

文章编号: 0258-7025(2009)07-1815-04

# 1064 nm 激光抽运 PPMgLN 光参量振荡高效率 2.7 $\mu\text{m}$ 激光器

彭跃峰 谢 刚 王卫民 武德勇

(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 PPMgLN 晶体准相位匹配(QPM)技术实现高效率 2.7  $\mu\text{m}$  激光输出的实验结果,理论计算了 PPMgLN 晶体准相位匹配周期调谐曲线,得出 PPMgLN 晶体周期为 31.3  $\mu\text{m}$  时可获得中红外波长 2.7  $\mu\text{m}$  激光输出。PPMgLN 晶体(MgO 掺杂摩尔分数为 5%)单谐振光参量振荡(OPO)技术采用  $e \rightarrow e+e$  相位匹配,消除了光束之间的走离效应并利用了 PPMgLN 晶体的最大非线性系数  $d_{33}$  (27.4 pm/V)。在 1064 nm 激光抽运功率为 26 W,声光 Q 开关工作频率为 7 kHz 的条件下,获得平均功率为 4.7 W,波长为 2.72  $\mu\text{m}$  激光输出,斜率效率超过 21%,对应闲频光波长 1.75  $\mu\text{m}$  激光输出功率约 9 W。2.7  $\mu\text{m}$  激光水平方向和垂直方向光束质量  $M^2$  因子分别为 2.05 和 1.84。

**关键词** 激光器; 2.7  $\mu\text{m}$  激光器; 光参量振荡; 准相位匹配; PPMgLN 晶体

**中国分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1815

## High Efficiency Optical Parametric Oscillator 2.7 $\mu\text{m}$ Laser on PPMgLN Pumped by 1064 nm Laser

Peng Yuefeng Xie Gang Wang Weimin Wu Deyong

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

**Abstract** Experimental results of high-efficiency 2.7- $\mu\text{m}$  laser is demonstrated on quasi-phase-matched single-resonated optical parametric oscillator (OPO) in PPMgLN (5% MgO-doping) pumped by 1064-nm laser. Theoretical analyses of PPMgLN grating period tuning are presented. When grating period is 31.3  $\mu\text{m}$ , a PPMgLN OPO could get output at wavelength of 2.7  $\mu\text{m}$ . 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 pump power is 26 W with repetition rate of 7 kHz, an average output power of 4.7 W at wavelength of 2.72  $\mu\text{m}$  is obtained with slope efficiency of more than 21%, and 9 W at the corresponding idler wavelength of 1.75  $\mu\text{m}$ . The  $M^2$  factors of 2.7- $\mu\text{m}$  laser are 2.05 and 1.84 in parallel and perpendicular directions, respectively.

**Key words** lasers; 2.7- $\mu\text{m}$  laser; optical parametric oscillator; quasi-phase-matching; PPMgLN crystal

### 1 引 言

光学参量振荡器(OPO)以其宽光谱调谐范围、高效率、高重复频率以及小型固体化等特点在激光雷达、激光测距、大气污染检测及光电对抗等领域中显示出越来越广泛的应用前景。在近 40 年的发展,随着一些新型而高效的非线性晶体的出现及发展,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<sup>[1~6]</sup>。

双折射相位匹配(BPM)只能利用晶体非线性极化张量中的某些特定的非对角元素,使得一些具有较大非线性系数的晶体因不能实现相位匹配而不能被利用,为解决这个问题,提出了准相位匹配(QPM)的概念。准相位匹配通过对晶体非线性极化率的周期性调制来补偿光参量过程中由于折射率色散造成的抽运光和参量光之间的相位失配,因此

收稿日期: 2008-09-16; 收到修改稿日期: 2008-11-25

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

E-mail: qiaopyf@yahoo.com.cn

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。目前,实现准相位匹配光学参量振荡器最常见的铁电材料是掺 MgO 周期极化 LiNbO<sub>3</sub> 晶体 (PPMgLN)。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 的激光输出<sup>[7]</sup>; 国内中国工程物理研究院应用电子学研究所采用 PPMgLN OPO 技术获得了转换效率 18%, 波长 3.7 μm, 功率 3.2 W 的激光输出<sup>[1]</sup>。

本文分析了 PPMgLN 晶体准相位匹配光学参量振荡器的周期调谐特性,采用 1064 nm 激光抽运 PPMgLN 晶体,实验上获得转换斜率效率 21.6%, 波长 2.72 μm, 输出功率 4.7 W 的激光输出,光束质量  $M^2$  因子小于 2.1, 对应闲频光波长 1.75 μm 激光输出功率约 9 W。

## 2 PPMgLN 准相位匹配波长周期调谐特性

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。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  $e \rightarrow e+e$  非临界相位匹配方式,从而消除了光束之间的走离效应,可以采用更长的 PPMgLN 非线性晶体开展实验研究,并且此时发挥作用的有效非线性系数最大,为  $d_{33}$ ,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、信号光和闲频光的波长;  $n_{ep}$ ,  $n_{es}$  和  $n_{ei}$  分别为抽运光、信号光和闲频光波长的折射率;  $\Lambda$  为光栅周期。

PPMgLN 晶体中 e 光折射率赛耳迈耶尔 (Sellmeier) 方程<sup>[1]</sup>为

$$\begin{aligned} n_e^2(\lambda, t) = & 5.35583 + 4.629 \times 10^{-7} f(t) + \\ & \frac{0.100473 + 3.862 \times 10^{-8} f(t)}{\lambda^2 - [0.20692 - 0.89 \times 10^{-8} f(t)]^2} + \\ & \frac{100 + 2.657 \times 10^{-5} f(t)}{\lambda^2 - 11.34929^2} - 1.5334 \times 10^{-2} \lambda^2, \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $f(t) = (t - 24.5) \times (t + 570.82)$ ,  $t$  单位为 °C,  $\lambda$

为波长,单位为 μm。

PPMgLN 晶体波长调谐方式有 3 种,周期调谐、温度调谐和角度调谐。温度调谐可以获得更高的调谐精度,周期调谐是最有效的波长调谐方式。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 1064 nm 激光抽运方式下,波长调谐与周期的关系,如图 1 所示。从图 1 中可以看出,当 PPMgLN 晶体周期为 31.3 μm 时,可以获得中红外波长 2.7 μm 激光输出。

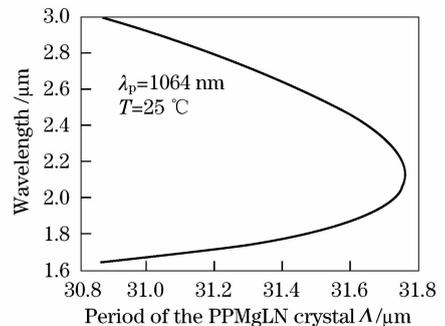


图 1 PPMgLN 晶体周期调谐曲线

Fig. 1 Calculated tuning curve for PPMgLN OPO pumped by 1064-nm laser at 25 °C

## 3 实验研究

### 3.1 实验装置

实验采用单谐振 (SRO)、外腔 OPO 结构, 1064 nm 激光输出采用平凹腔结构, 然后经耦合系统后, 抽运 PPMgLN (MgO 掺杂摩尔分数为 5%) 晶体, OPO 输出中红外激光, 实验装置如图 2 所示。M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> 构成 1064 nm 激光谐振腔, M<sub>1</sub> 对 1064 nm 激光高反, M<sub>2</sub> 对 1064 nm 激光反射率约 70%。在声光 Q 开关工作频率 7 kHz, 输出功率 30 W 时, 1064 nm 激光光束质量  $M^2$  因子小于 2.6。采用高光束质量, 波长 1 μm 激光作为抽运源, 有利于获得高效率、高光束质量中红外激光输出。M<sub>3</sub>, M<sub>4</sub> 构成 PPMgLN OPO 谐振腔, M<sub>3</sub> 对 1064 nm 激光高透, 对 2.5~3.0 μm 激光高反, M<sub>4</sub> 对 1.6~1.9 μm 激光高透, 对 2.5~3.0 μm 激光部分反射。PPMgLN 晶体两个通光面对 1064 nm, 1.6~1.9 μm 和 2.5~3.0 μm 激光高透, 周期为 31.3 μm, 尺寸为 1 mm × 10 mm × 40 mm。OPO 技术采用  $e \rightarrow e+e$  非临界相位匹配, 从而消除了光束之间的走离效应并利用了 PPMgLN 晶体的最大非线性系数  $d_{33}$  (27.4 pm/V),

可以使用较长的非线性晶体,减小了抽运阈值和中红外膜层损伤的可能性。

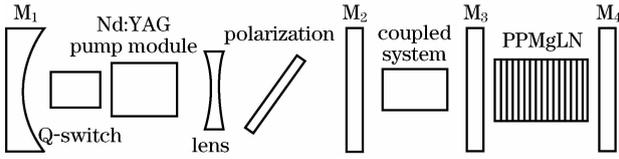


图 2 PPMgLN SRO 实验装置

Fig. 2 Experimental setup of PPMgLN SRO

### 3.2 实验结果与分析

当 1 μm 激光抽运功率 26 W,频率 7 kHz 时,波长 2.72 μm 激光输出功率 4.7 W,斜率效率 21.6%,输出功率与抽运功率关系曲线如图 3 所示,对应闲频波长 1.75 μm,激光输出功率约 9 W,图 3 未给出近红外波段 1.75 μm 激光输出功率曲线。从图 3 可以看出,中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,可以获得更高功率中红外激光输出。采用图 2 所示实验方案,在光束质量  $M^2$  因子小于 2.6 的情况下,获得了功率 30 W,波长 1064 nm 偏振激光输出,但是当 1064 nm 激光抽运功率为 26 W 时,PPMgLN 晶体膜层被损伤,无法进一步获得更高功率 2.7 μm 激光输出。图 2 设计方案抽运光斑大小直径约 0.8 mm,当抽运功率为 26 W 时,抽运功率密度约为 6 MW/cm<sup>2</sup>。目前国内中红外波段镀膜技术还不成熟,膜层损伤阈值较低,在某种程度上限制了中红外激光获得较高功率输出。受晶体加工技术的限制,目前 PPMgLN 晶体加工厚度一般为 0.5~1 mm,限制了采用圆光斑抽运时 1 μm 激光光斑的大小。为了获得较高功率激光输出,根据 PPMgLN 晶体的特点,设计了椭圆光斑抽运 PPMgLN 晶体光参量振荡单谐振腔结构,获得了输出功率 11.8 W、波长 2.72 μm 激光输出。目前日本分子科学激光研究中心已经加工了厚度为 3 mm 和 5 mm 的 PPMgLN 晶体<sup>[8]</sup>,虽然技术还不成熟,但随着 PPMgLN 晶体加工技术的发展,晶体厚度加大后,也可以采用圆光斑抽运获得更高功率中红外激光输出。光谱仪测得的激光光谱如图 4 所示,中红外激光中心波长为 2.72 μm,近红外激光中心波长为 1.75 μm,由于光谱仪测量精度的限制,光谱图并不能反映出输出激光实际线宽,实际线宽比光谱图所示的要窄。

采用刀口法测量光斑大小和双曲线拟合法对 2.7 μm 激光光束质量进行了测量,使 2.7 μm 激光光束通过焦距为 200 mm 的聚焦透镜,首先找到聚

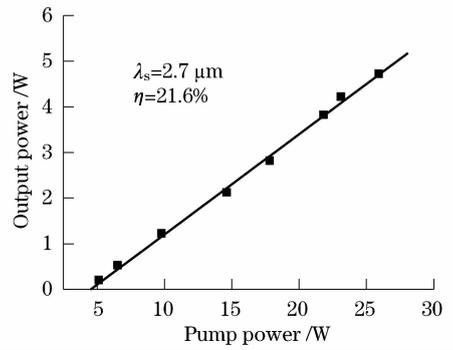


图 3 激光输出功率与抽运功率关系曲线

Fig. 3 Laser output power versus pump power

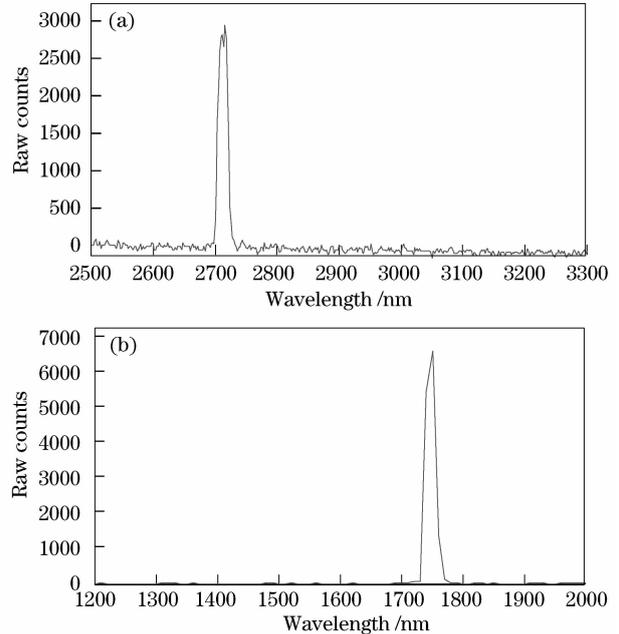


图 4 输出激光光谱

Fig. 4 Spectrum of laser

焦透镜后光斑束腰位置,然后通过测量束腰前后不同位置的光斑大小,最后依据光束传输方程对光斑大小进行双曲线拟合得到,两个方向的光束质量分别为  $M_x^2=2.05$  和  $M_y^2=1.84$ ,如图 5 所示。图 6 为中红外 CCD 测量的 2.7 μm 激光近场光斑分布。

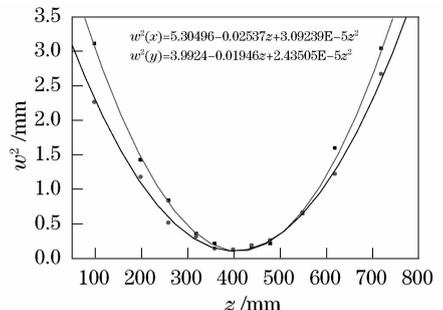


图 5 光斑半径非线性拟合曲线

Fig. 5 Nonlinear curve fit of spot radius

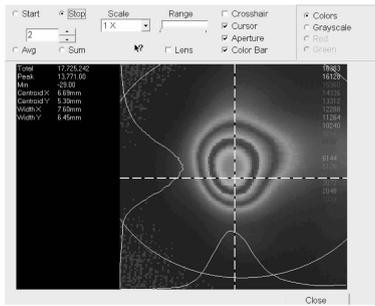


图 6 2.7  $\mu\text{m}$  激光光斑近场分布

Fig.6 2.7  $\mu\text{m}$  laser intensity distribution of near-field beam

## 4 结 论

采用 1064 nm 激光抽运 PPMgLN 晶体准相位匹配技术, 实验上获得了输出功率 4.7 W, 波长 2.72  $\mu\text{m}$  中红外激光输出。进一步将优化实验方案, 采用适合高重复频率、偏振激光输出的激光晶体(例如 Nd:YVO<sub>4</sub>)取代 Nd:YAG 晶体获得抽运源 1  $\mu\text{m}$  的激光输出, 提高抽运激光功率, 优化 OPO 谐振腔结构, 以便获得高功率、高光束质量中红外 2.7  $\mu\text{m}$  激光输出。

## 参 考 文 献

1 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

2 Jan Peter Meyn, Richard Wallenstein, Pavel Urenski *et al.*. Single-frequency continuous-wave optical parametric oscillator system with an ultrawide tuning range of 550 to 2830 nm[J]. *Optical Society of America*, 2002, **19**(6): 1419~1423

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 Hideki Ishizuki, Ichiro Shoji, Takunori Taira. High-energy quasi-phase-matched optical parametric oscillation in a 3-mm-thick periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> device[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(21): 2527~2529

5 Zhang Xinbao, Wang Yuezhu, Yao Baoquan *et al.*. Development of mid-infrared CW QPM-OPO based on PPLN[J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(6): 7~9

张兴宝, 王月珠, 姚宝权等. 基于 PPLN 的中红外 CW QPM-OPO 技术发展综述[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(6): 7~9

6 Paul D. Mason, Nick J. Wood. A high repetition-rate PPLN mid-infrared optical parametric oscillator source[C]. *SPIE*, 2004, **5620**: 308~316

7 Dawun 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

8 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