

文章编号: 1001 - 9014(2008)02 - 0105 - 04

# 基于 PPMgLN 晶体低阈值宽调谐 红外光参量振荡研究

姚江宏, 刘志伟, 薛亮平, 颜博霞, 贾国治, 许京军, 张光寅

(1. 南开大学 弱光非线性光子学教育部重点实验室(南开大学), 天津 300457;

2. 南开大学 物理科学学院, 天津 300071)

**摘要:** 对基于多周期极化掺镁铌酸锂晶体 (PPMgLN) 的信号光单谐振准相位匹配光学参量振荡器 (QPM-OPO) 进行了实验研究. 以输出波长为  $1.064\mu\text{m}$  的声光调 Q Nd: YAG 固体激光器作为基频泵浦源对周期为  $29 \sim 31.5\mu\text{m}$  的多周期掺镁 (5mol%) 铌酸锂极化光栅进行了光学参量振荡温度、周期调谐实验, 光参量振荡阈值功率仅为  $45\text{mW}$  (重复频率  $1\text{kHz}$ ). 通过温度调谐 ( $20 \sim 180^\circ\text{C}$ ) 与周期调谐 ( $29.0 \sim 31.0\mu\text{m}$ ) 相结合, 实现了调谐范围为  $1445 \sim 1685\text{nm}$  的信号光稳定输出.

**关键词:** 非线性光学; 光参量振荡器; 周期极化掺镁铌酸锂晶体; 准相位匹配

**中图分类号:** O437.4 **文献标识码:** A

## LOW-THRESHOLD AND WIDE TUNABLE OPTICAL PARAMETRIC OSCILLATOR BASED ON PERIODICALLY POLED MgO:LiNbO<sub>3</sub> (PPMgLN) CRYSTAL

YAO Jiang-Hong, LU Zhi-Wei, XUE Liang-Ping, YAN Bo-Xia,

JIA Guo-Zhi, XU Jing-Jun, ZHANG Guang-Yin

(1. The Key Laboratory of Weak Light Nonlinear Photonics (Nankai University), Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300457, China;

2. College of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** Experimental study was presented on signal-resonated quasi-phase matched optical parametric oscillator (OPO) in multi-grating ( $29.0 \sim 31.5\mu\text{m}$ ) periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> (PPMgLN) pumped by an acousto-optically Q-switched Nd:YAG laser. The threshold is  $45\text{mW}$  with pulses repetition rate  $1\text{kHz}$ . Furthermore a tunable infrared (IR) output from  $1.445 \sim 1.685\mu\text{m}$  was obtained by tuning the temperature of PPMgLN from  $20^\circ\text{C}$  to  $180^\circ\text{C}$  and tuning the grating of PPMgLN from  $29.0\mu\text{m}$  to  $31.0\mu\text{m}$ .

**Key words:** nonlinear optics; optical parametric oscillator (OPO); periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal (PPMgLN); quasi-phase matched

## 引言

光学参量振荡器 (OPO) 是目前可调谐激光产生的一种重要手段, 由 OPO 获得的可调谐红外相干光源在军事对抗、大气环境监测与保护、医学诊断、特殊环境远程传感与监控以及光谱学研究等许多领域有重要的应用价值<sup>[1]</sup>. 基于 QPM 技术的光学器件, 由于能最大限度地利用非线性光学晶体的有效

非线性系数, 并能实现所选定方向的匹配, 使其具有转换效率高、体积小、使用方便等特点<sup>[2]</sup>. 以 PPLN、PPMgLN、PPKTP 等为代表的周期极化工艺的成熟, 极大地促进了准相位匹配技术的发展, 使得光学参量振荡的应用更加广泛, 并具有波长覆盖范围宽、调谐范围大、调谐方便, 且适于小型化和固体化等优点<sup>[3-6]</sup>, 为激光频率变换提供了美好的前景. 与同成分铌酸锂晶体材料相比, 高掺镁 ( $>4.6\text{mol}\%$ ) 铌酸

收稿日期: 2007 - 04 - 05, 修回日期: 2007 - 09 - 27

Received date: 2007 - 04 - 05, revised date: 2007 - 09 - 27

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (90501004)、国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2006CB921703) 和长江学者和创新团队发展计划 (RP0149) 资助项目

作者简介: 姚江宏 (1967-), 男, 满族, 内蒙古呼和浩特人, 南开大学物理学院教授, 博士, 主要从事光电功能材料及其光学参量振荡的研究.

锂晶体具有大的非线性系数和高光折变阈值<sup>[7,8]</sup>, 更适合制备 QPM 器件, 其抗光损伤能力大大加强, 有利于制造大功率的光频转换器. 同时, 掺镁 (>4.6mol%) 之后, 铌酸锂晶体的极化矫顽场比同成分铌酸锂矫顽场降低了近一个量级, 仅为 3 kV/mm<sup>[9]</sup>, 这无疑有利于增大其通光孔径, 制备出高性能大厚度的周期极化铌酸锂器件.

本文在讨论准相位匹配光学参量振荡理论基础上, 报道了利用二极管侧面泵浦的 Nd:YAG 全固态激光器 1.064μm 输出为泵浦光, 对大小为 50.0mm × 7.0mm × 1.0mm 的多周期 (29.0 ~ 31.5μm) Z 切高掺镁 (5mol%) PPMgLN 光学微结构晶体进行红外光学参量振荡实验, 光参量振荡阈值功率仅为 45mW (重复频率 1kHz). 通过调谐晶体温度 (20 ~ 180 °C) 和周期 (29.0 ~ 31.0μm), 实现了信号光在 1445 ~ 1685nm 范围的可调谐稳定输出, 调谐范围达到 240nm.

## 2 QPM-OPO 可调谐分析

光参量振荡技术是用非线性晶体作为参量耦合元件, 将一个功率大的高频激光 (泵浦光) 入射到非线性晶体上, 产生了两个低频激光 (信号光和闲频光). 由能量守恒条件可得光参量放大的频率条件

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (1)$$

由于泵浦光强度远大于信号光和闲频光强度, 所以在满足准相位匹配条件下, 非线性混频过程持续进行, 泵浦光能量不断耦合到信号光和闲频光中, 从而形成光参量放大. 同时, 考虑到动量守恒条件, 可得光参量振荡的准相位匹配条件为

$$k = k_p - k_s - k_i - \frac{2\pi m}{\Lambda} = 0 \quad (2)$$

波长表达式

$$k = \frac{2\pi n_p(\omega_p, T)}{\Lambda} - \frac{2\pi n_s(\omega_s, T)}{\Lambda} - \frac{2\pi n_i(\omega_i, T)}{\Lambda} - \frac{2\pi m}{\Lambda} = 0 \quad (3)$$

其中  $\Lambda$  为光栅的极化反转周期, 下标  $p, s, i$  分别表示泵浦光、信号光与闲频光,  $m = 1, 3, 5, \dots$  为极化反转光栅周期阶数.  $k_p = \frac{2\pi n_p}{\Lambda}$ ,  $k_s = \frac{2\pi n_s}{\Lambda}$ ,  $k_i = \frac{2\pi n_i}{\Lambda}$  分别为泵浦光、信号光与闲频光的波传播矢量  $n(\omega, T)$ ,  $n(\omega_s, T)$ ,  $n(\omega_i, T)$  分别为泵浦光、信号光与闲频光的非常光折射率, 对 PPLN 晶体来说由其色散方程决定.  $\omega_p, \omega_s, \omega_i$  分别为泵浦光、信号光与闲频光在真空中的波长.

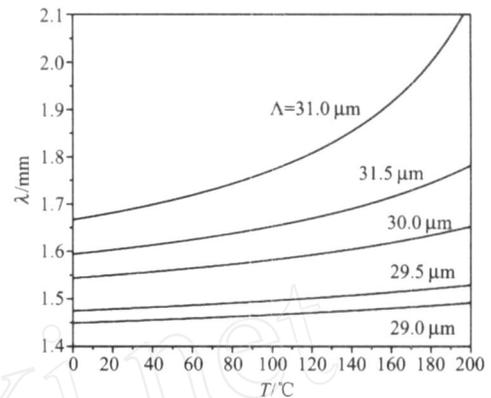


图 1 OPO 温度周期调谐理论曲线

Fig 1 OPO signal wavelength as a function of crystal temperature - period by theoretical calculation

考虑到铌酸锂晶体的折射率等参数在温度变化时也会随之改变, 因此可以利用温度调谐, 通过控制晶体温度来实现波长的调谐. 同时, 通过以上的分析可以看出, 改变晶体的周期结构大小, 也是实现对信号光以及闲频光波长调节的有效手段. 这里我们将晶体的温度调谐和周期调谐有机地结合起来, 我们利用掺镁铌酸锂晶体的非常光随温度变化色散方程<sup>[10]</sup>, 联立式 (2) 和式 (3), 得到了一阶 QPM PPMgLN 1.064μm 基频光泵浦下 OPO 输出波长的温度和周期调谐曲线, 如图 1 所示. 由图中我们可以看出, 通过周期、温度相结合的调谐, 可以实现信号光波长从 1.4 ~ 2.1μm 宽波段的可调谐输出.

## 3 实验及结果讨论

PPMgLN 器件是采用高压直流脉冲电场方法实现样品的周期畴结构反转. 这里我们采用短脉冲极化电流技术, 有效消除极化电流的热效应的影响, 脉冲宽度为 10ms, 脉冲周期为 110ms 在大小为 50.0mm × 7.0mm × 1.0mm 的 Z 切 1mm 厚的高掺镁 (5mol%) 铌酸锂上制备出了周期为 29.0 ~ 31.5μm 的多周期极化光栅高质量准相位匹配光参量振荡器件, 畴结构均匀, 为后续红外光参量振荡实现打下了基础.

对所研制的 PPMgLN 光学微结构基片, 通光端面抛光和镀膜处理后, 开展了红外光学参量振荡温度周期调谐实验, 实验装置如图 2 所示.

为了能够得到稳定的高转换效率的 OPO 信号光输出, 在查阅参考文献的基础上, 对泵浦源和 OPO 腔进行了优化设计, 图 2 是我们设计并采用的红外 OPO 实验装置示意图. 左边虚线方框中为泵浦

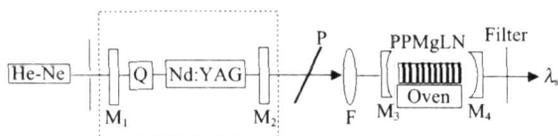


图 2 PPMgLN OPO 实验装置图

Fig 2 Experimental configuration for PPMgLN OPO

源谐振腔,右边装置为 OPO 激光器及谐振腔。氦氛激光器是为了准直。泵浦光源是二极管侧向泵浦的 Nd:YAG 全固态激光器,输出波长为  $1.064\mu\text{m}$ ,输出模式近  $\text{TEM}_{00}$ ,具有温度控制和冷却系统。选用双平腔,其结构简单易调,可有效地去除热透镜效应。输入镜  $M_1$ 对  $1.064\mu\text{m}$ 具有很高的反射率,反射率达到 99%,输出镜  $M_2$ 对  $1.064\mu\text{m}$ 的透过率为 10%。加入声光调 Q 晶体,重复频率在  $200\text{Hz} \sim 50\text{kHz}$ 。本实验我们选用  $1\text{kHz}$ ,脉冲宽度为  $120\text{ns}$ 。

泵浦光  $1.064\mu\text{m}$  输出后经偏振片和一焦距为  $100\text{mm}$  的透镜 F 聚焦到 PPMgLN 晶体的中心,聚焦后光斑半径约为  $100\mu\text{m}$ 。为了降低参量振荡的阈值,选择对  $1.064\mu\text{m}$  有反射作用的光参量振荡腔。谐振腔型采用双凹腔,考虑到晶体长度为  $50\text{mm}$  及晶体调整架的大小,OPO 腔由 2 个曲率半径均为  $100\text{mm}$  的凹面镜组成双凹腔,腔长为  $90\text{mm}$ ,PPMgLN 晶体位于谐振腔中心,构成激光共焦腔,由 ABCD 矩阵算得此谐振腔本征模束腰半径为  $110\mu\text{m}$ ,与泵浦光光斑尺寸基本匹配。OPO 输入镜  $M_3$ 对  $1.064\mu\text{m}$  高透,对信号光  $1.400 \sim 1.700\mu\text{m}$  高反;输出镜  $M_4$ 对  $1.064\mu\text{m}$  高反,反射率为 99% 以上,对  $1.400 \sim 1.700\mu\text{m}$  的信号光透过率在  $5 \sim 10\%$  之间,从而得到  $1.400 \sim 1.700\mu\text{m}$  的信号光输出。Filter 为滤光镜,对  $1064\text{nm}$  波段激光高反,对  $1.400 \sim 1.700\mu\text{m}$  波段的信号光透过率在 98% 以上。输入镜、输出镜以及滤光镜的基片均为普通的  $\text{K}_9$  玻璃,对闲频光 ( $3 \sim 5\mu\text{m}$ ) 是高吸收,上述 OPO 腔实现对信号光单谐振。本实验中所用的 PPMgLN 晶体的大小为  $50.0\text{mm}$  (沿 x 轴)  $\times 7.0\text{mm}$  (沿 y 轴)  $\times 1.0\text{mm}$  (沿 z 轴),晶体上沿 y 轴排列着  $29 \sim 31.5\mu\text{m}$  共 6 个周期,相邻周期之差为  $0.5\mu\text{m}$ 。PPMgLN 晶体放置在控温炉上,控温炉温度变化范围为:室温  $\sim 200$ ,精确度  $0.1$ 。同时,控温炉可以在垂直于光路的水平方向微调,实现晶体周期的调节。

图 3 是 PPMgLN 在周期  $\Lambda = 30.0\mu\text{m}$  OPO 信号光输出波长随温度变化的调谐曲线。由图中我们可以看出,通过调谐 PPMgLN 晶体的温度,范围为  $20$

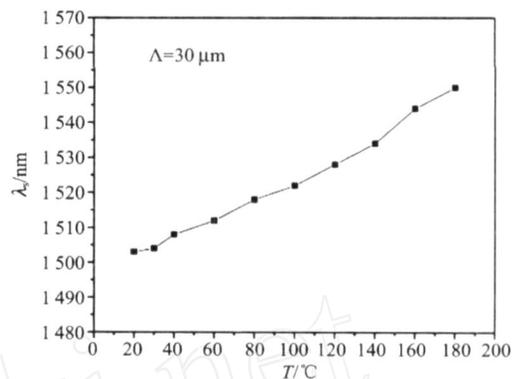


图 3 PPMgLN OPO 的信号光输出波长随温度调谐关系

Fig 3 PPMgLN OPO signal wavelength as a function of crystal temperature

$\sim 180$  ,得到了稳定的  $1503 \sim 1550\text{nm}$  信号光波长输出。温度每改变  $20$  ,输出波长变化不到  $6\text{nm}$ ,平均变化量为  $0.3\text{nm}/$  ,而我们设计使用的控温炉精确度为  $\pm 0.1$  ,保证了信号光输出波长稳定性,因此通过精细调节温度,可以得到  $1503 \sim 1550\text{nm}$  波段范围内信号光输出。

众所周知,由于铌酸锂晶体的光折变阈值与晶体温度有关,PLN 晶体在温度  $120$  以下,由于光折变效应信号光输出功率会迅速下降<sup>[11,12]</sup>,为避免晶体光折变损伤带来的影响,通常室温下 PLN 晶体很难实现高效率的光学参量振荡。而掺镁铌酸锂晶体具有优良的抗光损伤效应,只要 OPO 腔设计搭配合理,完全可以实验室室温下的光学参量振荡。本实验我们设计制备的 PPMgLN 晶体,在重复频率  $1\text{kHz}$  条件下,室温下光参量振荡阈值功率仅为  $45\text{mW}$ 。室温条件下,输入泵浦光功率  $225\text{mW}$ ,OPO 信号光输出功率可达  $36\text{mW}$ ,转换效率达到  $16.0\%$ 。由于 PPMgLN 晶体在室温下即可实现 OPO 信号光输出,有效地扩大了温度调谐范围。

在温度调谐基础上,我们系统讨论了 PPMgLN 晶体极化周期对信号光输出波长的调谐,图 4 为 PPMgLN OPO 信号光输出波长随极化周期变化的调谐曲线。由于光谱仪的探测范围为  $800 \sim 1700\text{nm}$ ,我们没有测得  $\Lambda = 31.5\mu\text{m}$  周期输出的信号光波长。从图 4 我们可以看到:在温度稳定的条件下,随着晶体极化周期的变化,OPO 信号光输出波长会发生明显改变,而且可调谐范围和幅度远大于温度调谐力度。工作温度控制在  $30$  时,极化周期宽度改变  $2\mu\text{m}$  ( $29.0 \sim 31.0\mu\text{m}$ ),OPO 信号光输出波长可以从  $1445\text{nm}$  变化到  $1589\text{nm}$ ,变化范围  $144\text{nm}$ ;工作温度在  $180$  时,OPO 信号光输出波长

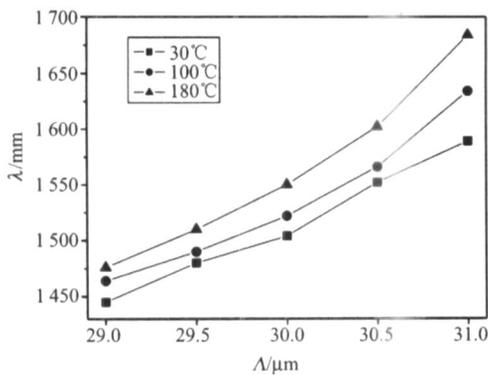


图4 PPMgLN OPO的信号光输出波长随周期调谐关系

Fig 4 PPMgLN OPO signal wavelength as a function of crystal periodicity

从 1476nm 变化到 1685nm, 波长变化范围达 209nm.

实验证明, 在一块掺镁铌酸锂晶体上制作多个周期极化微结构, 泵浦光泵浦不同的周期结构, 可以实现大范围的 OPO 信号光可调谐输出. 但是由于各个周期是分立的, 得到的信号光波长输出必然是非连续. 因此周期调谐往往需要与温度调谐相结合, 可以实现低阈值宽调谐的信号光连续输出. 通过温度和周期的精细调节, 我们实现了 1445 ~ 1685nm 波段信号光的连续可调谐输出, 调谐范围达到 240nm. 由于受实验中光谱仪的探测范围所限, 31.5 $\mu\text{m}$  周期输出的信号光波长没有测得, 实际的调谐波段范围应该更宽.

#### 4 结语

本文在讨论准相位匹配光学参量振荡理论基础上, 报道了利用二极管侧面泵浦的 Nd: YAG 全固态激光器 1.064 $\mu\text{m}$  输出为泵浦光, 对我们自己设计研制的大小为 50.0 mm  $\times$  7.0 mm  $\times$  1.0 mm 的多周期 (29.0 ~ 31.5 $\mu\text{m}$ ) Z 切高掺镁 (5mol%) PPMgLN 光学微结构进行红外光学参量振荡实验, 实现了光参量振荡阈值功率仅为 45mW (重复频率 1kHz), 并通过调谐晶体温度 (20 ~ 180) 和周期 (29.0 ~ 31.0 $\mu\text{m}$ ), 获得了输出波长调谐范围为 1445 ~ 1685nm 的信号光, 调谐宽度为 240nm.

#### REFERENCES

[1] YAO Jian-Quan. *Technique of Nonlinear Optical Frequency*

*Conversion and Tunable Lasers* [M]. Beijing: Science Press (姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术. 北京: 科学出版社), 1995.

- [2] CAI Shuang-Shuang, WU Bo, XU Hai-Bin, *et al* Study on infrared optical parametric oscillator based on PPMgLN [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (蔡双双, 吴波, 徐海斌, 等. 基于 PPMgLN 晶体的红外光参量振荡器研究. 红外与毫米波学报), 2006, 25 (5): 338—341
- [3] Mayers L E, Eckardt R C, Fejer M M, *et al* Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LNbO<sub>3</sub> [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1995, 12 (11): 2102—2116
- [4] Byer Robert L. Quasi-phase-matched nonlinear interactions and devices [J]. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 1997, 6 (4): 549—592
- [5] Bisson Scotte E, Armstrong Karla M, Kulp Thomas J, *et al* Broadly tunable, mode-hop-tuned cw optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate [J]. *Applied Optics*, 2001, 40 (33): 6049—6055.
- [6] CHEN Yun-Lin, LUO Yong-Feng, GUO Juan, *et al* Theoretical research of quasi-phase-matched all-optical wavelength conversion in LNbO<sub>3</sub> waveguides [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈云琳, 罗勇锋, 郭娟, 等. 准相位匹配 LNbO<sub>3</sub> 波导全光波长变换的理论研究. 红外与毫米波学报), 2004, 23 (5) 367—370.
- [7] KONG Yong-Fa, LIBing, CHEN Yun-Lin, *et al* Study on the micro-mechanism of Mg-doped lithium niobate crystals against photorefractive [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孔勇发, 李兵, 陈云琳, 等. 掺镁铌酸锂晶体抗光折变微观机理研究. 红外与毫米波学报), 2003, 22 (1): 40—44.
- [8] YAO Jiang-Hong, YAN Bo-Xia, CHEN Ya-Hui, *et al* Periodically poled second harmonic green light generation in near-stoichiometric MgO-doped LNbO<sub>3</sub> crystal [J]. *Laser Technology* (姚江宏, 颜博霞, 陈亚辉, 等. 周期极化近化学计量比掺镁铌酸锂晶体倍频研究. 激光技术), 2004, 28 (2): 141—143.
- [9] YAN Bo-Xia, YAO Jiang-Hong, CHEN Ya-Hui, *et al* Study on periodically poled characteristics of MgO: LNbO<sub>3</sub> and Second harmonic green light generation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (颜博霞, 姚江宏, 陈亚辉, 等. 高掺镁铌酸锂晶体周期极化及倍频特性研究. 红外与毫米波学报), 2005, 24 (3): 213—216
- [10] Jundt D H. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction,  $n_e$ , in congruent lithium niobate [J]. *Opt. Lett*, 1997, 22 (20): 1553—1555.
- [11] LIANG Xiao-Yan, HOU Wei, LÜ Jun-Hua, *et al* Low-threshold and wide tunable PPLN optical parametric oscillator [J]. *Chinese J. Lasers* (梁晓燕, 侯玮, 吕军华, 等. 低阈值宽调谐 PPLN 光参量振荡. 中国激光), 2002, A29 (1): 10—12
- [12] ZHANG Bai-Gang, YAO Jian-Quan, ZHANG Hao, *et al* Temperature tunable infrared optical parametric oscillator with periodically poled LNbO<sub>3</sub> [J]. *Chinese Physics Letters*, 2003, 20 (7): 1077—1080.