

# 近红外掺镁周期极化铌酸锂光参变振荡器

吴羽<sup>1</sup> 焦中兴<sup>2</sup> 何广源<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>广州大学实验中心, 广东 广州 510006)  
(<sup>2</sup>中山大学理工学院, 广东 广州 510275)

**摘要** 研究了掺镁周期性极化铌酸锂光参变振荡器(PPMgLN-OPO)在近红外波段的调谐特性和输出特性。计算了PPMgLN-OPO的调谐曲线,并采用Nd:YVO<sub>4</sub>激光器产生的1.064 μm激光作为抽运源,验证了其温度调谐特性,实现了1.8~2.6 μm的可调谐红外激光输出。此外,比较了长度为2 cm和3 cm的PPMgLN晶体的OPO输出特性,并在抽运功率为6.7 W时,获得了最大功率为3.2 W的2 μm激光输出,转换效率达47.8%。

**关键词** 激光技术;非线性光学;温度调谐;光参变振荡器;掺镁周期性极化铌酸锂

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.061403

## Near infrared Optical Parametric Oscillator Based on Periodically Poled MgO:LiNbO<sub>3</sub>

Wu Yu<sup>1</sup> Jiao Zhongxing<sup>2</sup> He Guangyuan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Laboratory Center of Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)  
(<sup>2</sup>School of Physics and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

**Abstract** Theoretical and experimental study is presented on near infrared band tuning and output characteristics of optical parametric oscillator based on periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> (PPMgLN-OPO). The temperature tuning curve of PPMgLN is calculated. Through OPO experiments based on PPMgLN pumped by a 1.064 μm Nd:YVO<sub>4</sub> laser, we realize tunable infrared laser output of 1.8~2.6 μm. We also compare the output characteristics of length of 2 cm and 3 cm PPMgLN crystals. When the pump power is 6.7 W, up to 3.2 W laser output in the 2 μm band is generated with a conversion efficiency of 47.8%.

**Key words** laser technique; nonlinear optics; temperature tuning; optical parametric oscillator; periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub>

**OCIS codes** 140.3530; 190.4970; 160.3730

## 1 引言

高功率红外固体激光器在工业、医疗及军事等领域有非常广泛的应用前景,一直是激光技术的研究热点。光参变振荡器(OPO)作为一种有效的波长转换技术,是产生高功率可调谐红外激光的重要手段之一,具有全固化、结构紧凑等优点。随着近几年新型周期性极化材料的出现,基于准相位匹配(QPM)技术的光参变振荡器<sup>[1~4]</sup>,由于具有低运转阈值、高转换效率及宽调谐范围等优点,越来越受到人们的重视。掺镁周期性极化铌酸锂(PPMgLN)是一种典型的周期性极化晶体<sup>[5]</sup>,具有较大的非线性系数( $d_{33} = 27$  pm/V),较高的损伤阈值(2 J/cm<sup>2</sup>),在0.3~4 μm波长范围都有高的透射率。因此,PPMgLN在近红外(1~3 μm)、中红外(3~5 μm)高功率OPO中有很高的应用价值,受到众多研究人员的关注<sup>[6~10]</sup>。

本文报道了1.064 μm Nd:YVO<sub>4</sub>激光器抽运的PPMgLN OPO的功率和调谐特点,并通过改变PPMgLN晶体的工作温度实现了1.8~2.6 μm的可调谐红外激光输出。对比了不同晶体长度的PPMgLN-OPO的输出功率、转换效率等性能,实验发现在抽运功率较低时,使用较长的PPMgLN晶体可以提高转换效率;而当抽运功率较高时,晶体长度对输出功率的影响较小。此结论为不同抽运功率下的

**收稿日期**: 2012-02-27; **收到修改稿日期**: 2012-03-06; **网络出版日期**: 2012-04-24

**作者简介**: 吴羽(1982—),女,硕士,实验师,主要从事光电子技术方面的研究。E-mail: wuyu8320@163.com

PPMgLN 晶体长度的选择提供了参考,以便在最低成本的前提下实现较高转换效率。实验在 6.7 W 的抽运功率下,最高产生了 3.2 W 的 2  $\mu\text{m}$  激光。1  $\mu\text{m}$  到 2  $\mu\text{m}$  的光-光转换效率为 47.8%。

## 2 PPMgLN-OPO 调谐理论

由准相位匹配原理可知,相位匹配条件为  $\Delta k = k_p - k_s - k_i - k_m = 0$ ,其中  $k_m = 2\pi m/\Lambda$ , $\Lambda$  为极化周期,  $k_x = 2\pi n_x/\lambda_x$  ( $x = p, s, i$ ), $p, s, i$  分别代表抽运光、信号光和闲频光, $m$  为准相位匹配阶数。则上式可以写成

$$\Delta k = 2\pi \left( \frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_s}{\lambda_s} - \frac{n_i}{\lambda_i} - \frac{m}{\Lambda} \right) = 0. \quad (1)$$

由能量守恒条件

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}, \quad (2)$$

可得

$$\frac{n_p - n_i}{\lambda_p} - \frac{n_s - n_i}{\lambda_s} - \frac{m}{\Lambda} = 0, \quad (3)$$

式中折射率  $n_p, n_s, n_i$  是波长和温度的函数。PPMgLN 晶体中,折射率与温度、波长有关的色散方程为<sup>[11]</sup>

$$n(\lambda, T) = 5.35583 + 4.629 \times 10^{-7} f(t) + \frac{0.100473 + 3.862 \times 10^{-8} f(t)}{\lambda^2 - [0.2.692 - 0.89 \times 10^{-8} f(t)]^2} + \frac{100 + 2.657 \times 10^{-5} f(t)}{\lambda^2 - 11.34929^2} - 1.5334 \times 10^{-2} \lambda^2, \quad (4)$$

式中  $f(t) = (t - 24.5) \cdot (t + 570.82)$ , 温度  $t$  单位为  $^{\circ}\text{C}$ , 波长  $\lambda$  单位为  $\mu\text{m}$ 。

由此,当  $\lambda_p = 1.064 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda = 32 \mu\text{m}$ ,  $m = 1$  时可以计算出温度调谐曲线,如图 1 所示。可以看到,当晶体温度由 20  $^{\circ}\text{C}$  增加到 120  $^{\circ}\text{C}$  时,信号光波长由约 1.7  $\mu\text{m}$  增加到了约 2.1  $\mu\text{m}$ ,相应的闲频光波长由约 2.7  $\mu\text{m}$  减小到约 2.1  $\mu\text{m}$ 。晶体温度为 120  $^{\circ}\text{C}$  时,OPO 工作在简并点附近。

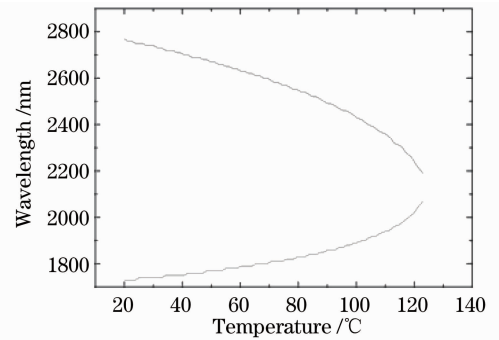


图 1 PPMgLN 温度调谐的理论曲线

Fig. 1 Theoretical temperature tuning curve of PPMgLN

## 3 实验研究

### 3.1 实验装置

Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器抽运 PPMgLN-OPO 实验装置示意图如图 2 所示。Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器为一台商业激光器,其重复频率为 20 kHz,最大输出功率 6.7 W,光束质量因子  $M^2 < 1.2$ ,脉冲宽度约 20 ns。PPMgLN-OPO 使用平平腔结构, $M_1, M_2$  均为平面镜。其中  $M_1$  对 1  $\mu\text{m}$  激光高透,对 2  $\mu\text{m}$  激光高反; $M_2$  对 1  $\mu\text{m}$  激光高反,对 1.8~2.5  $\mu\text{m}$  波段范围激光的透射率为 35%~60%,对 2.1  $\mu\text{m}$  激光的透射率为 35%。实验中用到两块 PPMgLN 晶体,分别是长度为 3 cm、周期为 32.1  $\mu\text{m}$  和长度为 2 cm、周期为 32  $\mu\text{m}$ 。

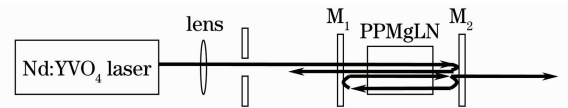


图 2 PPMgLN-OPO 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of the PPMgLN-OPO

### 3.2 实验结果与分析

首先采用长度为 2 cm、周期为 32  $\mu\text{m}$  的 PPMgLN 晶体做温度调谐实验,得到图 3(a) 所示的温度调谐曲线,实现了 1.8~2.6  $\mu\text{m}$  的可调谐红外激光输出。图中点数据为实验值,实线为理论计算结果,两者基本吻合。波长大于 2.4  $\mu\text{m}$  的部分已经超出了所用单色仪的测量范围,图中并未能给出实验值。由图 3(a) 也得知实验得到的简并点约为 115  $^{\circ}\text{C}$ 。图 3(b) 是 PPMgLN 晶体温度为 50  $^{\circ}\text{C}$  时的信号光输出光谱。此时 OPO 工作点远离简并点,因此输出参变光的谱线较窄。从图 3(b) 可以看到,信号光的中心波长为 1815 nm,谱线宽度仅为 5 nm。

对 OPO 输出参变光分光后测量,发现信号光输出功率比较大,而闲频光的功率则较小,绝大部分输出

能量都集中在信号光上。当 OPO 工作点向简并点靠近时,两参变光的谱线都逐渐增宽,同时两参变光的功率趋于接近。由于 PPMgLN-OPO 采用的是一类匹配,当 OPO 工作于简并点附近时,即晶体温度约为 115 °C 时,谱线会有很大的展宽。图 3(c) 是 OPO 工作于简并点附近时的输出光谱曲线。谱线中心波长约 2103 nm,谱线宽度约 80 nm。相对于非简并点时 OPO 的输出光谱,简并点处的谱线展宽非常明显。

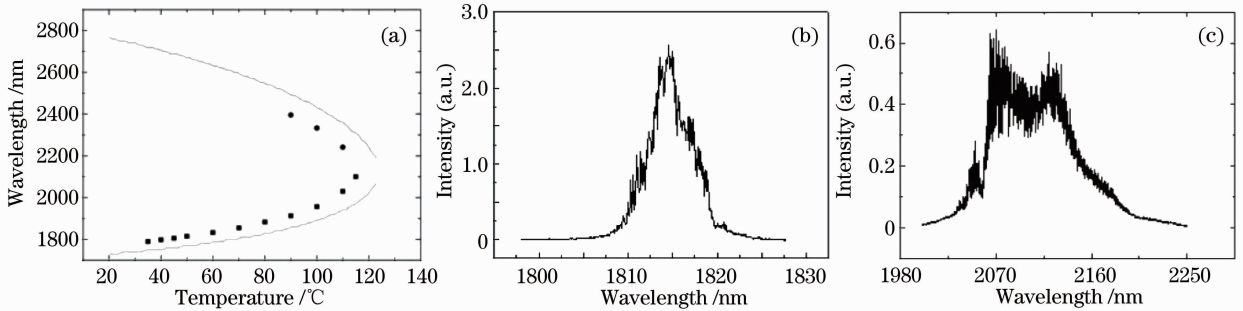


图 3 PPMgLN-OPO 温度调谐曲线及输出光的光谱图。(a) 温度调谐曲线; (b) PPMgLN 50 °C 时信号光的光谱; (c) PPMgLN 115 °C 时的输出光谱

Fig. 3 Temperature tuning curve of PPMgLN OPO and laser output spectra. (a) Temperature tuning curve; (b) spectrum of signal light when PPMgLN temperature is 50 °C; (c) spectrum of output laser when PPMgLN temperature is 115 °C

在相同抽运功率(4.5 W)下,改变 PPMgLN 晶体的温度,得到 OPO 输出功率随 PPMgLN 温度变化的曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,PPMgLN-OPO 的输出总功率并没有随着 PPMgLN 晶体温度的变化而出现大的波动,功率波动小于平均功率的 10%。可见,PPMgLN-OPO 的转换效率对 PPMgLN 的温度不是非常敏感。此外,实验也发现若晶体的温度高于简并点温度,OPO 将会由于失配导致输出功率迅速降低,并很快变为零。

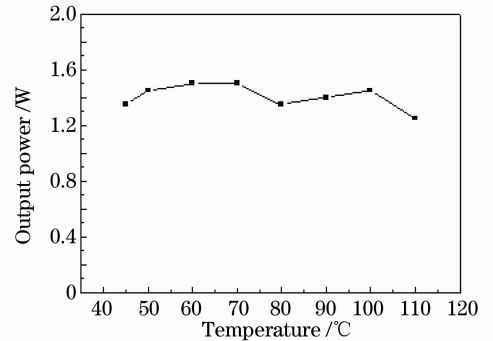


图 4 PPMgLN-OPO 输出功率与温度关系图

Fig. 4 PPMgLN-OPO output power versus temperature

通过上述温度调谐实验,得到 2 cm 长的 PPMgLN 晶体的简并点温度为 115 °C。进一步,分别使用长度为 2 cm 和 3 cm 的 PPMgLN 晶体开展实验,比较两者在简并点处的输出特性。在两者的输出功率都调整到最佳的情况下,得到 OPO 的输出功率与转换效率如图 5 所示。使用 3 cm 长晶体的 OPO 有较低的抽运阈值。同时,在抽运功率比较低时,3 cm 长的 PPMgLN 晶体的转换效率明显比 2 cm 长的要高。随着抽运功率的提高,两 OPO 的转换效率都在提高,且均未达到极大值。同时,两者输出功率、转换效率的差别逐渐减小。在最大抽运功率为 6.7 W 时,3 cm 长的 PPMgLN 晶体的 OPO 输出功率为 3.2 W,光-光转换效率为 47.8%;而 2 cm 长的 PPMgLN 晶体的 OPO 输出功率也达到了

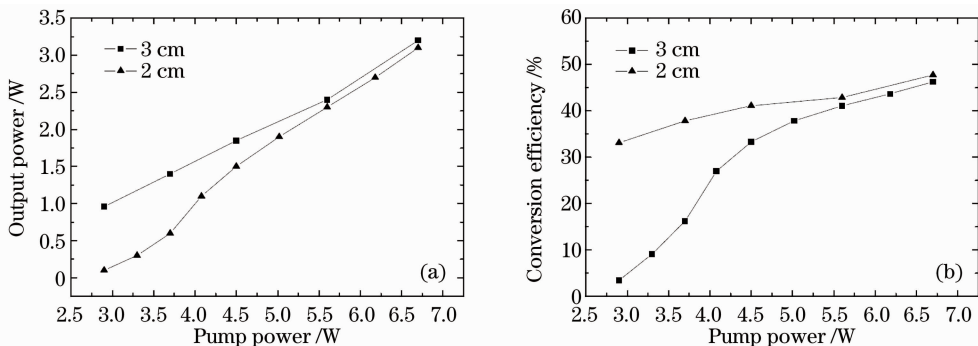


图 5 两种长度的 PPMgLN 晶体 OPO 的(a)输出功率、信号光和闲频光功率之和(b)转换效率与 1 μm 抽运功率关系图

Fig. 5 (a) Output power (the sum of signal and idler) and (b) conversion efficiency versus pump power for two different lengths of PPMgLN crystal in the OPO experiment

3.1 W,光-光转换效率为 46.3%。两 OPO 的性能已经非常接近了。由此可见,在抽运功率较高的时候,2 cm 长的 PPMgLN 晶体的 OPO 也可以达到与 3 cm 长的 PPMgLN 晶体的 OPO 接近的性能。因此,在设计 OPO 时,若抽运功率较低,为了获得高的转换效率,适合使用较长的 PPMgLN 晶体;若抽运功率较高,则使用较短的 PPMgLN 晶体也可以达到与长晶体接近的转换效率,同时可以降低成本。

## 4 结 论

采用 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器作抽运源,抽运 PPMgLN-OPO,实现了近红外激光的温度调谐输出,实验与理论吻合较好。同时,比较了不同长度的 PPMgLN 晶体,发现在抽运功率较低时,使用长度较长的晶体可以提高转换效率;而当抽运功率较高时,两晶体的输出功率差别减小,短晶体 OPO 也可以获得接近长晶体 OPO 的转换效率。此结论为不同抽运功率下的 PPMgLN 晶体长度的选择提供了参考,以便在最低成本的前提下实现较高转换效率。实验采用 3 cm 长的 PPMgLN 晶体,在抽运功率为 6.7 W 时,获得了最高 3.2 W 的 2 μm 激光输出,转换效率达 47.8%。为了进一步获得更高的功率输出,下一步的工作是对实验室内另一台 Nd:YAG 激光器稍作改造,作为抽运源,在实现更高功率红外激光输出的同时提高输出光的稳定性。

## 参 考 文 献

- 1 Yao Baoquan, Wang Yuezhu, Wang Qi. Development of mid-infrared optical parametric oscillator[J]. *Laser Technol.*, 2002, **26**(3): 217~220  
姚宝权,王月珠,王 骐. 中红外光参量振荡器发展状况分析[J]. 激光技术, 2002, **26**(3): 217~220
- 2 Yang Jian, Li Xiaoqin, Yao Jianquan *et al.*. High-power temperature-tunable periodically-poled lithium niobate optical parametric oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1459~1462  
杨 剑,李晓芹,姚建铨等. 基于周期极化铌酸锂晶体的高功率可调谐光参量振荡器[J]. 中国激光, 2008, **35**(10): 1459~1462
- 3 Xia Linzhong, Su Hong, Ruan Shuangchen *et al.*. Widely tunable high power optical parametric oscillator using multi-grating periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 503~506  
夏林中,苏 红,阮双琛等. 高功率宽调谐输出的多周期极化铌酸锂晶体光学参量振荡器[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 503~506
- 4 Peng Yuefeng, Lu Yanhua, Xie Gang *et al.*. Investigation of quasi-phase-matched optical parametric oscillator[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
- 5 M. M. J. W. van Herpen, S. E. Bisson, F. J. M. Harren. Continuous-wave operation of a single-frequency optical parametric oscillator at 4~5 μm based on periodically poled LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(24): 2497~2499
- 6 Xu Longhao, Diao Shuyan, Yao Jianquan *et al.*. Temperature-tuned optical parametric oscillators based on PPLN pumped by 1064 nm 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
- 7 Yao Jianghong, Liu Zhiwei, Xue Liangping *et al.*. Low-threshold and wide tunable optical parametrical oscillator based on periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> (PPMgLN) crystal[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2008, **27**(2): 105~108  
姚江宏,刘志伟,薛亮平等. 基于 PPMgLN 晶体低阈值宽调谐红外光参量振荡研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, **27**(2): 105~108
- 8 Wu Bo, Cai Shuangshuang, Shen Jianwei *et al.*. Widely tunable optical parametric oscillators based on periodically poled MgO doped LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5): 2684~2688  
吴 波,蔡双双,沈剑威等. 基于镁掺杂的周期性畴反转铌酸锂的宽调谐光参量振荡器[J]. 物理学报, 2007, **56**(5): 2684~2688
- 9 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
- 10 Peng Yuefeng, Wang Weimin, Wei Xingbin *et al.*. High-efficiency mid-infrared optical parametric oscillator based on PPMgO:CLN[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(19): 2897~2899
- 11 Xuejin Li, Baigang Zhang, Jianquan Yao *et al.*. Infrared OPO temperature tuning based on periodically-poled lithium niobate [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(12): 711~713