

一种新型的基于 PPLN 的多波长中红外激光光源

常建华 杨镇博 陆 洲 董时超

(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)

摘要 提出了一种新型的基于 PPLN 晶体的多波长中红外差频产生 (DFG) 光源的设计方案。针对 1060 nm 和 1550 nm 两个波段的基频光源组合, 采用晶体的分段温度控制技术获得了具有多峰结构的抽运光/闲频光准相位匹配 (QPM) 调谐曲线。通过改变分段晶体的温度调控抽运光 QPM 峰的位置, 实现中红外多波长 DFG 光源的调谐输出。理论研究结果显示当 PPLN 晶体分成长度相等的两个温度控制段, 且信号光波长设定为 1.58 μm , 分段晶体区间的温度分别设定为 20 $^{\circ}\text{C}$ 和 60 $^{\circ}\text{C}$ 时, 抽运光波长区域存在 4 个 QPM 峰, 对应的中红外闲频光 QPM 峰的中心波长分别位于 2.95, 3.03, 3.75, 3.83 μm 处。当分段晶体区间的温度改变为 50 $^{\circ}\text{C}$ 和 90 $^{\circ}\text{C}$ 时, 相应中红外闲频光 QPM 峰分别平移至 3.01, 3.11, 3.67, 3.77 μm 处。该研究结果可为设计和研制多波长宽调谐中红外 DFG 光源提供参考。

关键词 激光器; 多波长; 差频产生; 准相位匹配

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1002009

A Novel Multi-Wavelength Mid-Infrared Difference Frequency Generation Laser Source Based on PPLN

Chang Jianhua Yang Zhenbo Lu Zhou Dong Shichao

(*Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing,*

Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract A novel difference frequency generation (DFG) scheme for simultaneously achieving multi-wavelength mid-infrared (mid-IR) emissions based on a bulk PPLN crystal is proposed. For the combination of 1060 nm and 1550 nm wavelength band fundamental light sources, multiple pump quasi-phase-matching (QPM) peaks can be obtained by using the segmented temperature controlling techniques on a PPLN chip. Moreover, the multiple pump QPM peaks can be widely tuned by adjusting the segmented crystal temperatures and thus the tunability for the generated multiple mid-IR wavelengths is realized. Our simulated results show that when the PPLN crystal are evenly divided into two sections for temperature controlling, four pump QPM peaks are simultaneously reached, corresponding to the mid-IR idler QPM peaks at 2.95, 3.03, 3.75, 3.83 μm , as the signal wavelength setting at 1.58 μm and the segmented crystal temperatures setting at 20 $^{\circ}\text{C}$ and 60 $^{\circ}\text{C}$, respectively. When the segmented crystal temperatures are adjusted to 50 $^{\circ}\text{C}$ and 90 $^{\circ}\text{C}$, the idler QPM peak positions in the mid-IR DFG output spectrum are changed to 3.01, 3.11, 3.67, 3.77 μm . Such results may provide reference and guidance for design and development of widely tunable multi-wavelength DFG light sources.

Key words lasers; multi-wavelength; difference frequency generation; quasi-phase-matching

OCIS codes 140.3070; 190.4223; 230.7405; 130.3730; 230.0230; 130.3730

1 引 言

大量气体分子在中红外 (mid-IR) 3~5 μm 波段

存在强烈的基频吸收带, 其吸收强度比在近红外波段高 2~3 个数量级。由于此类基频吸收可反映气体的

收稿日期: 2013-04-12; **收到修改稿日期**: 2013-05-20

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、2012 年度国家级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

本征谱学性质,具有指纹特征,因此,基于中红外激光的吸收光谱技术可实现气体种类、浓度等信息的高灵敏度探测,在环境监测、医学诊断、矿产开发等领域具有极其重要的应用^[1-3]。迄今,基于不同激光产生机理出现了多种中红外光源^[4-6],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。但现阶段这些光源仍存在诸如需低温制冷、激光线宽宽、无跳模运转范围小、价格昂贵等问题,在实际应用中存在一定的局限性。另一方面,基于准相位匹配(QPM)技术的中红外差频产生(DFG)激光光源,因具有结构简单、调谐方便、室温运转和无阈值限制等优良特性,受到了广泛关注,已成为当前气体光谱检测应用的主流光源。

近年来,为满足多组分气体或单组分多条特征谱线的同步检测应用需求,如何实现中红外 DFG 光源的多波长运转已成为新的研究热点。由 QPM 差频理论可知,要实现多波长中红外激光的同步输出,其关键是设计具有多峰结构的相位匹配调谐曲线。为此人们提出了采用相位反转序列(PRS)^[7]、非周期的光学超晶格(ASO)^[8]、二阶非线性系数 $\chi^{(2)}$ 的正弦相位调制^[9]和连续相位调制^[10-11]等方法以制备具有多峰结构调谐曲线的差频转换器件。但是,这些方法大多致力于设计和优化新型的晶体畴结构,存在制作难度大、成本高以及相位失配量对器件的制作误差较为敏感等问题。不仅如此,一旦此类器件的晶体畴结构确定以后,QPM 峰的位置随之固定,难以实现中红外激光谱线的宽带调谐。

事实上,差频 QPM 特性不仅受到晶体畴结构的影响,还与晶体的工作温度紧密相关。2010 年,本研究小组针对 1060 nm 和 1550 nm 两个波段的基频光源组合,通过优化 PPLN 晶体的工作温度使抽运光的 QPM 带宽拓宽至 17.5 nm(对应中红外闲频光的 QPM 带宽约 175 nm)。实验中,利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;通过改变 PPLN 晶体的温度,中红外多波长激光谱线还可实现调谐输出^[12]。然而,受

PPLN 晶体的温度色散特性所限,该方案产生的多波长中红外激光谱线只能局限于 3.4 μm 附近带宽约 200 nm 的波长区间,难以获得更大范围的波长调谐输出。为解决这一问题,本文将介绍一种新型的基于 PPLN 晶体的多波长中红外差频产生方案,利用晶体的分段温度控制技术获得具有多峰结构的抽运光 QPM 调谐曲线,通过改变分段晶体的温度调控 QPM 峰的位置,最终实现多波长中红外 DFG 光源的宽带调谐输出。

2 理论模型与数值分析方法

准相位匹配差频的物理过程是指频率分别为 ω_p 、 ω_s 的抽运光和信号光进入周期极化晶体经二阶非线性作用产生频率为 $\omega_i = \omega_p - \omega_s$ 的闲频光。对于 z 切的 PPLN 晶体而言,当抽运光和信号光的偏振方向与晶体光轴平行时,可利用其最大的非线性系数 d_{33} 。在忽略光损耗和二阶以上的高阶非线性效应等因素时,非线性晶体中的差频过程可由下列耦合波方程组描述:

$$\frac{\partial E_s(z)}{\partial z} = -i \frac{\omega_s d_{\text{eff}}}{n_s c} E_i^*(z) E_p(z) \exp(-i\Delta k z), \quad (1a)$$

$$\frac{\partial E_i(z)}{\partial z} = -i \frac{\omega_i d_{\text{eff}}}{n_i c} E_s^*(z) E_p(z) \exp(-i\Delta k z), \quad (1b)$$

$$\frac{\partial E_p(z)}{\partial z} = -i \frac{\omega_p d_{\text{eff}}}{n_p c} E_s(z) E_i(z) \exp(i\Delta k z), \quad (1c)$$

式中 $E_l(z)$ 、 ω_l ($l = p, s, i$) 分别代表抽运光、信号光和闲频光在 z 处的电场强度和各自的光斑半径;晶体的有效非线性系数 $d_{\text{eff}} = 2/\pi \cdot d_{33} \cdot n_l$ ($l = p, s, i$) 表示三个光波在晶体中感受到的折射率; c 和 Δk 分别表示真空中的光速和相位失配量。为获得多个 QPM 峰,将 PPLN 晶体分成 N 个温度控制区间,如图 1 所示。PPLN 晶体的总长度 L 与各分段长度间的关系可表示为

$$L = \sum_{n=1}^N L_n. \quad (2)$$

为简化运算,采用矩阵级联法求解(1)式,其迭代过程为^[13]

$$\begin{pmatrix} E_s(z_n) \\ E_i^*(z_n) \end{pmatrix} = \mathbf{M}_n \begin{pmatrix} E_s(z_{n-1}) \\ E_i^*(z_{n-1}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{n,1} & M_{n,2} \\ M_{n,3}^* & M_{n,1}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_s(z_{n-1}) \\ E_i^*(z_{n-1}) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

矩阵中各元素的表达式为

$$\begin{aligned} M_{n,1} &= [\cosh(g_n L_n) + i\Delta k_n \sinh(g_n L_n)/2g_n] \exp(-i\Delta k_n L_n/2) \\ M_{n,2} &= -i\Gamma_1 \sinh(g_n L_n) \exp[-i\Delta k_n(z_{n-1} + L_n/2)]/g_n \\ M_{n,3} &= -i\Gamma_2 \sinh(g_n L_n) \exp[-i\Delta k_n(z_{n-1} + L_n/2)]/g_n, \end{aligned}$$

其中

$$\Gamma_j = \omega_j d_{\text{eff}} E_p(0) / n_j c \quad (j = s, i),$$

$$g_n = \sqrt{\Gamma_1 \Gamma_2^* - (\Delta k_n / 2)^2},$$

Δk_n 是第 n 分段的相位失配量。矩阵元 $M_{n,3}^*$ 和 $M_{n,1}^*$ 分别为 $M_{n,3}$ 和 $M_{n,1}$ 对应的共轭复数。经一系列的推导,可求得晶体输出端也即坐标 L 处信号光和闲频光的电场强度为

$$\begin{bmatrix} E_s(L) \\ E_i^*(L) \end{bmatrix} = \left(\prod_{n=1}^N M_n \right) \begin{bmatrix} E_s(0) \\ E_i^*(0) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

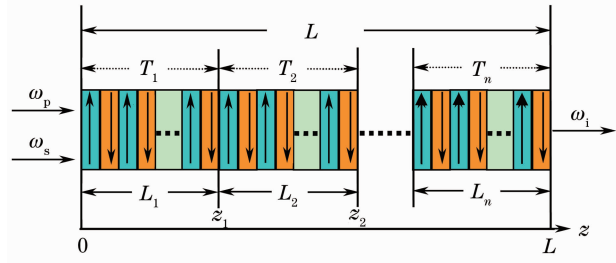


图1 PPLN 晶体分段温度控制结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of segmented temperature control for PPLN

3 结果与分析

针对 1060 nm 和 1550 nm 两波段的基频光源组合,采用矩阵级联算法对分段温度控制 PPLN 晶体中的 QPM 差频特性进行了理论模拟。数值计算过程中采用的参数为: $L=50$ mm;晶体有效非线性系数 d_{eff} 取值为 20.5×10^{-6} $\mu\text{m}/\text{V}$;激光光束功率与场强间的关系为 $P = \epsilon_0 c n |E|^2 / 2$; PPLN 晶体的材料折射率通过文献[14]中的 Sellmeier 方程求得。首先模拟了 PPLN 晶体在均匀温度条件下的差频 QPM 特性。图 2 中给出了当信号光波长和晶体温度分别设定为 $1.58 \mu\text{m}$ 和 20°C 时归一化的中红外 DFG 输出谱。由图 2 可见,此时中红外波段存在两个 QPM 峰,其中

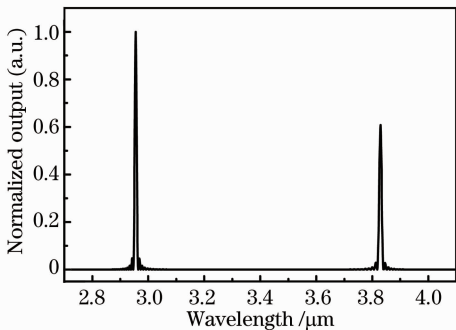


图2 晶体温度为 20°C 时归一化的中红外差频输出谱

Fig.2 Normalized mid-IR DFG output spectrum for crystal temperature of 20°C

心波长分别位于 $2.95 \mu\text{m}$ 和 $3.83 \mu\text{m}$ 处,对应的抽运光 QPM 波长分别为 $1.029 \mu\text{m}$ 和 $1.098 \mu\text{m}$ 。这表明,在该仿真条件下当采用这两个波长的抽运光源与 $1.58 \mu\text{m}$ 的信号光源在 PPLN 晶体中差频时可获得双波长中红外激光的同步输出。进一步的研究结果显示,抽运光(或闲频光)QPM 双峰的位置还随晶体温度的改变而改变。如图 3 所示,当晶体温度升高至 60°C 时,中红外双 QPM 峰的位置分别平移至 $3.03 \mu\text{m}$ 和 $3.75 \mu\text{m}$ 处,对应抽运光 QPM 波长分别为 $1.038 \mu\text{m}$ 和 $1.112 \mu\text{m}$ 。

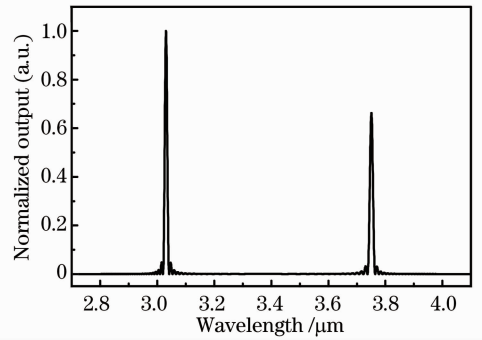


图3 晶体温度为 60°C 时归一化的中红外差频输出谱

Fig.3 Normalized mid-IR DFG output spectrum for the crystal temperature of 60°C

由于 1060 nm 抽运光波段在均匀的晶体温度条件下存在双 QPM 峰,若将晶体分成多个不同温度控制区间则抽运光波段将有望获得更多的 QPM 峰。图 4 给出了信号波长为 $1.58 \mu\text{m}$, PPLN 晶体划分为长度相等的两个温度控制段(20°C 、 60°C)时归一化的中红外 DFG 输出谱。正如之前的分析,由于一个 PPLN 温度控制段对应两个抽运光(闲频光) QPM 峰,中红外输出谱中出现了 4 个 QPM 峰,分别位于 $2.95, 3.03, 3.75, 3.83 \mu\text{m}$ 处,其谱线所处位置与图 2 和图 3 中晶体在均匀温度条件时完全一致。但因中红外闲频光的输出功率与晶体长度的平方成反比关系^[15],因此图 4 中各条谱线的归一化输出幅度只约为均匀温度时对应谱线强度的 25%。当第二个晶体温度控制区间的温度由 60°C 升高至 90°C 时,中红外归一化输出谱如图 5 所示。此时,温度为 90°C 的晶体区域对应的 QPM 双峰已由 $3.03, 3.75 \mu\text{m}$ 处平移至 $3.11, 3.67 \mu\text{m}$ 处。若进一步将第一段晶体温度控制段的温度由 20°C 改变至 50°C ,此时中红外归一化输出谱如图 6 所示,此时中红外 QPM 峰已分别平移至 $3.01, 3.11, 3.67, 3.77 \mu\text{m}$ 处。改变晶体分段区间温度的顺序,图 7 给出了当晶体温度分布为 90°C 和 50°C 时计算得到

的中红外归一化输出谱。由图 7 可见,此时中红外 QPM 峰的位置并没有发生变化,这表明中红外谱线位置只与分段晶体的温度相关而与晶体温度分布的先后顺序无关。

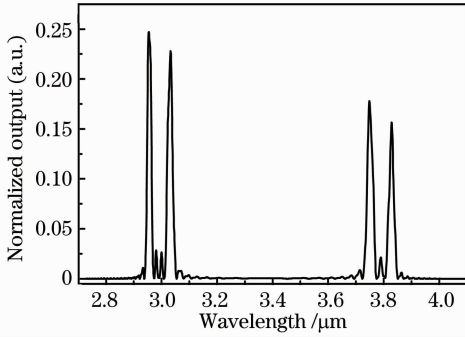


图 4 晶体温度分布为 20 °C 和 60 °C 时归一化的中红外差频输出谱

Fig. 4 Normalized mid-IR DFG output spectrum for crystal temperature distribution of 20 °C and 60 °C

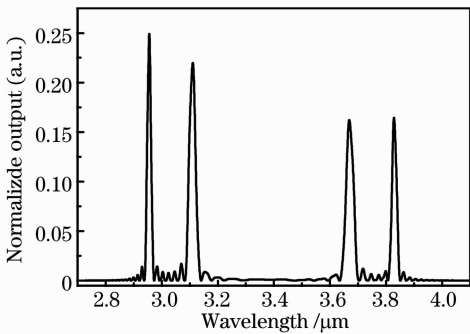


图 5 晶体温度分布为 20 °C 和 90 °C 时归一化的中红外差频输出谱

Fig. 5 Normalized mid-IR DFG output spectrum for crystal temperature distribution of 20 °C and 90 °C

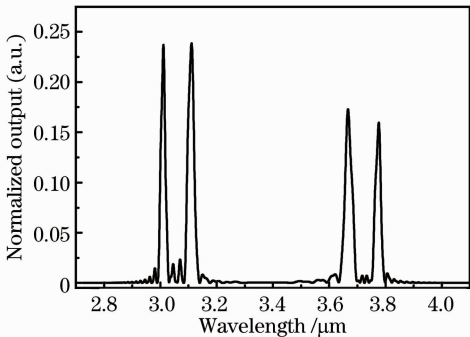


图 6 晶体温度分布为 50 °C 和 90 °C 时归一化的中红外差频输出谱

Fig. 6 Normalized mid-IR DFG output spectrum for crystal temperature distribution of 50 °C and 90 °C

由图 4~6 可知,当晶体温度逐渐升高时,中红外闲频光 QPM 双峰逐渐向中心靠拢。当 PPLN 晶

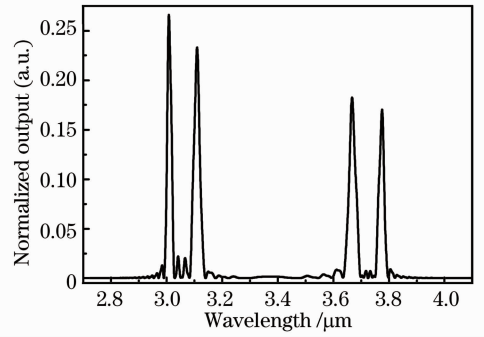


图 7 晶体温度分布为 90 °C 和 50 °C 时归一化的中红外差频输出谱

Fig. 7 Normalized mid-IR DFG output spectrum for crystal temperature distribution of 90 °C and 50 °C

体温度分布设定为 20 °C, 128.3 °C 时,图 8 给出了中红外 DFG 的归一化输出谱线。此时,128.3 °C 的晶体温度控制区间对应的闲频光双 QPM 峰已完全重合形成一宽的 QPM 带(3.26~3.51 μm),对应的 QPM 抽运光波长范围为 1.064~1.089 μm。结果表明,波长处于该范围内的抽运光均可获得有效的差频输出,采用该波段的多波长激光器与单波长信号光源差频可获得多波长中红外激光同步输出,这已被前期的研究结果所证实^[12]。

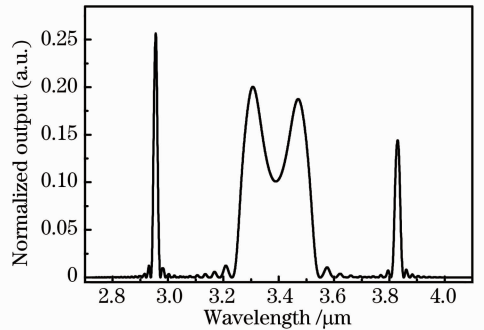


图 8 晶体温度分布为 20 °C 和 128.3 °C 时归一化的中红外差频输出谱

Fig. 8 Normalized mid-IR DFG output spectrum for crystal temperature distribution of 20 °C and 128.3 °C

此外,模拟结果显示中红外闲频光 QPM 峰的覆盖范围随固定的信号光波长变化而变化。图 9 为信号光波长固定为 1.60 μm,晶体温度设置为 20 °C 时的中红外 DFG 的归一化输出谱线。此时闲频光 QPM 双峰的位置分别位于 2.85 μm 和 3.92 μm 处,中红外谱线的覆盖范围较信号光波长固定为 1.58 μm 时有了较大提高。这表明,中红外 DFG 的波长覆盖范围与固定的信号光波长密切相关,信号光波长愈长中红外覆盖范围愈大。

由上述模拟结果不难看出,若将 PPLN 晶体分

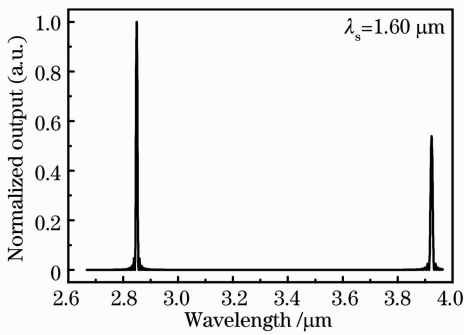


图9 信号光波长为 $1.60 \mu\text{m}$ ，晶体温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时归一化的中红外差频输出谱

Fig. 9 Normalized mid-IR DFG output spectrum for crystal temperature distribution of $20 \text{ }^\circ\text{C}$ when signal wavelength is set at $1.60 \mu\text{m}$

成3个温度控制段，则中红外DFG光源可同步输出6条激光谱线。以此类推，若需差频输出 $2N$ 条中红外激光谱线，只需将晶体分成 N 个温度控制区域。不仅如此，通过优化晶体温度使QPM双峰处于重叠位置时，采用多波长抽运光光源与单波长信号光差频可获得更多激光谱线的同步输出。

4 结 论

针对 1060 nm 和 1550 nm 波段基频光源组合，首次提出了一种新型的多波长中红外差频产生方案。基于 PPLN 晶体的温度色散特性，通过对晶体实行分段的温度控制获得了具有多峰结构的抽运光/闲频光 QPM 调谐曲线。通过改变分段晶体的温度实现对 QPM 峰位置的调控，进而获得多波长中红外 DFG 光源的大范围调谐输出。理论研究结果显示当 PPLN 晶体分成长度相等的两个温度控制段时，在信号光波长固定为 $1.58 \mu\text{m}$ 、晶体温度分布为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，抽运光波长区域存在 4 个 QPM 峰，对应的中红外闲频光 QPM 峰的中心波长分别位于 $2.95, 3.03, 3.75, 3.83 \mu\text{m}$ 处。当 PPLN 晶体温度分布改变为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，对应的中红外闲频光 QPM 峰分别平移至 $3.01, 3.11, 3.67, 3.77 \mu\text{m}$ 处。研究结果还表明，抽运光/闲频光 QPM 峰的位置不随分段晶体设定温度的前后顺序改变而改变。当 PPLN 晶体温度分布设定为 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，4 个 QPM 峰的位置依然处于 $3.01, 3.11, 3.67, 3.77 \mu\text{m}$ 处。不仅如此，当其中一个分段晶体的温度处于某一优化温度时，抽运光/闲频光对应的双 QPM 峰会发生重叠进而形成一宽带的 QPM 带。利用该新型的差频方案，当 PPLN 晶体

分成 N 个温度控制区间时，理论上可获得 $2N$ 个抽运光/闲频光 QPM 峰，并且通过改变分段晶体的温度可实现 QPM 峰位置的平移，解决了现有方法中红外多波长激光谱线难以大范围调谐输出的问题。

参 考 文 献

- 1 K P Petrov, R F Curl, F K Tittel. Compact laser difference frequency spectrometer for multicomponent trace gas detection [J]. Appl Phys B, 1998, 66(5): 531–538.
- 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.*. $3.5\text{-}\mu\text{m}$ high-resolution gas sensing employing a LiNbO_3 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 M H Chou, K R Parameswaran, M M Fejer, *et al.*. Multiple-channel wavelength conversion by use of engineered quasi-phase-matching structures in LiNbO_3 waveguides[J]. Opt Lett, 1999, 24(16): 1157–1159.
- 8 Y W Lee, F C Fan, Y C Huang, *et al.*. Nonlinear multiwavelength conversion based on an aperiodic optical superlattice in lithium niobate[J]. Opt Lett, 2002, 27(24): 2191–2193.
- 9 O Bang, B Clausen, P L Christiansen, *et al.*. Engineering competing nonlinearities [J]. Opt Lett, 1999, 24(20): 1413–1415.
- 10 M Asobe, O Tadanaga, H Miyazawa, *et al.*. Multiple quasi-phase-matched device using continuous phase modulation of $\chi^{(2)}$ grating and its application to variable wavelength conversion[J]. IEEE J Quantum Electron, 2005, 41(12): 1540–1547.
- 11 M Asobe, O Tadanaga, T Umeki, *et al.*. Unequally spaced multiple mid-infrared wavelength generation using an engineered quasi-phase-matching device [J]. Opt Lett, 2007, 32(23): 3388–3390.
- 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 X M Liu, H Y Zhang, Y L Guo, *et al.*. Optimal design and applications for quasi-phase-matching three-wave mixing [J].

- IEEE J Quantum Electron, 2002, 38(9): 1225–1233.
- 14 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.
- 15 J H Chang, Q H Mao, S J Feng, *et al.*. Theoretical and experimental investigations of the mid-IR DFG tuning property based on fiber laser fundamental lights[J]. Appl Phys B, 2011, 104(4): 851–859.

栏目编辑:宋梅梅