

文章编号: 1001-3806(2007)02-0120-03

## 周期极化掺镁铌酸锂晶体光参变产生研究

薛亮平, 姚江宏\*, 颜博霞, 贾国治, 许京军, 张光寅  
(南开大学 泰达应用物理学院, 天津 300457)

**摘要:** 为了获得 1.5 $\mu\text{m}$  波段可调谐红外光输出, 采用短脉冲电场极化法, 在 1mm 厚的掺镁 (摩尔分数为 0.05) 铌酸锂晶体上成功制备了周期为 29 $\mu\text{m}$  的极化光栅。利用声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 固体激光器直接抽运 PPMgLN 晶体, 开展了 OPG 光学转换研究工作。在输入 3W 的抽运光时, 得到信号光输出功率为 44mW, 转换效率 1.5%。并通过调谐晶体温度 (45 $^{\circ}\text{C}$  ~ 160 $^{\circ}\text{C}$ ), 获得了调谐范围 1.4538 $\mu\text{m}$  ~ 1.4750 $\mu\text{m}$  的信号光输出。实现了可调谐红外光的输出, 验证了晶体周期结构的均匀性。

**关键词:** 激光技术; 光参变产生; 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

### Study on optical parametric generation based on periodically poled MgO:LNbO<sub>3</sub> crystal

XUE Liangping, YAO Jianghong, YAN Boxia, JIA Guozhi, XU Jingjun, ZHANG Guangyin  
(TEDA Applied Physics School Nankai University, Tianjin 300457, China)

**Abstract** By using short pulse field the periodically poled grating ( $\Lambda = 29\mu\text{m}$ ) was successfully fabricated in 1.0mm thick MgO:LNbO<sub>3</sub> (mole fraction of doped MgO is 0.05). A high-repetition-rate optical parametric generation (OPG) based on PPMgLN pumped by a 1.064 $\mu\text{m}$  acousto-optically Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser. Under the condition of 3W of input pump power, 44mW of output signal power was obtained and the conversion efficiency was 1.5%. Furthermore a tunable infrared (IR) output from 1.4538 $\mu\text{m}$  ~ 1.4750 $\mu\text{m}$  was obtained by tuning the temperature of PPMgLN (45 $^{\circ}\text{C}$  ~ 160 $^{\circ}\text{C}$ ).

**Key words** laser technique; optical parametric generation (OPG); periodically poled MgO:LNbO<sub>3</sub> crystal (PPMgLN); quasi-phase match

## 引 言

可调谐红外相干光源在军事对抗、大气环境监测、医学、特殊环境远距离监控以及光谱学研究等许多领域有重要的应用价值。光参变振荡器 (OPO) 是可调谐激光产生的重要手段之一, 将具有一定频率的激光转换为信号光和闲频光的相干输出, 其特点是结构简单, 调谐范围宽。除了传统的双折射相位匹配 (birefringent phase matched BPM) 技术以外, 随着周期极化晶体制作工艺的日趋成熟, 使得准相位匹配 (quasi-phase matched QPM) 技术在光参变振荡中的应用更加广泛<sup>[1~3]</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。众所周知, 铌酸锂晶体以其优异的光电性能, 成为制备周期极化准相位光学器件的常用材料之一, 但一般条件下生长出来的同成分铌酸锂晶体 ([Li]/[Nb] 为 48.5/51.5) 存在着光折变引起的光损伤及室温下极化电场过大 (通常在 21kV/mm 左右) 等缺点, 这已成为制约其作为光频转换器件大功率输出和快速调谐的主要障碍<sup>[4,5]</sup>。

与同成分铌酸锂晶体材料相比, 高掺镁 (摩尔分数大于 0.046) 铌酸锂晶体具有大的非线性系数和高光折变阈值<sup>[6,7]</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, 铌酸锂晶体掺镁 (摩尔分数为 0.05) 之后, 晶体的极化矫顽场仅为 3kV/mm<sup>[8]</sup>, 比同成分铌酸锂矫顽场降低了几乎一个量级, 这有利于增大其通光孔径, 制备出高性能的周期极化材料器件<sup>[9]</sup>。

在讨论准相位匹配光参变振荡理论基础上, 报道了在大小为 7.0mm × 50.0mm × 1.0mm 的 z 切高掺镁

基金项目: 国家自然科学基金重大计划资助项目 (90501004); 天津市自然科学基金资助项目 (033600911); 长江学者和创新团队发展计划资助项目

作者简介: 薛亮平 (1979-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为红外光参变振荡器。

\* 通讯联系人。E-mail: yaohj@nankai.edu.cn

收稿日期: 2006-01-18 收到修改稿日期: 2006-03-10

(摩尔分数为 0.05) 铌酸锂上制备了周期极化光学微结构, 光栅周期为  $29\mu\text{m}$ , 周期数为 1700, 并且以  $1.064\mu\text{m}$  的 Nd:YAG 激光为抽运光, 进行了红外光参变产生试验, 在抽运光输入功率为 3.0W, 控温炉温度为  $160^\circ\text{C}$  时, 得到了 44mW 的红外信号光输出, 转换效率约为 1.5%。并且通过调谐晶体温度 ( $45^\circ\text{C} \sim 160^\circ\text{C}$ ), 获得了调谐范围  $1.4538\mu\text{m} \sim 1.4750\mu\text{m}$  的信号光输出。

## 1 准相位匹配光学参变振荡理论

光参变产生 (optical parametric generation OPG) 是用非线性晶体作为参变耦合元件, 将一个功率大的高频激光  $\omega_p$  (抽运光) 和一个弱的低频激光  $\omega_s$  (信号光) 同时入射到非线性晶体上, 弱的激光被放大, 同时产生了一个低频率  $\omega_i$  (闲频光)。由能量守恒条件得到光参变放大的频率条件为:

$$\frac{1}{\lambda_p} - \frac{1}{\lambda_s} - \frac{1}{\lambda_i} = 0 \quad (1)$$

准相位匹配技术是在铁电体晶体 (如  $\text{LiNbO}_3$ ) 中制成自发极化率  $P_s$  呈周期反转的铁电畴结构, 即周期性地调制二阶非线性系数  $d_{33}$  的符号使其半周期等于一个相干长度。为了利用最大二阶非线性系数  $d_{33}$ , 抽运光和信号光以 e 光形式同时入射到铌酸锂晶体中。由于二阶非线性极化, 在晶体内部产生一个频率为  $\omega_i = \omega_p - \omega_s$  闲频光 (e 偏振), 当闲频光与信号光在第 1 个相干长度末端达到最大值时, 二阶非线性系数  $d_{33}$  反号, 则信号光与闲频光的相位改变  $180^\circ$ , 因此, 它们在此区域通光方向继续增强; 闲频光又与抽运光发生非线性耦合, 再由二阶非线性极化辐射出  $\omega_s = \omega_p - \omega_i$  的信号光。由于抽运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, 上述非线性混频过程持续进行, 抽运光能量不断耦合到信号光和闲频光中, 从而形成光参变放大, 结构示意图如图 1 所示。因此, 由动



Fig 1 The simple configuration of OPG

量守恒条件可得光参变放大的准相位匹配条件为:

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

波长表达式为:

$$\Delta k = 2\pi \left[ \frac{n(\lambda_p, T)}{\lambda_p} - \frac{n(\lambda_s, T)}{\lambda_s} - \frac{n(\lambda_i, T)}{\lambda_i} - \frac{m}{\Lambda} \right] \quad (3)$$

式中,  $\Lambda$  为极化反转光栅周期,  $m = 1, 3, 5, \dots$  为极化反转光栅周期阶数。  $k_p = \frac{2\pi n_p}{\lambda_p}$ ,  $k_s = \frac{2\pi n_s}{\lambda_s}$ ,  $k_i = \frac{2\pi n_i}{\lambda_i}$  分别

为抽运光、信号光与闲频光的波传播矢量,  $n_p, n_s, n_i$  分别为抽运光、信号光与闲频光的折射率,  $\lambda_p, \lambda_s, \lambda_i$  分别为抽运光、信号光与闲频光在真空中的波长。

在实验中, 信号光和闲频光是通过参变散射或荧光引起的噪声光子产生的。也就是不需要输入信号光, 直接将抽运光  $\omega_p$  辐射在非线性光学晶体中, 即可对量子噪声中的两个频率 (信号光  $\omega_s$  和闲频光  $\omega_i$ ) 辐射产生放大。

## 2 实验及结果

掺镁铌酸锂晶体的周期极化是采用外加电场极化法。为了克服晶体均匀性差造成的影响, 作者提出用短脉冲极化电流技术来消除极化电流的热效应, 使用脉冲宽度为 10ms 脉冲周期为 110ms 的外加电场, 在大小为  $50.0\text{mm} \times 7.0\text{mm} \times 1.0\text{mm}$  的已单畴化且经过抛光的 z 切高掺镁铌酸锂 (摩尔分数为 0.05) 基片上制备出周期为  $29\mu\text{m}$ , 周期数为 1700 的周期极化掺镁铌酸锂光学微结构 (详见参考文献 [8])。实验中极化矫顽场为  $3\text{kV}/\text{mm}$  与同成分铌酸锂 ( $21\text{kV}/\text{mm}$ ) 相比降低了近一个量级。图 2 为样品 +z 面腐蚀之后在显微镜下观察到畴结构, 周期极化结构均匀, 占空比接近 50%, 良好的周期结构为随后光学实验打下基础。

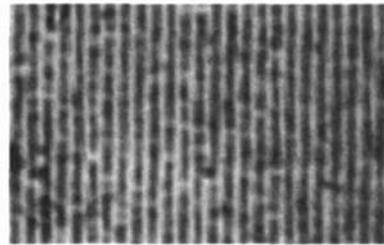


Fig 2 Cross sectional micro photograph of the periodically domain inverted structure with a period of  $29\mu\text{m}$

对以上制备的周期极化掺镁铌酸锂晶体样品抛光之后, 进行了红外光参变产生实验。图 3 为红外光参变产生实验装置示意图。

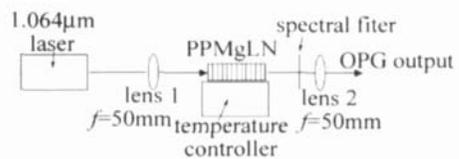


Fig 3 Experimental configuration of the PPMgLN OPG

选用声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 全固态激光器输出的  $1.064\mu\text{m}$  作为抽运光, 重复频率 50kHz 脉冲宽度 80ns 聚焦透镜焦距 50mm, 聚焦光斑半径约为  $100\mu\text{m}$ , 控温炉温度的变化范围为  $30^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ , 精确度  $0.1^\circ\text{C}$ 。抽运光经聚焦后直接入射到晶体中心, 在另一端, 输出光经滤光片 (滤掉  $1064\text{nm}$  抽运光及其倍频光) 和聚焦透镜后进入光谱仪, 测得  $1.4538\mu\text{m} \sim$

1.4750 $\mu\text{m}$ 的信号光输出。所用的测试仪器为 Agilent 86142B 型光纤光谱仪,用来测量 PPMgLN OPG 在 600nm~1700nm 范围输出光光谱; Molelectron PM500A-2 型功率计,用来测量 PPMgLN 输出光的平均功率。由于聚焦透镜是 K9 玻璃,对 3 $\mu\text{m}$ ~4 $\mu\text{m}$  的闲频光高吸收,所以只探测到信号光。

在实验中,移动入射点,发现不同入射点处输出功率变化不大,说明样品的周期畴结构基本均匀。通过改变控温炉的温度,系统研究了不同温度下的信号光波长,并测量了信号光的光功率。表 1 中给出了不同温度下测得的信号光波长,并根据 (1) 式计算得到相应的闲频光波长,式中,  $\lambda_p = 1.064\mu\text{m}$

Table 1 The output wavelength of OPG at different crystal temperature

$T/^\circ\text{C}$	$\lambda_s/\mu\text{m}$	$\lambda_i/\mu\text{m}$
45.0	1453.8	3968
60.4	1456.0	3952
72.9	1458.2	3936
88.0	1460.0	3923
110.0	1465.0	3887
160.0	1475.0	3818

由表中可以看出,通过控制 PPMgLN 晶体的温度 (45 $^\circ\text{C}$ ~160 $^\circ\text{C}$ ), 可以实现对信号光输出波长在 1.4538 $\mu\text{m}$ ~1.4750 $\mu\text{m}$  范围内控制。

同时观测了 OPG 信号光功率随抽运光功率变化曲线,见图 4。从图中可以看出,在输入功率为 3W 时,得到了 44mW 的红外信号光输出,转换效率为 1.5%。此时,信号光输出能够连续工作 100h 以上,输出功率波动小于 8%。

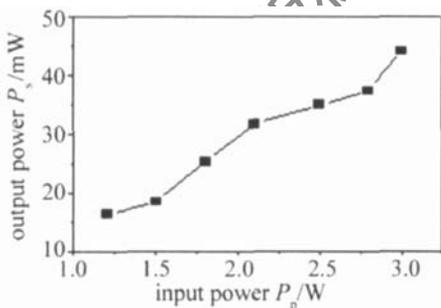


Fig 4 The signal output power versus the pump input power ( $T = 160^\circ\text{C}$ ,  $\Lambda = 29\mu\text{m}$ )

能实现红外光参变产生,证实晶体周期结构具有很好的质量,完全可以用于红外激光频率转换实验,这为进一步开展光学参变振荡研究,实现高效率抽运光转换打下了良好基础。同时,在此基础上,如果在以下几个方面做出改进:(1)进一步降低抽运光重复频率来提高峰值功率;(2)在聚焦透镜的两侧镀增透膜以

减少损耗;(3)选用更长的晶体,并进一步优化晶体周期极化结构与质量,OPG 转换效率还可以有所提高。但是,由于光参变产生本身就有转换效率不高的缺点,所以,要想实现高转换效率、大输出功率,必须考虑设计谐振腔,实现光参变振荡(OPO)。作者在此基础上已经利用该 PPMgLN 晶体开展了 OPO 光参变振荡实验,初步证实转换效率可达 20%,进一步实验还在进行中,具体结果将另文发表。

### 3 结 论

通过施加 3kV/mm 的脉冲电场,成功地制备了大小为 50.0mm $\times$ 7.0mm $\times$ 1.0mm,光栅周期为 29 $\mu\text{m}$ ,周期数为 1700 的周期极化掺镁铌酸锂晶体。以波长 1.064 $\mu\text{m}$  的声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器作为抽运源对其进行了 OPG 实验,在输入功率为 3W、控温炉温度为 160 $^\circ\text{C}$  时,得到了 44mW 的 1.4750 $\mu\text{m}$  红外信号光输出,转换效率为 1.5%。并且通过调谐晶体温度 (45 $^\circ\text{C}$ ~160 $^\circ\text{C}$ ), 获得了调谐范围为 1.4538 $\mu\text{m}$ ~1.4750 $\mu\text{m}$  的信号光输出。

### 参 考 文 献

- [1] 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]. *JOSA*, 1995, B12(11): 2102~2116
- [2] BYER R L Quasi phase-matched nonlinear interactions and devices [J]. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials* 1997, 6(4): 549~592
- [3] BESSON S E, ARMSTRONG K M, KULP T *et al* Broadly tunable mode-hop-tuned CW optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate [J]. *Appl Opt* 2001, 40(33): 6049~6055
- [4] WEN J K, WANG L, TANG Y Sh *et al* Enhanced resistance to photorefractive and photovoltaic effect in Li-rich LNbO<sub>3</sub>:Mg crystals [J]. *A P L*, 1988, 53(4): 260~262
- [5] CARMANY J, MONTOYA E, BERMUDEZ V *et al* Self-frequency doubling in Yb<sup>3+</sup> doped periodically poled LNbO<sub>3</sub>:MgO bulk crystal [J]. *A P L*, 2000, 76(11): 1374~1376
- [6] ZHONG G G, JIN J WU Zh K Measure of optically induced refractive index damage of lithium niobate doped with different concentration of MgO [A]. *Proceeding of 11th International Quantum Electronic Conference* [C]. Washington DC: IEEE, 1980, 631~633
- [7] YAO JH, YAN B X, CHEN Y H *et al* Periodically poled second harmonic green light generation in near-stoichiometric MgO-doped LNbO<sub>3</sub> crystal [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(2): 141~143 (in Chinese).
- [8] YAN B X, YAO JH, CHEN Y H *et al* Study on periodically poled characteristics of MgO:LNbO<sub>3</sub> and second harmonic green light generation [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* 2005, 24(3): 213~216 (in Chinese).
- [9] YAO JH, CHEN Y H, XU J *et al* Study on periodical poled domain reversal characteristics of near-stoichiometric LNbO<sub>3</sub> crystals [J]. *Acta Physica Sinica* 2002, 51(1): 192~196 (in Chinese).