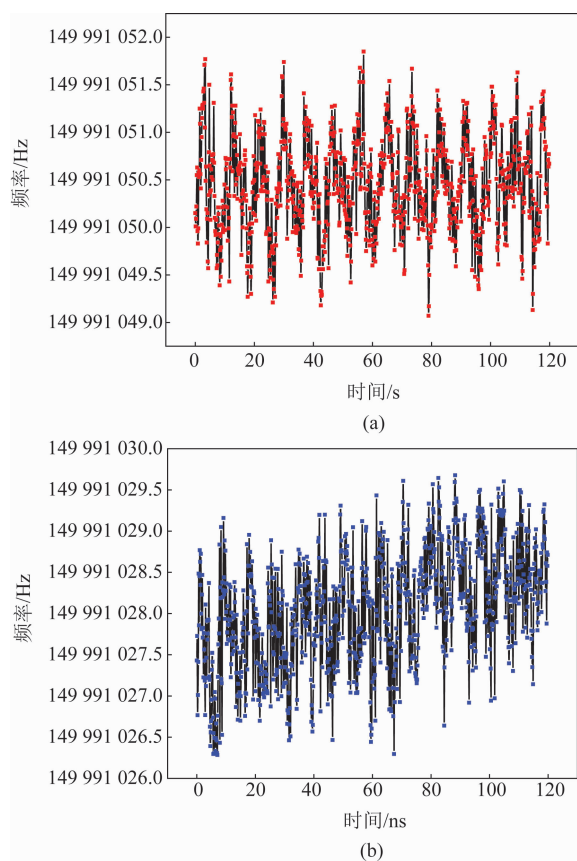


图 9 (a) 泵浦光拍频稳定性 (b) 闲频光拍频稳定性
Fig. 9 Frequency stability of (a) the pump beat-note and (b) the idler beat-note

泵浦光拍频为 150 MHz, 双频功率比为 0.1:1, 平移多周期 MgO:PPLN 晶体, 极化周期为 31、30.5、30、29.5 μm 时, 温度分别设置为 45、60、75、95 $^{\circ}\text{C}$. 采用频谱仪监测信号光拍频频谱, 随着泵浦光功率的升高, 拍频信号强度增大. 当泵浦光功率小于 7 W 时, 只观测到 150 MHz 频谱, 泵浦功率等于 7 W 时, 拍频信号出现 300 MHz 频谱. 由于泵浦功率较低时, 高次拍频信号微弱, 受限观测条件无法观测到. 为了获得双频闲频光, 泵浦光功率要低于 7 W. 双频闲频光的输出功率及效率如图 10 所示. 泵浦光功率为 6.9 W, 晶体极化周期为 30.5 μm 时, 最大获

得 1.16 W 双频闲频光, 最高泵浦光-闲频光转换效率 16.9%.

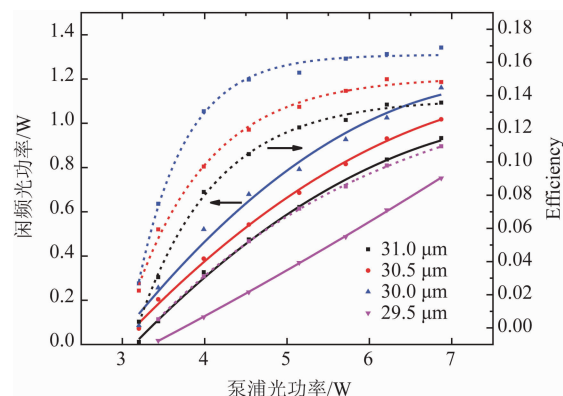


图 10 晶体不同极化周期下闲频光的输出功率
Fig. 10 Output power of the idler with different polarization periods of the crystal

MgO:PPLN 晶体的极化周期为 30 μm , 温度为 75 $^{\circ}\text{C}$, 双频泵浦光的频差分别为 125 MHz 和 175 MHz, 双频功率比为 0.1:1, 泵浦光功率 5.1 W, 输出的信号光和闲频光的频谱如图 11 所示, 随着双频泵浦光频差的改变, 信号光和闲频光的频差跟着改变, 始终与泵浦光的频差相同.

MgO:PPLN 晶体的极化周期为 30 μm , 温度为 75 $^{\circ}\text{C}$, 泵浦光不同拍频下, 双频闲频光的输出功率如图 12 所示. 由于双频激光的频差很小, 两个波长的泵浦光都可以满足准相位匹配, 基本不存在模式竞争, 双频激光泵浦的阈值和理论计算的单频激光泵浦的阈值基本相同, 改变频差对阈值和输出功率的影响不大. 光参量振荡的阈值功率约为 3 W, 泵浦光功率为 6.9 W 时获得最高输出功率 1.25 W, 泵浦光-闲频光最高转换效率 18.2%.

3.2 双频中红外激光的波长调谐范围

当晶体的温度从 30 ~ 110 $^{\circ}\text{C}$ 变化时, 采用 Ocean Optics 公司生产的 NIR Quest 512 便携式光纤光谱仪 (光谱测量范围为 1440 ~ 1820 nm) 对信号光光谱进行测量, 根据光参量振荡过程中能量守恒条件可以计算出闲频光的波长, 闲频光的波长随温度和极化周期的变化如图 11 所示, 调谐范围为 3 ~ 3.8 μm , 随着晶体温度的升高和极化周期增大, 闲频光波长变短. 闲频光输出波长改变时, 双频频差不变, 始终与泵浦光频差相同.

采用卓立汉光 Omni- λ 300 (光谱测量范围为 2.5 ~ 8 μm) 光栅光谱仪测量闲频光的光谱, 由于扫描光谱仪测量比较缓慢, 仅测量部分波段的光谱. 晶体极

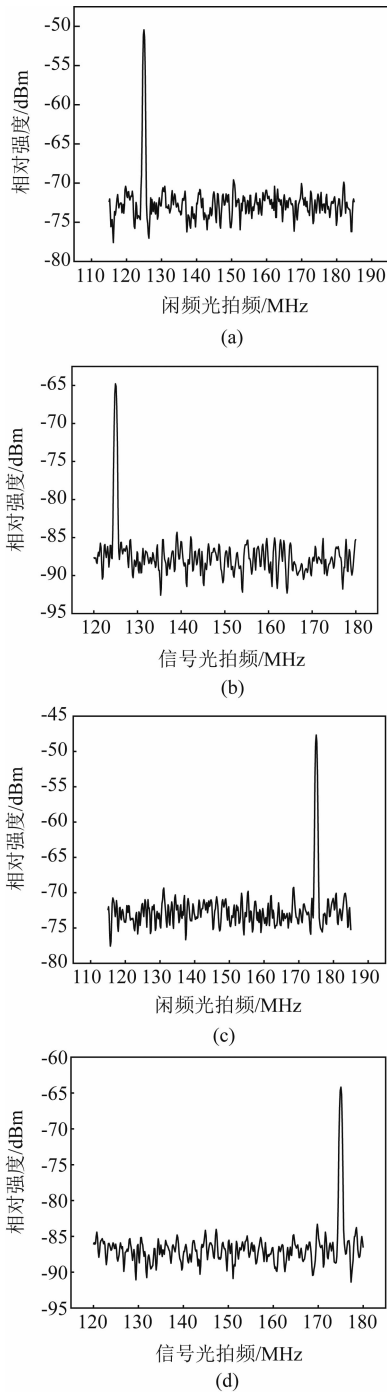


图 11 闲频光拍频和信号光拍频 (a-b) 125 MHz, (c-d) 175 MHz
 Fig. 11 Beat-note of idler and signal light at (a-b) 125 MHz and (c-d) 175 MHz

化周期为 31 μm , 温度为 30 $^{\circ}\text{C}$, 测得的光谱曲线如图 12 所示, 中心波长为 3 203 nm, 半高宽约为 5 nm.

4 结论

本文采用单频激光声光移频再合束的方式获得 1 064 nm 双频激光, 经过光纤功率放大器后泵浦基

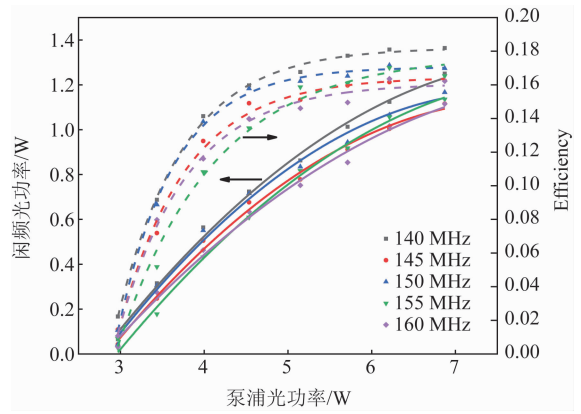


图 12 不同拍频下闲频光的输出功率
 Fig. 12 Output power of the idler at different beat-note frequencies

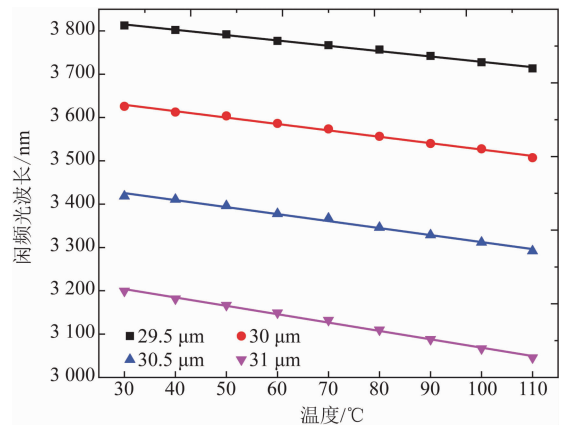


图 13 闲频光波长与晶体的温度和极化周期的关系
 Fig. 13 The relationship between the wavelength of idler and the temperature with different polarization periods of the crystal

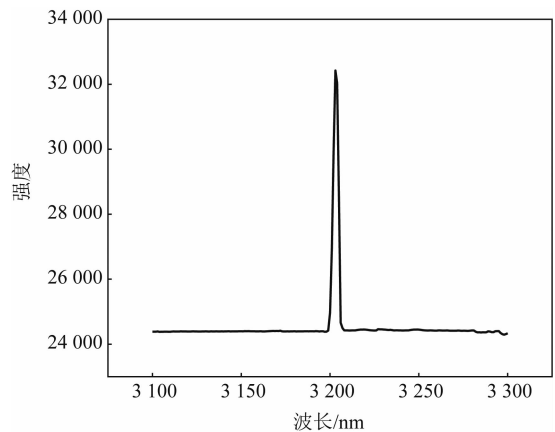


图 14 闲频光光谱
 Fig. 14 Spectrum of idler

于 MgO:PPLN 的信号光单谐振光参量振荡器, 实现了双频中红外激光输出, 双频频差调谐范围为 125-

175 MHz, 调谐范围受声光移频器限制, 中红外激光波长调谐范围为 $3 \sim 3.8 \mu\text{m}$, 最高输出功率 1.25 W, 泵浦光-闲频光的转换效率最高可达 18.2%. 该光源在双频中红外激光雷达、大气探测和环境质量检测等领域具有重要的应用价值.

References

- [1] Vainio M, Peltola J, Persijn S, *et al.* Singly resonant cw OPO with simple wavelength tuning [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(15):11141-11146.
- [2] Groot M L, Wilderen L J G W V, Larsen D S, *et al.* Initial steps of signal generation in photoactive yellow protein revealed with femtosecond mid-infrared spectroscopy. [J]. *Biochemistry*, 2003, **42**(34):10054-10059.
- [3] GUO Jing, HE Guang-Yuan, JIAO Zhong-Xing, *et al.* 2.1 μm optical parametric oscillator with high average power and narrow linewidth [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (郭靖, 何广源, 焦中兴, 等. 高功率窄线宽 2.1 μm 光学参量振荡器. *红外与毫米波学报*) 2014, **33**(6):625-628.
- [4] DAI Hong, CHEN Chao-Jie. Implementation of helicopter airborne mid-ir laser directional interference [J]. *Journal of ordnance equipment engineering*, (代红, 陈超. 直升机机载中红外激光定向干扰实现途径. *兵器装备工程学报*) 2011, **32**(1):114-116.
- [5] WANG Ling-Fang. Formaldehyde and methane spectroscopy measurements based on Mid-IR quantum cascade laser system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王玲芳. 基于中红外量子级联激光器系统的甲醛和甲烷光谱检测. *红外与毫米波学报*) 2014, **33**(6):591-597.
- [6] Orphal J, Bergametti G, Beghin B, *et al.* Monitoring tropospheric pollution using infrared spectroscopy from geostationary orbit [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2005, **6**(8):888-896.
- [7] Vercesi V, Onori D, Laghezza F, *et al.* Frequency-agile dual-frequency lidar for integrated coherent radar-lidar architectures [J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(7):1358-61.
- [8] Eberhard W L, Schotland R M. Dual-frequency Doppler-lidar method of wind measurement [J]. *Applied Optics*, 1980, **19**(17):2967.
- [9] Liu J M, Diaz R, Chan S C. Lidar detection using a dual-frequency source [J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(24):3600-3602.
- [10] Koch S E, Flamant C, Wilson J W, *et al.* An atmospheric soliton observed with doppler radar, differential absorption lidar and a molecular Doppler lidar [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2008, **25**(8):1267-1287.
- [11] SUN You-Wen, LIU Wen-Qing, XIE Pin-Hua, *et al.* Measurement of industrial gas pollutant emissions using differential optical absorption spectroscopy [J], *Acta Physica Sinica*, (孙友文, 刘文清, 谢品华, 等. 差分吸收光谱技术在工业污染源烟气排放监测中的应用. *物理学报*) 2013, **62**(1) 000094-103]
- [12] Ramos J A, Osorio M, Belsterli G, *et al.* Differential optical absorption spectroscopy system for multi purpose applications [C]// *Instrumentation and Measurement Technology Conference*. IEEE, 2014:1193-1196.
- [13] ZHU Shou-Shen, ZHANG Shu-Lian, LIU Wei-Xin, *et al.* Laser-micro-engraving method to modify frequency difference of two-frequency He-Ne lasers [J] *Acta Physica Sinica*, (朱守深, 张书练, 刘维新, 等. He-Ne 双频激光器频差的激光内雕赋值法. *物理学报*) 2014, **63**(6):159-163.
- [14] McKay A, Dawes J, Dekker P, *et al.* A comparison of tunable, passively-stabilized two-frequency solid-state lasers for microwave generation [C]// *International Topical Meeting on Microwave Photonics*. IEEE, 2005:161-164.
- [15] Danion G, Hamel C, Frein L, *et al.* Dual frequency laser with two continuously and widely tunable frequencies for optical referencing of GHz to THz beatnotes. [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(15):17673.
- [16] Rolland A, Brunel M, Loas G, *et al.* Beat note stabilization of a 10 - 60 GHz dual polarization Nd:YAG microchip laser through optical down conversion [C]// *Lasers and Electro-Optics Europe*. IEEE, 2011:1-1.
- [17] Le G J, Morvan L, Alouini M, *et al.* Dual-frequency single-axis laser using a lead lanthanum zirconate tantalate (PLZT) birefringent etalon for millimeter wave generation: beyond the standard limit of tunability. [J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(9):1090.
- [18] Kim M S, Kim S W. Two-longitudinal-mode He-Ne laser for heterodyne interferometers to measure displacement [J]. *Appl Opt*, 2002, **41**(28):5938-5942.
- [19] HE Tao, YANG Su-Hui, ZHAO Chang-Ming, *et al.* High power tunable beat frequency signal by all fiber dual-frequency amplification [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, (何滔, 杨苏辉, 赵长明, 等. 高功率可调谐双频激光全光纤放大实验研究. *强激光与粒子束*) 2014, **26**(12):26121006.
- [20] ZHENG Xiong-Hua, HE Guang-Yuan, JIAO Zhong-Xing, *et al.* Stable, high-average-power, continuous-wave singly resonant optical parametric oscillation based on angle-polished MgO:PPLN [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (郑雄桦, 何广源, 焦中兴, 等. 基于角度切割 MgO:PPLN 晶体的高平均功率、稳定的连续波单振荡光学参量振荡器. *红外与毫米波学报*) 2015, **34**(6):684-687.
- [21] Shukla M K, Maji P S, Das R. Yb-fiber laser pumped high-power, broadly tunable, single-frequency red source based on a singly resonant optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(13):3033.
- [22] Yang J F, Liu S D, He J L, *et al.* Tunable simultaneous dual-wavelength laser at 1.9 and 1.7 μm based on KTiO:AsO₄ optical parametric oscillator [J]. *Laser Physics Letters*, 2011, **8**(1):28-31.
- [23] Chen T, Wu B, Liu W, *et al.* Efficient parametric conversion from 1.06 to 3.8 μm by an aperiodically poled cascaded lithium niobate. [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(6):921-3.
- [24] Zhao Sheng-Zhi. *Nonlinear optics* [M]. Jinan, Shandong university press, 赵圣之. 非线性光学. 济南, 山东大学出版社, 2007:139.
- [25] Bjorkholm J E. Some effects of spatially nonuniform pumping in pulsed optical parametric oscillators [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1971, **7**(3):109-118.