

文章编号 1004-924X(2015)05-1227-06

## 沿光轴通光的 $\text{LiNbO}_3$ 的横向电光调制特性

李克武<sup>1,2</sup>, 王志斌<sup>1,2\*</sup>, 张 瑞<sup>1,2</sup>, 王国梁<sup>1,2</sup>, 王耀利<sup>1,2</sup>

(1. 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:** 为了克服现有电光器件的缺陷, 选取晶体生长工艺成熟、价格低廉、折射率及电光系数较大的  $\text{LiNbO}_3$  作为电光晶体材料, 研究了沿其光轴方向通光的横向电光效应。加工制作了  $x$  切、 $(xz)$   $45^\circ$  切和  $y$  切 3 种不同切型的横向电光调制器, 并对他们的调制性能做了实验分析。研究结果表明, 沿  $\text{LiNbO}_3$  光轴方向通光的横向电光调制有相同的电光参量, 折射率感应主轴的位置与电场方向有关; 3 种不同切型的横向电光调制器的零场泄露均很小, 静态消光比均优于 1 000 : 1, 半波电压实测值与理论值的相对误差不超过 1.7%; 相同调制电压下, 它们的调制深度相同, 且调制性能稳定。该项研究可为该类电光调制器件的设计和应用提供参考, 拓展它们在光通信和光学测量领域的应用。

**关键词:** 铌酸锂; 电光晶体; 电光调制器; 横向电光调制; 晶体切型; 半波电压; 调制深度

**中图分类号:** O436.4; TN761 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152305.1227

## LiNbO<sub>3</sub> transverse electro-optical modulation characteristics for light pass along optical axis

LI Ke-wu<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-bin<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Rui<sup>1,2</sup>, WANG Guo-liang<sup>1,2</sup>, WANG Yao-li<sup>1,2</sup>

(1. Engineering and Technology Research Center of Shanxi

Province for Optical-Electric Information and Instrument, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement of the

Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

\* Corresponding author, E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn

**Abstract:** To overcome the defects of existing electro-optical devices, the  $\text{LiNbO}_3$  with advantages of mature growth process, low prices, large refractive indexes and large electro-optical coefficients was selected as an electro-optical material, and its transverse electro-optical effect for light pass along optical axis was researched. Then, three kinds of transverse electro-optical modulators with  $x$ -cut,  $(xz)$   $45^\circ$ -cut and  $y$ -cut were fabricated, and their modulation characteristics were analyzed experimentally. The results indicate that the transverse electro-optical effects that light passes along optical axis have the same electro-optical parameters, and the refractive index induced spindle position is related to the direction of electric field. The three kinds of transverse electro-optical modulators with different cut modes all show the lower zero-field leakages, their static extinction ratios exceed

收稿日期: 2014-09-24; 修订日期: 2014-11-04.

基金项目: 国家国际科技合作专项资助项目 (No. 2013DFR10150); 国家自然科学基金仪器专项基金资助项目 (No. 61127015)

1 000 : 1 and the relative error of half-wave voltage between measured value and theoretical value is less than 1.7%. Under the same modulation voltage, these modulators give the same modulation depths and stable modulation characteristics. The research provides references for design of this kind of electro-optical modulation devices, and will expand their applications in optical communications and optical measurement fields.

**Key words:** LiNbO<sub>3</sub>; electro-optical crystal; electro-optical modulator; transverse electro-optical modulation; crystal cut-mode; half-wave voltage; modulation depth

## 1 引言

电光调制利用电光晶体的电光效应来实现对入射光传播方向、相位、振幅和偏振态的调制<sup>[1]</sup>。基于该效应研制出的诸如电光开关、电光调制器、电光偏转器和电光乘法器等电光器件,已广泛应用于光通信和光学测量领域<sup>[2-7]</sup>。根据施加电场方向和光传播方向之间的关系,电光调制分为纵向调制和横向调制。对于纵向调制,施加的电场方向和光传播方向平行,该类型电光器件采用的晶体材料以磷酸二氢钾(KDP)和磷酸二氢铵(ADP)为代表<sup>[8-9]</sup>;对于横向调制,施加的电场方向和光传播方向垂直,该类型电光器件采用的晶体材料以磷酸钛氧钾(KTP)和 LiNbO<sub>3</sub> 为代表<sup>[10-11]</sup>。由于纵向调制电光器件需要透明电极,器件工艺复杂、加工成本大,因此常用的电光器件大多采用横向调制设计。

用 KTP 设计出的横向电光器件已取得很大进展<sup>[12-14]</sup>,但 KTP 为双轴晶体,制作出的电光器件存在静态双折射,对温度极为敏感,调制性能受到很大限制。虽然科研人员采用两块晶体反向串联来消除这种静态双折射<sup>[15]</sup>,但该方法要求两块晶体长度完全一致,这是较难实现的。此外,沿晶体某些特定方向通光和沿另一特定方向施加电场也能够实现半波电压相对较低,温度稳定性较好的调制<sup>[16]</sup>,但该方法要求选定的方向极为精确,这给加工带来很大困难。

LiNbO<sub>3</sub> 属单轴晶体,具有折射率及电光系数较大、光谱范围宽(0.35~5 μm)、沿光轴方向通光的电光调制不具有静态双折射等特点;并且 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的生长工艺成熟,能够生长出大尺寸原晶、价格低廉。但该类型的电光调制特性长

期以来缺乏相关的实验研究,从而阻碍了该类电光器件工艺及应用的发展。文献[18]设计了 LiNbO<sub>3</sub> 的双横向电光调制器件,但电场在晶体中分布不均匀,限制了有效通光面。本文再次研究了沿光轴方向通光,在垂直光轴任意方向上施加电场的横向电光效应,得到了通光面大、调制均匀、无静态双折射和晶体切型多的调制器的设计方法。随后分别制作了 *x* 切, (*xz*) 45° 切, *y* 切 LiNbO<sub>3</sub> 横向电光调制器样品,并对它们进行了调制特性的测试及分析。

## 2 沿光轴通光的 LiNbO<sub>3</sub> 横向电光调制原理

LiNbO<sub>3</sub> 是光轴与晶体 *z* 轴重合的负单轴晶体,属于三方晶系中的 3m 晶类,入射光波长为 632.8 nm 时,双折射率  $n_o = 2.29$  和  $n_e = 2.20$ ,其电光系数矩阵为:

$$\gamma = \begin{pmatrix} 0 & -\gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & \gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & 0 & \gamma_{33} \\ 0 & \gamma_{51} & 0 \\ \gamma_{51} & 0 & 0 \\ -\gamma_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

上式中共有 4 个独立分量,机械受夹状态时分别取值为:  $\gamma_{22} = 3.4 \times 10^{-12}$  m/V,  $\gamma_{13} = 8.6 \times 10^{-12}$  m/V,  $\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12}$  m/V,  $\gamma_{51} = 28 \times 10^{-12}$  m/V<sup>[17]</sup>。

单轴晶体沿光轴方向通光,垂直于光轴方向施加电场时没有静态双折射。对于电光效应来说,静态双折射对温度极为敏感,如果不加以消除,那么设计出的电光器件调制不稳定,性能降低。

入射光沿光轴方向,在垂直光波矢量的方向上施加电场,这样设计出来的横向电光调制器件

LiNbO<sub>3</sub> 晶体的切型为 (xz)φ 切, 如图 1(a) 所示, 外电场作用下折射率的变化如图 1(b) 所示。

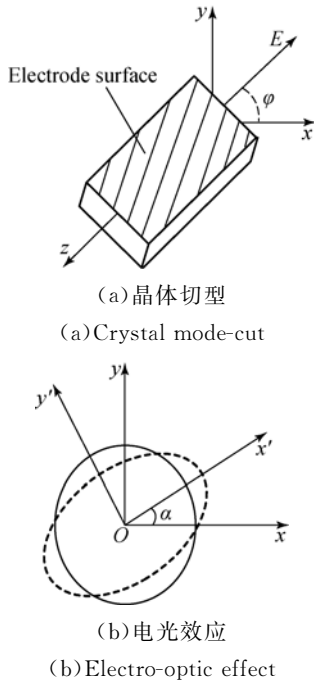


图 1 LiNbO<sub>3</sub> 电光效应工作原理图

Fig. 1 Principle of electro-optic effect of LiNbO<sub>3</sub>

从图 1(a) 可以看出, 取晶体切割的主平面为电极面, 因此外加电场 E 与晶体 x 轴的夹角和切割转角 φ 相同。图 1(b) 中, x', y' 为外电场作用下晶体的电感应主轴, α 为电感应主轴与 x 轴的夹角。根据文献 [17-18] 的报道, 坐标变换后的新主轴折射率为:

$$\begin{cases} n_{x'} = \left( \frac{1}{n_o^2} - \gamma_{22} E \right)^{-1/2} \approx n_o + \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{22} E \\ n_{y'} = \left( \frac{1}{n_o^2} + \gamma_{22} E \right)^{-1/2} \approx n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{22} E \end{cases}, \quad (2)$$

且 α 仅由外电场方向决定, 满足关系:

$$\alpha = \pi/4 - \varphi/2. \quad (3)$$

入射光通过电光晶体时被分解成沿两电感应主轴的分量, 由式 (2) 得到两分量的折射率差为:

$$n_{x'} - n_{y'} = n_o^3 \gamma_{22} E. \quad (4)$$

对于光沿光轴传播, 切割转角 φ 各不相同的横向电光调制, LiNbO<sub>3</sub> 电光晶体具有相同的电光参量 n<sub>o</sub><sup>3</sup>γ<sub>22</sub>。切割转角 φ 决定了外电场方向, 进而决定了电感应主轴的方向。

当 φ=0 时, LiNbO<sub>3</sub> 为 x 切, 外加电场沿 x 轴方向, 电感应主轴旋转了 π/4; 当 φ=π/2 时, LiNbO<sub>3</sub> 为 y 切, 外加电场沿 y 轴方向, 电感应主

轴与原晶轴重合。这是现在已经得到广泛应用的 LiNbO<sub>3</sub> 横向电光效应的两种典型模式。

### 3 沿光轴通光的 LiNbO<sub>3</sub> 横向电光调制实验与分析

#### 3.1 体电光调制器制作及调制工作原理分析

对于沿光轴方向通光的 LiNbO<sub>3</sub> 横向电光调制, 本文以 x 切, (xz)45° 切和 y 切 3 种不同切型的 LiNbO<sub>3</sub> 为例, 研磨抛光加工成长方体晶体长条, 长条的长度沿光轴方向, 厚度沿切向。加工好的晶体长条每个晶面的偏差均控制在 5' 以内, 其中切割主平面用平整的铝板夹持并作为电极, 制成 x 切, (xz)45° 切和 y 切 LiNbO<sub>3</sub> 横向体电光调制器, 晶体尺寸分别为 31.02 mm×11.44 mm×4.61 mm, 31.14 mm×11.44 mm×4.61 mm 和 31.10 mm×11.45 mm×4.62 mm。以 (xz)45° 切为例, 加工好的晶体实物如图 2 所示。

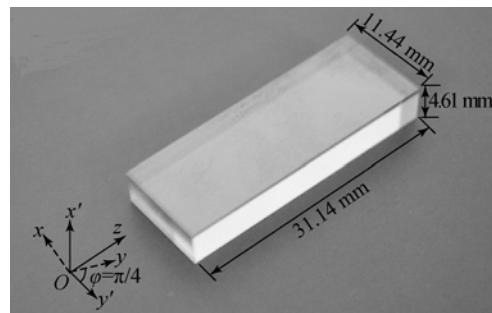


图 2 (xz)45° 切电光晶体

Fig. 2 (xz)45°-cut electro-optical crystal

为了测试所设计的 3 个体电光调制器的调制性能, 在实验室搭建了相应的实验系统。系统结构如图 3 所示, P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub> 分别为起偏器和检偏器, 电光调制器放置在 P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub> 之间。

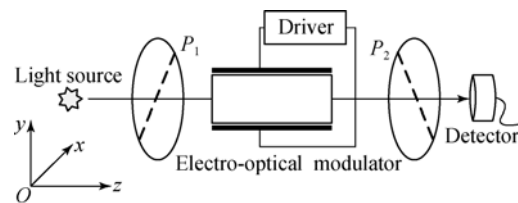


图 3 电光调制测试系统

Fig. 3 Electro-optical modulation test system

调节  $P_1$  偏振轴方向与电光晶体折射率感应主轴的方向成  $45^\circ$  角,  $P_2$  偏振轴方向与  $P_1$  偏振轴方向垂直, 入射光通过电光调制后光强信号<sup>[1]</sup>为:

$$I = I_0 \sin^2 \left[ \frac{\pi V}{2V_\pi} \right], \quad (5)$$

式中:  $V$  为驱动源输入的调制电压,  $V_\pi$  为半波电压。

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2n_0^3 \gamma_{22}} \cdot \frac{d}{l}, \quad (6)$$

其中:  $l$  为电光调制器晶体的长度,  $d$  为晶体厚度。由式(6)可知, 电光参量和尺寸相同的电光调制器对波长相同的入射光具有的半波电压相同。本文选用 632.8 nm 的 He-Ne 激光作为入射光源, 利用式(6)可求解得到  $x$  切、 $(xz)$ 45°切和  $y$  切电光调制器的半波电压分别为  $1.152 \times 10^3$ ,  $1.147 \times 10^3$  和  $1.151 \times 10^3$  V。

### 3.2 静态消光比测试

将制作好的 3 个不同切向的体电光调制器逐一进行实验分析。如图 3 所示, 电光调制器水平放置, 使主平面法线沿竖直方向; 起偏器  $P_1$  和检偏器  $P_2$  均选用方解石格兰泰勒棱镜, 为了使  $P_1$  偏振轴方向与电光晶体电感应主轴成  $45^\circ$  角, 结合图 1 和式(3), 可知对于  $x$  切、 $(xz)$ 45°切和  $y$  切体电光调制器, 取  $P_1$  与水平方向的夹角分别为  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  和  $45^\circ$ ,  $P_2$  调节至与  $P_1$  垂直且消光, 在  $P_1$  和体电光调制器之间插入一个毛玻璃, 在  $P_2$  之后用光屏可以观察到相对应的锥光干涉图, 如图 4 所示。

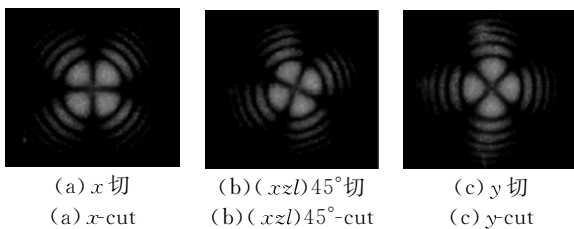


图 4 锥光干涉图

Fig. 4 Conoscopic interferograms

如图 4 所示, 此时入射光方向与电光调制器的晶体光轴平行,  $P_2$  垂直  $P_1$ 。拿走毛玻璃后, 用 Thorlabs 公司的硅基跨阻放大光电探测器 PDA10A-EC 测量入射光通过调制装置后的光强, 并用 Tektronix 公司的 DPO3054 示波器显示输出。分别将 3 个不同切型的电光调制器在  $P_2$  平行和垂直  $P_1$  两种情况下的光强(各测量了 6 组取平均值)记入表 1。

表 1  $P_2$  平行和垂直  $P_1$  两种情况下的光强

Tab. 1 Light intensities in cases of  $P_2$  parallel and vertical to  $P_1$

光强	$x$ 切	$(xz)$ 45°切	$y$ 切
$P_2 \perp P_1$	3.30 mV	3.44 mV	3.73 mV
$P_2 // P_1$	3.57 V	3.80 V	3.98 V

由表 1 可知,  $x$  切、 $(xz)$ 45°切和  $y$  切体电光调制器在无调制电压时的静态消光比分别为 1 082 : 1, 1 105 : 1 和 1 067 : 1。

### 3.3 半波电压测量

再次调节  $P_2$  垂直于  $P_1$ , 并用可调节高压直流驱动电源对电光调制器施加直流电压。在逐渐增大电压值的过程中分别测试了 3 个不同切型的电光调制器, 它们的光强随调制电压的变化关系几乎相同, 这里精细地测量了  $x$  切电光调制器归一化光强随调制电压的变化, 结果如图 5 所示。

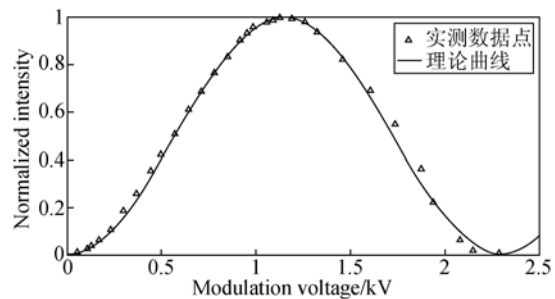


图 5 归一化光强与调制电压的关系图

Fig. 5 Relationship between normalized intensity and modulation voltage

图 5 中, 离散的数据点为实测数据, 理论曲线是将半波电压理论值带入式(5)得到的。由图可知, 实验值与理论曲线吻合得很好。对于  $x$  切、 $(xz)$ 45°切和  $y$  切电光调制器, 光强信号由最小变为最大时, 直流电压驱动源输出分别为 1.137, 1.130 和 1.132 kV, 此时将  $P_2$  调节至与  $P_1$  平行, 光强信号变为最小值, 呈现消光状态。实际上, 这时直流源输出的电压值就是制作好的电光调制器的半波电压, 与理论值十分接近, 相对误差分别为 1.3%, 1.5% 和 1.7%。对于一些具体应用要求的调制器, 还可以通过减小电光晶体厚度和长度的比值( $d/l$ )来降低半波电压。

此外, 在通光面上的不同位置进行通光, 测量得到的半波电压是一样的, 说明外加电场在电光晶体中均匀分布。因此, 基于该类电光调制效应可制作通光面大, 调制均匀的电光器件。

### 3.4 调制实验与分析

分别对3个不同切向的电光调制器施加频率  $f$  为 50 kHz, 峰峰值约为 680 V 的正弦调制电压, 均可得到如图 6 所示的调制结果。

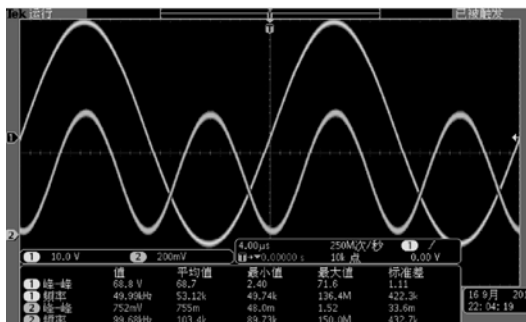


图 6 电光调制图

Fig. 6 Diagram of electro-optical modulation

图 6 中, 示波器 1 通道为调制电压(探测表笔  $\times 10$  档), 2 通道为探测器探测到的光信号。从图中可以看出, 调制后的光强信号频率被倍频到约 100 kHz。

3 个不同切向的体电光调制器的调制电压幅值  $V_0$  (电压峰峰值的一半) 均为 344 V, 结合它们实际的半波电压, 理论上可求出它们的调制深度<sup>[1]</sup> ( $\delta_0 = \pi V_0 / V_\pi$ ) 分别为 0.950, 0.956 和 0.955 rad。

由示波器显示的调制结果可知, 3 个调制器对应光强信号的峰峰值分别为 752, 808 和 832 mV, 代入式(5), 其中  $I_0$  取  $P_2$  平行  $P_1$  时的光强, 依次求解得到 3 个电光调制器的实际调制深度分别为 0.954, 0.959 和 0.950 rad, 与理论计算值基本吻合。

## 4 讨论

对于沿光轴方向通光的 LiNbO<sub>3</sub>, 外加电场

只要垂直光轴, 电光调制就具有相同的电光参量。本文分别制作了  $x$  切, ( $xz$ )45°切和  $y$  切的电光调制器, 并对它们的调制特性进行了测试。对于这 3 种电光调制器, 电光晶体尺寸接近时, 半波电压几乎相同; 施加相同的交流调制电压, 3 种电光调制器的调制结果与调制深度均相同。此外, 该类型电光调制器还具有通光面大, 调制均匀性好的优点。

对于不同切型的电光晶体, 施加的电场方向不同会导致电光晶体调制时折射率感应主轴旋转相应角度。利用该类电光晶体外加电场产生的相位延迟和折射率主轴的偏转特性, 该类型的电光调制可用于制作级联型电光偏振控制器, 偏振编码器 and 光学旋转传感器等器件。至于该类调制器件在光通信, 光信息处理和偏振测量等领域的其他应用还有待进一步的深入研究。

此外, 这种类型的电光调制效应还可以推广应用于钽酸锂,  $\beta$ -硼酸钡和石英等单轴晶体中。

## 5 结论

本文选取晶体生长工艺成熟、价格低廉、折射率及电光系数较大的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体作为电光晶体材料, 研究了它沿光轴方向通光的横向电光效应。加工制作了  $x$  切、( $xz$ )45°切和  $y$  切 3 种不同切型的电光调制器, 并对它们的调制性能进行了实验分析。结果表明, 3 种不同切型的电光调制器零场泄露均很小, 消光比均大于 1 000 : 1; 电光调制器尺寸接近时, 半波电压也接近, 半波电压实测值与理论值的相对误差不超过 1.7%; 相同调制电压下, 调制深度实测值与理论计算值十分接近。本文的研究能够对沿 LiNbO<sub>3</sub> 光轴方向通光的横向电光调制器的设计及应用提供一定的参考。

### 参考文献:

- [1] 董孝义, 高希才. 电光学及其应用[J]. 半导体光电, 1991, 12(2): 189-201.  
DONG X Y, GAO X C. Electro-optics and its application [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1991, 12(2): 189-201. (in Chinese)
- [2] 胡云, 赵学庆, 薛全喜, 等. 由级联紫外电光开关控制准分子激光的自发辐射放大[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 13-18.

2013, 21(1): 13-18.

HU Y, ZHAO X Q, XUE Q X, et al. . Suppression of ASE from excimer laser using cascaded UV electro-optical switch [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 13-18. (in Chinese)

- [3] WANG Q, YAO J P. A high speed 2×2 electro-optic switch using a polarization modulator [J]. *Optics Express*, 2007, 25(15): 16500-16505.
- [4] 何云涛, 江月松, 王长伟. 电光调制在被动综合孔径成像探测中的应用[J]. 光学学报, 2008, 28(6):

- 1201-1207.  
HE Y T, JIANG Y S, WANG CH W. Application of electro-optic modulation in passive synthetic aperture imaging detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1201-1207. (in Chinese)
- [5] 李长胜. 晶体的双参量调制及其应用[J]. *物理学报*, 2014, 63(7): 074207.  
LI CH SH. Crystals modulated by two parameters and their applications [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2014, 63(7): 074207. (in Chinese)
- [6] SATHIAN J N, JAATINEN E. Intensity dependent residual amplitude modulation in electro-optic phase modulators [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(16): 3684-3691.
- [7] 闫洁, 孟鹏花. 应用电光调制干涉系统对甲烷气体浓度监测的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(8): 2153-2155.  
YAN J, MENG P H. Research on methane concentration monitoring system based on electro-optical modulation interference [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(8): 2153-2155. (in Chinese)
- [8] 吴东江, 曹先锁, 王强国, 等. KDP 晶体加工表面的亚表面损伤检测与分析[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1721-1726.  
WU D J, CAO X S, WANG G Q, *et al.*. Damage detection and analysis of machined KDP crystal sub-surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1721-1726. (in Chinese)
- [9] 李征东, 黄祥金, 熊克明. ADP 晶体电光系数测量[J]. *人工晶体学报*, 2001, 30(2): 163-166.  
LI ZH D, HUANG X J, XIONG K M. Measurement of electro-optic coefficients of ADP [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2001, 30(2): 163-166. (in Chinese)
- [10] 王晓洋. KTP 晶体生长及电光性能的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002.  
WANG X Y. *Growth of KTP Crystals and Study on the Electro-optical Properties* [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2002. (in Chinese)
- [11] 谭雪春, 武志超, 凌铭, 等. 通信用高功率高速率 LiNbO<sub>3</sub> 电光调制器[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(增刊): 437-439.  
TAN X CH, WU ZH CH, LING M, *et al.*. High power and high rate LiNbO<sub>3</sub> electro-optic modulator applied in communication field [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (suppl.): 437-439. (in Chinese)
- [12] BIERLEIN J D, ARWEILER C B. Electro-optical and dielectric properties of KTiOPO<sub>4</sub> [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 49(15): 917-919.
- [13] 李世忱, 倪文俊, 杨天新, 等. KTP(KTiPO<sub>4</sub>) 晶体电光开关研究[J]. *光电子·激光*, 1999, 20(10): 95-98.  
LI SH CH, NI W J, YANG T X, *et al.*. Studies on crystal KTP (KTiPO<sub>4</sub>) electro-optic switch [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 1999, 20(10): 95-98. (in Chinese)
- [14] ZHENG G L, XU J, CHEN L X, *et al.*. A thermal design for the potassium titanyl phosphate electro-optical modulator [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(27): 6774-6778.
- [15] 沈德忠. KTP 晶体的电光研究进展[J]. *人工晶体学报*, 2001, 30(1): 28-35.  
SHEN D ZH. Progress in E-O research for KTP crystals [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2001, 30(1): 28-35. (in Chinese)
- [16] 吴丹丹, 余卫龙. 双轴晶体电光调制器的最优设计[J]. *物理学报*, 2005, 54(1): 134-138.  
WU D D, SHE W L. Optimal design of electro-optic modulator of biaxial crystal [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2005, 54(1): 134-138. (in Chinese)
- [17] 俞宽新. 高等光学[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2009.  
YU K X. *Advanced Optics* [M]. Beijing: Beijing Industrial University Press, 2009. (in Chinese)
- [18] LI CH SH. Complete polarization conversion using one crystal with dual transverse Pockels effect[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(13): 2241-2251.

## 作者简介:



李克武(1990—),男,云南文山山人,2013年于中北大学获得学士学位,主要从事光晶体光学器件设计及光谱偏振成像技术方面的研究。E-mail: kewuli1990@gmail

## 导师简介:



王志斌(1966—),男,山西长治人,教授,硕士生导师,现为中北大学山西省光电信息与仪器工程技术研究中心主任,主要从事光谱成像技术及遥感遥测方面的研究。E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)