

文章编号: 0258-702X(2002)01-0010-03

## 低阈值宽调谐 PPLN 光参量振荡

梁晓燕, 侯玮, 吕军华, 许祖彦

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

**摘要** 用半导体激光(LD)抽运的声光调 $Q$  Nd:YVO<sub>4</sub>激光器做抽运源, 实现了准位相匹配的光参量输出, 其调谐范围为1.436~1.7  $\mu\text{m}$ 。非线性光学介质是多周期极化的LiNbO<sub>3</sub>(PPLN)。光参量振荡阈值10.3  $\mu\text{J}$ (脉宽22 ns), 在抽运光达到阈值3.3倍条件下, 信号光输出能量4.25  $\mu\text{J}$ , 斜效率12.5%。

**关键词** 准相位匹配, 周期极化LiNbO<sub>3</sub>, 调谐

中图分类号 TN 248 文献标识码 A

### Low-threshold and Wide Tunable PPLN Optical Parametrical Oscillator

LIANG Xiao-yan, HOU Wei, LÜ Jun-hua, XU Zu-yan

(Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** A widely tunable quasi-phase-matched optical parametric oscillator that uses periodically poled LiNbO<sub>3</sub> with a multigrating structure is reported in this paper. With a 1064 nm acousto-optically  $Q$ -switched Nd:YVO<sub>4</sub> pump laser, a tunable IR output from 1.436  $\mu\text{m}$  to 1.7  $\mu\text{m}$  is obtained. The threshold is 10.3  $\mu\text{J}$  with pulses repetition rate 10 kHz. The maximum output energy of signal is 4.25  $\mu\text{J}$  with the conversion efficiency of 12.5%.

**Key words** quasi-phase-matching, PPLN, tuning

光参量过程中常用的非线性光学晶体, 如BBO, LBO, KTP等为满足相位匹配条件, 需要沿特殊方向切割, 或需要特定的工作温度, 且相互作用的光波偏振方向不同, 因而只能利用晶体非线性系数中某些特定的非对角元素。准位相匹配(QPM)是通过晶体非线性极化率的周期性调制来补偿光参量过程中由于折射率色散造成的抽运光与参量光之间的位相失配<sup>[1]</sup>, 因而可以人为地根据晶体的折射率色散设计调制周期, 这样不仅可以选晶体最大的非线性系数, 而且可以使某些不能用相位匹配方法完成有效非线性过程而具有大的非线性系数的晶体得到有效利用, 如LiTaO<sub>3</sub>。同时, 准相位匹配在介质的整个透光波段内都可以通过设计极化周期来实现, 这也是相位匹配晶体无法做到的。此外, 象PPLN, PPLT, PPKTP用的非线性极化张量都是 $d_{33}$ , 光束均沿 $x$ 方向传输, 从而不存在走离效应, 这样为提高转换效率, 晶体可以做得很长。近年来, 准相位匹配晶体,

如:PPLN, PPLT, PPKTP, PPKTA等<sup>[2~5]</sup>以上述特点在全固态激光器抽运的频率变换过程中充分体现出其优势。目前已经实现了脉冲和连续的倍频<sup>[2, 6]</sup>及光参量振荡(OPO)和放大<sup>[7, 8]</sup>等。我们采用全固态调 $Q$ 激光器1064 nm输出, 抽运多个周期均匀排列的PPLN, 通过调节PPLN的极化周期, 在光学窗口1.55  $\mu\text{m}$ 附近, 人眼安全范围内实现了1.436~1.7  $\mu\text{m}$ 的宽调谐, 低阈值准相位匹配光参量振荡。

### 1 原理和实验装置

光参量过程中准位相匹配的波矢失配量为:

$$\Delta K = k_p - k_s - k_i - K_m \text{ 其中}$$

$$K_m = \frac{2m\pi}{\Lambda}; \Lambda = 2ml_c = \frac{2m\pi}{k_p - k_s - k_i}$$

可见介质的极化周期为 $\Lambda$ 时 $\Delta K = 0$ , 满足相位匹配条件。在极化介质的占空比为50%的情况

收稿日期 2000-06-27; 收到修改稿日期 2000-12-07

基金项目 973 国家重点基础研究发展规划项目(课题号: G1998061405-5)

作者简介 梁晓燕(1967.11—), 女, 山西五台显人, 中国科学院物理所获博士学位, 主要从事激光与非线性光学研究。

下,其有效非线性系数为

$$d_{\text{eff}} = \frac{2d_{ij}}{m\pi}, \quad m = 1, 3, 5, \dots$$

$m$  为准相位匹配的阶数,取整奇数,为获得大的有效非线性系数,常取一阶准相位匹配。对  $\text{LiNbO}_3$  而言,在所有的非线性系数中对角元素  $d_{33}$  要高出其他系数一个数量级,如  $d_{33} = 27 \text{ pm/V}^{[8]}$ ,所以 PPLN 是沿晶体  $z$  轴方向极化,相互作用光波的偏振方向均沿  $z$  轴。在一阶准相位匹配的条件下,其有效非线性系数为

$$d_{\text{eff}} = \frac{2d_{33}}{\pi} = 19 \text{ pm/V}$$

由  $\text{LiNbO}_3$  非常光随温度变化的色散方程<sup>[9]</sup>,可以求出在 1064 nm 抽运的条件下,所需 PPLN 的周期与信号光波长的相应值。所以 PPLN 常用的调谐方式有两种:周期调谐和温度调谐,若同时将两种调谐方式组合起来,可以在很宽的范围内连续调谐。我们所选 PPLN 长 20 mm(沿  $x$  轴),宽 10 mm(沿  $y$  轴),厚 0.5 mm(沿  $z$  轴),片子上从 28.2 ~ 31.0  $\mu\text{m}$  共平行排列 14 个周期,相邻两周期之差为 0.2  $\mu\text{m}$ 。晶体两端镀有对 1064 nm,1300 ~ 1900 nm,3000 ~ 4000 nm 的增透膜。

抽运源是 SDL-10W 二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器,声光调  $Q$  1064 nm 脉冲输出,考虑到晶体的热透镜效应,实验中采用平平腔结构可以实现稳定运转。激光晶体 Nd 离子掺杂浓度 1 at.-%,尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm,腔长约 86 mm,输出耦合透过率为 15%。鉴于声光  $Q$  开关功率的限制,重复频率为 10 kHz,脉宽 22 ns 时,最高平均输出功率 400 mW。在实验过程中保持抽运光的工作模式为单横模 ( $\text{TEM}_{00}$ ),用激光光束质量分析仪(BCS6314 型)测得  $M^2 \approx 1.2$ 。为了在保证 OPO 抽运光参数不变的条件下调其强度,在光路中插入一个由可旋转的 1064 nm 半波片和起偏器组成的可调节衰减器。经一焦距为 100 mm 的匹配透镜聚焦后,抽运光在介质中的光斑半径约为 65  $\mu\text{m}$ 。OPO 由一平面输入耦合镜  $M_1$  和一曲率半径为 25 mm 的平凹输出耦合镜  $M_2$  组成近共焦腔,腔长约 27 mm,PPLN 晶体靠近  $M_1$ ,谐振腔本振模束腰半径 68  $\mu\text{m}$ ,与抽运光基本匹配,这样可以保证 OPO 基模振荡。输入耦合镜对抽运光 90% 透过,对信号光 99% 高反,输出耦合镜对抽运光 80% 透过,对信号光 98% 反射,它们对闲频光(3 ~ 4  $\mu\text{m}$ )都是高吸收,这样 OPO 对信号光单共振。实验装置如图 1。

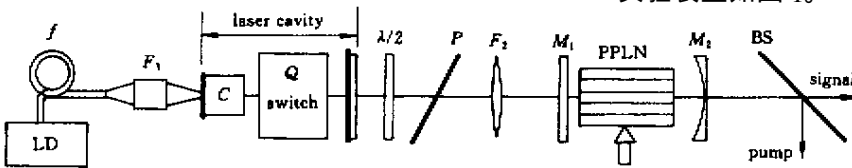


图 1 PPLN-OPO 实验装置

$f$ : 光纤;  $C$ : Nd:YVO<sub>4</sub>;  $P$ : 起偏器;  $F_1, F_2$ : 透镜;  $M_1$ : 平面输入镜;  $M_2$ : 输出镜;  $BS$ : 分束片

Fig.1 Experimental setup for all-solid-state pumped PPLN OPO

$f$ : fiber;  $C$ : Nd:YVO<sub>4</sub>;  $P$ : polarizer;  $F_1, F_2$ : focusing optics;  $M_1$ : flat input coupler;  $M_2$ : output coupler;  $BS$ : beam splitter

## 2 实验结果

### 2.1 调谐曲线

由于  $\text{LiNbO}_3$  晶体的光损伤阈值与晶体温度有关,在 60 ~ 100℃ 范围内的光折变损伤阈值与室温相比明显升高<sup>[10]</sup>,所以,为避免晶体光折变损伤,我们把 PPLN 晶体装在一个由半导体加热元件控制的炉子内,实验过程中炉子的温度保持在 63℃。PPLN 的通光方向为  $x$  轴,装晶体的炉子固定在一沿  $y$  轴方向平移的高精度调节架上,这样平移晶体可以改变 PPLN 的准相位匹配周期,从而实现信号光调谐输出。实验过程中用一套腔镜实现了 1.436 ~ 1.7  $\mu\text{m}$  的宽调谐,同时观察到抽运光与信号光的和频输

出。调谐曲线如图 2,其中实线是  $T = 63.4^\circ\text{C}$  时,信号光波长随周期调谐的理论曲线,圆点是实验值,虚线是和频光的理论值,方点是实验值,可以看出理论与实验值吻合得较好。

### 2.2 阈值和转换效率

在极化周期为 29.9  $\mu\text{m}$ ,信号光波长为 1.55  $\mu\text{m}$  处,OPO 阈值是 10.3  $\mu\text{J}$ ,在 PPLN 整个调谐范围内阈值基本保持不变,此时阈值能量密度为 0.18  $\text{J}/\text{cm}^2$ ,远低于  $\text{LiNbO}_3$  的光折变损伤阈值<sup>[7]</sup> 2.7  $\text{J}/\text{cm}^2$ 。输出信号光强度及转换效率随抽运光的变化特性如图 3。在抽运光为阈值的 3.3 倍时,信号光平均输出功率 42.5 mW,单脉冲能量 4.25  $\mu\text{J}$ ,斜效率 12.5%。

在不同抽运光强度下,信号光一直工作在单横模状态。

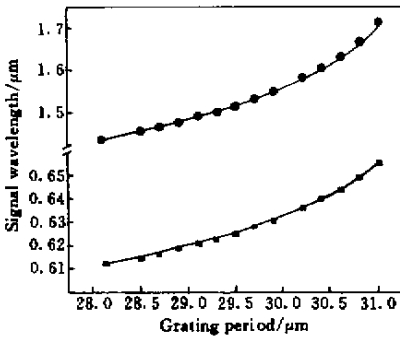


图2 OPO 信号光及和频光的输出波长随 PPLN 极化周期的调谐曲线

Fig.2 OPO tuning as a function of PPLN grating period, achieved by translation of the PPLN crystal through 14 different grating sections

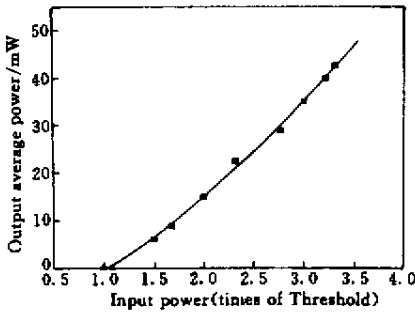


图3 输出的信号光平均功率随抽运光抽运倍数的变化曲线

Fig.3 Output signal average power as a function of the pumping level

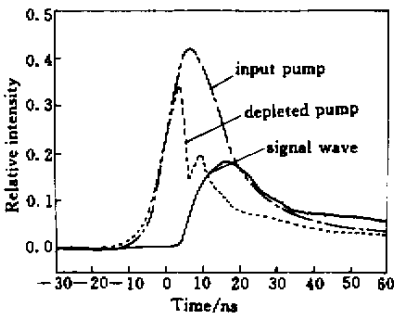


图4 信号光(实线),出射抽运光(虚线)及入射抽运光(点画线)的波形

Fig.4 Temporal profile of the signal (solid line), the depleted pump (dot line) and the input pump (dash and dot line) at 3.3 times threshold

### 2.3 输入、输出波形

在抽运光是阈值的 3.3 倍,信号光输出平均功

率达到 42.5 mW 的条件下,用快速响应的光电二极管(DET3-GE 型)和数字式存储示波器(TDS3052 型)记录了输入输出的抽运光波形及信号光波形响应,发现信号光脉冲尾部拖得很长,这是由于 OPO 输出耦合透过率(2%)太低的原因。图 4 与波形的幅度无对应关系,仅表明波形之间的关系。

### 3 讨论

实现了全固态抽运的 PPLN-OPO 宽调谐、低阈值输出,但由于 OPO 输出腔镜的透过率较小(2%),没有达到最佳输出耦合,同时增强了腔内抽运光与信号光的和频效应,所以降低了 OPO 的斜效率,同时多通道效应(1064 nm 的倍频)和串接效应(信号光与抽运光的和频)也对斜效率有一定的影响。

### 参考文献

- 1 J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing *et al.*. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric [ J ]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**: 1918 ~ 1939
- 2 G. D. Miller, R. G. Batchko, W. M. Tulloch *et al.*. 42%-efficient single-pass cw second-harmonic generation in periodically poled lithium niobate [ J ]. *Opt. Lett.*, 1997, **22** ( 24 ): 1834 ~ 1836
- 3 Yasuo Kitaoka, Kiminori Mizuuchi, Kazuhisa Yamamoto *et al.*. Intracavity second-harmonic generation with a periodically domain-inverted LiTaO<sub>3</sub> device [ J ]. *Opt. Lett.*, 1996, **21** ( 24 ): 1972 ~ 1974
- 4 A. Garashi, A. Arie, A. Skliar *et al.*. Continuous-wave optical parametric oscillator based on periodically poled KTiOPO<sub>4</sub> [ J ]. *Opt. Lett.*, 1998, **23** ( 22 ): 1739 ~ 1741
- 5 H. Karlsson, M. Olson, G. Arvidsson *et al.*. Nanosecond optical parametric oscillator based on large-aperture periodically poled RbTiOAsO<sub>4</sub> [ J ]. *Opt. Lett.*, 1999, **24** ( 5 ): 330 ~ 332
- 6 G. W. Ross, M. Pollnau, P. G. R. Smith *et al.*. Generation of high-power blue light in periodically poled LiNbO<sub>3</sub> [ J ]. *Opt. Lett.*, 1998, **23** ( 3 ): 171 ~ 173
- 7 L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer *et al.*. Multigrating quasi-phase-matched optical parametric oscillator in periodically poled LiNbO<sub>3</sub> [ J ]. *Opt. Lett.*, 1996, **21** ( 8 ): 591 ~ 593
- 8 L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer *et al.*. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO<sub>3</sub> [ J ]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12** ( 11 ): 2102 ~ 2115
- 9 D. H. Jundt. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction,  $n_e$ , in congruent lithium niobate [ J ]. *Opt. Lett.*, 1997, **22** ( 20 ): 1553 ~ 1555
- 10 M. Taya, M. C. Bashaw, M. M. Fejer. Photorefractive effects in periodically poled ferroelectrics [ J ]. *Opt. Lett.*, 1996, **21** ( 12 ): 857 ~ 859