

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

刘磊 李霄 肖虎 许晓军 姜宗福

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 报道了采用自行研制的全光纤主振荡功率放大(MOPA)结构 1064 nm 单频 Yb 光纤激光器抽运掺氧化镁的周期性极化铌酸锂(PPMgLN)晶体实现 3.81 μm 输出的中红外连续波(cw)单谐振光学参变振荡器(OPO)。单谐振 OPO 通过 $e \rightarrow e+e$ 相位匹配,基于 50 mm 长,28.5~31.5 μm 多周期的 PPMgLN 晶体(MgO 掺杂摩尔分数为 5%),选用其中 29.5 μm 的周期,采用了两镜线性腔结构。在 30 $^{\circ}\text{C}$ 的工作温度下,通过 49 W 的线偏振激光抽运,获得了最大功率 4.25 W,波长为 3.81 μm 的闲频光输出,抽运阈值为 5 W,其对应量子转换效率为 31.1%。实验还通过改变 PPMgLN 晶体的工作温度 21 $^{\circ}\text{C}$ ~170 $^{\circ}\text{C}$,获得了中红外波长 3.65~3.82 μm 激光输出,测量了相应 OPO 的输出光谱。通过对比实验所测得中红外光输出波长与两组不同的理论计算结果,发现当晶体工作温度大于 110 $^{\circ}\text{C}$ 后,实验测量结果与理论计算结果有一定的偏差,这和实验中晶体在高温区控温精度有一定的关系。

关键词 非线性光学;光学参变振荡器;光纤激光器;中红外;周期性极化铌酸锂晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0102001

Mid-Infrared, Singly Resonant and Continuous-Wave Optical Parametric Oscillator Pumped by a Single-Frequency Fiber Laser

Liu Lei Li Xiao Xiao Hu Xu Xiaojun Jiang Zongfu

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A continuous-wave (cw) singly resonant optical parametric oscillator (OPO) with the wavelength of 3.81 μm is obtained by pumping the periodically poled MgO:LiNbO₃ (PPMgLN) crystal with a homemade Yb single-mode fiber laser at 1064 nm. The laser uses the all optical master oscillator power amplifier (MOPA) structure. The cw singly resonant OPO used the $e \rightarrow e+e$ phase matching in crystal. The PPMgLN is 50 mm long and the period is from 28.5 μm to 31.5 μm . The cavity is formed of two mirror linear structure. Pumped by the 49 W linear polarized light field at 30 $^{\circ}\text{C}$, the idler light 3.81 μm is obtained. Its maximum power can reach 4.25 W. The threshold value of the pumping laser power is 5 W, corresponding to the output efficiency of 31.1%. When the temperature of the PPMgLN is changed from 21 $^{\circ}\text{C}$ to 170 $^{\circ}\text{C}$, the wavelength of the output laser changes from 3.65 μm to 3.82 μm . And the corresponding spectrum of OPO is measured. The experiment results are different from the theoretical results when the temperature of the PPMgLN exceeds 110 $^{\circ}\text{C}$.

Key words nonlinear optics; optical parametric oscillator; fiber laser; mid-infrared; periodically poled MgO:LiNbO₃ crystal

OCIS codes 190.4970; 140.3070; 140.3580

1 引 言

从 1965 年 Giordmaine 等^[1]第一次实现光学参

变振荡器(OPO)以来,高转换效率、宽调谐范围的 OPO 已经成为获得中红外激光光源最有效的方式

收稿日期: 2011-07-27; 收到修改稿日期: 2011-09-22

作者简介: 刘磊(1981—),男,博士研究生,主要从事中红外光学参变振荡器方面的研究。E-mail: llwm0319@163.com

导师简介: 姜宗福(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光器技术和气动光学等方面的研究。

E-mail: jiangzongfu28@163.com

之一。作为 OPO 的一种,单谐振 OPO 由于其非常好的稳定性而得到了广泛的关注。1962 年 Armgtrong 等^[2]提出了准相位匹配(QPM)的概念。采用 QPM 的掺 MgO 周期性极化铌酸锂(PPMgLN),具有高增益、低阈值、高效率等优点,成为实现 QPM OPO 最常见的铁电材料。2005 年,日本 H. Ishizuki 小组^[3]研制出了 5 mm 厚的 PPMgLN 晶体,代表了当今世界最高水平。

目前,在国内对 QPM OPO 的研究主要集中在脉冲和准连续的运转形式,通过利用抽运光的高峰值功率实现 OPO。天津大学姚建铨课题组较早开展了 OPO 相关特性的研究,在 QPM 技术方面,采用激光二极管(LD)端面抽运的声光调 Q Nd:YVO₄ 全固态激光器为抽运源,对于 QPM OPO 的温度调谐和角度调谐进行了理论研究工作和相关实验^[4~6]。王宏杰等^[7]同样采用 1064 nm 的声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器为抽运源实现了 PPMgLN OPO 的信号光在 1449.7~1665.0 nm、闲频光在 3989.2~2946.0 nm 范围内的调谐输出,获得了信号光功率最高为 118.5 mW,闲频光功率最高输出为 46.6 mW 的输出。林洪沂等^[8,9]对基于 PPMgLN 晶体中红外单谐振 OPO 进行了研究。利用声光调 Q 的 Nd:YVO₄ 激光器作为抽运源,采用外腔结构,使用不同周期的晶体分别实现了在 3.03 μm 处 426.1 mW 的脉冲输出^[8],在 3.61 μm 处 1.13 W 的脉冲输出^[9],并通过改变晶体的极化周期实现最宽达到 3.03~4.49 μm 的宽带可调谐输出^[8]。魏星斌等^[10~13]基于单谐振 OPO 结构,采用 LD 连续抽运 Nd:YAG 晶体声光调 Q 1064 nm 激光器作为抽运源抽运 PPMgLN 晶体。进行了闲频光为 2.7^[10,11],3.7^[12],3.8 μm^[13] 输出的 OPO 研究,最大分别获得了 53.2^[10],36.7^[11],3.2^[12],16.7 W^[13] 的脉冲光输出,并通过多周期晶体实现了 2.7~4.8 μm 的波长调谐范围^[12]。目前,对于连续运转的 QPM OPO,国内有报道的为檀慧明等^[14]采用 Nd:YVO₄ 固体激光器的 1064 nm 波长作为抽运源,在 8.75 W 连续运转模式抽运下获得了 905 mW 的 3.2 μm 闲频光输出,通过改变晶体的极化周期,实现了闲频光 3.13~4.20 μm 中红外宽带可调谐的连续激光输出。

在非线性光学频率转换研究领域,抽运源的光束质量是影响非线性转换效率的主要因素之一。传统的固体激光器在高功率工作时,由于热透镜效应,输出的激光光束质量不易控制,使得非线性转换效率低下。高功率光纤激光器具有良好的散热特性,

能够获得较好光束质量的激光,可以作为非线性光学研究领域的优质抽运源^[15]。同时,采用光纤激光器抽运的 OPO 相对于其他固体激光器抽运的 OPO 可靠性好,结构更加紧凑,所以基于光纤激光器抽运的 OPO 为新一代的紧凑型、可调谐、高功率参量设备提供了新的发展道路。在国内,浙江大学沈永行课题组^[16]以全光纤化、在 1064.2 nm 处最大 23.5 W 的线偏振脉冲激光输出的声光调 Q 掺镱光纤激光器抽运基于 PPMgLN 晶体的宽带可调谐 OPO,在 3168 nm 处得到闲频光功率为 3.01 W,在 3614 nm 波长处得到功率为 2.75 W。在国外,高能量、高效率、高光束质量的 Yb 光纤激光抽运的基于 PPMgLN 的单谐振连续 OPO 得到了很大的发展。2002 年,Gross 等^[17]报道了可调谐的 Yb 光纤激光器抽运的连续单谐振参变振荡器。在 8.3 W 抽运功率下,产生了 1.9 W 闲频光输出,波长为 3.2 μm。2005 年,又出现了 50 W 连续 Yb 光纤激光器抽运的基于 PPMgLN 的连续单谐振 OPO 的报道,在 2.9 μm 处产生超过 10 W 的输出^[18]。之后又有报道 15 W 光纤激光器抽运的连续单谐振 OPO 产生 3.5 W 的 3.0 μm 闲频光输出^[19]。2009 年,Kumar 等^[20]报道了光纤激光器抽运的连续单谐振 OPO 产生 7.7 W 的 3.067 μm 闲频光输出。2010 年 Angus Henderson 等^[21]报道了光纤激光器抽运的连续单频 OPO 产生 6.2 W 的 3.6 μm 闲频光输出。

本文报道了采用自行研制基于主振荡功率放大(MOPA)结构的全光纤化 1064 nm 连续单频光纤激光器抽运单谐振 OPO 的研究工作。实验采用了两镜腔结构,所用非线性晶体为 PPMgLN(掺杂 MgO 摩尔分数为 5%)多周期晶体,选用其中的 29.5 μm 周期,在 30 °C 的温度下,当抽运线偏振光功率为 49 W 时,在 3.81 μm 处实现最大 4.25 W 的中红外光输出,量子转换效率约 31.1%。同时,通过在 21~170 °C 改变晶体的工作温度,获得了在 3.65~3.82 μm 范围变化的中红外激光输出,并测量了相应的输出光谱。

2 实验装置

OPO 的实验装置如图 1 所示。抽运源为自行研制的 MOPA 结构的连续单频掺镱光纤激光器^[22]。该激光器包括种子源和功率放大器两大部分。种子源采用美国 NP Photonics 公司的分布式反馈结构的保偏掺镱光纤激光器,中心波长为 1064 nm,线宽为 20 kHz。该种子源输出的激光通

过耦合输入国产的3级全光纤放大器。光纤放大器最终输出功率为70 W的单频基模1064 nm激光。在抽运源和OPO腔之间采用了EOT公司的光隔离器,用来衰减OPO的回光。图1中的衰减器模块主要由半波片和偏振光分束器组成,它主要用来产生线偏振光并对其大小和偏振进行控制。实验中通过衰减器后最大输出线偏振光为55 W,由于传输损耗的影响,实际进入OPO腔的功率为49 W。图2为通过光谱仪(OSA, Agilent86142B)测得的抽运光在49 W时的输出光谱情况,光谱扫描范围为1 nm。

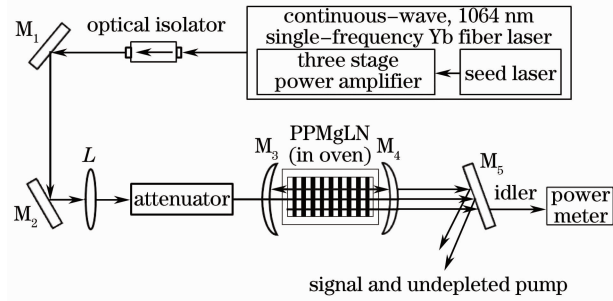


图1 OPO实验装置图

Fig.1 Experiment setup of OPO

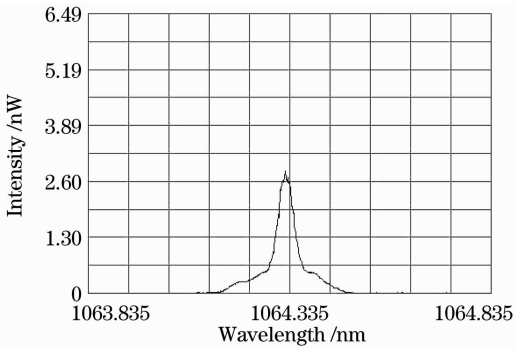


图2 抽运光光谱

Fig.2 Spectrum of pump laser

OPO谐振腔由两个曲率半径为100 mm的凹凸镜(M_3, M_4)构成,它们的基底材料皆为 CaF_2 。为了降低OPO阈值和提高光-光转换效率,其谐振腔尽量短,而在实验中把晶体放置在控温炉中,由于控温炉大小为70 mm,最后腔长为90 mm。腔镜 M_3, M_4 镀有对抽运光 $1.064 \mu m$ 高透($T > 90\%$),信号光 $1.4 \sim 1.6 \mu m$ 高反($R > 99.8\%$)和闲频光 $3.3 \sim 4.0 \mu m$ 高透($T > 98\%$)的多层介质膜。该OPO采用的是对信号光单谐振结构。晶体采用台湾HCP公司PPMgLN(掺杂MgO摩尔分数为5%)多周期晶体,在 $28.5 \sim 31.5 \mu m$ 共均匀分布7个周期值,相邻周期间距为 $0.5 \mu m$,尺寸:长50 mm,宽8.6 mm,厚1 mm。晶体两端面镀有抽运光1064 nm($R < 3\%$),

信号光 $1.4 \sim 1.6 \mu m$ ($R < 1\%$),闲频光 $3.0 \sim 4.2 \mu m$ ($R < 4.5\%$)的多层增透膜。平面镜 M_5 镀有对抽运光 $1.064 \mu m$ 高反($R > 99.5\%$),信号光 $1.4 \sim 1.6 \mu m$ 高反($R > 99.5\%$)和闲频光 $3.3 \sim 4.2 \mu m$ 高透($T > 85\%$)的多层增透膜。图3为通过分光光度计(PerkinElmer Lambda 950)测量的 M_3, M_4 和 M_5 对于信号光 $1.4 \sim 1.6 \mu m$ 的透射率情况。

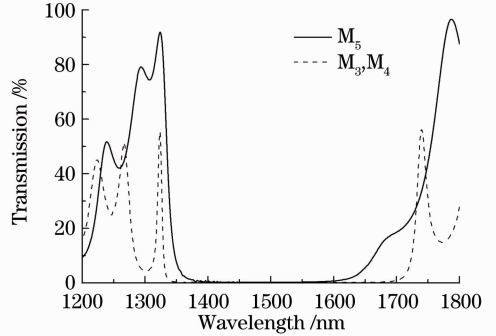


图3 透镜透射率曲线

Fig.3 Transmission curves of the lens

3 实验结果与分析

根据图1的实验装置进行了实验研究。实验中,抽运光通过50 cm的聚焦透镜聚焦到两镜线性腔中的晶体中心,光斑大小约 $66 \mu m$,抽运聚焦参数 ξ 为0.8。采用多周期晶体中 $29.5 \mu m$ 的周期,在49 W线偏振光的抽运下,晶体工作温度为 $30 \text{ }^\circ C$,得到了最大4.25 W,波长为 $3.81 \mu m$ 的闲频光输出,抽运阈值为5 W,量子转换效率大小为31.1%。参考图1,通过调节功率衰减器,测量得到闲频光随抽运功率变化的情况,如图4所示。实验中没有发现输出功率饱和的现象,可以进一步提高抽运功率大小以得到更高的闲频光输出功率。

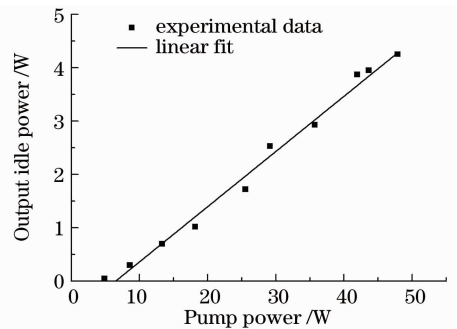


图4 $3.81 \mu m$ 闲频光输出功率与抽运功率的关系曲线
Fig.4 Idle output power at $3.81 \mu m$ versus pump power

温度调谐是OPO的一种最常见的调谐方式,它可以较大的波长范围进行连续调节。实验中对多周期晶体在 $29.5 \mu m$ 周期的情况下进行了21~

170 °C 的温度调谐,实现了中红外波长 3.65 ~ 3.82 μm 激光输出。通过改变晶体周期,进行分立调谐波长的基础上,在结合改变晶体工作温度,进行波长的微调,可进一步实现更大范围的中红外波段的连续调谐输出。

在 QPM 条件下,由于相互作用的参变光的偏振方向没有要求,实验采用 $e \rightarrow e + e$ 相位匹配,此时非线性晶体有效非线性系数最大。PPMgLN 晶体内的 e 光在不同温度下的折射率满足 Sellmeier 方程。Grayer 等^[23,24]就掺杂 MgO 摩尔分数为 5% 的铌酸锂晶体的折射率 Sellmeier 方程和方程相关系数做了系统的研究。图 5 中实线和虚线分别表示了由 Grayer 等和 Paul 等所报道的 PPMgLN 晶体折射率 Sellmeier 方程及其相关系数计算出的温度调谐数据结果,方形符号表示实验测量值。如图 5 所示,实验测量值与 Grayer 等^[23]的理论计算数据在 50 ~ 110 °C 温度范围吻合较好(偏差小于 10 nm),而与 Paul 等^[24]的理论计算数据在 21 ~ 90 °C 温度范围吻合较好(偏差小于 10 nm)。通过与两组理论计算数据对比可以看出在高温条件下(晶体温度大于 110 °C),实验测量数据与两组理论计算数据都有一定的偏差。影响 OPO 输出波长的因素很多,在实验过程中晶体温度的变化和晶体内部温度的不均匀性以及晶体极化周期的不均匀性都会对输出波长带来影响。同时在实验中发现所用控温炉对于所控

制温度与室温偏差越小,控制的晶体温度越稳定,在高温条件下,设定控温值与实际控温值有一定的偏差。这是造成实验测量值与理论计算数据偏差的一个重要原因。

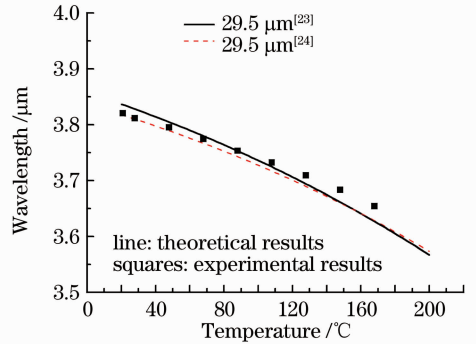


图 5 OPO 温度调谐特性曲线

Fig. 5 Temperature tuning curve of OPO

实验中采用中红外光谱仪(Bruker tensor 37 FT-IR Spectrometer,分辨率为 1 cm^{-1})测量了 21 ~ 170 °C 的温度调谐下,中红外波长 3.65 ~ 3.82 μm 激光的光谱。典型结果如图 6 所示。工作温度在 30 °C 和 70 °C 下,测得的中红外光中波长分别为 3811 nm 和 3774 nm。在 110 °C 和 170 °C 下,分别对应的中心波长为 3732 nm 和 3654 nm,由于所用光谱仪和采用测量精度的原因,并不能准确测出激光谱线宽度,实际线宽比图 6 所示的要窄。

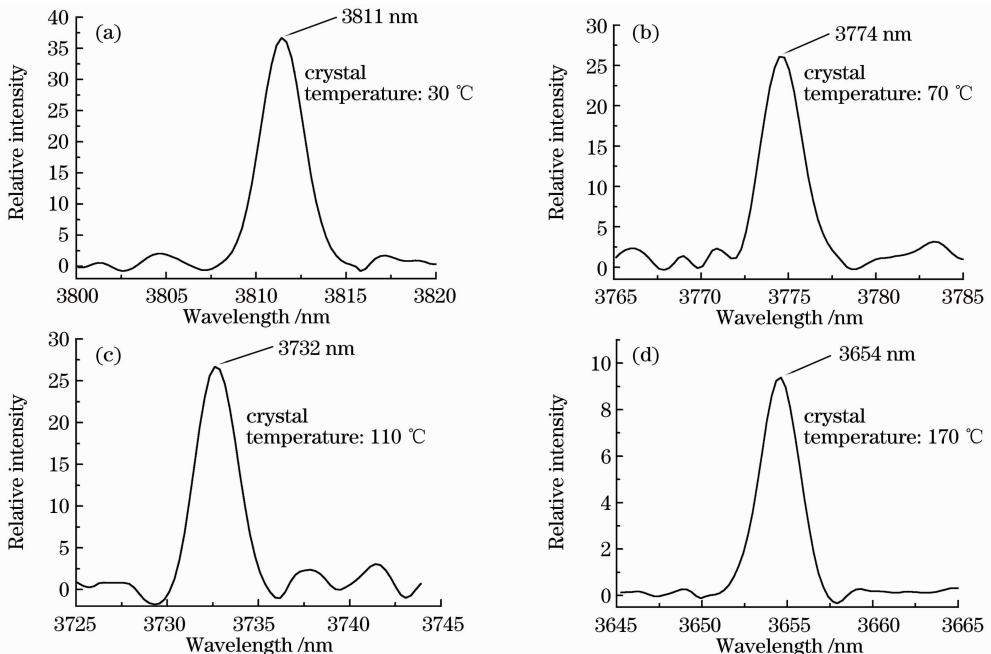


图 6 不同晶体工作温度下 OPO 闲频光的输出光谱

Fig. 6 OPO output spectrum at idle wavelength at different crystal temperature

4 结 论

采用自行研制的全光纤 MOPA 的 1064 nm 单频 Yb 光纤激光器抽运 PPMgLN 晶体, 通过对信号光单谐振结构, 获得了输出功率最大 4.25 W, 波长 3.81 μm 的连续中红外激光输出。同时, 通过调节晶体工作温度, 获得了中红外波长 3.65~3.82 μm 激光输出。对比实验所测得中红外光输出波长调谐曲线与两组不同的理论计算结果, 发现当晶体工作温度大于 110 $^{\circ}\text{C}$ 后, 实验结果与理论计算结果出现一定的偏差。下一步工作将优化实验方案, 提高 PPMgLN OPO 激光器长期工作稳定性, 以及开展中红外 3.8 μm 激光器小型化相关技术研究。

致谢 感谢周朴及其课题组成员为本实验提供的光纤激光器, 感谢中国科学院成都光电技术研究所黄伟老师提供的镀膜腔镜。

参 考 文 献

- 1 J. A. Giordmaine, R. C. Miller. Tunable coherent parametric oscillation in LiNbO_3 at optical frequency[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, **14**(24): 973~976
- 2 A. Armtrstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing *et al.*. Interaction between light waves in a nonlinear dielectric[J]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(6): 1918~1939
- 3 Hideki Ishizuki, Takunori Taira. High-energy quasi-phase-matched optical parametric oscillation in a periodically poled $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ device with a 5 mm \times 5 mm aperture[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(21): 2918~2920
- 4 Zhang Hao, Yao Jianquan, Zhang Baigang *et al.*. Angle-tuned optical parametric oscillators based on PPLN pumped by 1064 nm laser[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(12): 1250~1253
张浩, 姚建铨, 张百钢等. 1064 nm 泵浦的角度调谐 PPLN 光学参量振荡器[J]. *光电子•激光*, 2003, **14**(12): 1250~1253
- 5 Zang Guiyan, Yao Jianquan, Zhang Baigang *et al.*. Temperature tuning quasi-phase matched optical parametric oscillators[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(5): 469~472
臧贵艳, 姚建铨, 张百钢等. 温度调谐准相位匹配光学参量振荡器[J]. *光电子•激光*, 2003, **14**(5): 469~472
- 6 Xu Longhao, Diao Shuyan, Yao Jianquan *et al.*. Temperature-tuned optical parametric oscillators based on PPLN pumped by 1064nm laser[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(8): 728~730
徐龙浩, 刁述妍, 姚建铨等. 1064nm 泵浦温度调谐 PPLN 光学参量振荡器[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(8): 728~730
- 7 Wang Hongjie, Chen Shaofu, Zhou Yan *et al.*. Measuring and analyzing infrared spectrum of periodically polarized lithium niobate[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(8): 2096~2098
王宏杰, 陈少甫, 周岩等. 周期极化铌酸锂晶体的红外光谱谱分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(8): 2096~2098
- 8 Lin Hongyi, Tan Huiming, Cui Tiecheng *et al.*. Widely tunable, high conversion efficiency, acousto-optic Q-switched $\text{Nd}:\text{YVO}_4/\text{PPMgLN}$ optical parametric generator[J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(2): 155~157
林洪沂, 檀慧明, 崔铁成等. 宽调谐高效率声光调 Q $\text{Nd}:\text{YVO}_4/\text{PPMgLN}$ 光学参量产生器[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(2): 155~157
- 9 Lin Hongyi, Tan Huiming, Cui Tiecheng *et al.*. Watt-level, mid-infrared, wide-tunable optical parametric oscillator[J]. *J.*

- Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(2): 196~199
林洪沂, 檀慧明, 崔铁成等. W 级中红外宽调谐光学参量振荡器的研究[J]. *光电子•激光*, 2010, **21**(2): 196~199
- 10 Wei Xingbin, Peng Yuefeng, Wang Weimin *et al.*. High-power $\text{MgO}:\text{PPLN}$ optical parametric oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1447~1450
魏星斌, 彭跃峰, 王卫民等. 高功率 $\text{MgO}:\text{PPLN}$ 光参变振荡器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1447~1450
- 11 Peng Yuefeng, Wei Xingbing, Wang Weimin *et al.*. High efficiency 2.7 μm tunable mid-infrared laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2624~2628
彭跃峰, 魏星斌, 王卫民等. 高效率中红外 2.7 μm 可调谐激光器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2624~2628
- 12 Peng Yuefeng, Lu Yanhua, Xie Gang *et al.*. Investigation of quasi-phase-matched optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 670~674
彭跃峰, 鲁燕华, 谢刚等. 准相位匹配 PPMgLN 光参量振荡技术[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 670~674
- 13 Peng Yuefeng, Wang Weimin, Liu Dong *et al.*. High efficiency PPMgLN optical parametric oscillator infrared laser with 62 W output power[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 613~616
彭跃峰, 王卫民, 刘东等. 62 W 高效率 PPMgLN 光参量振荡红外激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 613~616
- 14 Tan Huiming, Lin Hongyi, Zhang Bolin. Mid-infrared tunable all-solid-state optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2303~2308
檀慧明, 林洪沂, 张搏麟. 基于 PPMgLN 的中红外全固态可调谐光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2303~2308
- 15 Jiang Peipei. Research on High Power Pulsed Fiber Laser and the Fiber Laser Pumped Optical Parametric Oscillator [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. 5~6
姜培培. 高功率脉冲光纤激光器及其泵浦的光参量振荡器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009. 5~6
- 16 Yang Dingzhong, Jiang Peipei, Chen Tao *et al.*. PPMgLN-based high power optical parametric oscillator pumped by a pulsed fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 34~37
杨丁中, 姜培培, 陈滔等. 基于周期性畴极化反转掺镁铌酸锂晶体的脉冲光纤激光器抽运的高功率光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 34~37
- 17 P. Gross, M. E. Klein, T. Walde *et al.*. Fiber-laser-pumped continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(6): 418~420
- 18 D. W. Chen, T. D. Rose. Low noise 10-W CW OPO generation near 3 μm with MgO doped PPLN[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005. 1829~1831
- 19 Henderson Angus, Stafford Ryan. 8.6 Watt, single frequency CW OPO[C]. *SPIE*, 2007, **6455**: 64550E
- 20 S. Chaitanya Kumar, R. Das, G. K. Samanta *et al.*. Optimally-output-coupled, 17.5 W, fiber-laser-pumped continuous-wave optical parametric oscillator[J]. *Appl. Phys. B*, 2011, **102**(1): 31~35
- 21 Angus Henderson, Peter Esquinasi. 23-watt 77% efficient CW OPO pumped by a fiber laser[C]. *SPIE*, 2010, **7580**: 75800D
- 22 Yanxing Ma, Xiaolin Wang, Jinyong Leng *et al.*. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 951~953
- 23 O. Grayer, Z. Sacks, E. Galun *et al.*. Temperature and wavelength dependent refractive index equations for MgO -doped congruent and stoichiometric LiNbO_3 [J]. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, 2008, **91**(2): 343~348
- 24 O. Paul, A. Quosig, T. Bauer *et al.*. Temperature-dependent sellmeier equation in the MIR for the extraordinary refractive index of 5% MgO doped congruent LiNbO_3 [J]. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, 2007, **86**(1): 111~115