

# 光参变振荡器的红外光谱研究

颜彩繁 王宏杰 金 帅 张光寅

(南开大学物理科学学院, 天津 300071)

**摘要** 对宽调谐周期极化掺镁铌酸锂光参变振荡器(OPO)进行了实验研究,OPO的抽运源采用的是激光二极管端面抽运的声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>激光器,其谐振腔由两个凹面镜构成了简单的线性腔,凹面镜的衬底材料选用氟化钙。通过改变周期极化掺镁铌酸锂晶体的温度(30~80 ℃)和极化周期(29.0~31.5 μm),OPO实现了信号光波长在 1450~1700 nm 和闲频光波长在 2849.0~3989.4 nm 范围内的宽调谐输出。对 OPO 输出的光谱进行了测量,信号光光谱的半峰全宽均小于 0.58 nm,闲频光光谱的半峰全宽小于 4 nm。实验结果表明,实测的信号光与闲频光的波长调谐曲线与理论模拟结果非常吻合。

**关键词** 光谱学;红外光谱;光参变振荡器;信号波长;闲频波长;调谐曲线

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1015003

## Study on Infrared Spectrum of Optical Parametric Oscillator

Yan Caifan Wang Hongjie Jin Shuai Zhang Guangyin

(School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** A experimental study of widely tunable periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> (PPMgLN) optical parametric oscillator (OPO) is presented. The laser diode (LD) end-pumped acousto-optically (A-O) Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser was used as the pump source of OPO. The OPO resonator consisted of a two CaF<sub>2</sub> concave mirror linear cavity. By varying temperature (30~80 ℃) and poling periods (29.0~31.5 μm) of PPMgLN crystal, the signal wavelength was tunable in the range of 1450~1700 nm as well as the idler wavelength was tuned from 2849.0~3989.4 nm. The measured full width at half maximum (FWHM) of the output signal and idler were about 0.58 and 4 nm or less, respectively. The results indicate that the experimental data agrees well with the calculated tuning curve.

**Key words** spectroscopy; infrared spectrum; optical parametric oscillator; signal wavelength; idler wavelength; tuning curve

**OCIS codes** 190.4970; 300.6170; 140.3600

## 1 引 言

红外可调谐相干光源因其用途广泛而成为人们关注的焦点。目前,获得红外相干光源的方法主要有利用差频产生器、量子阱激光器和光参变振荡器(OPO)。由于全固态 OPO 结构紧凑、调谐范围宽、可实现窄线宽输出,因此,OPO 的研究成为光学领域的热点之一<sup>[1~14]</sup>。

Dixt 等<sup>[1]</sup>对高重复率、单谐振 OPO 进行了研究。采用 1064 nm 调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器抽运多周期掺镁铌酸锂(PPMgLN)晶体(25.5~31.5 μm),OPO 得到了信号光波长在 1.37~1.64 μm 和闲频

光波长在 3.0~4.8 μm 的输出。当调 Q 重复频率为 10 kHz,1064 nm 抽运功率为 1.92 W 时,OPO 输出的最大信号光功率为 250 mW,闲频光的功率为 140 mW,其振荡阈值大约为 0.73 W。林洪沂等<sup>[2]</sup>报道了低阈值宽调谐的 PPMgLN-OPO,其阈值功率为 0.27 W。在调 Q 重复频率为 16.5 kHz、抽运功率为 1.35 W 和极化周期为 31 μm 的条件下,OPO 获得 3.202 μm 闲频光的功率为 161.9 mW 和 1.594 μm 信号光的功率为 98.5 mW,总的转换效率为 19.3%。通过改变晶体的极化周期(28.5~31.5 μm),OPO 输出的信号光 1.43~1.65 μm 和闲

收稿日期: 2011-04-28; 收到修改稿日期: 2011-06-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90501004)资助课题。

作者简介: 颜彩繁(1960—),女,高级工程师,主要从事光电子与激光等方面的研究。E-mail: yancaf@nankai.edu.cn

频光  $3.13\sim 4.19\ \mu\text{m}$ 。姚江宏等<sup>[3]</sup>利用周期极化掺镁铌酸锂 OPO 实现了信号光的低阈值、宽调谐输出。

目前,大多数研究者对 OPO 的输出功率特性等讨论得较多,而对 OPO 的输出光谱特性,尤其是对闲频光光谱的报道甚少,彭跃峰等<sup>[11~13]</sup>在实验上对 OPO 输出的闲频光的光谱进行了测量。OPO 腔镜如果选用 K9 玻璃作为基质材料,由于玻璃对闲频光高吸收,OPO 只能得到信号光的输出<sup>[3,5,8]</sup>。而使用透射率很高的氟化钙(在  $0.4\sim 7.0\ \mu\text{m}$  波段的透射率大于  $90\%$ )为 OPO 腔镜的衬底材料,并镀上多层宽带膜,能够使 OPO 获得信号光和闲频光的输出。

本文采用激光二极管(LD)端面抽运声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器作为抽运源,由两个氟化钙衬底的凹面镜组成了 OPO 的腔镜,对周期极化掺镁铌酸锂 OPO 输出的信号光和闲频光的光谱进行了测量与分析,并详细讨论了波长调谐曲线。将周期极化掺镁铌酸锂晶体的温度调谐与周期调谐相结合,实现了 OPO 在近红外和中红外波段的宽调谐输出。

## 2 实验装置

OPO 的实验装置示意图如图 1 所示。使用德国 Limo 公司生产的  $808\ \text{nm}$  光纤耦合半导体激光器作为 OPO 的抽运源,其最大输出功率为  $30\ \text{W}$ 。选用掺钕离子的原子数分数为  $0.5\%$  的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为激光增益介质,其尺寸为  $3\ \text{mm}\times 3\ \text{mm}\times 8\ \text{mm}$ 。晶体靠近光耦合器的那一面镀有  $808\ \text{nm}$  高

透(透射率  $T=92\%$ )和  $1064\ \text{nm}$  高反(反射率  $R>99\%$ )的双色介质膜用作  $1064\ \text{nm}$  激光器的后腔镜,晶体的另一个面镀有  $1064\ \text{nm}$  的增透膜。输出耦合镜 M<sub>1</sub> 对  $1064\ \text{nm}$  光的透射率为  $20\%$ ,腔长设为  $130\ \text{mm}$ 。声光调 Q 开关的重复频率可以在  $0.2\sim 50.0\ \text{kHz}$  范围内选择。通过实验,声光调 Q 的重复频率定为  $19\ \text{kHz}$ 。

周期极化掺镁铌酸锂晶体的尺寸为  $50\ \text{mm}\times 7\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$ ,两端面镀有增透膜(针对波长为  $1.064, 1.4\sim 1.7$  和  $3\sim 4\ \mu\text{m}$ )。晶体在  $29.0\sim 31.5\ \mu\text{m}$  等间隔地平行排列着 6 个周期,相邻两周期之间的距离为  $0.5\ \mu\text{m}$ 。为了实现温度调谐,把晶体放置在控温炉中。控温炉的工作温度可在  $25\sim 200\ ^\circ\text{C}$  范围内变化,其精确度为  $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}$ 。OPO 的谐振腔由两个曲率半径均为  $100\ \text{mm}$  的氟化钙平凹镜组成,输入镜 M<sub>2</sub> 镀有  $1064\ \text{nm}$  高透膜( $T=86\%$ )和信号光波长在  $1450\sim 1825\ \text{nm}$  的高反膜( $R>99\%$ );输出耦合镜 M<sub>3</sub> 镀有对  $1064\ \text{nm}$  的高反膜( $R=99.9\%$ )、信号光波长在  $1450\sim 1700\ \text{nm}$  的高反膜( $T<3.0\%$ )和闲频光波长在  $3000\sim 6400\ \text{nm}$  的高透膜( $T>80\%$ )。由于光学调整架的限制,OPO 的最短腔长为  $78\ \text{mm}$ 。根据文献<sup>[15]</sup>可得到 OPO 谐振腔束腰基模光斑的尺寸为  $176\ \mu\text{m}$ 。为了实现抽运光与参量光的模式匹配,用焦距  $100\ \text{mm}$  的耦合透镜将  $1064\ \text{nm}$  的激光聚焦到周期极化掺镁铌酸锂晶体中。

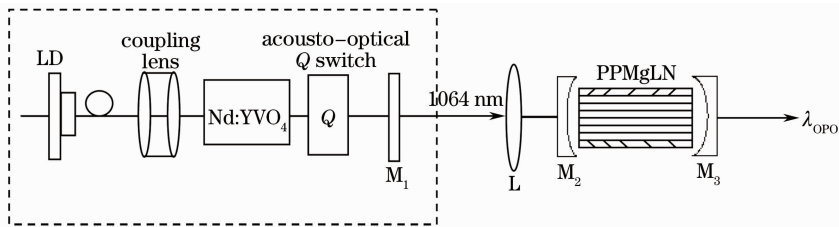


图 1 OPO 的实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of OPO experimental setup

## 3 实验结果与讨论

OPO 的振荡阈值随着谐振腔的腔长、抽运光的脉冲宽度和输出耦合镜透射率的增大而提高<sup>[8]</sup>。为了降低 OPO 的阈值功率,在抽运光脉冲宽度不变的情况下,尽量缩短 OPO 的腔长,提高输出耦合镜对信号光的反射率。通过设计控温炉的调整架,使腔长由  $95\ \text{mm}$  变为  $80\ \text{mm}$ ;输出耦合镜对信号光的透射率由大于  $4\%$  降为小于  $3\%$ ,使得 OPO 的振荡阈值有所降低。在声光调 Q 开关的重复频率为

$19\ \text{kHz}$  时,使用激光功率计对 OPO 输出的信号光和闲频光的平均功率分别进行了测量,OPO 输出的信号光( $\lambda_s = 1475.2\ \text{nm}$ )和相应的闲频光( $\lambda_i = 3812\ \text{nm}$ )的平均功率随输入功率的变化曲线如图 2 所示,由图 2 可见,OPO 的阈值功率约为  $80\ \text{mW}$ ,这一结果明显低于文献<sup>[1,2]</sup>报道的结果。当  $1064\ \text{nm}$  抽运光的功率小于  $900\ \text{mW}$  时,OPO 输出的平均功率随着抽运光功率的增大基本上呈线性增加;当抽运光的功率大于  $900\ \text{mW}$  以后,其输出的平

均功率开始出现起伏变化,这主要是由晶体的热透镜效应引起的。在抽运光的功率为 900 mW 时, OPO 获得信号光的输出功率为 146.1 mW,其光-光转换效率为 16.3%;同时测量到闲频光的输出功率为 91.9 mW,相应的光-光转换效率为 10.2%,总的转换效率为 26.5%,高于文献[1,2]报道的结果。

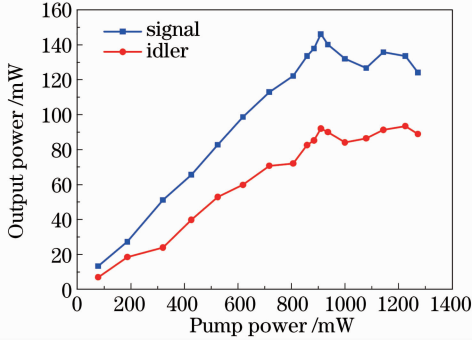


图2 信号光和闲频光的输出功率曲线

Fig. 2 Signal and idler power versus pump power

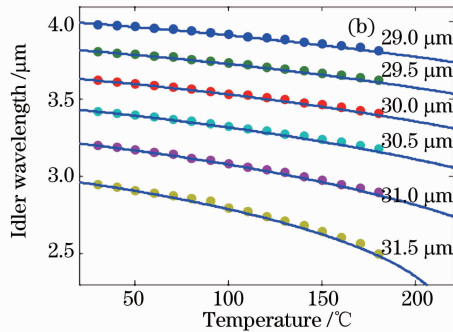
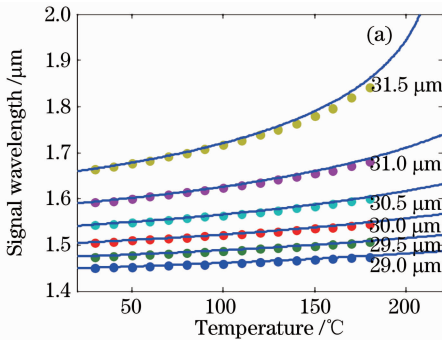


图3 PPMgLN-OPO 的信号光(a)和闲频光(b)的温度调谐曲线

Fig. 3 Signal (a) and idler wave (b) temperature tuning curve of PPMgLN-OPO

OPO 输出的闲频光的温度调谐曲线如图 3(b) 所示,图中的圆点为实验观测值,曲线同样是由文献[16]模拟计算得到的理论曲线。当晶体的极化周期为 29.0~31.5  $\mu\text{m}$ ,温度在 30~180  $^{\circ}\text{C}$  的范围内变化时, OPO 输出的闲频光波长为 3987.4~2502.0 nm,其调谐范围达到了 1485.4 nm。温度调谐速率随着晶体的极化周期的增加而增大,极化周期在 29.0  $\mu\text{m}$  时的平均调谐速率约为 1.35  $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ ,在 31.5  $\mu\text{m}$  处达到 3.59  $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 。可见闲频光的调谐速率远大于信号光。从实验结果可以看出,实验测量值与理论模拟曲线相当吻合。

用光谱仪分别测量了 OPO 产生的信号光和闲频光的光谱,图 4 和图 5 分别给出了 OPO 输出的几个典型的光谱图。当晶体的极化周期为 29.0  $\mu\text{m}$ ,温度为 30  $^{\circ}\text{C}$  时,产生的信号光的中心波长为 1450.2 nm,其光谱的半峰全宽 (FWHM) 约为

采用法国 JY 公司生产的 iHR320 光栅光谱仪对 OPO 输出的信号光和闲频光的光谱进行了测量,光谱仪对光谱的响应范围为 300~5000 nm,其最小分辨率为 0.09 nm。图 3(a) 给出了 PPMgLN 晶体在不同极化周期下的 OPO 信号光输出的波长随晶体温度变化的实验结果。图中的圆点为实验测量值,曲线是依据文献[16]模拟计算得到的结果。由图 3(a) 可见,在晶体的同一极化周期下,随着晶体温度的升高,信号光的输出波长随之增加,但变化较缓慢;在晶体的温度保持不变的情况下,随着极化周期的增大,信号光的输出波长将随之增加,而且极化周期越大,信号光的输出波长变化越大。信号光波长为 29.0  $\mu\text{m}$  时,平均调谐速率约为 0.17 nm/ $^{\circ}\text{C}$ ;波长为 31.5  $\mu\text{m}$  时达到了 1.18 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。当 PPMgLN 晶体的极化周期为 29.0~31.5  $\mu\text{m}$ ,温度在 30~180  $^{\circ}\text{C}$  内变化时, OPO 得到了信号光波长在 1450.2~1839.0 nm 内的调谐输出,调谐范围为 388.8 nm。

0.3 nm,如图 4 (a) 所示。闲频光的光谱图如图 4(b) 所示,根据高斯拟合曲线,可以得到其闲频光的中心波长为 3989.4 nm,其光谱的 FWHM 为 2.32 nm。

在 PPMgLN 晶体的极化周期为 31.5  $\mu\text{m}$ ,温度为 80  $^{\circ}\text{C}$  的条件下, OPO 输出的信号光和闲频光的光谱图如图 5 所示。根据高斯拟合曲线,获得的信号光的中心波长为 1696.2 nm,光谱的 FWHM 为 0.58 nm。相应的闲频光的中心波长为 2849.0 nm,光谱的 FWHM 为 2.62 nm。

当 PPMgLN 晶体的极化周期在 29.0~31.5  $\mu\text{m}$ ,温度在 30~180  $^{\circ}\text{C}$  内变化时, OPO 实现了信号光波长在 1450.2~1839.0 nm 和闲频光波长在 3987.4~2502.0 nm 范围内的调谐输出。由于周期极化掺镁铌酸锂晶体的两个端面镀膜范围的限制,因此 OPO 产生的信号光波长在 1450~

1700 nm范围内的光谱的 FWHM 小于或等于 0.58 nm;相应的闲频光在 2849.0~3989.4 nm 范

围内的光谱的 FWHM 小于 4 nm。而在其他的光谱范围内,OPO 输出光谱的 FWHM 会略大一些。

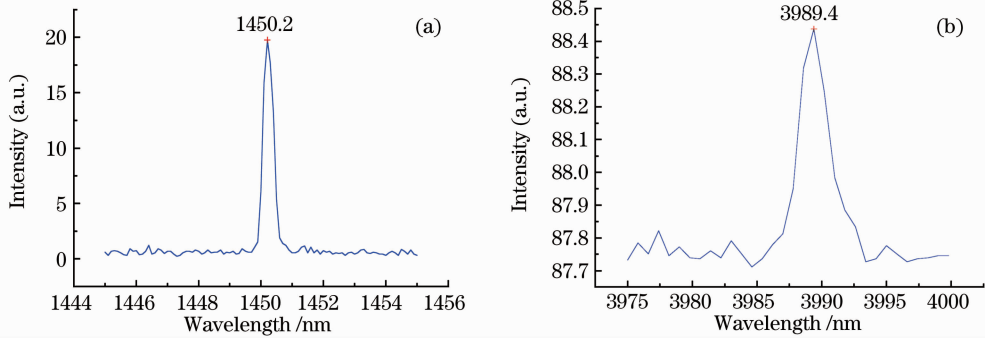


图 4 在 PPMgLN 的温度为 30 °C,极化周期为 29.0 μm 时 OPO 输出的信号光(a)和闲频光(b)的典型光谱图  
Fig. 4 Typical signal (a) and idler wave (b) spectra of OPO with the temperature of 30 °C and grating periods of 29.0 μm

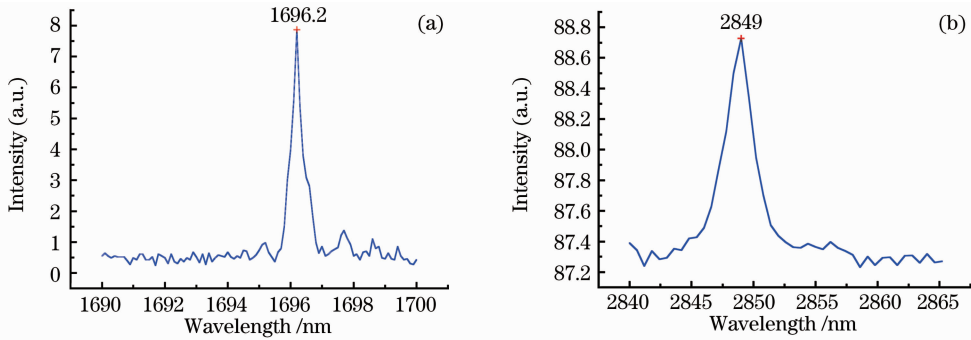


图 5 在 PPMgLN 的温度为 80 °C,极化周期为 31.5 μm 时 OPO 输出的信号光(a)和闲频光(b)的典型光谱图  
Fig. 5 Typical signal (a) and idler wave (b) spectra of OPO at 80 °C and grating periods of 31.5 μm

## 4 结 论

报道了 LD 端面抽运声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> OPO 的实验结果。通过缩短 OPO 的腔长和提高输出耦合镜对信号光的反射率,降低了其阈值功率。在调 Q 重复频率为 19 kHz 时,从实验上观测到阈值功率约为 80 mW。当抽运光的功率为 900 mW 时,获得信号光的输出功率为 146.1 mW,其光-光转换效率为 16.3%;同时测量到闲频光的输出功率为 91.9 mW,相应的光-光转换效率为 10.2%,总的转换效率为 26.5%。将晶体的极化周期(29.0~31.5 μm)与温度(30~180 °C)调谐相结合,OPO 获得了信号光在 1450.2~1839.0 nm 范围内的调谐输出,信号光的调谐范围为 388.8 nm;相应输出的闲频光的波长为 3987.4~2502.0 nm,其调谐范围达到了 1485.4 nm。OPO 输出光谱的范围覆盖了整个光纤通信的 S+C+L+U 波段。

rate mid-infrared generation with singly resonant optical parametric oscillator using multi-grating periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Optics and Laser Technology*, 2010, **42**(1): 18~22

2 Lin Hongyi, Miao Jieguang, Tan Huiming *et al.*. Extra-cavity, wide-tunable, passively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub>/PPMgLN optical parametric oscillator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(1): 15~18

林洪沂, 苗杰光, 檀慧明 等. 外腔式宽调谐被动调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>/PPMgLN 光学参量振荡器[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(1): 15~18

3 Yao Jianghong, Xue Liangping, Yan Boxia *et al.*. Optical parametric oscillator based on periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 209~213

姚江宏, 薛亮平, 颜博霞 等. 周期极化掺镁铌酸锂晶体的光学参量振荡[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 209~213

4 Y. L. Chen, J. W. Yuan, C. F. Yan *et al.*. Low-pump-threshold tunable optical parametric oscillator using periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **273**(2): 560~563

5 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. 1064 nm 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

6 R. Gebs, T. Dekorsy, S. A. Diddams *et al.*. 1-GHz repetition rate femtosecond OPO with stabilized offset between signal and idler frequency combs [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(8): 5397~5405

## 参 考 文 献

1 N. Dixt, R. Mahendra, O. P. Naraniya *et al.*. High repetition

- 7 V. D'auria, S. Fornaro, A. Porzio *et al.*. Fine tuning of a triply resonant OPO for generating frequency degenerate CV entangled beams at low pump powers[J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **91**(2): 309~314
- 8 Yan Caifan, Wang Yanan, Chen Shaofu *et al.*. Low threshold singly-resonant optical parametric oscillator based on periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2752~2755  
颜彩繁, 王亚楠, 陈少甫等. 低阈值单谐振周期极化掺镁铌酸锂光参量振荡器[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2752~2755
- 9 He Jingliang, Wang Ruihua, Huang Haitao *et al.*. Efficiency and high power all-solid-state 1.5  $\mu\text{m}$  intracavity optical parametric oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7):1789~1792  
何京良, 王瑞华, 黄海涛等. 高效大功率全固态 1.5  $\mu\text{m}$  腔内光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7):1789~1792
- 10 Liu Xu, Lu Changyong, Cheng Yong *et al.*. Laser diode pumped optical parametric oscillator laser with orthogonal Porro-prism resonator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9):2257~2261  
刘旭, 卢常勇, 程勇等. 激光二极管抽运正交波罗棱镜腔光参量振荡激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2257~2261
- 11 Peng Yuefeng, Xie Gang, Wang Weimin *et al.*. High efficiency periodically poled lithium niobate with MgO optical parametric oscillator 2.7  $\mu\text{m}$  laser with 11.8 W output power[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2262~2265  
彭跃峰, 谢刚, 王卫民等. 11.8 W 高效率掺氧化镁的周期极化铌酸锂晶体光参量振荡 2.7  $\mu\text{m}$  激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2262~2265
- 12 Peng Yuefeng, Xie Gang, Wang Weimin *et al.*. High efficiency optical parametric oscillator 2.7  $\mu\text{m}$  laser on PPMgLN pumped by 1064 nm laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1815~1818  
彭跃峰, 谢刚, 王卫民等. 1064 nm 激光抽运 PPMgLN 光参量振荡高效率 2.7  $\mu\text{m}$  激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1815~1818
- 13 Wei Xingbin, Peng Yuefeng, Wang Weimin *et al.*. High-power MgO: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 MgO:PPLN 光参变振荡器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5):1447~1450
- 14 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
- 15 Zhang Guangyin, Guo Shuguang. Graphic Analysis and Design Method of Optical Resonator[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. 35~38  
张光寅, 郭曙光. 光学谐振腔的图解分析与设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. 35~38
- 16 D. Paul, A. Quosig, T. Bauer *et al.*. Temperature-dependent Sellmeier equation in the MIR for the extraordinary refractive index of 5% mol MgO doped congruent LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **86**(1): 111~115