

文章编号: 0253-2239(2007)10-1807-5

光纤型宽带可调连续波差频产生中红外激光器^{*}

李晓芹 蒋 建 王执山 冯素娟 毛庆和

(中国科学院安徽光学精密机械研究所激光技术研究中心, 合肥 230031)

摘要: 报道一种新型光纤化宽带可调连续波中红外激光器系统, 该激光系统采用准相位匹配(QPM)的差频产生(DFG)技术, 非线性晶体为多周期的周期性极化掺镁铌酸锂晶体(PPMgLN), 掺镱光纤激光器(YDFL)用作抽运光源, 可调激光器经掺铒光纤放大器(EDFA)功率提升后作为信号光源。利用建立的准相位匹配-差频产生系统, 获得了连续波中红外差频光输出; 实验发现, 温度导致相位失谐的半峰全宽(FWHM)为 4.5 °C; 通过优化选择晶体周期, 并结合调节信号光波长和控制温度, 该准相位匹配-差频产生系统可在 3.1~3.6 μm 内连续调谐。

关键词: 非线性光学; 差频发生; 准相位匹配; 周期极化掺镁铌酸锂晶体; 光纤激光器; 光纤放大器

中图分类号: TN252 文献标识码: A

Widely Tunable Continuous-Wave Mid-IR Difference-Frequency Generation Source with Fiber Laser and Amplifier

Li Xiaoqin Jiang Jian Wang Zhishan Feng Sujuan Mao Qinghe

(Laser Technology Research Center, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: A novel fiber-type widely tunable continuous-wave Mid-IR laser source was present and demonstrated. The Mid-IR laser system was based on the difference-frequency generation (DFG) and the quasi-phase-matched (QPM) techniques. The nonlinear crystal used is a periodically poled MgO-doped LiNbO₃ (PPMgLN) crystal with multiple-periods structure. An ytterbium-doped fiber laser and a tunable laser cascaded with an erbium-doped fiber amplifier (EDFA) were used as the pump and the signal sources for the DFG process, respectively. With such a fiber-type QPM-DFG system, the continuous-wave Mid-IR radiation was obtained. It was found that the FWHM of the phase mismatching due to the temperature was about 4.5 °C. By suitable choosing the crystal period combined with controlling the temperature and the wavelength of signal, Mid-IR radiation with continuously tuning range between 3.1 to 3.6 μm has been achieved with the system.

Key words: nonlinear optics; difference-frequency generation; quasi-phase-matched; periodically poled MgO-doped LiNbO₃ crystal (PPMgLN); fiber laser; fiber amplifier

1 引 言

光波与物质之间的相互作用可以反映物质微观结构和宏观特性规律, 在工农业生产、医学诊断、矿床开发、食品安全、过程控制、环境治理、空间探测以及国防军工等领域都具有重要的应用^[1~2]。中红外波段集中了大量气体分子的基带吸收线, 吸收强度

比近红外波段大 2~3 个数量级, 且主要为分子的振转光谱区, 谱线非常密集。因此, 研制连续波单频可调中红外激光源以满足于上述应用要求非常重要。中红外激光源主要有量子级联激光器、铅盐激光器、色心激光器和光学参变振荡器等^[3,4]。但是, 这些光源在实际应用中都存在不足, 如铅盐激光器和量

^{*} 国家自然科学基金(60677050)、中国科学院“百人计划”和国家 973 计划(2007CB936603)资助课题。

作者简介: 李晓芹(1982-), 女, 河南人, 硕士研究生, 主要从事差频产生中红外光纤激光技术方面的研究。

E-mail: fiber_optics@aiofm. ac. cn

导师简介: 毛庆和(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光纤光学、激光物理与光纤激光器件等方面的研究。

E-mail: mqinghe@aiofm. ac. cn

收稿日期: 2006-12-13; 收到修改稿日期: 2007-03-06

子级联激光器需要低温制冷,光学参变振荡器为阈值器件,且单频控制有待提高等。基于差频产生(DFG)的中红外激光系统具有可在室温下连续工作、无阈值限制、线宽窄、调谐范围大、调谐方便等一系列优点^[5,6]。特别是随着各种新型周期性极化非线性晶体^[7,8]及其准相位匹配(QPM)技术的应用,基于差频产生技术的中红外激光器进展迅速,已成为单频连续波中红外激光器的主流技术。但是,目前的差频产生中红外激光器均由分离光器件构成,抽运源大多为固体激光器^[1,9],存在着系统复杂、体积笨重、效率低、功耗大、稳定性可靠性差、不易维护、仅适合于实验室使用等问题,这大大制约了该类光源的实际应用。正因为如此,人们近来开始将光纤技术应用于差频产生中红外调谐半导体激光光谱(TDLAS)技术,但由于这类技术主要是采用温度对半导体激光器的波长进行调制,从而使得中红外激光输出的波长调谐范围仅在几纳米以内^[10,11]。

本文报道一种光纤型宽带可调连续波差频产生中红外激光器,采用掺镱光纤激光器(YDFL)作为抽运光源,可调激光器经掺铒光纤放大器(EDFA)进行功率提升后作为信号光源,通过掺镁的周期性极化铌酸锂(PPMgLN)晶体,经准相位匹配技术,实现了 $3.1\sim 3.6\ \mu\text{m}$ 连续可调的中红外激光输出。由于采用光纤激光器/放大器作为抽运光源和信号光源,不仅大大地降低了成本,而且稀土玻璃掺杂光纤的宽带增益特性将使差频产生激光器更便于宽带调谐,而随着高功率光纤激光器件的成熟,差频产生激光器的输出功率也将会大幅提升,特别重要的是,该差频产生型中红外激光器运用了光纤器件,从而具有结构简单、小型轻便、系统损耗低、单模工作、效率高、功耗低、稳定性可靠性好、不受应用场合限制等优点。

2 差频产生中红外激光器的结构

图1是光纤型中红外差频产生系统的结构示意图。差频产生系统的抽运光源为一自制的线形腔掺镱光纤激光器(YDFL),其谐振腔由萨尼亚克(Sagnac)光纤环镜和光纤布拉格光栅(FBG)构成,其中心波长、反射比和半峰全宽分别为 $1065\ \text{nm}$ 、 93% 和 $0.1\ \text{nm}$,所用掺铒光纤(YDF)在 $975\ \text{nm}$ 处的吸收系数为 $199\ \text{dB/m}$,长度为 $5\ \text{m}$,分光比为 $70:30$ 的光耦合器提供激光输出,最大输出功率可达 $61\ \text{mW}$,该掺镱光纤激光器所用无源光纤均为HI1060 Flex型光纤。差频产生系统的信号源由可

调激光器再经掺铒光纤放大器进行功率提升构成,可调激光器为Agilent 8164B,波长调谐范围覆盖C和L波段($1520\sim 1630\ \text{nm}$),输出功率达 $10\ \text{mW}$ 。自制的掺铒光纤放大器采用双向抽运,前后向分别采用 $980\ \text{nm}$ 和 $1480\ \text{nm}$ 激光二极管抽运以同时获得低噪声和高输出功率特性,所用掺铒光纤(EDF)在 $1532\ \text{nm}$ 处吸收系数为 $7.2\ \text{dB/m}$,长度为 $48\ \text{m}$,增益峰处于 $1562\ \text{nm}$ 附近,最大输出功率可达 $220\ \text{mW}$,该信号源部分所用光纤均为G652光纤。差频产生系统的抽运光和信号光由两只光纤型偏振控制器(PC)分别调控其偏振状态,再由一只 $1060\ \text{nm}/1550\ \text{nm}$ 波分复用耦合器(WDM)合波,波分复用耦合器在 $1550\ \text{nm}$ 和 $1060\ \text{nm}$ 处的工作带宽均为 $\pm 20\ \text{nm}$ 、插入损耗分别为 $0.5\ \text{dB}$ 和 $0.7\ \text{dB}$ 。经波分复用耦合器合波后的抽运光和信号光经光纤型准直器准直,再由焦距为 $33\ \text{mm}$ 的消色差透镜 L_1 耦合进入非线性晶体,非线性晶体为周期性极化掺Mg铌酸锂(PPMgLN)晶体,相比于普通PPLN,PPMgLN具有更好的抗光折射能力、更高的光损伤阈值和更大的二阶非线性光学系数(d_{33})^[12]。该PPMgLN的透光范围为 $0.25\sim 5\ \mu\text{m}$,为多周期结构,由7个不同周期的PPMgLN叠合而成,周期依次分别为 $28.5\ \mu\text{m}$ 、然后相差 $0.5\ \mu\text{m}$ 直到 $31.5\ \mu\text{m}$,每个周期的几何尺寸相同,均为 $50\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$,且输入和输出端分别镀有近红外和中红外增透膜,以减小抽运光和信号光的反射、便于差频光输出。PPMgLN晶体放置在特制的温控炉内,以便于温度调谐,温控炉温度调节范围为 $0\sim 200\ ^\circ\text{C}$ 、控制精度优于 $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}$ 。为便于光路调整,温控炉固定在特制的调整平台上。PPMgLN晶体的输出端经截止波长为 $2.5\ \mu\text{m}$ 的长通滤波片滤除剩余近红外的抽运光和信号光,再经焦距为 $100\ \text{mm}$ 的 CaF_2 透镜 L_2 准直输出。

在图1所示的差频产生系统中,考虑到差频产生过程的转换效率随相互作用距离的增加而增大,选定的PPMgLN晶体长度达 $50\ \text{mm}$ 。但是,任一周期晶体的厚度仅为 $1\ \text{mm}$,这就要求对抽运光和信号光的光束质量进行有效地准直和聚焦,以保证抽运光和信号光在 $50\ \text{mm}$ 的长度内能很好地重叠,同时光斑能被限制在同一周期的PPMgLN晶体内。为此,系统调试时,对抽运光和信号光的光束质量分别用光束质量分析系统进行了测试,发现由光纤准直器输出的抽运光和信号光的光斑直径均约为 $1.2\ \text{mm}$,经焦距为 $33\ \text{mm}$ 的透镜 L_1 会聚后,抽运

光和信号光的光斑直径在束腰处分别为 $57.4 \mu\text{m}$ 和 $56 \mu\text{m}$, 且功率分布曲线与标准高斯分布的符合度分别达 95.1% 和 97% , 图 2 为相应的测试结果; 而在距离焦点后 30 mm 处, 抽运光和信号光的光斑直径分别为 $1001 \mu\text{m}$ 和 $947 \mu\text{m}$, 可见, 聚焦系统保证了抽运光和信号光在晶体长度范围内能够很好地重叠、且光斑能被限制在同一周期的 PPMgLN 晶体

中。另一方面, 由于 PPMgLN 晶体的 d_{33} 远大于其他的二阶非线性光学系数^[13], 因此, 为提高转换效率, 必须利用最大非线性系数, 即抽运光和信号光的偏振方向必须平行于晶体的光轴, 为此, 系统中接入了光纤型偏振控制器以调节抽运光和信号光的偏振态。

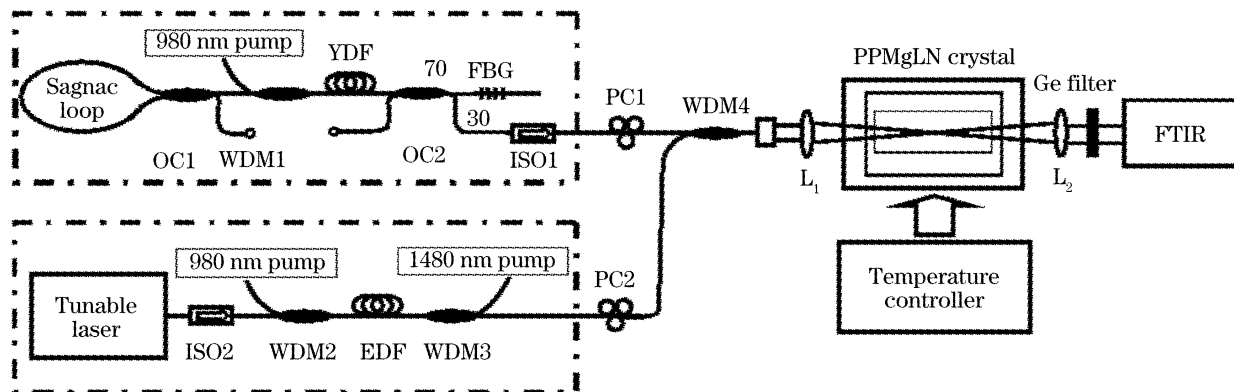


图 1 差频产生中红外激光器结构系统示意图。OC1: 3 dB 光纤耦合器; OC2: 70:30 光纤耦合器; ISO1: 1060 nm 隔离器; ISO2: 1550 nm 隔离器; WDM1: 980 nm/1060 nm 波分复用耦合器; WDM2: 980 nm/1550 nm 波分复用耦合器; WDM3: 1480 nm/1550 nm 波分复用耦合器; WDM4: 1060 nm/1550 nm 波分复用耦合器; PC1: 1060 nm 光纤型偏振控制器; PC2: 1550 nm 光纤型偏振控制器; L₁: 消色差透镜; L₂: CaF₂ 透镜; FTIR: 红外傅里叶变换光谱仪

Fig. 1 Schematic configuration of the DFG source. OC1: 3 dB optical fiber coupler; OC2: 70:30 optical fiber coupler; ISO1: 1060 nm Isolator; ISO2: 1550 nm Isolator; WDM1: 980 nm/1060 nm wavelength-division-multiplexing coupler; WDM2: 980 nm/1550 nm wavelength-division-multiplexing coupler; WDM3: 1480 nm/1550 nm wavelength-division-multiplexing coupler; WDM4: 1060 nm/1550 nm wavelength-division-multiplexing coupler; PC1: 1060 nm polarization controller; PC2: 1550 nm polarization controller; L₁: achromatic lens; L₂: CaF₂ lens; FTIR: infrared Fourier transformation optical spectrometer

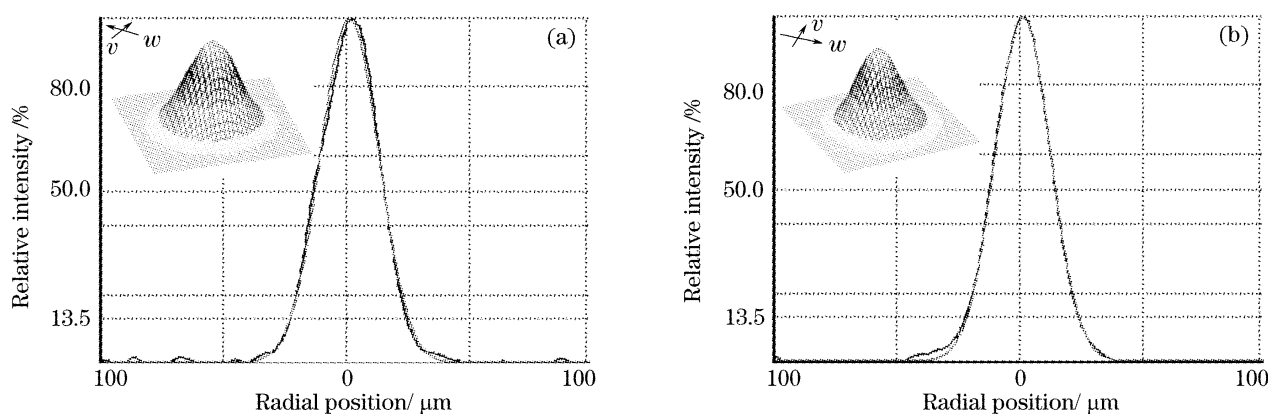


图 2 测得的聚焦透镜焦点处的光斑。(a) 1065 nm 抽运光, (b) 1550 nm 信号光

Fig. 2 Measured spots at the focus of the lens for the beams. (a) 1065 nm pump light, (b) 1550 nm signal light

3 测试结果

实验首先将抽运光源和信号光源的波长分别固定为 1065 nm 和 1562 nm , 抽运光功率为 61 mW , 由掺铒光纤放大器输出的信号光功率为 220 mW , 这时, 对应的消色差透镜后的功率分别为 31.7 mW

和 161 mW 。根据抽运光和信号光波长, 考虑到温控炉的温度控制范围为 $0 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$, 故选定差频产生过程的 PPMgLN 周期为 $30 \mu\text{m}$, 并通过调整固定晶体的调整平台保证抽运光和信号光被限定在该周期的 1 mm 厚的晶体。在此基础上, 调节两光纤型偏

振控制器使抽运光与信号光在晶体内的偏振方向平行于晶体的光轴,并辅以温度调节,获得了差频产生中红外激光输出。图 3 给出了温度控制在 82.3 °C 时由红外傅里叶变换光谱仪 (FTIR) 测得的激光输出谱,由图可见,输出激光的波数为 2988 cm⁻¹,对应的波长为 3.35 μm,这与由 1065 nm 和 1562 nm 的抽运光和信号光所对应的差频产生理论波长一致。

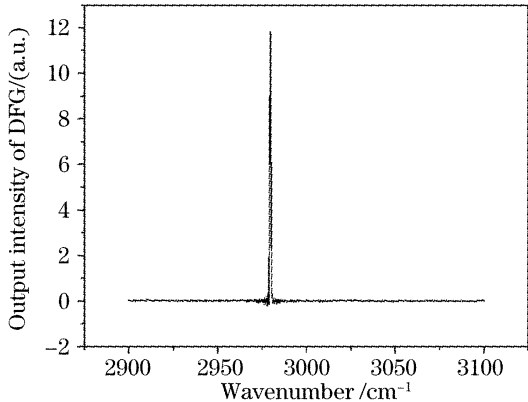


图 3 抽运光源和信号光源波长分别为 1065 nm 和 1562 nm 时测得的差频产生输出光谱

Fig. 3 Measured output spectrum of the difference-frequency generation system with pump and signal wavelengths of 1065 nm and 1562 nm respectively

对于图 3 所示的输出差频光,在其他条件不变的情况下,实验研究了 PPMgLN 控制温度对差频产生激光输出功率的影响,测量结果如图 4 所示。由图可见,当晶体的温度控制在 82.3 °C 时,差频产生输出功率最大,当控制温度偏离 82.3 °C 时,差频产生转换效率下降,当差频产生输出功率下降到最佳匹配温度 (82.3 °C) 的输出功率一半时所对应的温度范围 (FWHM) 约为 4.5 °C。事实上,当温度改变时,晶体的周期常量和折射率都将发生变化,从而影响相位匹配条件。但是,考虑到 PPMgLN 的热

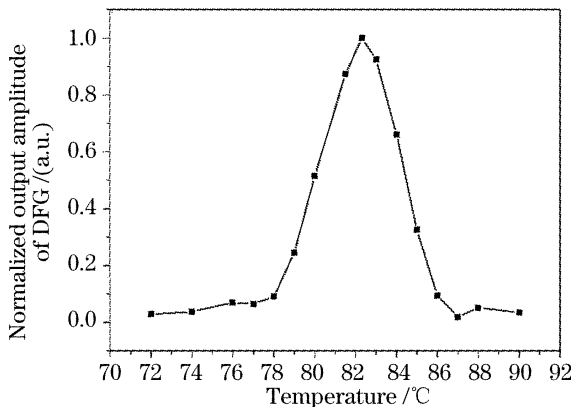


图 4 归一化差频光输出功率随温度的变化关系

Fig. 4 Normalized output of the difference-frequency generation (DFG) system as a function of the temperature

膨胀系数仅约为 2×10^{-6} ,在 4.5 °C 的温度范围内对 30 μm 的周期常量影响极小,而根据文献 [14],晶体的折射率具有很强的温度依赖性,因此,这种温度引起的相位失谐主要是由晶体的折射率随温度变化导致的相位失配所造成。实验中,我们还通过改变信号光波长,并选用 29.5 μm 周期常量的晶体产生差频光,实验研究了差频光输出功率随晶体温度的变化关系,结果发现,半峰全宽也约为 4.5 °C,表明这种差频光输出功率随温度的变化关系受晶体周期常量的影响并不明显。

对于固定的抽运光和信号光波长,当选定 PPMgLN 周期常量后,若晶体温度偏离最佳匹配温度,差频产生过程将产生相位失配,输出功率下降,但是,这种由温度引起的相位失配却提供了一种差频产生输出波长的连续调谐方式。利用图 1 所示的系统,将抽运光源的波长固定于 1065 nm,并将信号光波长通过可调激光器在 1520~1630 nm 内连续调谐,通过优化选择晶体的周期,辅以温度调谐,实现了差频产生中红外激光的连续调谐。实验中所用晶体周期为 29.5 μm 和 30 μm,温度调节范围为 45 °C~163 °C。图 5 为由红外傅里叶变换光谱仪记录的中红外激光调谐输出结果,由图 5 可见,中红外激光的调谐范围为 3185~3530 nm (波数为 3139.88~2832.74 cm⁻¹),对应的调谐宽度为 345 nm。由图 5 还可看出,当差频光波数为 2988 cm⁻¹ (波长为 3.35 μm) 时,输出功率最大,而当差频光的波数偏离 2988 cm⁻¹ 时,输出功率明显下降,且波数大于该值的输出功率比小于该值时的输出功率下降得多,这是由于 2988 cm⁻¹ 的差频光所对应的信号光波长为 1562 nm,正处在掺铒光纤放大器的增益谱的峰值,掺铒光纤放大器输出的信

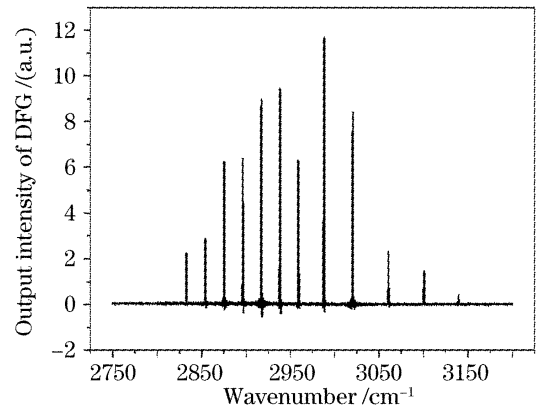


图 5 差频光波长的调谐特性

Fig. 5 Wavelength tuning output property of the difference-frequency generation system

号光功率最大,而差频光功率与抽运光和信号光功率的乘积成正比,使得 2988 cm^{-1} 处的输出功率最大,而当差频光波数小(大)于 2988 cm^{-1} 时,对应的信号光波长变短(长),由于所用掺铒光纤放大器的 L 波段增益低于 C 波段增益,从而使得差频光波数大于 2988 cm^{-1} 时的输出功率比小于该值时的输出功率下降得多,若均衡掺铒光纤放大器的增益谱,可望使差频产生激光输出平坦化。值得注意的是,若图 1 中的可调激光器(Agilent8164B)替换成可调光纤激光器,如文献[15],整个差频产生系统可望全光纤化,若抽运光源也采用可调光纤激光器,差频光的可调范围将会进一步扩展;另外,由于差频输出是经滤波准直后由红外傅里叶变换光谱仪检测,本次实验未标定差频光的绝对光功率,但这并不影响本文所得的结果。

4 结 论

利用掺铒光纤激光器作为抽运光源、可调激光器经掺铒光纤放大器功率提升后作为信号光源,设计并建立了基于多周期 PPMgLN 的全光纤准相位匹配-差频产生中红外激光系统。利用该激光系统,获得了连续波中红外差频激光输出,通过优化选择晶体周期,并结合温度调节,在 $3.1\sim 3.6\text{ }\mu\text{m}$ 内实现了对差频光连续调谐。由于该差频产生型中红外激光系统运用了光纤器件,从而具有结构简单、小型轻便、系统损耗低、单模工作、效率高功耗低、稳定性可靠性好、不受应用场合限制等优点。不仅如此,若信号光源采用光纤激光器,整个差频产生系统可望全光纤化,若抽运光源也采用可调光纤激光器,差频光的可调范围将会进一步扩展。

参 考 文 献

- 1 Y. Mine, N. Melander, D. Richter *et al.*. Detection of formaldehyde using mid-infrared difference frequency generation [J]. *Appl. Phys. B*, 1997, **65**: 771~774
- 2 K. P. Petrov, R. F. Curl, F. K. Tittel *et al.*. Compact laser difference-frequency generation spectrometer for multi-component trace gas detection[J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **66**: 531~538
- 3 Zhang Baigang, Yao Jianquan, Ding Xin *et al.*. Continuously

- tunable optical parametric oscillator based on multi-grating periodically poled lithium niobate[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(8): 897~902 (in Chinese)
- 张百钢,姚建铨,丁欣等. 连续调谐输出的多周期极化铌酸锂晶体光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 897~902
- 4 Federico Capasso, Roberto Paiella, Rainer Martini *et al.*. Quantum cascade lasers: Ultrahigh-speed operation, optical wireless communication, narrow linewidth, and far-infrared emission[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **38**(6): 511~532
- 5 Hiroaki Ashizawa, Shinobu Ohara, Shigeru Yamaguchi *et al.*. Performance characteristics of narrow linewidth fiber laser pumped mid-IR difference frequency mixing light source for methane detection[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, **42**: 1263~1267
- 6 S. Stry, P. Hering, M. Murtz. Portable difference-frequency laser-based cavity leak-out spectrometer for trace-gas analysis [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**: 297~303
- 7 Baigang Zhang, Jianquan Yao, Hao Zhang *et al.*. Angle-tuned signal-resonated optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(6): 346~349
- 8 Chen YunLin, Xu Jingjun, Song Feng *et al.*. Study on technology of periodic poling bulk LiNbO₃ by applying external field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5): 618~620 (in Chinese)
- 陈云琳,许京军,宋峰等. 外加电场极化法制备 LiNbO₃ 周期性畴反转的工艺研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(5): 618~620
- 9 K. P. Petrov, L. Goldberg, W. K. Burns *et al.*. Detection of CO in air by diode-pumped $4.6\text{ }\mu\text{m}$ difference frequency generation in quasi-phase-matched LiNbO₃ [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(1): 86~88
- 10 D. Richter, P. Weibring. Ultra-high precision mid-IR spectrometer I: design and analysis of an optical fiber pumped difference-frequency generation source [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **82**: 479~486
- 11 P. Weibring, D. Richter, A. Fried *et al.*. Ultra-high-precision mid-IR spectrometer II: system description and spectroscopic performance[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **85**: 207~218
- 12 David E. Zelmon, David L. Small, Dieter Jundt. Infrared corrected Sellmeier coefficients for congruently grown lithium niobate and 5 mol. magnesium oxide lithium niobate[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(12): 3319~3322
- 13 Martin M. Fejer, G. A. Magel, Dieter H. Jundt *et al.*. Quasi-phase-matched second harmonic generation: tuning and tolerances[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(11): 2631~2654
- 14 Dieter H. Jundi. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction, n_e , in congruent lithium niobate[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(20): 1553~1555
- 15 Qinghe Mao, John W. Y. Lit. Widely tunable L-band erbium-doped fiber laser with fiber Bragg gratings based on optical bistability[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(9): 1335~1337