

文章编号: 0253-2239(2004)02-172-3

# LiNbO<sub>3</sub> 电光调谐光学参变振荡器\*

李 春 安毓英 曾晓东

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

**摘要:** 在光学参变振荡器中, 角度或温度调谐方式的最大缺陷就是参变光波长变化较慢, 调谐操作复杂; 电光调谐方式具有调谐速度快, 操作简单的优点。利用非线性光学晶体 LiNbO<sub>3</sub> 的电光效应, 在 1.064 μm Nd:YAG 激光器输出的抽运光作用下, 切割角  $\theta=47.5^\circ$ , 在垂直于 1.06 μm 抽运光偏振方向上加 -4.5~+4.5 kV 直流电压, 实现参变光波长调谐输出, 输出光能量约为 2.6 mJ 左右, 转换效率  $\eta\approx 17.3\%$ 。实验所得的参变光波长变化与调谐电压的线性关系与理论计算相吻合, 为实现光学参变振荡器的快速调谐快速输出提供了一种可行的技术途径。

**关键词:** 非线性光学; 光学参变振荡器; 电光效应; 铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)晶体

中图分类号: TN242 文献标识码: A

## LiNbO<sub>3</sub> Electrooptic Tuning Optical Parametric Oscillator

Li Chun An Yuying Zeng Xiaodong

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071)

(Received 12 December 2002; revised 25 February 2003)

**Abstract:** The main problems of classical angle-tuning and temperature-control tuning in optical parametric oscillator are the complexity of operation and slowness of tuning rate. However, electrooptic tuning takes advantage over in operation and rates. Based on the electrooptical effect of the nonlinear optic crystal LiNbO<sub>3</sub>, pumped by 1.064 μm Nd:YAG laser, when the cut angle  $\theta=47.5^\circ$ , DC voltage varying in the range of -4.5~4.5 kV is applied to LiNbO<sub>3</sub> and tunable output of optical parametric oscillator is obtained. The maximum output energy is ~2.6 mJ and the conversion efficiency  $\eta$  is ~17.3%. The experimental results agree well with the theoretical calculation. This is a viable novel approach for changing the optical parametric wavelength.

**Key words:** nonlinear optics; optical parametric oscillator (OPO); electrooptical effect; LiNbO<sub>3</sub> crystal

## 1 引 言

随着高性能非线性光学晶体材料的发展, 光学参变振荡(OPO)技术逐渐成为获取可调谐、高能量相干光输出的一种主要手段。在双折射非线性光学晶体中, 晶体对光波的折射率与光波和晶体光学主轴间夹角大小有关。因此, 可以通过调节参变光和晶体光学主轴间的夹角实现波长调谐。实际上角度调节并不是参变光波长调谐的唯一技术手段, 任何能改变晶体折射率的物理因素包括压强、温度、电场

等均可用来实现波长调谐。根据非线性晶体折射率的温度特性, 也可通过控制晶体的温度实现波长调谐。光学参变振荡的角度调谐和温度调谐技术已经获得广泛的应用, 国内外有关这两种调谐技术的文献很多, 在此无须逐一列举。

虽然角度调节和温度控制是应用较为普遍的两种波长调谐方法, 但这两种方法的共同缺点是实现调谐的速度较慢, 不能实现输出波长的“捷变”。波长变换速度缓慢极大地限制了光学参变振荡在某些领域中的应用, 如在军事领域中, 激光目标跟踪就对波长的变化速度提出了很高要求, 只有利用非线性晶体电光效应实现的电光调谐光学参变振荡器才能满足对波长变化速度的要求, 实现参变光波长的“捷

\* 重点实验室基金(51472010301DZ01)资助课题。

E-mail: lichun007@sina.com

收稿日期: 2002-12-12; 收到修改稿日期: 2003-02-25

变”。目前,国内外对电光调谐光学参变振荡器的研究较少,Eckardt 等<sup>[1]</sup>利用晶体的电光效应实现了对双光参变振荡器的稳频控制,仅将电光效应作为一种辅助波长调谐手段。本文用 LiNbO<sub>3</sub> 作为参变晶体,利用晶体的电光效应,当切割角  $\theta=47.5^\circ$ ,在垂直于  $1.06 \mu\text{m}$  抽运光偏振方向上加  $\pm 4.5 \text{ kV}$  直流电压,实现了参变光波长调谐,实验所得的参变光波长变化与调谐电压的线性关系与理论计算吻合较好,为实现光学参变振荡参变光波长“捷变”提供了一种可行的途径。

## 2 理论依据

光学参变振荡器中,互作用的参变光间满足能量守恒和动量守恒关系,这两个基本方程表示为

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad (1)$$

$$n_p \omega_p = n_s \omega_s + n_i \omega_i, \quad (2)$$

式中,  $\omega_p$ 、 $\omega_s$ 、 $\omega_i$  分别表示抽运光、信号光、闲频光的频率;  $n_p$ 、 $n_s$ 、 $n_i$  分别表示参变晶体对抽运光、信号光、闲频光的折射率。在外加电场作用下,晶体电光效应改变了对抽运光、信号光和闲频光的折射率:  $n_j \rightarrow n_{j0} + \Delta n_j$ , 下标  $j = p, s, i$ ; 为满足动量守恒关系,信号光和闲频光的频率也要改变:  $\omega_k \rightarrow \omega_{k0} + \Delta \omega_k$ , 下标  $k = s, i$ 。因此,可通过电压调节实现参变光波长调谐。在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体光学参变振荡中,当抽运光波长为  $1.064 \mu\text{m}$ ,在 I 类相位匹配方式下光学参变振荡的角度调谐曲线如图 1 所示。光学参变振荡的有效非线性系数  $d_{\text{eff}} \approx d_{15} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin(3\phi)$ , 当晶体的切割角  $\theta=47.5^\circ$ ,  $\phi=-90^\circ$  时,有效非线性系数  $d_{\text{eff}} \approx 5.88 \text{ pm/V}$ , o 光和 e 光的有效电光系数分别为

$$\gamma_{\text{eff}}^{\text{o}} \approx -\frac{\gamma_{22} + \gamma_{13} + \gamma_{33} + 2\gamma_{51}}{2.828} \approx 39.77 \text{ pm/V}, \quad (3)$$

$$\gamma_{\text{eff}}^{\text{e}} \approx \frac{\gamma_{22} - \gamma_{13}}{1.414} \approx 2.56 \text{ pm/V}. \quad (4)$$

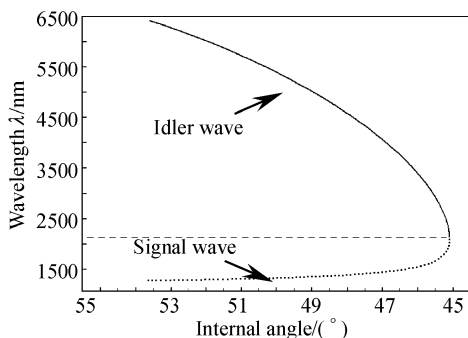


Fig. 1 Angle wavelength tuning in LiNbO<sub>3</sub> OPO  
在平行于抽运光(e 光)的偏振方向上加直流电

压,外加电压与晶体折射率变化间关系为

$$\delta n = -n_{\text{eff}}^3 \gamma_{\text{eff}} E / 2, \quad (5)$$

对于 o 光,  $n_{\text{eff}} = n_o$ , 对于 e 光

$$n_{\text{eff}} = n_o n_e (n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta)^{-1/2}.$$

光学参变振荡中抽运光波长是固定的,抽运光折射率的变化仅与晶体电光效应有关,所以

$$\Delta n_p = (\partial n_p / \partial E) dE = \delta n_p, \quad (6)$$

而信号光和闲频光折射率的变化不仅与晶体电光效应有关还同时与晶体的色散特性有关,所以信号光和闲频光的折射率变量

$$\Delta n_k = \frac{\partial n_k}{\partial E} dE + \frac{\partial n_k}{\partial \omega} d\omega = \delta n_k + \dot{n}_k \Big|_{\omega_{k0}} \Delta \omega_k, \quad (7)$$

将晶体加上电压后的折射率和信号光、闲频光的频率代入(2)式,忽略二次变量就可求出信号光的频率变化量

$$\Delta \omega \approx \frac{\omega_{i0} (\delta n_s - \delta n_i) - \omega_p (\delta n_s - \delta n_p)}{(n_{s0} - n_{i0}) - \omega_{i0} \dot{n}_i \Big|_{\omega_{i0}} + \omega_{s0} \dot{n}_s \Big|_{\omega_{s0}}}. \quad (8)$$

上面理论推导过程表明,给出下列三个条件时就可计算出光学参变振荡的电光调谐特性: 1) 非线性光学晶体的有效电光系数和外加直流电压的大小; 2) 晶体的色散方程; 3) 互作用的抽运光、信号光和闲频光的波长。

## 3 实验装置及结果分析

实验装置如图 2 所示。LiNbO<sub>3</sub> 晶体固定在绝缘的调节平台上进行角度粗调,晶体的切割角  $\theta=47.5^\circ$ ,  $\phi=-90^\circ$ ; 尺寸为  $|s_1| \times |s_2| \times |s_3| = 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ ;  $s_1$  为通光方向,没有经过抛光处理的两个面  $s_1 \times s_3$  均匀镀上银电极。晶体这样切割、加工的方式很容易保证外加控制电压方向与抽运光的偏振方向平行。抽运光源为  $1.064 \mu\text{m}$  Nd:YAG 激光器,重复频率为  $10 \text{ Hz}$ ,脉宽  $20 \text{ ns}$ ,能量为  $15 \text{ mJ}$ ,在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的入射面上的光斑直径约为  $0.8 \text{ mm}$ 。光学参变振荡谐振腔为环形结构,降低了对腔镜镀膜的要求,有效地避免了参变光反射回抽运源造成的干扰;同时,环形腔结构便于在腔内插入光学元件对参变光特性进行进一步的研究。为保证在一个脉宽时间内参变光在腔内的振荡次数,整个环形腔的线性光学长度应根据光学元件的要求控制到最小,总长约为  $12 \text{ cm}$  左右。因为 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的切割、加工是根据 I 类相位匹配方式完成的,所以信号光和闲频光均为 o 光。在抽运光强度很容易达到光学参变振荡阈值情况下,为避免双光参变振荡器频率不稳定问题,环形腔的膜系设计主要保证信号光在腔内振荡,同时要将闲频光有

效耦合出谐振腔以避免闲频光和信号光相互作用进行能量的后向转换。 $M_1$  对  $1.064 \mu\text{m}$  的透射率  $T=97.4\%$ , 对  $1.47\sim 1.52 \mu\text{m}$  的反射率  $R\approx 99.5\%$ ;  $M_2$  为闲频光的耦合输出镜, 对  $1.064 \mu\text{m}$  的反射率  $R=99\%$ , 对  $3.5\sim 3.7 \mu\text{m}$  的透射率  $T\approx 75\%$ , 对  $1.47\sim 1.52 \mu\text{m}$  的反射率  $R\approx 92\%$ ;  $M_3$  对  $1.064 \mu\text{m}$  的反射率  $R=99.9\%$ , 对  $1.47\sim 1.52 \mu\text{m}$  的反射率  $R\approx 97.5\%$ ;  $M_4$  为信号光的耦合输出镜, 对  $1.064 \mu\text{m}$  的反射率  $R=99\%$ , 对  $1.47\sim 1.52 \mu\text{m}$  的透射率  $T\approx 84\%$ 。 $M_2$ 、 $M_4$  耦合输出闲频光、信号光的能量用 ED-500 能量计和示波器监测, 在外加调谐电压在  $-4.5\sim 4.5 \text{ kV}$  之间变化时, 输出信号光和闲频光的波长用测量精度为  $0.2 \text{ nm}$  的 WDG-300 单色仪进行实时测量, 单色仪狭缝输出的红外光用红外光敏板感测。实验中所测量到的最大输出光能量约为  $2.6 \text{ mJ}$ , 转换效率  $\eta\approx 17.3\%$ , 光学参变振荡至少可在  $30 \text{ min}$  内稳定输出。在进行光学参变振荡电光调谐实验过程中, 当外加调节电压绝对值大于  $3 \text{ kV}$  时, 要特别注意控制实验环境的湿度, 以防止电极间放电造成晶体的损伤。

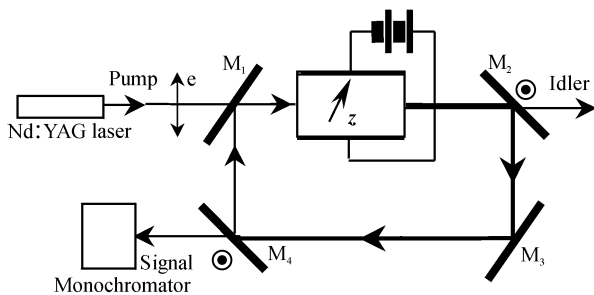


Fig. 2 Experimental setup of electrooptic tuning  
LiNbO<sub>3</sub> OPO

图 3 为光学参变振荡外加调节电压与输出参变光波长的关系, 其中的理论调谐曲线根据 (8) 式计算得出, 计算中所用的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体色散方程、折射率和电光系数的取值均由福晶公司提供。当调谐电压为零时, 输出的信号光波长为  $1514.8 \text{ nm}$ , 闲频光波长为  $3575.4 \text{ nm}$ ; 当调谐电压为  $-4.5 \text{ kV}$  时, 信号光波长  $1537.6 \text{ nm}$ , 闲频光波长  $3435.8 \text{ nm}$ ; 当调谐电压为  $4.5 \text{ kV}$  时, 信号光波长  $1497.2 \text{ nm}$ , 闲频光波长  $3742.6 \text{ nm}$ 。因此, 信号光的调谐带宽为  $22.8 \text{ nm}$ , 调谐速率为  $20.3 \text{ nm}/(\text{kV}\cdot\text{mm})$ ; 闲频光的调谐带宽为  $139.6 \text{ nm}$ , 调谐速率为  $124.1 \text{ nm}/(\text{kV}\cdot\text{mm})$ 。实验装

置安装固定完毕, 就可通过转动直流电压源旋钮得到参变光波长调谐输出, 实验结果与理论计算吻合较好, 实验操作特别方便快捷。因此, 利用晶体电光效应是实现波长“捷变”的可行途径。

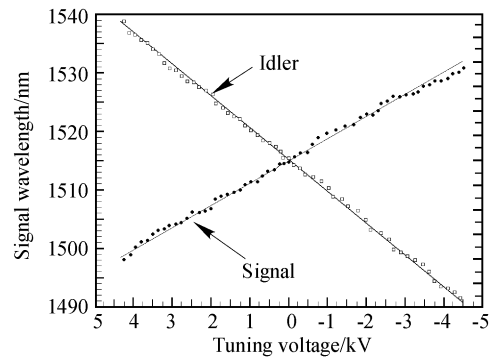


Fig. 3 Wavelength tuning of signal and idler beams  
vs applied DC voltage

## 参 考 文 献

- Eckardt R C, Nabors C D, Kozlovsky W J *et al.*. Optical parametric oscillator frequency tuning and control. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, **8**(2):646~654
- Hopkins F K. Nonlinear materials extend the range of high-powers. *Laser Focus World*, 1995, **31**(7):87~93
- Kato K. Parametric oscillator at  $3.2 \mu\text{m}$  in KTP pumped at  $1.064 \mu\text{m}$ . *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **27**(5):1137~1140
- Nelson D F. General solution for the electro-optic effect. *J. Opt. Soc. Am.*, 1975, **65**(6):1144~1149
- Liu Qiang, Ju Youlun, Wang Yuezhu *et al.*. Stimulated Brillouin scattering phase-conjugate resonator and internal optical parametric oscillator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(8):1089~1093 (in Chinese)
- Wang Yuezhu, Liu Qiang, Yao Baoquan *et al.*. High efficient optical parametric oscillator pumped by SBS phase conjugation beam. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(9):1176~1179 (in Chinese)
- Smith A V, Gehr R J, Bowers M S. Numerical models of broad-bandwidth nanosecond optical parametric oscillators. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1999, **6**(9):609~619
- Henderson A J, Roper P M, Borschowa L A *et al.*. Stable, continuously tunable operation of a diode-pumped doubly resonant parametric oscillator. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(17):1264~1266
- Li Chun, Zeng Xiaodong, An Yuying *et al.*. Novel method of calculating biaxial crystal in  $3\sim 4 \mu\text{m}$  optical parametric oscillators (OPO). *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2001, **30**(12):1457~1460 (in Chinese)