

文章编号: 1001-3806(2016)03-0409-04

周期性极化掺镁铌酸锂晶体光参量振荡研究

曾江斌^{1,2}, 陈怀熹², 梁万国^{2*}, 缪龙², 周煌², 冯新凯², 邹小林², 李广伟²

(1. 福州大学 材料科学与工程学院, 福州 350116; 2. 中国科学院 福建物质结构研究所, 福州 350002)

摘要: 为了实现高转化率 $3\mu\text{m}$ 红外激光光参量振荡输出, 采用外加脉冲电场法在厚度为 1mm、掺摩尔分数为 0.05 的镁铌酸锂晶体上成功制备了周期为 $31.2\mu\text{m}$ 的极化光栅, 理论计算并模拟了 1064nm 激光抽运周期极化铌酸锂晶体时, 闲频光波长随温度的对应关系, 并进行了实验验证。利用 1064nm 声光调 Q Nd:YAG 激光器作为抽运源对样品进行了光学参量振荡实验, 其中, 脉冲激光脉宽为 200ns, 重复频率是 20kHz。在控制温度为 80°C 、输入抽运光功率为 5.567W 时, 光参量振荡输出波长 $3\mu\text{m}$ 的闲频光功率为 1.141W, 光光转换效率达到 20.1%。结果表明, 通过此方法制备的周期性极化铌酸锂晶体光参量振荡, 具有较高的光光转换效率。

关键词: 非线性光学; 光参量振荡; 周期性极化掺镁铌酸锂晶体; 准相位匹配**中图分类号:** O437.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.023Research of optical parametric oscillation of periodically poled MgO-doped LiNbO₃ crystalZENG Jiangbin^{1,2}, CHEN Huaixi², LIANG Wanguo², MIAO Long²,
ZHOU Huang², FENG Xinkai², ZOU Xiaolin², LI Guangwei²

(1. College of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2 Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In order to achieve high conversion rate of $3\mu\text{m}$ infrared laser output from an optical parametric oscillation, by using the applied pulse electric field method, periodically poled grating of $31.2\mu\text{m}$ was prepared on MgO-doped (mole fraction of 0.05) lithium niobate crystal with the thickness of 1mm. The relationship between idler wavelength and temperature when periodically poled MgO-doped LiNbO₃ pumped by 1064nm pulsed laser was studied by theoretical calculation and simulation. Acousto-optic Q -switched Nd:YAG laser with the wavelength of 1064nm was used as the fundamental source to operate optical parametric oscillation experiment with pulse width of 200ns and repetition rate of 20kHz. When pulse input power is 5.567W at the temperature of 80°C , idler output power of 1.141W was obtained with output wavelength of $3\mu\text{m}$. The maximum conversion efficiency from incident pump power to idler output was 20.1%. The results show that this method of preparation by periodically poled lithium niobate optical parametric oscillation has high optical conversion efficiency.

Key words: nonlinear optics; optical parametric oscillation; periodically poled MgO-doped LiNbO₃; quasi phase match

引言

$3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 波段中红外激光在大气环境检测^[1]、光谱测量、医疗等民用领域具有广泛用^[2]。同时在军用领域方面, $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 中红外激光被广泛应用作光电对抗的激光光源^[3]。光参量振荡 (optical parametric oscillation, OPO) 是产生中远红外激光的重要手段之一, 周期性极化晶体制作工艺的日益成熟, 使准相位匹

配技术得以在光参量振荡中广泛应用^[4-6]。在 $3\mu\text{m}$ 波长 OPO 研究领域中, 国内外众多科研单位对 OPO 进行了大量研究, 并取得了较好的研究成果。南开大学物理学院 YAN 等人^[7]采用重复频率为 10kHz 的抽运光, 当功率为 1.35W 时, OPO 获得功率为 161.9mW 的 $3.02\mu\text{m}$ 闲频光。2006 年, 英国牛津大学的 GRILLI 等人^[8]采用 1064nm 二极管抽运光源, OPO 获得了功率为 200 μW 、波长为 $3.08\mu\text{m}$ 的输出闲频光, 闲频光转换效率为 12.3%。2010 年, 中国工程物理研究院利用 1064nm 声光调 Q Nd:YAG 激光器抽运 OPO, 抽运光功率为 145W 时, OPO 获得输出波长为 $3.8\mu\text{m}$ 、功率为 22.6W 的闲频光, 其光光转换效率达到了 15.6%^[9]。2014 年, XIE 等人采用 1064nm 抽运光, 获得了 11.14%

基金项目: 中国科学院科研装备研制资助项目

作者简介: 曾江斌 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事非线性光学研究。

* 通讯联系人。E-mail: wgl@fjirsm.ac.cn

收稿日期: 2015-03-31; 收到修改稿日期: 2015-04-23

的 $3.8\mu\text{m}$ 闲频光转换率^[10]。南安普顿大学的 LIN 利用波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的全光纤保偏掺 Yb^{3+} 光纤激光器为抽运光源,其平均功率为 58W 时,OPO 获得输出功率为 21W ,其中 $3.82\mu\text{m}$ 闲频光功率为 5.5W ,转换效率为 9.4% ^[11]。

本文中在讨论准相位匹配光学参量振荡理论的基础上,利用脉冲极化电压法,在 7.5cm z 切掺镁(摩尔分数为 0.05) 铌酸锂晶体上制备了极化周期结构,并制作成 $55\text{mm} \times 10\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的极化晶体器件。采用 1064nm 作为抽运源,对制备的周期性极化掺镁铌酸锂光学参量振荡器输入的抽运光和闲频光的光谱和功率进行了测量和分析,讨论了闲频光与输入光功率关系曲线,获得了比较满意的结果。

1 理论分析

准相位(quasi phase match, QPM)是一种设计晶体周期结构以达到满足相位匹配关系匹配的技术,它最大的优点就是可以通过人为合理控制畴反转周期,实现理想的非线性相位匹配,获得符合实际应用要求的输出光^[11]。

PPMgOLN 晶体与温度有关的色散方程为:

$$n_e^2 = 5.756 + 2.86 \times 10^{-6}f + \frac{0.0983 + 4.7 \times 10^{-8}f}{\lambda^2 - (0.2020 + 6.11 \times 10^{-8}f)^2} + \frac{189.32 + 1.516 \times 10^{-4}f}{\lambda^2 - 12.52^2} - 0.0132\lambda^2 \quad (1)$$

式中, $f = (T - 24.5^\circ\text{C})(T + 570.82^\circ\text{C})$, T 为摄氏温度, λ 为入射光波长, n_e 为晶体对入射波长非常光折射率。

光参量振荡技术是指将一个大功率高频激光(ω_p 是抽运光频率)入射到非线性晶体(如铌酸锂等)上,由于晶体的非线性作用,产生了两个低频激光,作者分别把它们叫做信号光 ω_s 和闲频光 ω_i 。由能量守恒条件,2 种激光的频率必须满足^[12]:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (2)$$

由动量守恒条件^[13]:

$$\frac{n_p}{\lambda_p} = \frac{n_s}{\lambda_s} + \frac{n_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\Lambda} \quad (3)$$

式中, $\omega_p, \omega_s, \omega_i$ 分别表示抽运光频率、信号光频率和闲频光频率; n_p, n_s, n_i 分别表示晶体对抽运光、信号光和闲频光的折射率; $\lambda_p, \lambda_s, \lambda_i$ 分别表示抽运光、信号光和闲频光波长; Λ 为晶体极化周期,由理论可知,通过合理设计极化周期,能够获得实际需要的信号光或闲频光输出。

2 实验及结果

2.1 周期性极化样品的制备

光学超晶格极化晶体的准位相匹配概念在 20 世纪 60 年代就已经被提出来,但是直到 1993 年外加电场极化的方法^[14-17]实现了铌酸锂畴结构反转,才使得光学超晶格极化晶体的制作工艺逐渐成熟。本文中对周期极化晶体的制备同样是基于借用于现代微电子的光刻技术,在 1mm 厚 z 切掺镁铌酸锂单畴晶片表面制作特定周期结构的电极,并对晶体施加精确控制电场,控制脉冲幅度、脉冲个数和脉宽^[18]来实现所需的周期畴反转。图 1 为由外加脉冲极化电场得到的样品在腐蚀之后,通过显微镜观察到的 $+z$ 面图样,极化晶体周期为 $31.2\mu\text{m}$,极化结构较为均匀。

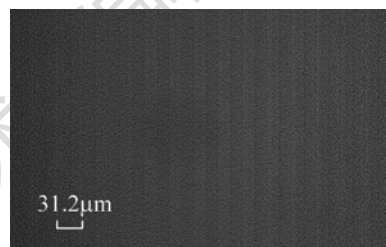


Fig. 1 Image of PPMgOLN + z face after etching

2.2 样品光参量振荡实验

光参量振荡实验装置如图 2 所示。

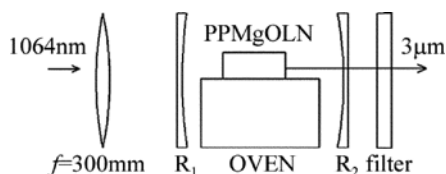


Fig. 2 Experiment setup of optical parametric oscillator

图 2 中抽运光为 1064nm 脉冲激光,选用单谐振腔,其结构简单而且易调,谐振腔物理腔长 55mm 。本实验中,设计的声光调 Q 开关重复频率为 20kHz ,脉冲宽度为 200ns 。输出抽运光后,经一焦距为 $f = 300\text{mm}$ 的透镜聚焦到样品中心,聚焦光斑约为 $150\mu\text{m}$ 。光学参量振荡器谐振腔是由两个平凹镜组成的双凹腔,将样品置于谐振腔中心位置。输入镜 R_1 对抽运光 1064nm 具有很高的透射率,透射率为 99.5% ,对信号光 1648nm 具有很高的反射率,反射率约为 98% ;输出镜 R_2 对 1064nm 具有较高的反射率,同时对 $3\mu\text{m}$ 波长的透射率为 85% ,再经滤波器输出,从而得到 $3\mu\text{m}$ 闲频光单谐振输出。

图 3 为样品光学振荡实验中闲频光输出功率随抽运光熟路功率变化曲线。实验中通过温控炉将样品温度控制为 80°C ,调节抽运光输入功率,调谐范围为

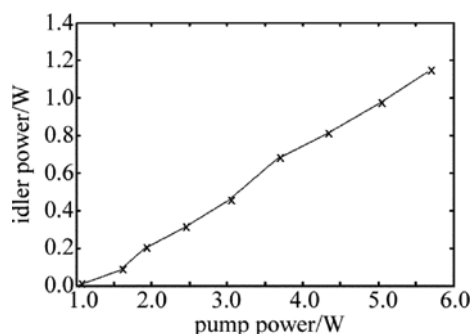


Fig. 3 Relationship between of idler power and pump power while the maximum idler power was 1.141 W with pump power of 5.657 W

1.03 W ~ 5.65 W。图 4 所示为 PPMgOLN 样品光光转换效率随输入抽运功率变化曲线。实验表明, 闲频光输出功率随着输入功率增加而增加, 光光转换效率也随之增加; 当输入功率为 5.65 W 时, 输出闲频光功率为 1.14 W, 此时光光转换效率达到最大, 为 20.1%。

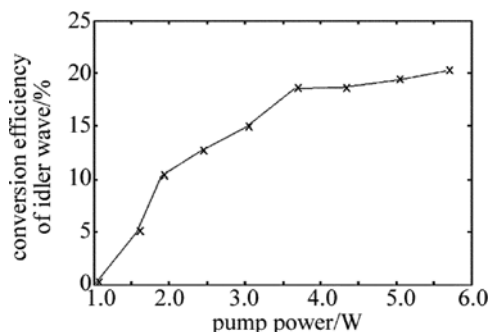


Fig. 4 Relationship between optic-optic conversion efficiency and pump power while the maximum efficiency was 20.1% with pump power of 5.657 W

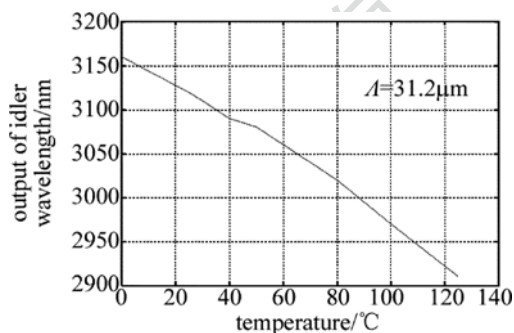


Fig. 5 Relationship between output idler wavelength and temperature

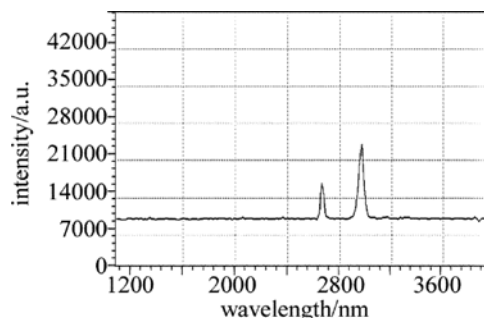


Fig. 6 Spectrum of idler of PPMgLN OPO at 80°C

图 5 所示为理论模拟闲频光波长随温度变化调谐曲线, 由图计算得知, 温度控制在 80°C 左右, 输出波长为 3 μm 的闲频光, 与实验结果较为符合。图 6 所示为 80°C 时光谱仪获得的光谱图。图 7 为实验时拍摄的 OPO 输出光斑图。

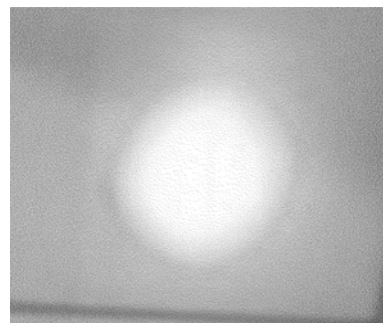


Fig. 7 Picture of idler of OPO at 80°C

3 结 论

采用外加脉冲电压法, 成功制备尺寸规格为 45 mm (长) × 10 mm (宽) × 1 mm (高) 的摩尔分数为 0.05 的 OPO 用 PPMgOCL 晶体, 极化周期为 31.2 μm。采用 1064 nm 波长全固态激光器作为抽运光, 在输入功率为 5.657 W、控制温度为 80°C 时, OPO 获得的 3 μm 闲频光最大功率为 1.141 W, 转化效率达到 20.1%。

在此特别感谢中国科学院福建物质结构研究所张戈研究员、陈玮冬等人在实验过程中给予的巨大帮助。

参 考 文 献

- [1] QIN X F, ZHOU W D. Progress of mid-infrared continuous wave optical parametric oscillator technique based on PPLN crystal [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 37(2):198-203 (in Chinese).
- [2] LIANG X Y, HOU W, LU J H, *et al.* All-solid-state pumped tunable PPLN optical parametric oscillator [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(9):1148-1149 (in Chinese).
- [3] CHEN Sh Zh, CHEN B. Application of Infrared technology in military [J]. Optical Technique, 2006, 32(s1):581-586 (in Chinese).
- [4] MYERS L E, ECKARDT R C, FEJER M M, *et al.* Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃ [J]. Journal of the Optical Society of America, 1995, B12(11):2102-2116.
- [5] BADER U, BARTSCHKE J, KLIMOV I, *et al.* Optical parametric oscillator of quasi-phase matched LiNbO₃ pumped by a compact high repetition rate single-frequency passively Q-switched Nd:YAG laser [J]. Optics Communications, 1998, 147(1/3):95-98.
- [6] BUTTERWORTH S D, PRUNERI V, HANNA D C. Optical parametric oscillation in periodically poled lithium niobate based on continuous-waves pumping at 1.047 μm [J]. Optics Letters, 1996, 21(17):1345-1347.
- [7] YAN C X, WANG H J, JIN Sh. Study on infrared spectrum of optical parametric oscillator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(10):1015003 (in Chinese).
- [8] GRILLI R, CIAFFONI L, HANCOCK G, *et al.* Mid-infrared ethene detection using difference frequency generation in a quasi-phase-mat

- ched LiNbO₃ waveguide[J]. Applied Optics, 2009, 48(30):5696-5703.
- [9] WEI X B. Research on mid-infrared PPLN-OPO[D]. Mianyang:China Academy of Engineering Physics, 2010:1-93 (in Chinese).
- [10] XIE Y Zh, WAN Y. Study on mid-infrared laser PPMgLN optical parametric oscillators [J]. Laser Technology, 2014, 38(2):368-371 (in Chinese).
- [11] LIN D, ALAM S U, SHEN Y, *et al.* An all-fiber PM MOPA pumped high-power OPO at 3.82 microns based on large aperture PPMgLN[J]. Proceedings of the SPIE, 2012, 8237:82371k.
- [12] YAO J H, LI G G, XU J J, *et al.* New development of quasi-phase-matching (QPM) technique[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1999, 16(4):290-294 (in Chinese).
- [13] DENG H R, LI T. Theory analysis of 2μm laser output based on PPLN [J]. Laser Technology, 2013, 37(1):63-67 (in Chinese).
- [14] YAMADA M, NADA N, SAITOH M, *et al.* First-order quasi-phase-matched LiNbO₃ waveguide periodically poled by applying an external field for efficient blue second-harmonic generation[J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(5):435-436.
- [15] ISHIZUKI H, SHOJI I, TAIRA T. Periodical poling characteristics of congruent MgO:LiNbO₃ crystals at elevated temperature[J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(23):4062-4064.
- [16] KURODA A, KURIMURA S. Domain inversion in ferroelectric MgO:LiNbO₃ by applying electric fields[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(11):165-167.
- [17] BRYAN D A, GERSON R, TOMASCHKE H E. Increased optic damage resistance in the lithium niobate[J]. Applied Physics Letters, 1984, 44(9):847-849.
- [18] YAO J H, CHEN Y H, DENG H L, *et al.* Study on periodically polarization characteristics of near stoichiometric MgO-doped LiNbO₃ crystal[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2003, 22(1):35-39.