

文章编号: 0258-7025(2010)03-0613-04

# 62 W 高效率 PPMgLN 光参量振荡红外激光器

彭跃峰 王卫民 刘 东 魏星斌 武德勇 李德明

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 报道了采用 1064 nm 激光抽运掺 MgO 周期极化 LiNbO<sub>3</sub> (PPMgLN) 晶体准相位匹配 (QPM) 技术实现高效率红外激光输出的实验结果, 理论计算了 PPMgLN 晶体准相位匹配温度调谐曲线。抽运源为激光二极管连续 (CW) 抽运 Nd:YAG 晶体声光调 Q 1  $\mu\text{m}$  激光器, PPMgLN 晶体 (MgO 摩尔分数为 5%) 单谐振光参量振荡技术采用  $e \rightarrow e + e$  相位匹配, 消除了光束之间的走离效应和利用了 PPMgLN 晶体的最大非线性系数  $d_{33}$  (27.4 pm/V)。在 1064 nm 激光抽运功率 104 W, 声光 Q 开关工作频率 7 kHz 和 PPMgLN 晶体工作温度 110  $^{\circ}\text{C}$  条件下, 获得了平均功率 62.7 W 红外激光输出, 斜率效率 71.7%, 其中中红外波长 3.84  $\mu\text{m}$  激光输出功率 16.7 W, 近红外波长 1.47  $\mu\text{m}$  激光输出功率 46 W。

**关键词** 激光器; 红外激光器; 光参量振荡; PPMgLN 晶体; 准相位匹配

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0613

## High Efficiency PPMgLN Optical Parametric Oscillator Infrared Laser with 62 W Output Power

Peng Yuefeng Wang Weimin Liu Dong Wei Xingbin Wu Deyong Li Deming

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** The experimental results of a high-efficiency infrared-laser are demonstrated on a quasi-phase-matched (QPM) single-resonated optical parametric oscillator (OPO) in PPMgLN (5% MgO-doping) pumped by a 1064 nm laser of an elliptical beam. Theoretical analyses of the PPMgLN temperature tuning are presented. The pump source was an acousto-optically Q-switched continuous wave (CW)-diode-side-pumped Nd:YAG laser, the pump beam polarization matches the  $e \rightarrow e + e$  interaction in PPMgLN, thus maximal nonlinear coefficient  $d_{33}$  (27.4 pm/V) is effective and walk-off of beams can be avoided. When the pump power was 104 W with a repetition rate of 7 kHz and PPMgLN crystal temperature of 110  $^{\circ}\text{C}$ , an average output power of 62.7 W was obtained with a slope efficiency of 71.7%, with 16.7 W at the mid-infrared wavelength of 3.84  $\mu\text{m}$  and 46 W at the near-infrared wavelength of 1.47  $\mu\text{m}$ .

**Key words** lasers; infrared laser; optical parametric oscillator; PPMgLN crystal; quasi-phase-matching

### 1 引 言

光学参量振荡器 (OPO) 能够产生宽光谱可调谐激光输出, 并能将现有的激光波长转换到传统激光器无法达到的波段。随着性能优良抽运源和中红外非线性晶体技术的发展, OPO 相继实现了从紫外到远红外的全波段调谐、从连续 (CW) 到超快飞秒的整个时间谱范围运转。固体光参量振荡激光器以其宽光谱调谐范围、高效率、高功率、高重复频率及小型固体化等特点在军事对抗、大气环境监测、特殊环境远距离监控以及光谱学研究等诸多领域有重要

的应用价值<sup>[1~3]</sup>。准相位匹配 (QPM) 可以利用晶体的最大非线性系数, 且没有波矢方向和偏振方向的限制, 理论上能够利用晶体的整个透光范围实现相位匹配。LiNbO<sub>3</sub> 是典型的负单轴晶体, 其透光波段为 330~5500 nm, 在其所有的二阶非线性极化张量中, 以  $d_{33}$  为最大, 约为 27.4 pm/V, 是双折射相位匹配常用的  $d_{31}$  的 7.5 倍, 采用准相位匹配方式的周期性极化铌酸锂 (PPLN) 可以利用  $d_{33}$  实现相位匹配, 具有高增益、低阈值、高效率等优点。由于掺 MgO 的 PPLN 晶体能显著提高抗激光损伤阈值,

收稿日期: 2009-05-22; 收到修改稿日期: 2009-06-15

作者简介: 彭跃峰 (1978—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事激光二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: qiaopyf@yahoo.com.cn

且可以有效降低晶体的极化矫顽场,因此掺 MgO 周期极化 LiNbO<sub>3</sub> 晶体(PPMgLN)成为实现准相位匹配光学参量振荡器最常见的铁电材料。日本三菱电气公司采用 1 μm 激光抽运 PPMgLN 晶体光参量振荡技术获得了平均功率 57 W, 波长 1.9~2.3 μm 可调谐激光输出<sup>[4]</sup>;加拿大航空公司采用 PPMgLN OPO 技术获得了转换效率 20%, 波长 2.94 μm, 功率 10 W 激光输出<sup>[5]</sup>;日本 Tetsumi Sumiyoshi 等<sup>[6]</sup>采用 PPMgLN OPO 技术获得了单脉冲能量 270 mJ 红外激光输出;国内中国工程物理研究院应用电子学研究所采用 PPMgLN OPO 技术获得了平均功率 11.2 W, 波长 3.8 μm 的激光输出<sup>[7]</sup>。

PPMgLN OPO 技术输出功率受 PPMgLN 晶体厚度限制,目前日本分子科学研究所已经可以研制出厚度为 5 mm 的 PPMgLN 晶体<sup>[8,9]</sup>,随着大尺寸优质中红外非线性晶体技术、中红外膜层技术和高效抽运源技术的发展,采用光参量技术具有获得高功率、高单脉冲能量红外激光输出潜力。

本文采用 1064 nm 激光椭圆光斑抽运 1 mm 厚 PPMgLN 晶体光参量振荡技术,实验上获得平均功率 62.7 W, 信号波长 1.47 μm 和闲频波长 3.84 μm 激光输出。

## 2 PPMgLN 晶体准相位匹配波长温度调谐分析

在准相位匹配条件下,由于对相互作用的耦合光波的偏振方向没有要求,可以人为地选择,因此,可以选择 e→e+e 匹配,此时 PPMgLN 晶体发挥作用的有效非线性系数为  $d_{33}$ ,从而降低了阈值,提高了转换效率。

在 PPMgLN 准相位匹配光参量振荡器中,三波相互作用的能量守恒和共线条件下的动量守恒公式满足

$$\begin{cases} 1/\lambda_p = 1/\lambda_s + 1/\lambda_i \\ n_{ep}/\lambda_p = n_{es}/\lambda_s + n_{ei}/\lambda_i + 1/\Lambda \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $\lambda_p, \lambda_s$  和  $\lambda_i$  分别为抽运光、信号光和闲频光波长; $n_{ep}, n_{es}$  和  $n_{ei}$  分别为抽运光、信号光和闲频光折射率; $\Lambda$  为 PPMgLN 晶体周期。

PPMgLN 晶体中 e 光折射率赛耳迈耶尔(Sellmeier)方程<sup>[10]</sup>为

$$n_e^2(\lambda, t) = 5.756 + 2.86 \times 10^{-6} f(t) + \frac{0.0983 + 4.7 \times 10^{-8} f(t)}{\lambda^2 - [0.202 + 6.113 \times 10^{-8} f(t)]^2} +$$

$$\frac{189.32 + 1.516 \times 10^{-4} f(t)}{\lambda^2 - 12.52^2} - 1.32 \times 10^{-2} \lambda^2, \quad (2)$$

式中  $f(t) = (t - 24.5)(t + 570.82)$ ;  $t$  为摄氏温度。

考虑晶体的热膨胀,若在温度为  $t_0$  时光栅周期为  $\Lambda(t_0)$ ,则在温度为  $t$  时光栅周期  $\Lambda(t)$  应为

$$\Lambda(t) = \Lambda(t_0)[1 + a(t - t_0)], \quad (3)$$

式中  $a = (1/l) \cdot (\partial l / \partial T)$ , 为晶体的热膨胀系数,  $l$  为晶体长度。

PPMgLN 晶体调谐方式有 3 种:周期调谐、温度调谐和角度调谐。温度调谐可以获得较高波长调谐精度和波长连续调谐。同时采用周期调谐和温度调谐方式,既可以获得较宽的调谐范围,也可以获得较高的调谐精度。利用 PPMgLN 晶体 OPO 能量守恒和动量守恒公式,计算了在 PPMgLN 晶体周期为 29.2 μm(在常温 25 °C 时),采用 1064 nm 激光抽运情况下,光参量振荡波长调谐与晶体温度的关系,如图 1 所示。从图中可以了解到,晶体工作在 30~200 °C 温度范围时,可以获得中红外波长 3.93~3.68 μm 和近红外波长 1.458~1.496 μm 激光调谐输出。

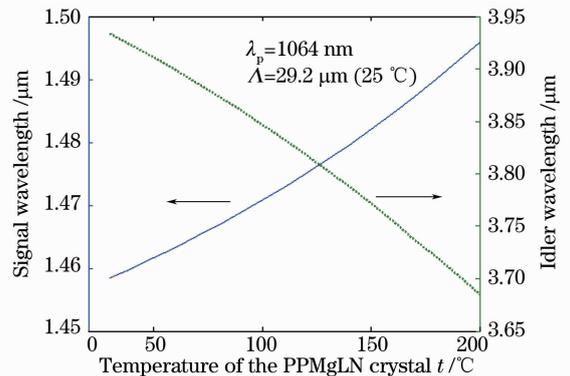


图 1 PPMgLN 晶体温度调谐曲线

Fig. 1 Temperature tuning curve for PPMgLN OPO pumped by 1064 nm laser

## 3 实验研究

### 3.1 实验装置

实验采用 1 μm 激光抽运 PPMgLN OPO 单谐振腔(SRO)结构,实验装置如图 2 所示。1064 nm 激光谐振腔由全反镜,输出镜,Nd:YAG 增益模块,Q 开关,石英旋转片,偏振片等组成。 $M_1$  对 1064 nm 激光高反, $M_2$  对 1064 nm 激光反射率为 60%。通过合理设计 1064 nm 激光器参数,获得了高功率、高光束质量 1 μm 激光输出。采用高光束质

量 1 μm 激光作为抽运源,有利于获得高效率、高光束质量红外激光输出。1 μm 激光经耦合系统后,整形成椭圆光斑,以合适功率密度抽运 PPMgLN (MgO 摩尔分数为 5%) 晶体, OPO 输出近红外和中红外波段激光。 OPO 技术采用 e→e+e 相位匹配,从而消除了光束之间的走离效应和利用了 PPMgLN 晶体的最大非线性系数  $d_{33}$  (27.4 pm/V)。  $M_3$ ,  $M_4$  构

成 PPMgLN OPO 谐振腔,  $M_3$  对 1064 nm 激光高透,对 1.4~1.6 μm 和 3.6~4.0 μm 激光高反,  $M_4$  对 1064 nm 激光高反,对 1.4~1.6 μm 激光高透,对 3.6~4.0 μm 激光部分反射。在常温下 PPMgLN 晶体周期为 29.2 μm,两个通光面对 1064 nm, 1.4~1.6 μm 和 3.6~4.0 μm 激光高透,晶体尺寸为 1 mm × 4 mm × 40 mm。

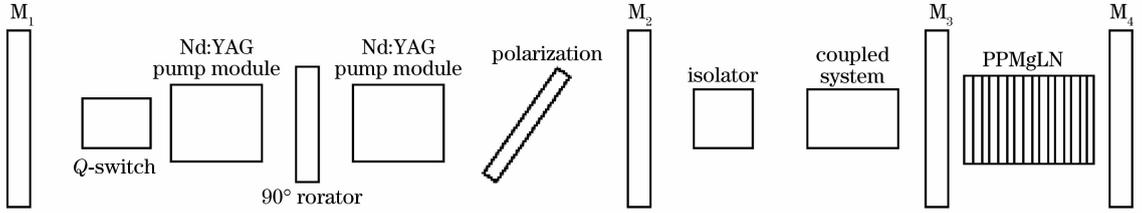


图 2 PPMgLN SRO 实验装置  
Fig. 2 Experimental setup of PPMgLN SRO

### 3.2 实验结果与分析

开展了实验研究,当 1064 nm 激光抽运功率 104 W,频率 7 kHz, PPMgLN 晶体工作温度 110 °C 时,光参量振荡器平均输出功率 62.7 W,斜率效率 71.7%。采用的光参量振荡器输出镜  $M_4$  对 1064 nm 激光反射率大于 99.8% (事先标定过),光参量振荡器输出激光中基本不含 1064 nm 激光 (1064 nm 激光功率低于 0.1 W)。采用对 1.3~1.7 μm 激光高反,对 3.5~4.2 μm 激光高透的分光镜对光参量振荡器输出激光功率进行分光测量,通过测量分光镜反射部分激光功率和透射部分激光功率,根据事先标定好的分光镜反射率、透射率参数计算得出光参量振荡器 62.7 W 输出功率中波长 3.84 μm 激光输出功率 16.7 W,波长 1.47 μm 激光输出功率 46 W。图 3 给出了光参量振荡器红外激光输出功率 (3.84 + 1.47 μm) 和 3.84 μm 激光输出功率与 1064 nm 激光抽运功率的关系曲线。从图 3 可以看出,红外激光输出功率没有出现饱和效应,因此随着抽运功率的

提高,有可能获得更高功率红外激光输出。实验过程中,发现 PPMgLN 晶体膜层透过率低于方案设计值,特别是中红外波段透过率与设计值偏差较大,初步分析估计偏差超过 5%。光谱仪测得的输出激光光谱如图 4 所示,中红外激光中心波长为 3.84 μm,近红外激光中心波长为 1.47 μm。由于所用光谱仪和采用测量方法测量线宽精度的原因,图 4 并不能准确反映出输出激光谱线宽度,实际线宽比图 4 所示的要窄。通过改变晶体工作温度,测量了抽运功率 104 W 情况下,光参量振荡器平均输出功率,如图 5 所示。由图 5 可知,在不同工作温度情况下,光参量振荡器平均输出功率有所差异,但差别并不大,分析认为测量误差、激光器稳定性、光学元器件膜系参数有稍许差异等都有可能造成这种差异。同时测量了 PPMgLN 晶体不同工作温度情况

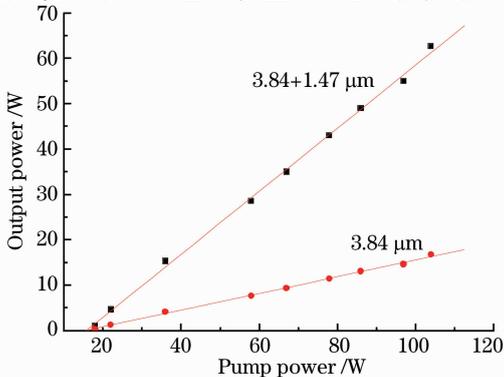


图 3 激光输出功率与抽运功率的关系曲线  
Fig. 3 Laser output power versus pump power

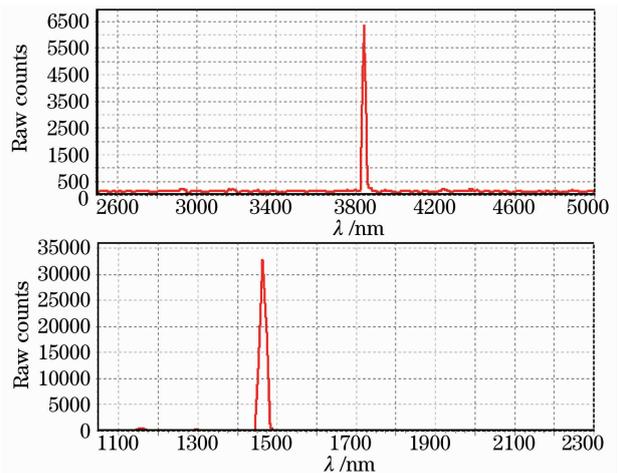


图 4 输出激光光谱  
Fig. 4 Laser output spectrum

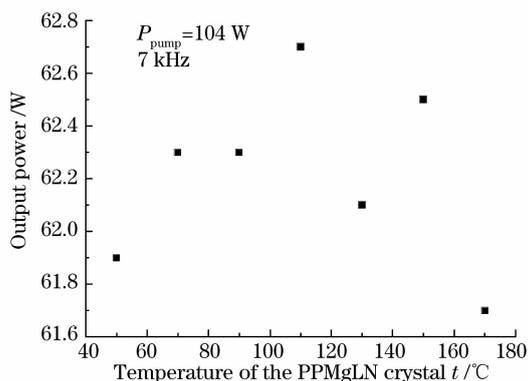


图 5 激光输出功率与晶体工作温度的关系

Fig. 5 Laser output power versus temperature of PPMgLN

下输出激光光谱,与理论分析有约 $10^\circ\text{C}$ 差异。

## 4 结 论

采用 1064 nm 激光椭圆光斑抽运 PPMgLN 晶体准相位匹配光参量振荡技术,实验上获得了平均功率 62.7 W 红外激光输出,其中中红外波长  $3.84\ \mu\text{m}$  激光输出功率 16.7 W,  $1.47\ \mu\text{m}$  激光输出功率 46 W。进一步将优化实验方案,避免光学元件损伤,提高 PPMgLN 光参量振荡激光器长期工作稳定性,以及开展中红外  $3.8\ \mu\text{m}$  激光器小型化技术研究。

## 参 考 文 献

1 Fan Jinxiang. Status quo and trend of infrared system and technologies for America's ballistic missile defense system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(5):536~550

范晋祥. 美国弹道导弹防御系统的红外系统与技术的发展[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(5):536~550

2 Ren Guoguang, Huang Yunian. Laser-based ICRM system defenses for military and commercial aircraft [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(1):1~6

任国光,黄裕年. 用激光红外干扰系统保护军用和民航机[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(1):1~6

3 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

4 Y. Hirano, S. Yamamoto, H. Taniguchi. Highly efficient and high power  $2\ \mu\text{m}$  generation with PPMgLN OPO [C]. *Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO)*, 2001. 579~580

5 Da-Wun Chen, Todd S. Rose. Low noise 10-W OPO generation near  $3\ \mu\text{m}$  with MgO doped PPLN [C]. *Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO)*, 2005. 1829~1831

6 Tetsumi Sumiyoshi, Yoshio Otani, Satoko Matsumoto *et al.*. Development of a two-wavelength OPO generating 270-mJ infrared pulses for medical applications [C]. *IEEE*, 2004. 807~808

7 Peng Yuefeng, Wang Weimin, Xie Gang *et al.*.  $3.8\ \mu\text{m}$  mid-infrared laser with 11.2 W output power [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(Suppl.):82~85

彭跃峰,王卫民,谢刚等. 11.2 W 中红外  $3.8\ \mu\text{m}$  激光器[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(增刊):82~85

8 H. Ishizuki, T. Taira. High-energy optical-parametric oscillator by using 5 mm  $\times$  5 mm aperture periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> [C]. *Conference on Lasers & Electro-Optics Europe*, 2005. 214

9 H. Ishizuki, T. Taira. Fabrication and characterization of 5-mm-thick periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> device [C]. *Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO)*, 2005. 2108~2110

10 O. Gayer, Z. Sacks, E. Galun *et al.*. Temperature and wavelength dependent refractive index equations for MgO-doped congruent and stoichiometric LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Appl. Phys. B-Lasers and Optics*, 2008, **91**:343~348