

# 基于 PPLN 温度渐变控制的宽调谐中红外差频产生激光光源

常建华<sup>1,2</sup> 黄 秦<sup>1,2</sup> 顾久驭<sup>1,2</sup> 王亚炜<sup>1,2</sup> 尹 杰<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044)  
(<sup>2</sup>南京信息工程大学江苏省气象传感网技术工程中心, 江苏 南京 210044)

**摘要** 提出了一种基于等周期 PPLN 晶体渐变式温度控制的宽带中红外差频产生(DFG)激光光源的设计新方案。理论研究结果显示,在固定抽运光波长条件下,闲频光/信号光的准相位匹配(QPM)波长接收带宽(BW)随着晶体两端温度梯度的增加而增加,但差频转换效率却随之下降。当抽运光波长固定为 1.08  $\mu\text{m}$  时,在均匀温度条件下中红外闲频光的 QPM BW 约为 8 nm。固定晶体初始端的温度为 30  $^{\circ}\text{C}$ ,当晶体两端的温度梯度分别设定为 20  $^{\circ}\text{C}$ 、40  $^{\circ}\text{C}$  和 60  $^{\circ}\text{C}$  时,闲频光的 QPM BW 可分别拓宽至 35 nm、80 nm 和 136 nm。与此同时,QPM 带内相对差频转换效率分别下降至 0.2、0.095 和 0.06。当晶体初始端的温度设定为 90  $^{\circ}\text{C}$ ,仍保持晶体两端的温度梯度为 60  $^{\circ}\text{C}$  时,该宽带的闲频光 QPM 带向短波长方向平移,其波长覆盖范围为 3.288~3.464  $\mu\text{m}$ 。

**关键词** 激光器; 宽调谐; 中红外; 差频产生; 准相位匹配

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1202008

## Widely Tunable Mid-Infrared Difference Frequency Generation in a Temperature-Gradient-Controlled PPLN

Chang Jianhua<sup>1,2</sup> Huang Qin<sup>1,2</sup> Gu Jiuyu<sup>1,2</sup> Wang Yawei<sup>1,2</sup> Yin Jie<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China  
<sup>2</sup>Jiangsu Technology and Engineering Center of Meteorological Sensor Network, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

**Abstract** A novel scheme for broadband mid-infrared (mid-IR) difference frequency generation (DFG) based on a temperature-gradient-controlled equal periodic PPLN is proposed. The theoretical results show that, under condition of the fixed pump wavelength, the acceptance bandwidth (BW) of idler/signal quasi-phase matching (QPM) is increased with the temperature gradient across the crystal, whereas the conversion efficiency decreases. When the pump wavelength is 1.08  $\mu\text{m}$ , the idler QPM BW is about 8 nm in the uniform temperature case. However, when the initial end temperature is 30  $^{\circ}\text{C}$ , and the crystal temperature gradient increases to 20  $^{\circ}\text{C}$ , 40  $^{\circ}\text{C}$  and 60  $^{\circ}\text{C}$ , the idler QPM BWs are broadened to 35 nm, 80 nm and 136 nm, and the relative conversion efficiencies decrease to 0.2, 0.095 and 0.06. When the temperature at the initial crystal end and the temperature gradient are 90  $^{\circ}\text{C}$  and 60  $^{\circ}\text{C}$ , respectively, the broadband idler QPM band moves to the shorter wavelengths and could cover the range of 3.288~3.464  $\mu\text{m}$ .

**Key words** lasers; wide tuning; mid-infrared; difference frequency generation; quasi-phase matching

**OCIS codes** 140.3460; 190.4360; 130.3730

**收稿日期**: 2013-09-12; **收到修改稿日期**: 2013-09-29

**基金项目**: 国家自然科学基金(11374161)、江苏省气象探测与信息处理重点实验室开放基金(KDXS1206)、江苏省传感网与现代气象装备优势学科和 2013 年度江苏省大学生创新创业训练计划

**作者简介**: 常建华(1976—),男,博士,副教授,主要从事非线性光频转换和气体光谱检测应用等方面的研究。

E-mail: jianhuachang@nuist.edu.cn

## 1 引 言

3~5  $\mu\text{m}$  波段连续波可调谐中红外激光光源在痕量气体检测中具有重要的应用<sup>[1-3]</sup>。迄今,基于不同激光产生机理出现了多种中红外光源,如量子级联激光器、铅盐激光器、色心激光器、参量振荡器等<sup>[4-6]</sup>。其中,准相位匹配(QPM)差频产生(DFG)中红外光源因具有结构简单、调谐便利、线宽窄以及可室温运转等优势,已成为光谱检测应用的主流光源。对于等周期的周期极化晶体而言,中红外闲频光的 QPM 波长接受带宽(BW)通常为 8~10 nm,仅能同时覆盖极少量气体的特征吸收峰。为满足多组分、多吸收谱线同步检测的应用需求,如何拓宽中红外 DFG 光源的调谐范围受到了人们的广泛关注。近年来,人们采用多周期、扇形结构的周期极化晶体或利用晶体的温度色散特性,中红外 DFG 光源的调谐范围可提高至 1  $\mu\text{m}$  以上<sup>[7-8]</sup>。然而,尽管这类方法可有效拓展 DFG 光源的调谐范围,但在调谐过程中为确保满足相位匹配条件需结合非线性晶体极化周期或晶体温度的频繁切换,严重降低了激光光源的使用效率<sup>[9-10]</sup>。如何在固定的晶体畴结构与温度分布条件下实现中红外 DFG 光源的宽调谐运转依然值得深入研究,而其关键是拓宽 QPM BW。为此,一些传统的光栅光谱的调节方法,如啁啾、相移、砌趾等技术相继被应用于晶体的周期极化方案,有效拓展了中红外闲频光的 QPM BW,但与此同时,也极大地增加了器件工艺制备、实验控制难度以及器件成本。

近年来的研究表明,对于某些非线性周期极化晶体,如 PPLN 晶体,还可利用其温度可控的色散特性实现对 QPM BW 的有效拓展<sup>[11]</sup>。基于这一特性,针对 1060 nm 和 1550 nm 波段的基频光源组合,本研究小组在中红外 3.4  $\mu\text{m}$  附近将闲频光 QPM BW 拓宽至约 170 nm。实验中采用多波长掺镱光纤激光器(YDFL)与单波长掺铒光纤激光器(EDFL)差频获得了 14 条中红外激光谱线的同步输出<sup>[12]</sup>。然而,进一步的研究发现,PPLN 晶体固有的色散使得该拓宽的闲频光 QPM 带只能存在于中红外 3.4  $\mu\text{m}$  附近,难以对其他波长区域实现有效覆盖<sup>[13]</sup>。本文基于 PPLN 的温度色散关系提出一种新型的宽带中红外差频产生方案。利用晶体温度渐变的控制方法有效拓展闲频光的 QPM BW,通过改变晶体两端的温度实现中红外闲频光 QPM 带的 BW 及其位置的有效调控。

## 2 理论模型

非线性差频过程可简单描述为频率为  $\omega_3$  的抽运光与频率为  $\omega_1$  的信号光在晶体中经二阶非线性效应产生频率为  $\omega_2 = \omega_3 - \omega_1$  的闲频光。当晶体长度较短时,忽略光传输损耗和二阶以上的高阶非线性效应等因素,在慢变包络近似条件下非线性晶体中的差频过程可由如下耦合波方程组描述:

$$\frac{\partial E_j}{\partial z} = -iD_j E_{(3-j)} \times E_3 \exp(-i\Delta k z) \quad (j = 1, 2), \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_3}{\partial z} = -iD_3 E_1 E_2 \exp(i\Delta k z), \quad (2)$$

式中  $D_j = \omega_j d_{\text{eff}} / (n_j c)$  ( $j = 1, 2, 3$ ), 其中  $d_{\text{eff}} = 2/\pi \cdot d_{33}$  为晶体的有效非线性系数,  $c$  为真空中的光传播速度;  $\Delta k = k_3 - k_2 - k_1 - 2\pi/\Lambda$  为相位失配量,  $\Lambda$  为晶体的极化周期;  $E_j(z)$ ,  $k_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) 分别表示信号光、闲频光和抽运光在  $z$  处的电场强度和各自波矢量大小;  $n_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) 为三个光波在晶体中感受到的折射率, 其值为激光波长和晶体温度的函数。为使 PPLN 获得渐变的温度分布, 本文采用了如图 1 所示的温度控制方案。将 PPLN 晶体放置于一金属的温控炉中, 温控炉两端采用 2 个玻尔帖温度控制器对晶体的温度进行调控。当两端的温度控制器的温度分别设置为  $T_1$  和  $T_2$  时, PPLN 晶体沿长度方向的温度分布  $T$  将呈现良好的线性关系, 表示为:

$$T(z) = T_1 + [T_2 - T_1](z/L), \quad (3)$$

式中  $L$  为晶体长度, 相应的相位失配量也是位置  $z$  的函数, 可表示为:

$$\Delta k(z) = 2\pi[n_3(T)/\lambda_3 - n_1(T)/\lambda_1 - n_2(T)/\lambda_2 - 1/\Lambda], \quad (4)$$

将(3)、(4)式代入(1)、(2)式, 通过求解耦合模方程可获得在渐变温度条件下 PPLN 晶体中的差频 QPM 特性, 其详细的数值求解方法可参见文献[14]。

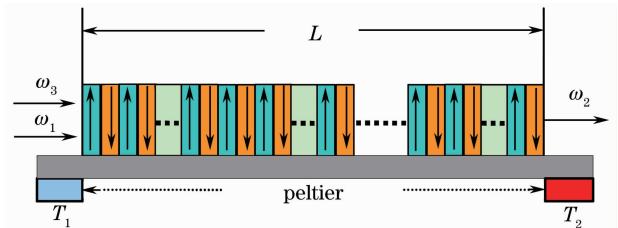


图 1 PPLN 晶体渐变温度控制结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of gradient temperature control for PPLN

### 3 结果与讨论

针对 1060 nm 和 1550 nm 两波段的基频光源组合,本文采用数值方法分别研究了 PPLN 晶体在均匀温度和渐变温度条件下的 QPM 差频特性。计算过程中采用的参数为:晶体长度  $L=50$  mm;晶体有效非线性系数  $d_{\text{eff}}=20.5 \times 10^{-6}$   $\mu\text{m}/\text{V}$ ;抽运光与信号光的输入功率分别为 120 mW 和 100 mW;激光光束功率与场强间的关系为  $P=\epsilon_0 c n |E|^2/2$ ;晶体的温度变化范围设定为 30  $^{\circ}\text{C} \sim 200$   $^{\circ}\text{C}$ 。PPLN 晶体的材料折射率通过文献[15]中塞涅尔方程求得。首先分析均匀温度条件下 PPLN 晶体中的信号光的差频 QPM 特性。当抽运光波长固定为 1.08  $\mu\text{m}$ 时,图 2 给出了晶体两端温度分别设定为 30  $^{\circ}\text{C}$  和 50  $^{\circ}\text{C}$ 时,晶体在不同位置处的温度分布以及不同温度所对应的 QPM 信号光波长。如图所示,由于不同晶体温度对应于不同的 QPM 信号光波长,相应的闲频光 QPM 带的位置也会相应发生平移。图 3 为信号光在不同晶体温度条件下的获得的归一化闲频光输出谱线。由图可见,在晶体温度为 30  $^{\circ}\text{C}$ 时,中红外闲频光存在且仅存在一个 QPM 带位于 3.557  $\mu\text{m}$ 处,其对应的 QPM 信号光波长为 1.551  $\mu\text{m}$ 。在此温度条件下,闲频光的 QPM BW 约为 8 nm。模拟结果显示,随着晶体温度的升高,该闲频光 QPM 带逐渐向短波长方向平移,但 QPM BW 几乎保持不变。当晶体温度升高至 200  $^{\circ}\text{C}$ 时,闲频光 QPM 带已平移至 3.28  $\mu\text{m}$ 处,其对应的信号光波长为 1.61  $\mu\text{m}$ 。

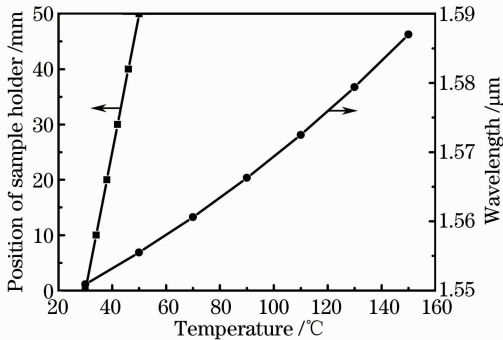


图 2 晶体沿长度方向温度分布以及不同晶体温度对应的 QPM 信号波长

Fig. 2 Temperature at each position of sample holder, and QPM signal wavelength for different crystal temperatures

由于在固定抽运光波长时,不同晶体温度对应不同的 QPM 信号光波长,通过改变晶体温度虽可实现闲频光 QPM 带位置的平移,但 QPM BW 并不

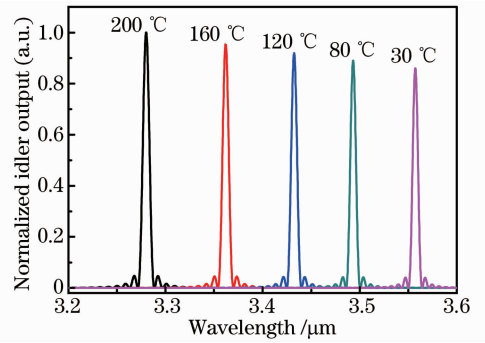


图 3 不同晶体温度对应的 DFG 输出谱线

Fig. 3 Normalized DFG output spectra for different crystal temperatures

能获得有效拓宽。若对 PPLN 晶体施行渐变式温度控制,因不同位置处的晶体段将呈现不同的温度(对应不同的 QPM 信号光波长),将可使闲频光/信号光 QPM 带实现叠加,进而拓宽其 QPM BW。基于这一思想,本文进一步研究了渐变温度条件下 PPLN 晶体中的的差频输出特性。如图 4 所示,当晶体两端温度分别设定为 30  $^{\circ}\text{C}$  和 50  $^{\circ}\text{C}$ 时,闲频光 QPM 带出现了显著的双峰结构,其可覆盖的波长区域为 3.516  $\sim$  3.551  $\mu\text{m}$ 。需要指出的是,在渐变式温度分布下,由于每一温度值对应晶体有效长度的减小导致了闲频光在 QPM 带内的相对转换效率显著降低。如图所示,在温度梯度为 20  $^{\circ}\text{C}$ 时,其带内峰值转换效率降低至晶体在 30  $^{\circ}\text{C}$ 均匀温度条件下对应值的 23%。

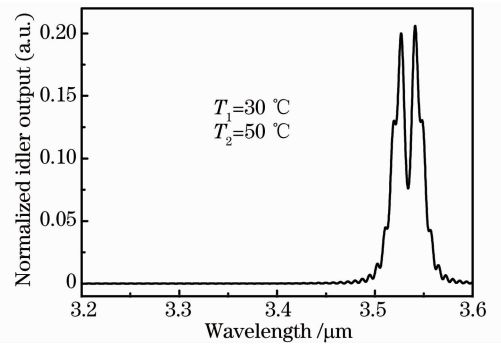


图 4 晶体两端温度梯度为 20  $^{\circ}\text{C}$ 时的归一化差频输出谱

Fig. 4 Normalized DFG output spectra for the crystal temperature gradient of 20  $^{\circ}\text{C}$

随着晶体两端温度梯度的增大,闲频光 QPM BW 也随之显著逐渐增加,与此同时 QPM 带内的差频转换效率也不断降低。若晶体的初始端温度固定为 30  $^{\circ}\text{C}$ ,当  $T_2$  升高至 70  $^{\circ}\text{C}$ 时,计算获得的归一化闲频光输出谱线如图 5 所示。由于晶体两端温差已增加至 40  $^{\circ}\text{C}$ ,闲频光 QPM 带呈现多峰结构,其覆盖范围扩展至 3.467  $\sim$  3.547  $\mu\text{m}$ ,峰值相对转换

效率约为 0.095。进一步增加温度差,当晶体末端温度  $T_2$  增加至 90 °C 时,中红外闲频光的输出谱如图 6 所示。此时 QPM BW 和峰值相对转换效率分别为 136 nm 和 0.06。上述结果表明,闲频光/信号光 QPM BW 的增加是以牺牲带内的差频转换效率为代价的。图 7 给出了渐变温度条件下,峰值相对转换效率和 QPM BW 与晶体两端温度梯度之间的关系。从图中可以清楚地看到,随着晶体两端温度差的升高,闲频光 QPM BW 显著增加而相对转换效率逐渐下降。在温度差为 0 时,也即在均匀温度条件下,闲频光 QPM BW 约为 8 nm。由图可知,当温度梯度升高至 120 °C 时,QPM BW 和峰值相对转换效率已分别变化至 360 nm 和 0.03。

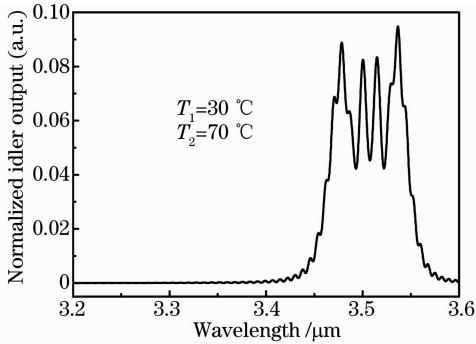


图 5 晶体两端温度梯度为 40 °C 时的归一化差频输出谱  
Fig. 5 Normalized DFG output spectra for the crystal temperature gradient of 40 °C

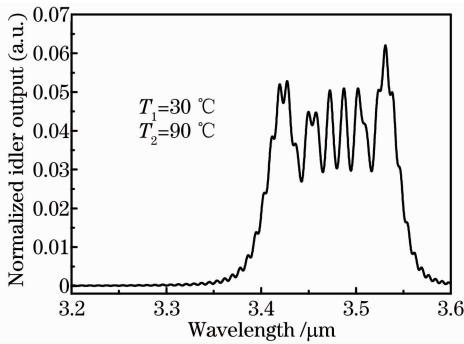


图 6 晶体两端温度梯度为 60 °C 时的归一化差频输出谱  
Fig. 6 Normalized DFG output spectra for the crystal temperature gradient of 60 °C

由上述研究结果不难发现,尽管增加晶体两端的温度梯度可使闲频光的 QPM BW 显著增加,但闲频光 QPM 带在长波长一侧的边界始终位于波长 3.55 μm 附近。其原因在于晶体初始端的温度固定在 30 °C。若改变晶体初始端的温度,则该拓宽的闲频光 QPM 带也可发生显著的平移。图 8 给出了在  $T_1$  和  $T_2$  分别设定为 90 °C 和 150 °C 时,计算得到的归一化闲频光输出谱线。由图可见,此时该拓宽的

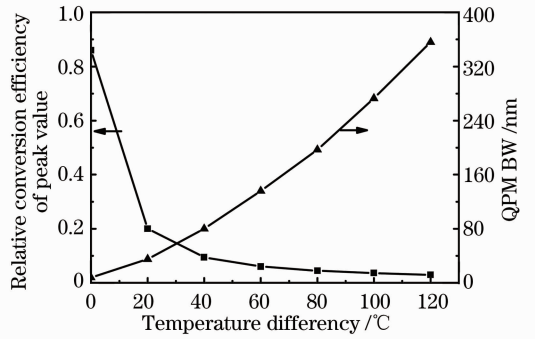


图 7 峰值相对转换效率、QPM 波长接受带宽与温度差间的关系

Fig. 7 Relative conversion efficiency of peak value and idler QPM BW as functions of the temperature gradient  
闲频光 QPM 带已平移至 3.288~3.464 μm 区域。这表明,在保持一定的温度梯度条件下,通过改变晶体初始端的温度还可实现宽带的闲频光 QPM 带位置的平移。

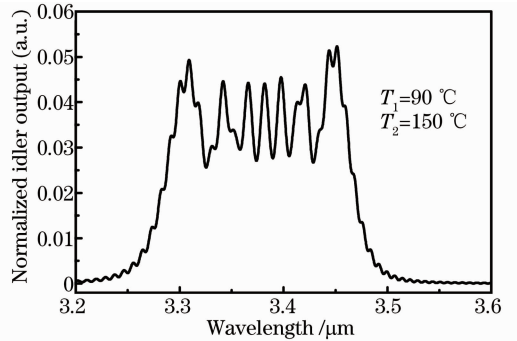


图 8 改变晶体两端的温度值获得的平移的归一化差频输出谱

Fig. 8 Shifted DFG output spectra obtained by changing the temperature at the initial crystal end

## 4 结 论

针对 1060 nm 和 1550 nm 波段基频光源组合,本文提出了一种基于等周期 PPLN 晶体的宽带中红外光源的设计新方案。通过对 PPLN 晶体施行渐变的温度控制,可有效拓宽闲频光/信号光的 QPM BW。理论研究结果显示,对于长度为 50 mm 的 PPLN 晶体,在均匀温度条件下中红外闲频光的 QPM BW 约为 8 nm。固定晶体初始端的温度为 30 °C,当晶体两端的温度差分别设定为 20 °C、40 °C 和 60 °C 时,闲频光的 QPM BW 可分别拓宽至 35 nm、80 nm 和 136 nm。与此同时,在 QPM 带内相对差频转换效率分别降低至 0.2、0.095 和 0.06。当晶体初始端的温度改变为 90 °C,晶体两端的温度差仍保持为 60 °C 时,该宽带的闲频光 QPM 带位置

发生平移,其波长覆盖范围变为  $3.288\sim 3.464\ \mu\text{m}$ 。该新型的差频方案只需采用等周期 PPLN 晶体即可获得宽带的闲频光 QPM 带,且可通过改变晶体两端的温度实现对宽带 QPM 带位置的调控,为设计和研制新型宽带 DFG 光源提供了一种新思路。

### 参 考 文 献

- 1 O Tadanaga, T Yanagawa, Y Nishida, *et al.*. Efficient 3- $\mu\text{m}$  difference frequency generation using direct-bonded quasi-phase-matched LiNbO<sub>3</sub> ridge waveguide[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(6): 1101–1103.
- 2 Wang Liusan, Cao Zhensong, Wang Huan, *et al.*. A widely tunable mid-infrared difference frequency generation laser and its detection of atmospheric water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0414003.  
汪六三, 曹振松, 王欢, 等. 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): 0414003.
- 3 L Ciaffoni, R Grilli, G Hancock, *et al.*. 3.5- $\mu\text{m}$  high-resolution gas sensing employing a LiNbO<sub>3</sub> OPM-DFG waveguide module [J]. *Appl Phys B*, 2009, 94(3): 517–525.
- 4 Yao Wenming, Tan Huiming, Wang fan, *et al.*. Extra-cavity, all-solid-state continuous wave optical parametric oscillator and stimulated Raman scattering in PPMgLN[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1202008.  
姚文明, 檀慧明, 王帆, 等. 外腔全固态连续波 PPMgLN 光学参量振荡器与受激拉曼散射[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1202008.
- 5 Liu Lei, Li Xiao, Xiao Hu, *et al.*. Mid-infrared, singly resonant and continuous-wave optical parametric oscillator pumped by a single-frequency fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0102001.  
刘磊, 李宵, 肖虎, 等. 单频光纤激光器抽运的中红外连续单谐振光学参变振荡器[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0102001.
- 6 Yu Xingyan, Dai Shixun, Zhou Yaxun, *et al.*. Theoretical studies on mid-infrared gain characteristics of erbium-doped chalcogenide glass fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0105003.  
於杏燕, 戴世勋, 周亚训, 等. 掺铒硫系玻璃光纤的中红外增益特性模拟研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0105003.
- 7 F Adler, K C Cossel, M J Thorpe, *et al.*. Phase-stabilized, 1.5 W frequency comb at 2.8~4.8  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(9): 1330–1332.
- 8 F K Tittel, D Richter, A Fried. Mid-infrared laser applications in spectroscopy[J]. *Top Appl Phys*, 2003, 89: 445–516.
- 9 D Richter, D G Lancaster, F K Tittel. Development of an automated diode-laser-based multicomponent gas sensor[J]. *Appl Opt*, 2000, 39(24): 4444–4450.
- 10 J H Chang, Q H Mao, S J Feng, *et al.*. Widely tunable mid-IR difference-frequency generation based on fiber lasers [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(20): 3486–3488.
- 11 Z S Cao, L Han, W G Liang, *et al.*. Broadband difference frequency generation around 4.2  $\mu\text{m}$  at overlapped phase-match conditions[J]. *Opt Commun*, 2008, 281(14): 3878–3881.
- 12 J Jiang, J H Chang, S J Feng, *et al.*. Mid-IR multiwavelength difference frequency generation based on fiber lasers [J]. *Opt Express*, 2010, 18(5): 4740–4747.
- 13 J H Chang, T T Wang, Q H Mao. Widely tunable difference frequency generation around 3.4  $\mu\text{m}$  using index dispersion property of PPLN[J]. *Laser Phys*, 2012, 22(3): 592–597.
- 14 Chang Jianhua, Yang Zhenbo, Lu Zhou, *et al.*. A novel multi-wavelength mid-IR difference frequency generation laser source based on PPLN[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1002009.  
常建华, 杨镇博, 陆洲, 等. 一种新型的基于 PPLN 的多波长中红外激光光源[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1002009.
- 15 D H Jundt. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction,  $n_e$ , in congruent lithium niobate [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(20): 1553–1555.

栏目编辑:张腾