

## 周期极化铌酸锂晶体的红外光谱测量分析

王宏杰, 陈少甫, 周岩, 翁宇佳, 颜彩繁, 吕福云, 张光寅

南开大学物理科学学院, 天津 300071

**摘要** 对周期极化非线性晶体的光参量振荡器实现连续调谐输出的条件进行了理论模拟和分析, 并且针对基于多周期的掺镁铌酸锂晶体光参量振荡器进行了实验研究, 在掺镁铌酸锂晶体内制作了6个等间隔的晶畴区, 其间距为 $0.5\ \mu\text{m}$ , 极化周期范围为 $29.0\sim 31.5\ \mu\text{m}$ 。在室温下采用LD端面抽运的声光调Q Nd:YVO<sub>4</sub>激光器作泵浦源, 实现了PPMgLN光参量振荡器的信号光在 $1\ 449.7\sim 1\ 665.0\ \text{nm}$ 、闲频光在 $3\ 989.2\sim 2\ 946.0\ \text{nm}$ 范围内的调谐输出, 其最低激射阈值为 $108.0\ \text{mW}$ 、最高激射阈值为 $149.2\ \text{mW}$ 。当泵浦功率为 $649\ \text{mW}$ 时, 获得了信号光最高为 $118.5\ \text{mW}$ 的输出, 其光-光转换效率为 $18.26\%$ ; 闲频光最高输出为 $46.6\ \text{mW}$ , 其光-光转换效率为 $7.18\%$ 。以上参数均接近实用化水平。而且, 这两个波段的光源分别在整个光纤通信的S+C+L波段和大气层透射窗口范围, 具有十分重要的应用前景。

**关键词** 周期极化掺镁铌酸锂; 光参量振荡器; 光谱特性; 光纤通信; 红外窗口

**中图分类号**: O437 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)08-2096-03

### 引言

众所周知,  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  波长中红外光是大气层最佳透射窗口。该波段红外相干光源在环境检测、光谱分析、空间光通讯、医疗诊断以及军事对抗武器等领域均有非常重要的应用<sup>[1-4]</sup>。就目前产生中红外光的三种主要方法而言, 相比InGaAs/InAlAs量子级联激光器和CO激光器倍频输出方法, 本文采用周期极化铌酸锂(PPLN)光参量振荡器来获得中红外光源, 这是一种最简便、成本最低、最易实现连续调谐输出的有效方法。尽管目前其输出功率比前二者低, 但由于其独特的优势, 仍然受到青睐<sup>[5-7]</sup>。本实验中采用外加电场法, 在掺镁铌酸锂晶体中设计制作了 $29.0\sim 31.5\ \mu\text{m}$ 六个等间隔极化周期的晶畴区, 在室温下以声光调Q的Nd:YVO<sub>4</sub>激光器作泵浦源, 对该PPMgLN光参量振荡器进行了晶畴极化周期调谐输出的实验研究。用法国J-Y公司的iHR320型光栅光谱仪进行测试, 其光谱响应范围为 $300\sim 5\ 500\ \text{nm}$ 。实验发现, 在泵浦光抽运功率为 $649\ \text{mW}$ 时, PPMgLN光学参量振荡器在 $2\ 946.0\sim 3\ 989.2\ \text{nm}$ 波长范围内稳定输出闲频光, 最高功率为 $46.6\ \text{mW}$ , 其光-光转换效率为 $7.18\%$ , 而同时实现了信号光在 $1\ 449.7\sim 1\ 665.0\ \text{nm}$ 范围的调谐输出, 最高功率为 $118.5\ \text{mW}$ , 其光-光转换效率为 $18.26\%$ , 实验过程中其最高激射阈值为 $149.2\ \text{mW}$ 。需要指出的是, 该信

号光的输出范围覆盖了整个光纤通信的S+C+L波段, 因此, 其具有十分广泛的应用前景<sup>[8-10]</sup>。

### 1 理论模拟和分析

人们非线性光学晶体中引入极化率的周期调制来补偿参量过程中由于折射率色散造成的三波之间的相位失配, 从而可以实现高效率的非线性光学输出。但是, 周期性极化非线性晶体在实现准相位匹配条件时, 必须同时满足能量守恒和动量守恒条件<sup>[11]</sup>

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{s} + \frac{1}{i} \quad (1)$$

$$\frac{n_p}{p} = \frac{n_s}{s} + \frac{n_i}{i} + \frac{1}{\Lambda} \quad (2)$$

在(1)和(2)式中,  $p, s, i$  分别是泵浦光、信号光、闲频光波长,  $n_p, n_s, n_i$  对应其折射率,  $\Lambda$  是极化周期。显而易见, 在泵浦波长确定的情况下, 信号光和闲频光波长是可以同时随着极化周期实现连续调谐输出的<sup>[12-14]</sup>。图1给出的是泵浦光波长为 $1\ 064\ \text{nm}$ 时, 信号光和闲频光随极化周期连续调谐的理论模拟曲线<sup>[15]</sup>。

### 2 实验装置

实验装置如图2所示, 主要包括 $1\ 064\ \text{nm}$ 泵浦源和

收稿日期: 2008-05-03, 修订日期: 2008-08-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90501004); 南开大学物理学基地经费(J0730315)资助

作者简介: 王宏杰, 1959年生, 南开大学物理科学学院光电信息系高级工程师 e-mail: wang\_hj@nankai.edu.cn

PPMgLN 光参量振荡器两部分。

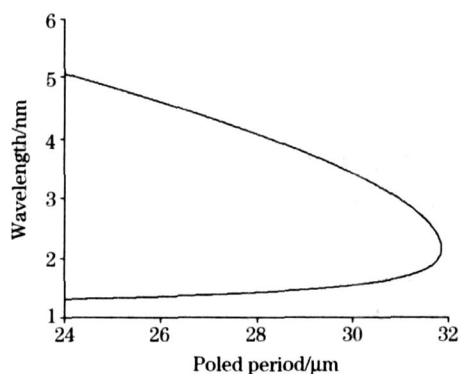


Fig. 1 Tunable curve of PPLN

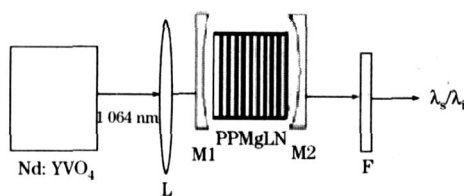


Fig. 2 Experimental setup

### 2.1 全固态声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器

泵浦源采用 LD 端面抽运的声光调 Q 的 Nd:YVO<sub>4</sub>, LD 中心波长为 808 nm, 最大功率为 30 W, Nd:YVO<sub>4</sub> 尺寸为: 3 mm × 3 mm × 4.2 mm, 掺钕浓度为 0.5%。其采用平平腔结构, 腔长为 130 mm, 调 Q 重复频率为 19 kHz。

### 2.2 周期极化掺镁铌酸锂光参量振荡器

采用焦距为 100 mm 的凸透镜 L 将 1 064 nm 泵浦光聚焦成直径约为 230 μm 的圆斑, 耦合进 PPMgLN 谐振腔内。为实现室温下的调谐输出<sup>[16]</sup>, 本实验设计制备了尺寸为 7 mm × 50 mm × 1 mm 掺镁 (5 mol%) 周期极化铌酸锂晶体, 其沿 z 轴方向极化, 极化周期从 29.0 ~ 31.5 μm 等间隔平行排列着六个晶畴区, 相邻两个周期间隔为 0.5 μm。晶体放置在控温炉中, 工作温度为 26 ± 0.1。PPMgLN 谐振腔由曲率半径均为 100 mm 的平凹镜组成, 腔长为 95 mm, M<sub>1</sub> 为输入镜, 对 1 064 nm 光透过率为 98%, 对 1 400 ~ 1 700 nm 信号光反射率为 99%; M<sub>2</sub> 为输出镜, 对 1 064 nm 光的反射率为 99%, 对 1 400 ~ 1 700 nm 信号光的反射率高于 96%, 而对 3 000 ~ 5 000 nm 的闲频光高透过, F 为 CaF<sub>2</sub> 滤光片, 能滤掉 2 000 nm 以下的信号光。在测试信号光输出时, 将 M<sub>2</sub> 换成对 1 400 ~ 1 700 nm 光透过率为 10% 的输出镜, 同时取出 CaF<sub>2</sub> 滤光片。

## 3 实验结果及分析

实验所用 PPMgLN 晶体通光方向为 x 轴正向, 沿 y 轴方向平移晶体可改变晶体的极化周期。实验过程中, 始终保持 PPMgLN 晶体温度在 (26 ± 0.1)。我们测量到, 在 29.0 μm 极化周期的晶畴区内激射阈值最低, 是 108.0 mW。当泵浦功率为 649 mW 时, 获得了平均功率为 118.5 mW 的信号

光输出, 其光-光转换效率为 18.26%, 对应的闲频光输出功率为 46.6 mW, 其光-光转换效率约 7.18%。而在 29.5 μm 极化周期的晶畴区内激射阈值最高, 是 149.2 mW。当泵浦功率为 649 mW 时, 获得了平均功率 72.2 mW 的信号光输出, 其光-光转换效率为 11.12%, 而此时闲频光输出 28.3 mW, 其光-光转换效率约 4.36%。当极化周期从 29.0 μm 变化到 31.5 μm 时, 实际测量到信号光在 1 449.7 ~ 1 665.0 nm; 而闲频光在 3 989.2 ~ 2 948.0 nm 范围内调谐输出, 实测数据见表 1。

Table 1 Tunable output of PPLN (Unit: /μm; /nm)

周期	s		i	
	实测值	计算值	实测值	误差率/%
29.0	1 449.7	3 998.0	3 989.2	-0.22
29.5	1 474.4	3 822.0	3 811.0	-0.29
30.0	1 504.7	3 632.0	3 623.2	-0.24
30.5	1 542.0	3 432.0	3 421.6	-0.30
31.0	1 591.1	3 211.0	3 198.8	-0.38
31.5	1 665.0	2 948.0	2 946.0	-0.07

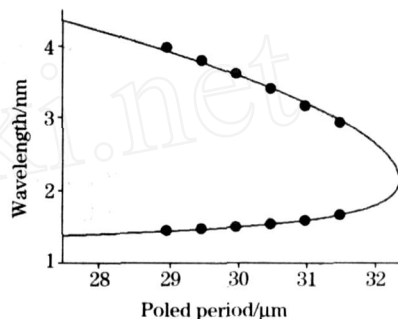


Fig. 3 Tuning curves of PPMgLN output wavelength

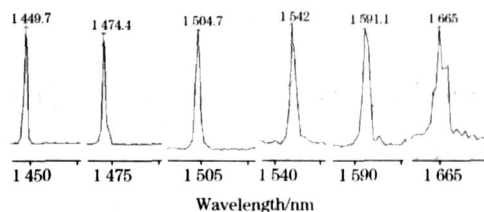


Fig. 4 Spectrum of signal-wave

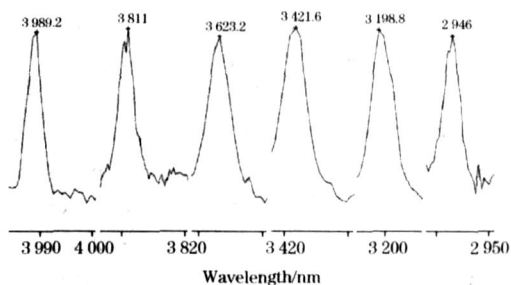


Fig. 5 Spectrum of idle-wave

从表 1 中可以看出, 实际测量到的闲频光波长相对其计算值的误差率不大于 0.4%, 这表明该测量结果是相当精确

的。

图 3 是测量到的 PPMgLN 光参量振荡器输出的信号光和闲频光波长随晶体极化周期调谐输出的曲线, 该测量结果与图 1 的理论模拟曲线很好地吻合。另外, 测量到的信号光和闲频光光谱分别如图 4、图 5 所示。

从图 4、图 5 测量到, 信号光平均半峰宽度小于 1 nm, 闲频光平均半峰宽度不大于 4 nm。然而, 在 30.0  $\mu\text{m}$  左右的极化周期中, 闲频光光谱较宽, 输出功率有所下降, 这是因为极化工艺的波动所造成的。

## 4 结 论

本实验将抗高损伤阈值的周期极化掺镁铌酸锂晶体制成光参量振荡器, 采用 LD 声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器作泵浦源, 当晶体极化周期从 29.0  $\mu\text{m}$  变化到 31.5  $\mu\text{m}$  时, 在室温下实现了信号光在 1 449.7~1 665.0 nm、闲频光在 3 989.2~2 948.0 nm 范围内的调谐输出。以上两个波段分别对应于整个光纤通信的 S+C+L 波段和大气层最佳透射窗口(3~5  $\mu\text{m}$ )。因此, 其具有十分广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] ANGUS Henderson, RYAN Stafford. Optics Express, 2006, 14(2): 767.
- [ 2 ] Paul O, Quosig A, Bauer T, et al. Appl. Phys., 2007, B86: 111.
- [ 3 ] ZHANG Wang, YU Qing-xu(张望, 于清旭). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(3): 614.
- [ 4 ] DENG Lun-hua, GAO Xiao-ming, CAO Zhen-song, et al(邓伦华, 高晓明, 曹振松, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(11): 2186.
- [ 5 ] Bosenberg W R, Drobshoff A, Alexander J I, et al. Opt. Lett., 1996, 21(10): 713.
- [ 6 ] Popp A, Muller F, Kuhnemann F, et al. Appl. Phys. B, 2002, 75(6-7): 751.
- [ 7 ] Elder I F, Terry J A C. J. Opt. A: Pure Appl. Opt., 2000, 2: 19.
- [ 8 ] LIANG Xiao-yan, HOU Wei, LÜ Jun-hua, et al(梁晓燕, 候玮, 吕军华, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2002, A29(1): 10.
- [ 9 ] LI Xue-jin, ZHANG Bai-gang, YAO Jian-quan, et al. Chin. Opt. Lett., 2003, 1(12): 711.
- [ 10 ] Li H P, Tang D Y, Ng S P, et al. Optics & Laser Technology, 2006, 38(3): 192.
- [ 11 ] CHEN Yun-lin, YUAN Jian-wei, ZHOU Bin-bin, et al. Opt. Commun., 2007, 273(2): 560.
- [ 12 ] CHEN Yun-lin, YUAN Jian-wei, ZHOU Bin-bin, et al(陈云琳, 袁建伟, 周斌斌, 等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2007, 36(4): 515.
- [ 13 ] YAO Jiang-hong, XUE Liang-ping, YAN Bo-xia, et al(姚江宏, 薛亮平, 颜博霞, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2007, 34(2): 209.
- [ 14 ] WU Bo, CAI Shuang-shuang, SHEN Jian-wei(吴波, 蔡双双, 沈剑威). Acta Physica Sinica(物理学报), 2007, 56(5): 2684.
- [ 15 ] Lindsay I D, Grob P, Lee C J, et al. Optics Express, 2006, 14(25): 12341.
- [ 16 ] CHANG Ki-min, TAIHA Joo. Opt. Lett., 2005, 30(14): 1855.

# Measuring and Analyzing Infrared Spectrum of Periodically Polarized Lithium Niobate

WANG Hong-jie, CHEN Shao-fu, ZHOU Yan, WENG Yu-jia, YAN Cai-fan, LÜ Fu-yun, ZHANG Guang-yin  
Physics Institute of Nankai University, Tianjin 300071, China

**Abstract** The present paper reports theoretical and experimental research on the tunable output characteristics of periodically polarized lithium niobate. We made six equal distance crystal grating sections, with each distance being 0.5 mm and the polarization period range of 29.0~31.5 mm. Especially, at room temperature, the signal-wavelength tunable output in the range of 1 449.7~1 665.0 nm and idle-wavelength tunable output in the range of 3 989.2~2 946.0 nm were achieved by LD end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser with Q-switch in sound-wave. The lowest excitation threshold was 108.0 mW, while the highest excitation threshold was 149.2 mW. When the pump power was 649 mW, the highest gained signal-wave output was 118.5 mW and its conversion efficiency was 18.26%. Meanwhile, the idle-wave output was 46.6 mW and its conversion efficiency was 7.18%. These parameters approached the practicality level.

**Keywords** PPMgLN; OPO; Spectral characteristics; Fiber communications; IR-window

(Received May 3, 2008; accepted Aug. 8, 2008)