

基于镁掺杂的周期性畴反转铌酸锂的 宽调谐光参量振荡器*

吴 波 蔡双双 沈剑威 沈永行

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 310027)

(2006 年 9 月 4 日收到 2006 年 10 月 23 日收到修改稿)

报道基于 6 mol% 镁掺杂的周期性畴反转掺镁铌酸锂 (PPMgLN) 的宽调谐光参量振荡器 (OPO). PPMgLN 采用外加电场法制作, 周期为 27.8—31.6 μm , 周期间隔为 0.2 μm . 光参量振荡器的抽运源采用输出为 1.064 μm 的声光调 Q 的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 激光器, 其调谐范围为 1.42—1.73 μm (信号光) 和 2.76—4.27 μm (闲散光), 斜率效率达到 47%. 在输入功率为 10.6 W 时, 输出功率达到 4.8 W (信号光和闲散光之和).

关键词: 周期性畴极化掺镁铌酸锂, 宽调谐光参量振荡器

PACC: 4265, 4265K

1. 引 言

光参量振荡器可作为各种波段波长固定激光器的替代品, 已广泛应用于军事、生物、环境等领域, 特别是在中红外波段, 光参量振荡器由于其具有较高的转换效率和宽调谐范围而得到越来越多的重视. 自 1993 年使用外加电场法成功制作出周期性畴极化铌酸锂 (PPLN) 以后^[1], 基于准相位匹配 (QPM) 技术的光参量振荡器的研究迅速发展起来^[2-6]. 由于该技术在非线性晶体的透光范围内的任何波长都可实现相位匹配, 且能利用非线性晶体的最大非线性系数, 使基于该技术的光参量振荡器具有很高的转换效率, 这些优点让光参量振荡器的应用范围得到了进一步扩展.

但是, 铌酸锂晶体的高矫顽场 (21 kV/mm)^[7] 和 低的光损伤阈值 (100 MW/cm²)^[8] 极大地限制了 PPLN 在高功率光参量振荡器中的应用. 为了解决这些问题, 掺杂铌酸锂晶体, 特别是掺镁铌酸锂晶体被认为是一个可行的方法^[9]. 据报道, 5 mol% 掺镁铌酸锂能有效地降低其矫顽场 (室温下约为纯铌酸锂晶体的 1/4), 同时也极大地提高了其光损伤阈值 (约为纯铌酸锂的 100 倍). 近年来, 关于 5 mol% 掺镁铌酸

锂的周期性畴极化反转和基于 5 mol% PPMgLN 的光参量振荡器的研究有很多的报道^[10-16], 据国外报道, 3 mm 厚的 5 mol% PPMgLN 已经制作成功, 某些基于 5 mol% PPMgLN 的 OPO 的转换效率也达到 70%^[17, 18], 但是对于其他浓度的掺镁铌酸锂的畴极化反转和应用却鲜有研究. 考虑到加入更高浓度的 MgO 后, 铌酸锂的抗光损伤阈值可能会有得到进一步的提高, 因此, 对其他掺镁浓度的铌酸锂的研究具有一定的实用和科学价值. 本文将介绍 6 mol% 掺镁铌酸锂的周期性畴极化反转和基于此的宽调谐范围光参量振荡器的一些性质, 同时给出 6 mol% 掺镁铌酸锂的 Sellmeier 方程.

2. 周期性畴极化掺镁铌酸锂

本实验采用直径为 76.2 mm, 厚度为 1 mm 的高掺杂 (6 mol%) 掺镁铌酸锂晶片 (购于中电科技华莹电子有限公司) 制作 PPMgLN. 反转前, 采用光刻技术在晶片的 +Z 面上制作出周期性的铝电极, 周期方向与 X 方向平行, 周期为 27.8—31.6 μm , 周期间隔为 0.2 μm .

采用外加电场法制作 PPMgLN, 实验步骤和环境类似于文献 [19]. 反转过程中, 温度为 170°C, 反

* 可调谐 (气体) 激光技术国防科技重点实验室基金 (批准号: 514720105 04JW0401), 浙江省科技厅重点科技计划项目 (批准号: 2005C21034) 资助的课题.

转电场强度为 1.4 kV/mm (与 5 mol\% 掺镁铌酸锂的反转电压相当,仅为纯铌酸锂的 $1/17$),持续时间为 0.8 s .

将反转后的晶片在室温下置于 40% 的氢氟酸中腐蚀 1 h ,其 $+Z$ 面的腐蚀图案见图 1.从图 1 可以看出,反转和未反转的畴的比例为 $1:1$,是光频转换的最佳占空比,有利于提高光频的转换效率;且反转

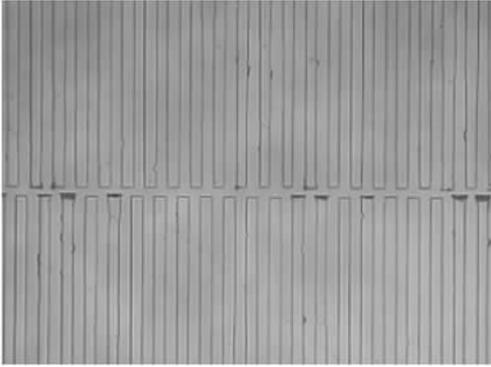


图 1 将反转后的掺镁铌酸锂经氢氟酸腐蚀后的光学显微照片 ($+Z$ 面).该照片显示反转占孔比基本为 $1:1$,达到光参量振荡器所需要的最佳占孔比

边界平滑均匀.在后续的光参量振荡器实验证明,反转边界的光滑度对高效率的光频转换有重要影响.

3. 基于 PPMgLN 的 OPO

将反转后的晶片切割成长为 40 mm ,宽为 10 mm 的长条,两端面抛光并镀上增透膜,增透范围为 $1.064 \mu\text{m}$, $1.4\text{--}1.8 \mu\text{m}$ 及 $3.2\text{--}4.3 \mu\text{m}$.光参量振荡器的实验示意图如图 2 所示.抽运光源采用声光调 Q 的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 激光器,输出波长为 $1.064 \mu\text{m}$ 的脉冲激光,脉冲重复频率为 17 kHz ,脉宽为 30 ns .抽运光经两镀金反射镜反射后由透镜聚焦后入射进 PPMgLN.透镜焦距为 500 mm ;实验中采用的谐振腔为由反射镜 M_1 和 M_2 组成的单共振振荡器(SRO),其中作为输入镜的 M_1 为平面镜,该镜对 $1.064 \mu\text{m}$ 的抽运光高透($T > 90\%$),在 $1.4\text{--}1.7 \mu\text{m}$ (信号光的范围)和 $3.2\text{--}4.3 \mu\text{m}$ (闲散光的范围)的范围内高反($R = 98\%$).输出镜 M_2 为凹面镜,曲率为 200 mm ,对 $1.064 \mu\text{m}$ 高反,对 $1.4\text{--}1.7 \mu\text{m}$ 反射率约 70% ,对闲散光所在光谱范围高透,其反射率低于 10% .

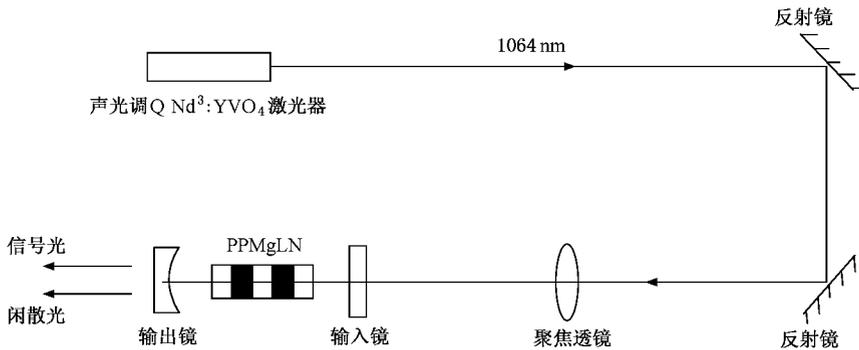


图 2 光参量振荡器示意图.光参量振荡器的抽运源为声光调 Q 的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 激光,经由两反射镜反射后,由凸透镜聚焦后入射进 PPMgLN,图中的 M_1 和 M_2 组成光学谐振腔

光参量振荡器实验在室温下进行.实验中,为了恒定晶片的工作温度,PPMgLN 被置于一块质量较大的铜块上,并使铜块保持良好的散热条件.实验发现,光参量振荡器的阈值低于 1 W ,其输出功率与输入功率的关系如图 3 所示(反转周期为 $30.8 \mu\text{m}$,输出的信号光为 $1.602 \mu\text{m}$).光参量振荡器的平均转换效率为 44% ,斜率效率为 47% .受实验条件限制,实验中的最大输入功率为 10.6 W .由图 3 可看出在输

入功率为 10.6 W 处,其转换效率仍然未达到饱和,因此,可以肯定,若继续加大输入功率,其输出功率将随着输入功率的增大而继续增大.

沿 Y 轴方向平移 PPMgLN 晶体,改变其对应的反转周期,可以得到不同输出波长的信号光和闲散光.实验中的光谱测量采用日本生产的 AQ6317C 型光谱仪,其光谱测量范围为 $600\text{--}1750 \text{ nm}$.使用准相位匹配条件 $\Delta k = k_p - k_s - k_i - k_\Lambda \equiv \alpha k_p, k_s, k_i$ 分

别为抽运光,信号光和闲散光的波矢, $k_{\Lambda} = 2\pi/\Lambda$, Λ 为畴反转周期),可得反转周期和输出波长的关系如图 4 所示(该图显示测量得到的 18 个信号光的位置,此外一个反转周期在切割时被损坏;另一个信号光波长则超出测量仪器的测量范围),图中,由光谱仪测得的信号光由空心圆圈表示;使用能量守恒定律 $\hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i$ (ω_p, ω_s 和 ω_i 分别为抽运光,信号光和闲散光的频率)可以求出与信号光相对应的闲散光,在图 4 中用实心圆表示.为了确定 Sellmeier 方程,在测量的数据中均匀取出 10 个点,采用最小二乘法确定其系数,最后可得 Sellmeier 方程如(1)式所示.6 mol% 掺镁铌酸锂的周期调谐曲线(理论计算曲线)仍显示在图 4.为了对 6 mol% 掺镁铌酸锂与 5 mol% 掺镁铌酸锂及纯铌酸锂进行比较,该图同时给出了在 $1.064 \mu\text{m}$ 的抽运光下,5 mol% 掺镁铌酸锂和纯铌酸锂的周期调谐曲线^[20].

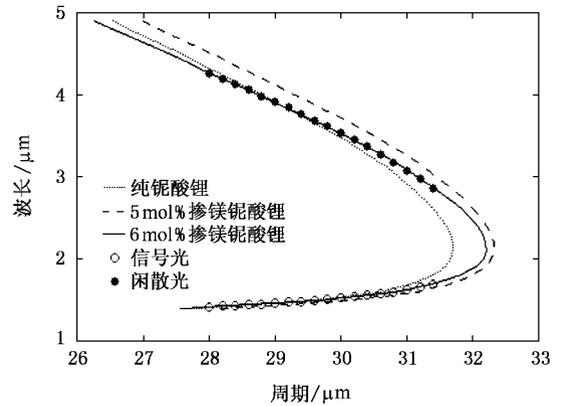


图 4 反转周期与输出波长的关系(图中同时给出了纯铌酸锂和 5 mol% 掺镁铌酸锂的调谐曲线;上图中,理论模拟结果由线条表示,空心圆圈为实测的信号光,实心圆为根据能量守恒定律计算出的闲散光)

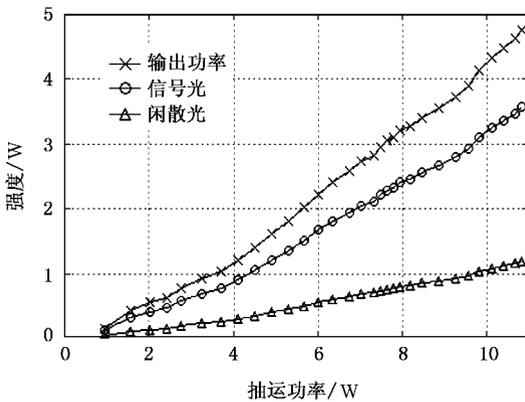


图 3 光参量振荡器的输入功率和输出功率的关系(本实验最大输出功率为 4.8 W,平均转换效率为 44%,斜率效率为 47%,在输入功率达到 10.6 W 后,其转换效率仍未达到饱和)

$$n^2 = 4.5202 + \frac{0.09080}{\lambda^2 - 0.04155} - 0.02275\lambda^2. \quad (1)$$

图 5 是在反转周期为 $31.0 \mu\text{m}$ 的输出光光谱图.如图所见,该周期输出的信号光为 $1.5397 \mu\text{m}$,光谱宽度大约为 0.5 nm .

实验中除了人眼不见的抽运光、信号光和闲散光外,还有包括倍频的 532 nm 的绿光.除此之外,在调节不同的反转周期的过程中,还会出现红光、紫光(图 6);由分析可知,这些可见光来自于抽运光和信号光的和频或更高阶的混频的结果^[15],如图 6 中所显示的高阶混频光的光谱从左到右依次为 635.5 nm , 788.7 nm 和 802.8 nm ,分别为信号光(1578 nm)与抽运光(1064 nm)的和频($\omega_s + \omega_p$),信号光的倍频

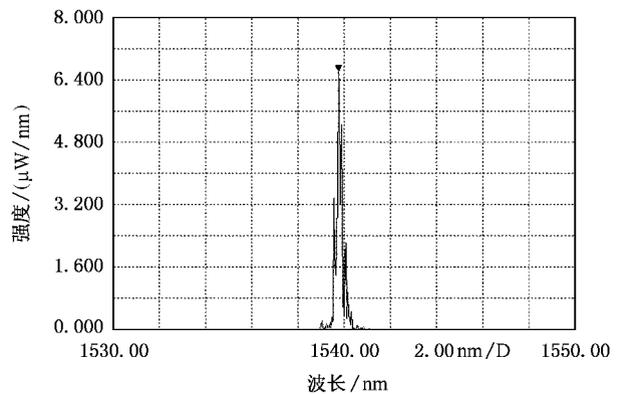


图 5 信号光为 $1.5397 \mu\text{m}$ 的光谱图(其光谱宽度大约为 0.5 nm)

($2\omega_s$)和闲散光(3266 nm)与抽运光的和频($\omega_i + \omega_p$)的结果.

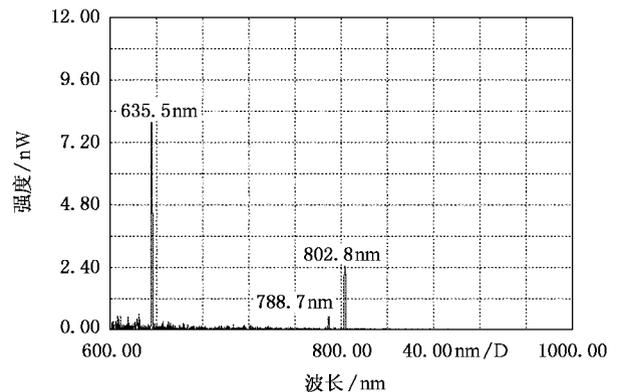


图 6 当信号光为 $1.578 \mu\text{m}$ 时,抽运光,信号光和闲散光的高阶混频;从左到右是信号光与抽运光的和频,信号光的倍频及闲散光和抽运光的和频

4. 结 论

本实验使用外加电场法在较低电场下(170℃下,反转电场强度为1.4 kV/mm)成功制备了厚度为1 mm的大尺寸、均匀反转的周期性极化6 mol%掺镁铌酸锂.并经由光参量振荡器实验证明,该PPMgLN具有很高的转换效率,并成功实现了低阈值、高转换

的目的(阈值低于1 W,斜率转换效率为47%).在本实验条件下,晶片内部最大峰值功率密度为30 MW/cm²(平均功率为0.15 MW/cm²).由图3可知,其转换效率在此时并未有明显的饱和现象,因此可以得出,该晶片可用于更高功率下的光频转换.考虑到这两个优点,若能成功制备出厚度为2 mm,3 mm的周期性畴极化铌酸锂,则该技术可用于很高功率的光参量振荡器.

- [1] Yamada M, Nada N, Saitoh M, Watanabe K 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 435
- [2] Chen Y L, Yuan J W, Yan W G, Zhou B B, Luo Y F, Guo J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2079(in Chinese)[陈云琳、袁建伟、闫卫国、周斌斌、罗勇锋、郭 娟 2005 物理学报 **54** 2079]
- [3] Xue T, Yu J, Yang T X, Ni W J, Tan L, Li S C 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2528(in Chinese)[薛 挺、于 建、杨天新、倪文俊、谭 莉、李世忱 2002 物理学报 **51** 2528]
- [4] Lin X C, Kong Y P, Zhang Y, Zhang J, Yao A Y, Bi Y, Sun Z P, Cui D F, Li R N, Wu L A, Xu Z Y 2004 *Chin. Phys.* **13** 1042
- [5] Chen Y P, Chen X F, Xie S W, Zeng X L, Xia Y X, Chen Y L 2002 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **4** 324
- [6] Zhang B G, Yao J Q, Ding X, Zhang H, Wang P, Xu D G, Yu G J, Zhang F 2004 *Chin. Phys.* **13** 364
- [7] Myers L E, Eckardt R C, Fejer M M, Byer R L 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 2102
- [8] <http://www.cn-optics.com/product/MgoLiNbO3.asp>
- [9] Bryan D A, Gerson R, Tomaschke H E 1984 *Appl. Phys. Lett.* **44** 847
- [10] Nakamura M, Sugihara M, Kotoh M, Taniguchi H, Tadatomo K 1999 *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** 1234
- [11] Kuroda A, Kurimura S 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 1565
- [12] Nakamura M, Koto M, Taniguchi H, Tadatomo K 1999 *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** 512
- [13] Chen Y L, Guo J, Liu X J, Lou C B, Chen S L, Xu J J, Zhang W L, Kong Y F, Zhang G Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 156(in Chinese)[陈云琳、郭 娟、刘晓娟、楼慈波、陈绍林、许京军、张万林、孔勇发、张光寅 2004 物理学报 **53** 156]
- [14] Pavel N, Shoji I, Taira T, Mizuuchi K, Morikawa A, Sugita T, Yamamoto K 2004 *Opt. Lett.* **29** 830
- [15] Lin X C, Li R N, Yao A Y, Bi Y, Cui D F, Xu Z Y 2003 *Chin. Phys.* **12** 514
- [16] Yao J H, Chen Y H, Yan B X, Deng H L, Kong Y F, Chen S L, Xu J J, Zhang G Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4369(in Chinese)[姚江宏、陈亚辉、颜博霞、邓浩亮、孔勇发、陈绍林、许京军、张光寅 2004 物理学报 **53** 4369]
- [17] Ishizuki H, Shoji I, Taira T 2004 *Opt. Lett.* **29** 2527
- [18] Hirano Y, Yamamoto S, Taniguchi H 2001 *CLEO; CFH2*, p. 579
- [19] Ishizuki H, Shoji I, Taira T 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 4062
- [20] Cai S S, Wu B, Shen J W, Shen Y H 2006 *Journal of Zhejiang University(Engineering science)* **40** 1097(in Chinese)[蔡双双、吴波、沈剑威、沈永行 2006 浙江大学学报(工学版) **40** 1097]

Widely tunable optical parametric oscillators base on periodically poled MgO doped LiNbO₃ *

Wu Bo Cai Shuang-Shuang Shen Jian-Wei Shen Yong-Hang

(State key Laboratory of Modern Optical Instrumentation , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China)

(Received 4 September 2006 ; revised manuscript received 23 October 2006)

Abstract

This paper reports the fabrication of the periodically poled 6 mol% MgO doped LiNbO₃(PPMgLN) and the demonstration of the PPMgLN-based optical parametric oscillators (OPOs). The PPMgLN wafer was fabricated by high voltage pulse triggered domain reversal technique with periods ranging from 27.8—31.6 μm by a step of 0.2 μm . The OPO has a wide spectral tuning range from 1.42—1.73 μm (for the signal) and 2.76—4.27 μm (for the idler) while the wavelength of the pump is 1.064 μm . In the experiment , the output power of 4.8 W(the sum of the signal and the idler) was achieved when the input pumping power was 10.6 W and the slope efficiency was computed to be 47% .

Keywords : PPMgLN , widely tunable OPO

PACC : 4265 , 4265K

* Project supported by the National Key Laboratory Foundation of China(Grant No.514720105 04JW0401) and the Foundation of Science and Technology Bureau of Zhejiang Province , China(Grant No.2005C21034).