

文章编号: 0253-2239(2006)10-1554-5

# 利用电光效应实现周期极化 KTP 晶体制作过程的实时监控\*

任铁雄<sup>1</sup> 于 建<sup>1</sup> 桑 梅<sup>1</sup> 付伟佳<sup>1</sup> 倪文俊<sup>1</sup> 康玉琢<sup>1</sup> 李世忱<sup>1</sup> 胡永岚<sup>2</sup> 师瑞泽<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)  
(<sup>2</sup> 中非人工晶体研究院, 北京 100018)

**摘要:** KTP 晶体与其他非线性晶体相比具有明显的优势,但同时它具有相当高的电导率,因此极化过程中一直存在传导电流,使其不能利用传统的方法有效控制极化反转过程。为了解决这种困难,需要对 KTP 晶体的极化反转过程进行实时监控。采用了利用电光效应的实时监控方案,并且进行了理论分析,用实验验证了实时监控方案的可行性。与采用该方法前相比,KTiOPO<sub>4</sub>(简称 PPKTP)器件的倍频转换效率提高了数倍。实验表明利用实时监控可以提高周期极化 KTP 晶体的制备质量和重复性,也可以作为周期极化 KTP 晶体质量的检验手段。

**关键词:** 非线性光学; 准相位匹配; 周期极化 KTP; 电光效应; 实时监控

中图分类号: O437.1 文献标识码: A

## Real-Time Monitoring to Fabrication of PPKTP Crystal Utilizing Electro-Optical Effect

Ren Tiexiong<sup>1</sup> Yu Jian<sup>1</sup> Sang Mei<sup>1</sup> Fu Weijia<sup>1</sup> Ni Wenjun<sup>1</sup> Kang Yuzhuo<sup>1</sup>  
Li Shichen<sup>1</sup> Hu Yonglan<sup>2</sup> Shi Ruize<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Optoelectronics Information Technical Science, Education Ministry of China, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)  
(<sup>2</sup> Research Academy of Synthetic Crystal, Beijing 100018)

**Abstract:** Compared with other nonlinear optical materials, KTP crystal has prominent advantages. But it also has high conductivity and it becomes difficult to efficiently control domain-reversion with conventional method, due to the existence of ionic current. So to conquer the difficulty, it is necessary to monitor the polarization-reversal process of KTP crystal in real-time. Real-time monitoring method into the fabrication of PPKTP, short for KTiOPO<sub>4</sub> is carried out by utilizing electro-optical effect. The principle is analyzed theoretically and the result demonstrates the validity of the method experimentally. Compared with the results without the monitoring method, the conversion efficiency of PPKTP crystal increases by many times. It is proved that this method can be used to enhance the quality and repeatability of PPKTP crystal fabrication, and is also effective to examine the quality of PPKTP crystal.

**Key words:** nonlinear optics; quasi-phase matching; periodically poled KTP; electro-optical effect; real-time monitoring

## 1 引 言

1962 年 Armstrong 等发表了关于准相位匹配技术的论文,但由于材料制作工艺上的困难,未得到

广泛应用。近十余年来,随着用外加电场方法对非线性晶体进行周期极化技术的应用,使准相位匹配技术得到迅速发展。利用准相位匹配晶体中的非线性

\* 国家自然科学基金(60377018)和教育部科学技术研究重点项目(02042)资助课题。

作者简介: 任铁雄(1978~),男,朝鲜留学生,硕士研究生,主要从事准相位匹配技术及应用的研究。

E-mail: datie@eyou.com

导师简介: 于 建(1946~),女,天津大学精仪学院教授,主要从事光电子技术和激光技术、准相位匹配技术方面的研究。

E-mail: yuj@tju.edu.cn

收稿日期: 2005-12-31; 收到修改稿日期: 2006-03-06

性效应来实现激光频率变换,被认为是非线性光学频率变换技术中的重大突破,近些年来受到国内外的广泛关注。实现准相位匹配最有效、最实用的方法是沿相互作用光的传播路径对材料的非线性参量进行空间调制,使得有效非线性系数在  $+d_{\text{eff}}$  和  $-d_{\text{eff}}$  之间交替变化。

近年来国内外有关周期极化  $\text{LiNbO}_3$  (PPLN)、 $\text{LiTaO}_3$  (PPLT) 以及周期极化  $\text{KTiOPO}_4$  (PPKTP) 晶体理论和应用研究的报道很多<sup>[1~8]</sup>。其中制备技术最为成熟的是周期极化铌酸锂晶体。周期极化铌酸锂晶体具有非线性系数大,转换效率高的优点,但是周期极化铌酸锂晶体光损伤阈值低,光折变效应明显,且极化反转电压高(矫顽场约为  $21 \text{ kV/mm}$ ),因此很难制备出反转厚度较大的器件,大大限制了器件的应用范围。相比之下,周期极化 KTP 晶体具有非线性系数较大,光损伤阈值高,矫顽场电压(约为  $2.1 \text{ kV/mm}$ )较低和光折变效应不明显的优点,可以制备出大尺寸器件,以便提高变频输出功率。

实现周期极化的最常用的方法是外加高压电场使晶体内部的铁电畴产生极化反转。但是周期极化 KTP 晶体的电导率很高(比周期极化铌酸锂晶体高 10 个数量级以上),容易产生传导电流,给有效控制极化反转过程带来新的困难,因此需要对 KTP 晶体的极化反转过程进行实时监控。本文介绍了利用电光效应的实时监控方案,并进行了理论分析和实验验证,反转后器件的通光倍频转换效率显著提高。

## 2 实时监控方案

### 2.1 基本原理与实验装置

监控电导率较小的周期极化铌酸锂晶体的极化反转程度,是通过测量极化反转期间消耗的电荷量来实现的,理论上电荷量和发生极化反转的面积  $A$  之间的关系为  $Q = \int Idt = 2P_s A$ <sup>[9]</sup>,其中  $P_s$  是自发极化强度, $I$  是极化电流。利用公式算出有效极化反转面积  $A$ ,作为评价反转程度的标准。

KTP 晶体的电导率比铌酸锂晶体大 10 个数量级之多,整个极化过程中除了极化电流以外还存在传导电流。由于周期极化 KTP 晶体的电导率在整个区域内不是很均匀而且变化不规则<sup>[10]</sup>,无法准确地估计属于极化电流的比例。图 1 表示在周期极化 KTP 晶片上外加矫顽场以下电压时电导率的变化。在矫顽场电压以下没有极化反转,所以这时候检测到的电流都属于传导电流。

图 1 中可以看出即使外加电场不变的情况下,周期极化 KTP 晶体的电导率也不是常数。

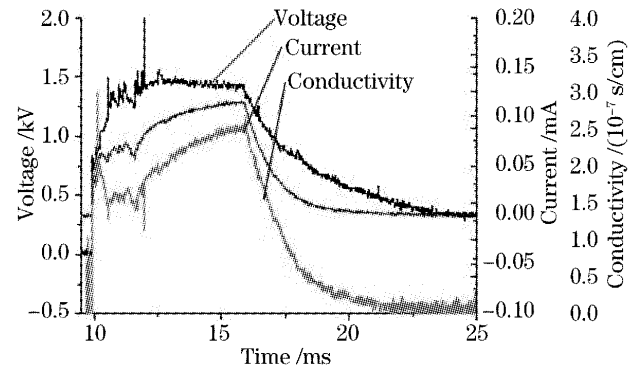


图 1 外加电场时电导率的变化曲线

Fig. 1 Conductivity curve under the action of electric field

为了克服这一缺点,利用周期极化 KTP 晶体良好的电光性质对其极化反转实行监控,以提高制作的质量和重复性。利用晶体的横向电光效应的实验装置如图 2 所示。

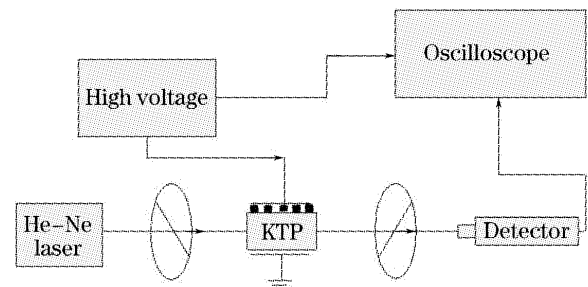


图 2 实时监控方案示意图

Fig. 2 Experimental setup of real-time monitoring system

采用外加电场方法对 KTP 晶体进行极化反转,所用波形为梯形波,由上升沿、保持沿和下降沿组成。当晶体沿  $z$  轴外加电场之后,晶体的折射率将发生变化,导致激光经过晶体后的偏振态发生变化。采用 He-Ne 激光器作为检测光源,沿着  $x$  轴方向通光,第一个偏振片使 He-Ne 激光器的输出光变成与晶体的  $z$  轴成  $+45^\circ$  的线偏振光。经过晶体电光调制后输出的光再通过与晶体的  $z$  轴成  $-45^\circ$  的偏振片之后,检测器接收的光强反映出偏振态的变化。当外加电压在矫顽场以下时,检测器接收到的光强变化只与外加电场的变化有关,因此只在脉冲的前沿和后沿处,接收光强有变化,其余时间保持不变。当外加电压超过矫顽场时,情况发生变化,因为畴反转区域的电光系数取负值,因此这些区域与没有发生极化反转区域的电光效应相抵消。当极化反转的占空比为 50% 时,电光效应的有效作用为 0,极化过程相当于电光效应的有效作用长度由晶体长度

变为 0 的过程。利用极化反转的这一特性对极化反转进行控制。

## 2.2 理论计算

周期极化 KTP 晶体的电光系数矩阵为

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{23} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中每个参量的值见表 1。

表 1 周期极化 KTP 晶体的电光系数<sup>[11]</sup>

Table 1 Electro-optical coefficients of PPKTP<sup>[11]</sup>

Electro-optical coefficient at 633 nm (pm/V)				
$r_{13}$	$r_{23}$	$r_{33}$	$r_{42}$	$r_{51}$
9.5	15.7	36.3	9.3	7.3

外加电场  $E_x$  之后,经过晶体的光沿  $y$  轴方向与  $z$  轴方向成分之间相位差的计算公式如下:

$$\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 = \frac{2\pi L_x}{\lambda_0} (n_z - n_y) + (1 - 2D) \frac{\pi L_E E_x}{\lambda_0} (n_y^3 r_{23} - n_z^3 r_{33}), \quad (2)$$

其中  $L_x$  是晶体的长度,  $L_E$  是有效电光作用长度(存在电场区域的总长度),  $E_x$  是外加电场的强度,  $D$  为占空比(每个周期中极化反转区域宽度与周期之比)。

(2) 式中,第一项与电光效应无关,在整个极化过程中为常量(不考虑温度的变化),只有第二项与电光效应有关,且随着极化过程中占空比的变化而变化。折射率  $n_x, n_y$  的值由赛耳迈耶尔方程计算:

$$n_i^2 = a + b/(\lambda^2 - c) - d\lambda^2 \quad (\lambda \text{ in } \mu\text{m}) \quad (3)$$

赛耳迈耶尔方程的参量见表 2。

表 2 赛耳迈耶尔方程的参量<sup>[12]</sup>

Table 2 Coefficients of Sellmeier equation<sup>[12]</sup>

	$a$	$b$	$c$	$d$
$x$	3.0065	0.03901	0.04251	0.01327
$y$	3.0333	0.04154	0.04547	0.01408
$z$	3.3134	0.05694	0.05658	0.01682

这时检测器接收到的光强  $I$  与相位差  $\Gamma$  之间的关系表示为

$$I \propto (1 - \cos \Gamma), \quad (4)$$

由(2)式和(4)式可以看出,影响检测器接收到的光强主要由占空比和外加电压决定。图 3 和图 4 分别表示占空比和外加电压对检测器接收到的光强的影响。图 3 中可以看到,随着占空比  $D$  的变化,检测器接收到的光强变化呈现余弦形状,只要准确地算

出目标占空比  $D$  值时的相对光强,就可以有效地控制极化过程。

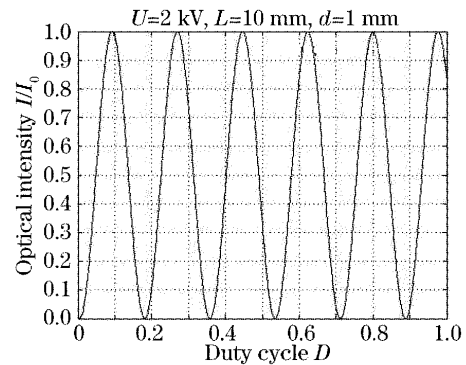


图 3 光强与占空比之间的关系

Fig. 3 Dependence of optical intensity on duty cycle

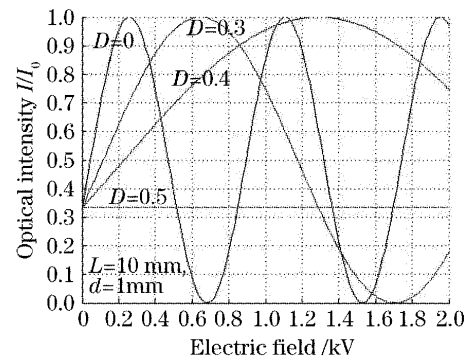


图 4 不同  $D$  值下电压与光强之间的关系

Fig. 4 Dependence of optical intensity on voltage with different duty cycle  $D$

图 4 中可以看出  $D$  值越接近 0.5, 曲线的变化越缓慢,直至  $D=0.5$  时电光效应“消失”。利用这一特性,对制备出来的器件进行检验。换句话说,外加矫顽场电压以下的三角波电压时,检测器接收到的光强变化的缓慢程度能表现出器件的“质量”。

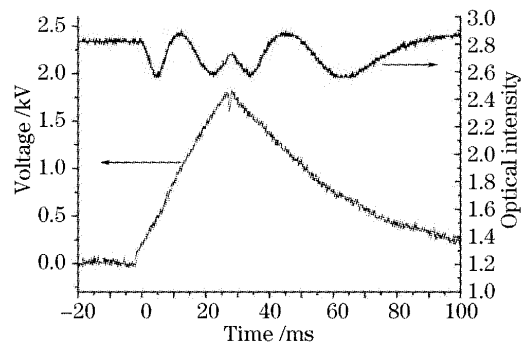


图 5 样品 1 外加三角形电压时检测器接收到的光强变化

Fig. 5 Variety of optical intensity when the triangle-shape voltage is applied on sample

## 3 实验结果与分析

实验中利用的 KTP 晶体是用熔盐法生长之后

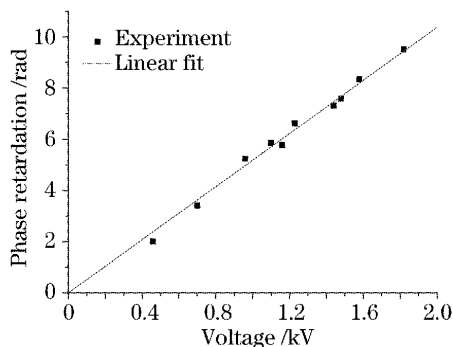


图 6 样品 1 外加电压与相位差之间的关系

Fig. 6 Dependence of phase retardation on applied voltage on sample

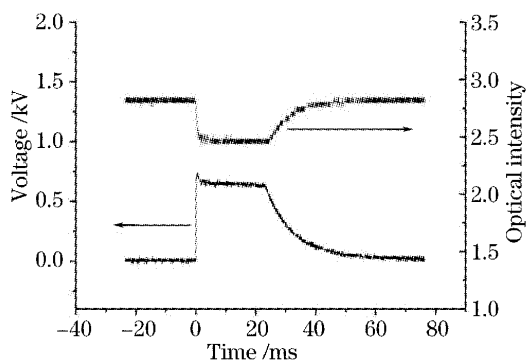


图 7 样品 2 外加矫顽场以下方形电压时检测器接收到的光强变化

Fig. 7 Variety of optical intensity when the square voltage below coercive field is applied on sample 2

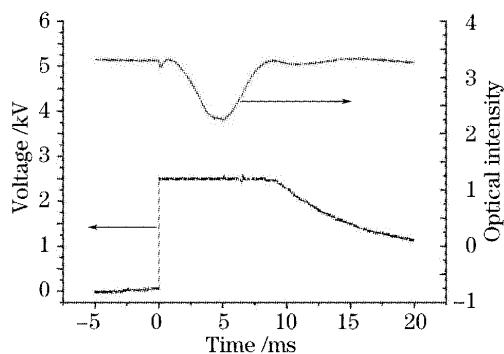


图 8 样品 2 外加矫顽场以上方形电压时检测器接收到的光强变化

Fig. 8 Variety of optical intensity when the square voltage over coercive field is applied on sample 2

进行铷交换的样品。样品 1 和样品 2 的大小为  $8\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。首先,对晶体外加矫顽场以下的三角波电压,观察 KTP 晶体的电光效应。由(2)式和(4)式可知,当外加电场低于矫顽场电压时,检测器接收到的光强随着电压的变化呈现正弦波的形状,而且外加电场与对应的相位差形成线性关系。图 5、图 6 表明 KTP 晶体的电光效应与理论分析非常吻合。由(2)式计算的相位差与从拟合直线中得

出的相位差有明显的差别,其主要原因是铷交换 KTP 晶体样品内电场分布的不均匀性。之后,对晶体外加方波形电压,观察 KTP 晶体的电光效应。图 7、图 8 分别为外加  $670\text{ V/mm}$ ,  $22\text{ ms}$  脉冲和  $2.52\text{ kV/mm}$ ,  $10\text{ ms}$  脉冲时检测器接收到光强的变化曲线。从图 7 中看出,当外加电压低于矫顽场电压时,只要电压不变,检测器接收到光强也没有变化,即没有发生极化反转。从图 8 中看出,当外加电压高于矫顽场电压时,同样电压不变的情况,检测器接收到的光强有明显的变化,而且其变化曲线呈现正弦波的形状。这些结果利用(2)式能很好地解释,而且能说明对晶体外加矫顽场以上电压时,晶体的结构发生变化,即发生极化反转,并反映在其相位变化上。

可以从光强变化曲线算出相应的相位差变化,然后将其与理论计算的相位差做比较,决定是否继续加电压。值得一提的是,通过观察脉冲的下降沿对应的光强变化曲线可以定性地判断样品的极化程度,即变化越慢,极化程度越好。

## 4 结 论

以上的实验结果与我们的理论分析非常吻合,同时证明了利用电光效应对 KTP 晶体的极化反转进行实时监控方案的可行性。这种方案不但可以用于占空比为 0.5 的极化反转,而且可以用于其它占空比的极化反转,不同的是,当占空比不为 0.5 时,最后电光效应没有完全“消失”,而累积的相位差与我们计算的相位差一致时,可停止加压。

我们利用上述方案对 KTP 晶体的极化反转进行了实时监控,将极化反转后的周期极化 KTP 样品进行通光实验,当耦入样品的基频光功率为  $710\text{ mW}$  时,获得  $7.25\text{ mW}$  的倍频绿光输出,其单通倍频转换效率为  $1.02\%$ 。与采用该方法前相比,周期极化 KTP 器件的单通倍频转换效率提高了数倍。

## 参 考 文 献

- 1 V. Pasiskevicius, H. Karlsson, F. Laurell *et al.*. High-efficiency parametric oscillation and spectral control in the red spectral region with periodically poled  $\text{KTiOPO}_4$ [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(10): 710~712
- 2 Martin M. Fejer, G. A. Magel, Dieter H. Jundt *et al.*. Quasi-phased-matched second harmonic generation tuning and tolerances [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(11): 2631~2655
- 3 Shi-ning Zhu, Yong-yuan Zhu, Yi-qiang Qin *et al.*. Experimental realization of second harmonic generation in a Fibonacci optical superlattice of  $\text{LiTaO}_3$  [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(14): 2752~2755
- 4 Jian Yu, Ting Xue, Tianxin Yang *et al.*. Fan-out grating quasi-phase-matched second harmonic generation in  $\text{LiNbO}_3$  waveguide[J].

- Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(11): 2528~2535 (in Chinese)  
薛挺, 于建, 杨天新等. 周期极化铌酸锂光参量振荡调谐与容差特性分析[J]. *物理学报*, 2002, **51**(11): 2528~2535
- 5 Xue Ting, Yu Jian, Yang Tianxin *et al.*. Frequency doubled CW green light generation in periodically poled KTiOPO<sub>4</sub> crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(3): 565~572 (in Chinese)  
薛挺, 于建, 杨天新等. 准位相匹配铌酸锂波导倍频特性分析与优化设计[J]. *物理学报*, 2002, **51**(3): 565~572
- 6 Yu Jian, Xue Ting, Yang Tianxin *et al.*. Tunability and tolerance of optical parametric oscillator in periodically poled lithium niobate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 921~923 (in Chinese)  
于建, 薛挺, 杨天新等. 准相位匹配扇形光栅铌酸锂光波导倍频绿光输出[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 921~923
- 7 Yu Jian, Ni Wenjun, Xue Ying *et al.*. Numerical analysis and optimization of quasi-phase-matched second-harmonic-generation in LiNbO<sub>3</sub> waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 793~795 (in Chinese)  
于建, 倪文俊, 薛挺等. 周期极化 KTiOPO<sub>4</sub> 晶体连续倍频绿光输出[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 793~795 (in Chinese)
- 8 Xue Ting, Yu Jian, Yang Tianxin *et al.*. Theoretical analysis of the 1.5  $\mu\text{m}$  band all-optical wavelength converters based on cascaded second-order nonlinearity in LiNbO<sub>3</sub> waveguide[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(1): 91~98 (in Chinese)  
薛挺, 于建, 杨天新等. 1.5  $\mu\text{m}$  波段基于级联二阶非线性的铌酸锂光波导全光波长变换的理论分析[J]. *物理学报*, 2002, **51**(1): 91~98
- 9 G. Rosenman, A. Skliar, M. Oron *et al.*. Polarization reversal in KTiOPO<sub>4</sub> crystals[J]. *Appl. Phys.*, 1997, **30**: 277~282
- 10 Q. Guan, J. Wang, W. Cui *et al.*. The DC conductive property of KTiOPO<sub>4</sub> crystal along its Z-axis[J]. *Cryst. Res. Technol.*, 1998, **33**: 821~825
- 11 J. D. Bierlein, C. B. Arweiler. Electro-optic and dielectric properties of KTiOPO<sub>4</sub>[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(15): 917~919
- 12 K. Kato. Parametric oscillation at 3.2  $\mu\text{m}$  in KTP pumped at 1.064  $\mu\text{m}$ [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **27**(5): 1137~1141

• 广告 •

## 最佳全球供应商



LBO 专利号: 4,826,283 美国专利号  
88 1 02084.2 中国专利号  
2023845 日本专利号



FC CASTECH®

我公司提供以下类型晶体:

- 非线性光学晶体
- 激光晶体
- 声光及电光晶体
- 双折射晶体
- 光折变晶体
- 晶体组件
- X-射线晶体
- 光学件



BBO



BIBO



KTP



Nd:YVO<sub>4</sub>



胶合晶体



键合晶体



蓝光组件



光敏晶体

### 福建福晶科技有限公司

地址: 福建省福州市杨桥西路155号 邮编: 350002  
TEL: 86-591-83710533 FAX: 86-591-83711593  
http://www.castech.com E-mail: sales@castech.com