

# 基于铌酸锂压电弹光双效应的单晶体弹光调制器

陈友华<sup>1,2</sup> 张记龙<sup>1,2</sup> 王艳超<sup>1,2</sup> 魏海潮<sup>1,2</sup> 王志斌<sup>1,2</sup> 张 瑞<sup>1,2</sup> 王立福<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中北大学教育部仪器科学与动态测试重点实验室, 山西 太原 030051)  
(<sup>2</sup> 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

**摘要** 为了克服 Kemp 型弹光调制器调制效率低、加工工艺困难及体积大等缺点,提出了采用铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)晶体压电弹光双效应的单晶体弹光调制器的设计思想;根据压电振动理论和晶体光学原理,分析了晶体各物理量随空间变换的特性,推导了调制电压-相位差-振幅之间的关系,并对晶体切型和通光方向进行了优化,所设计的晶体尺寸为 41 mm×7.7 mm×17.1 mm( $x \times y \times z$ ),切割角为 0°( $x$  切),通光方向  $z$  轴(光轴),通过在  $xz$  面施加与晶体谐振基频一致的周期性电压,产生沿  $x$  方向,频率为 73.71 kHz 的伸缩振动,最后通过实验对所设计单晶体弹光调制器进行了验证;实验结果表明,对 633 nm 激光进行半波调制时,该弹光调制器所需调制电压为 1.6 V;与基于铌酸锂(LiTaO<sub>3</sub>)且未进行切型优化的单晶体弹光调制器相比,调制电压下降了约 4 倍。

**关键词** 光学器件;铌酸锂晶体;压电效应;切型;单晶体;弹光调制器

**中图分类号** O482.4; O734<sup>+</sup>.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1116002

## Single Crystal Photo-Elastic Modulator Based on Lithium Niobate Piezoelectric and Photo-Elastic Effect

Chen Youhua<sup>1,2</sup> Zhang Jilong<sup>1,2</sup> Wang Yanchao<sup>1,2</sup> Wei Haichao<sup>1,2</sup>

Wang Zhibin<sup>1,2</sup> Zhang Rui<sup>1,2</sup> Wang Lifu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement,

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

<sup>2</sup> Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument,  
Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** In order to overcome the disadvantage of Kemp-type photo-elastic modulator such as low modulation efficiency, processing technology difficulty, bulky et al., a photo-elastic modulation mode is proposed. Which uses LiNbO<sub>3</sub> crystal piezoelectric properties to produce single crystal photo-elastic modulator. According to the theory of piezoelectric vibration and crystal optics principle, the crystal orientation dependence of physical properties is analyzed, and the relations of displacement and retardation amplitudes over voltage are derived. Then, the cutting-type and the optical path are optimized. The device is designed with dimensions 41 mm×7.7 mm×17.1 mm in  $x$ -,  $y$ - and  $z$ -direction, 0° cutting angle ( $x$ -cut),  $z$ -axis for the optical path and electrodes on the  $xz$ -surfaces offer basic modulation frequencies at 73.71 kHz corresponding to the longitudinal oscillations in  $x$ -direction. Finally, the corresponding experimental equipment is built for the experimental verification; the result shows that; the voltage amplitude to achieve a half-wave retardation amplitude is only about 1.6 V for 633 nm wavelength, and the modulation voltage reduces about 4 times, compared with the LiTaO<sub>3</sub> signal-crystal photo-elastic modulator whose cutting-type isn't optimized.

**Key words** optical devices; lithium niobate; piezoelectric effect; cutting-type; single crystal; elastic-optic modulator

**OCIS codes** 130.3730; 230.4110; 260.1180

**收稿日期**: 2012-05-24; **收到修改稿日期**: 2012-06-16

**基金项目**: 国家自然科学基金仪器专项基金(61127015)、国际科技合作项目(2012DFA10680)和山西省国际科技合作项目(2010081038)资助课题。

**作者简介**: 陈友华(1986—),男,博士研究生,主要从事高速光谱探测方面的研究。E-mail: chenyh110512@163.com

**导师简介**: 张记龙(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光电仪器与系统、光信息高速调制等方面的研究。

E-mail: zhangjl@nuc.edu.cn

## 1 引 言

弹光调制器<sup>[1]</sup> (PEM) 是一种基于弹光效应的应力双折射器件, 在偏振检测、时分复用、调 Q、偏振编码及超高速干涉调制等方面应用广泛<sup>[2~8]</sup>。现有的 PEM 多采用 Cheng 等<sup>[9]</sup> 提出的 Kemp 型结构, 其基本工作方式为一个压电驱动器驱动一个各向同性的弹光晶体, 压电驱动器与弹光晶体之间通过胶粘层连接, 该结构体积较大, 并需要严格的加工工艺以保证二者同时工作在谐振状态。同时, 额外的胶粘耦合层会造成能量传输损耗, 导致调制效率下降。

为了克服上述缺点, Bammer 等<sup>[10]</sup> 在 2007 年提出一种利用非线性晶体钽酸锂 (LiTaO<sub>3</sub>) 自身的压电和弹光效应的单晶体弹光调制器 (SCPEM), 即晶体自身既是压电驱动器, 又是弹光晶体, SCPEM 无需尺寸匹配, 而且省去了能量传输环节, 因而其体积可以加工的很小, 相应的调制频率可得到较大提升 (几万赫兹到几兆兹), 半波电压也得到了较大降低 (不大于 30 V)<sup>[11]</sup>。然而, 对兼有自然双折射、弹光效应和压电效应的非线性晶体而言, 需要考虑晶体切型对调制的影响, 并进行优化, 该方面的研究, 已在其他晶体光学效应中得到应用<sup>[12~14]</sup>, 但目前尚未有与 SCPEM 密切相关的文献报道。

本文在 Bammer 等<sup>[10]</sup> 的基础上, 考虑到钽酸锂

(LiNbO<sub>3</sub>) 晶体与 LiTaO<sub>3</sub> 晶体属于同一点群, 并具有更加优异的弹光和压电性能, 决定采用 LiNbO<sub>3</sub> 晶体作为 SCPEM 材料, 并综合分析了晶体各物理量随空间变换的特性, 优化了切割方向及通光方向等对晶体压电性能和弹光性能的影响, 设计了基于 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的单晶体弹光调制器, 进行了相关实验验证, 并对其弹光性能进行了初步分析。

## 2 LiNbO<sub>3</sub> 晶体各物理量空间分布和切型选择

LiNbO<sub>3</sub> 晶体是三方晶系中 3 m 点群晶体的代表性晶体, 如图 1 所示, 它的物理学坐标系的 z 轴沿 3 次轴方向, x 轴垂直于其中某一镜面, 因此, 按右手法则选取, y 轴应在某一镜面内, 其介电、弹性、压电及弹光系数张量形式参见文献<sup>[15]</sup>。

首先将坐标系 xyz 按右手法则绕 z 轴旋转 φ, 此时, 坐标系变换成为 x'y'z' (z' // z), 然后, 再将 x'y'z' 按右手法则绕 x' 轴旋转 θ, 最后, 坐标系变换成 x''y''z'' (x'' // x')。通过上述坐标变换的规则, 就可以得到 3 m 点群相关物理量随空间变换的规律。

设  $\mathbf{A} = [a_{ij}]$  (i, j = 1, 2, 3) 是坐标变换矩阵, 则绕 z 轴旋转和绕 x 旋转的坐标变换矩阵分别为

$$\mathbf{A}_{rz} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{rx} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

应变张量的变换矩阵  $\mathbf{N}$  为

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} a_{11}^2 & a_{12}^2 & a_{13}^2 & a_{12}a_{13} & a_{13}a_{11} & a_{11}a_{12} \\ a_{21}^2 & a_{22}^2 & a_{23}^2 & a_{22}a_{23} & a_{23}a_{21} & a_{21}a_{22} \\ a_{31}^2 & a_{32}^2 & a_{33}^2 & a_{32}a_{33} & a_{33}a_{31} & a_{31}a_{32} \\ 2a_{21}a_{31} & 2a_{22}a_{32} & 2a_{23}a_{33} & a_{22}a_{33} + a_{32}a_{23} & a_{23}a_{31} + a_{33}a_{21} & a_{21}a_{32} + a_{31}a_{22} \\ 2a_{31}a_{11} & 2a_{32}a_{12} & 2a_{33}a_{13} & a_{32}a_{13} + a_{12}a_{33} & a_{33}a_{11} + a_{13}a_{31} & a_{31}a_{12} + a_{11}a_{32} \\ 2a_{11}a_{21} & 2a_{12}a_{22} & 2a_{13}a_{23} & a_{12}a_{23} + a_{22}a_{13} & a_{13}a_{21} + a_{23}a_{11} & a_{11}a_{22} + a_{21}a_{12} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中  $a_{ij}$  (i, j = 1, 2, 3) 为坐标变换  $\mathbf{A}$  矩阵元。在以上变换原则下, 晶体的介电系数张量、压电系数张量和弹性顺服系数张量变换公式分别为<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} \epsilon' = \mathbf{A}_{rx} \mathbf{A}_{rz} \epsilon \mathbf{A}_{rz}^T \mathbf{A}_{rx}^T \\ d' = \mathbf{A}_{rx} \mathbf{A}_{rz} d \mathbf{N}_{rz}^T \mathbf{N}_{rx}^T \\ s' = \mathbf{N}_{rz} \mathbf{N}_{rx} s \mathbf{N}_{rz}^T \mathbf{N}_{rx}^T \\ p = \mathbf{N}_{rz} \mathbf{N}_{rx} p \mathbf{N}_{rz}^T \mathbf{N}_{rx}^T \end{cases}, \quad (3)$$

机电耦合系数坐标变换公式为

$$k'_{ij} = d'_{ij} / \sqrt{\epsilon'_{ij} s'_{ij}}. \quad (4)$$

根据上述坐标变换规则以及张量变换公式, 代入 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的初始介电、弹性、压电和弹光张量矩阵 (如表 1 所示) 即可计算出晶体压电、机电耦合和弹光系数随空间变化的规律。

表1 LiNbO<sub>3</sub> 的介电常量、弹性系数、压电系数和弹光系数

Table 1 Dielectric constants, elastic coefficients, piezoelectric and elasto-optic coefficient of LiNbO<sub>3</sub>

Crystal	$\epsilon_{11}$	$\epsilon_{33}$	$s_{11}$	$s_{12}$	$s_{13}$	$s_{14}$	$s_{33}$	$s_{44}$	$d_{15}$	$d_{22}$	$d_{31}$	$d_{33}$	$p_{11}$	$p_{12}$
LiNbO <sub>3</sub>	85.2	28.7	5.78	-1.01	-1.41	-1.02	5.02	17.0	68	21	-1	6.2	-0.026	0.09

考虑到 SCPEM 的振动模式为  $y$  轴施加激励电场,  $x$  轴长度伸缩振动模式。因此,对应的压电系数为  $d_{21}$ , 机电耦合系数为  $k_{21}$ , 应变弹光系数为  $p_{11}$  和  $p_{12}$ 。图 1 给出了以  $1^\circ$  间隔计算出的  $d_{21}$ 、 $k_{21}$  和应变弹光系数之差  $\Delta p$  的空间分布情况, 其中  $\Delta p = p_{11} - p_{12}$ , 可以明显看出 LiNbO<sub>3</sub> 晶体各向异性的特点以及其对称轴分布情况。

为了消除 LiNbO<sub>3</sub> 晶体静态双折射的影响, 实验中选择晶体的  $z$  轴(光轴) 透光, 相应的坐标变换只考虑

绕  $z$  轴的旋转, 因此, 可将图 1 中各系数的三维空间分布投影至  $x-y$  面上, 图 2 采用极坐标表达方式, 给出了各物理量绕  $z$  轴旋转后的特性分布。可以看出, 压电系数  $d_{21}$  的分布由 6 个“花瓣”组成, 存在 1 个 3 次轴和 3 个互成  $120^\circ$  的镜面, 其最大值  $d_{21} = 2.6 \text{ pC/N}$ , 相邻最大值间隔  $60^\circ$ ;  $k_{21}$  的分布与  $d_{21}$  相同, 最大值  $k_{21} = 0.3937$ ; 最大值  $\Delta p = 0.35$ , 且相邻最大值间隔为  $90^\circ$ ; 因此,  $0^\circ$  角切割可以保证最大的压电效应和弹光效应。

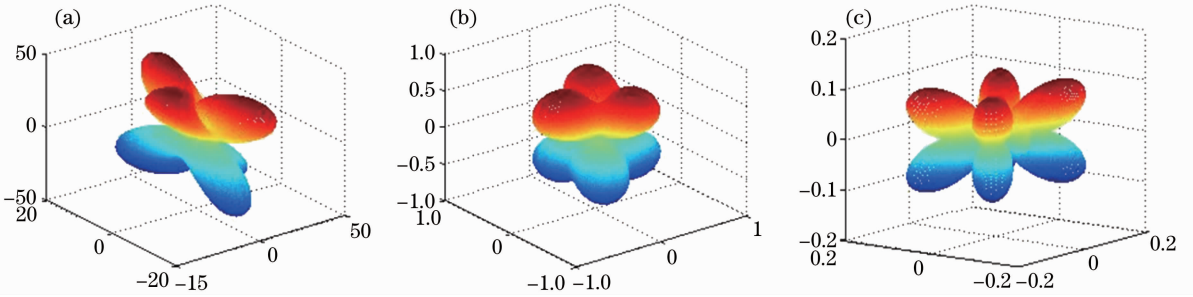


图 1 LiNbO<sub>3</sub> 晶体(a)压电系数  $d_{21}$ ; (b) 机电耦合系数  $k_{21}$ ; (c) 弹光系数  $\Delta p$  的绝对值  
Fig. 1 (a) Piezoelectric coefficient  $d_{21}$ ; (b) electromechanical coupling coefficient  $k_{21}$ ; (c) absolute value of photo-elastic coefficient  $\Delta p$  of LiNbO<sub>3</sub>

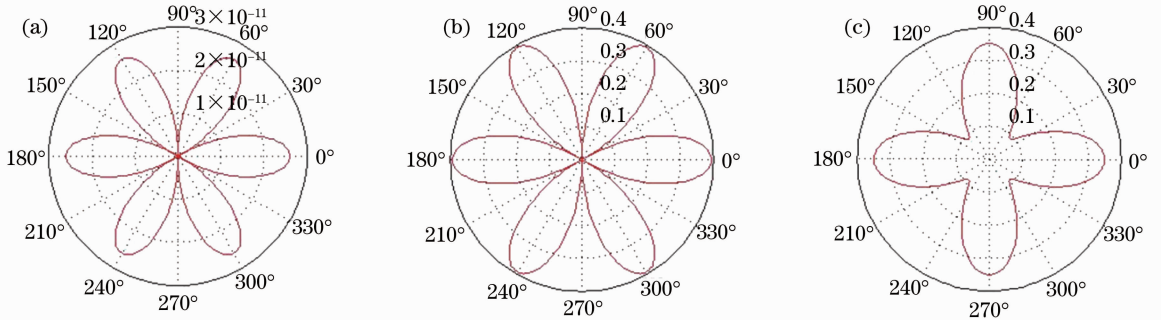


图 2 LiNbO<sub>3</sub> 晶体(a)压电系数  $d_{21}$ ; (b) 机电耦合系数  $k_{21}$ ; (c) 弹光系数  $\Delta p$  的  $x-y$  平面投影  
Fig. 2 (a) Piezoelectric coefficient  $d_{21}$ ; (b) electromechanical coupling coefficient  $k_{21}$ ; (c) projection of photo-elastic coefficient of LiNbO<sub>3</sub>

### 3 调制器基本理论及结构

基于 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的 SCPEM 基本结构如图 3 所示, SCPEM 水平放置,  $x$  方向长度伸缩振动模式的谐振频率为

$$f_b = \sqrt{1/(\rho s'_{11})}/(2l) = 74.4 \text{ kHz}, \quad (5)$$

式中  $s'_{11}$  为坐标变换后的弹性柔顺系数。SCPEM 的上下表面镀电极, 通过施加与晶体谐振频率一致的

周期性电压, 可在  $y$  方向产生周期性电场, 通过电致伸缩效应产生  $x$  方向的伸缩振动。

当与水平方向成  $45^\circ$  的线偏振光通过  $x-y$  面后, 将受到周期性相位调制, 其最大调制相位差为<sup>[17]</sup>

$$\delta_{\max} = \frac{2\pi L}{\lambda}(n_{\text{sm}} - n_{\text{fm}}), \quad (6)$$

式中  $n_{\text{sm}}$ ,  $n_{\text{fm}}$  分别是快轴和慢轴的最大折射率( $x$  轴与  $y$  轴), 且有

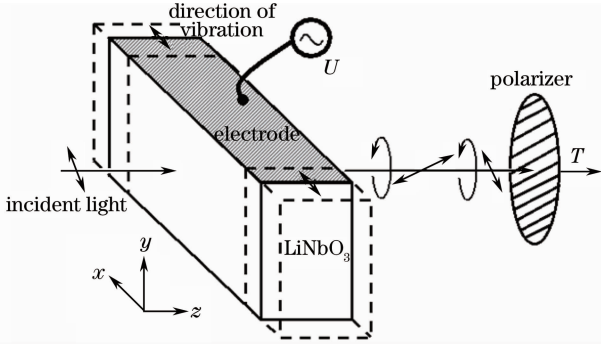


图 3 单晶体弹光调制器基本结构示意图  
Fig. 3 Sketch of basic structure of single-crystal elastic-optic modulator

$$\frac{n_{sm} - n_{fm}}{n_0^3} = (\nu_{11m} - \nu_{22m})(p_{11} - p_{12}), \quad (7)$$

式中  $n_0$  为静态折射率,  $\nu_{11m}, \nu_{22m}$  为最大应变张量分量, 经过与水平方向呈  $45^\circ$  的检偏器之后的透射率为

$$T_r(\delta) = \cos^2(\delta/2 - \pi/4) = [1 + \cos(\delta - \pi/2)]/2, \quad (8)$$

式中调制相位差  $\delta = \delta_{\max} \sin \omega t$ ,  $\omega = 2\pi f_b$  为调制角频率。根据(8)式, 可以得到透射率随时间变化关系, 如图 4 所示。

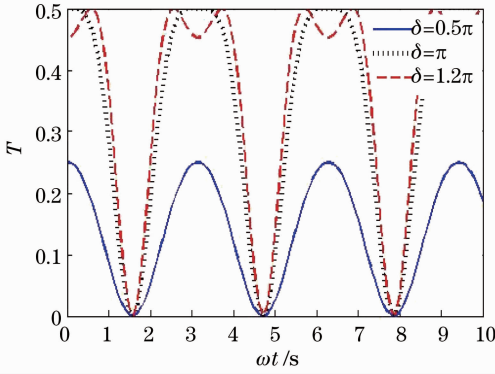


图 4 不同相位差下的透射率曲线

Fig. 4 Transmission curves for different retardations

晶体采用的  $y$  轴激励,  $x$  方向伸缩振动模式, 其杨氏模量  $E=173$  GPa, 压电系数  $e=2.5$  C/m<sup>2</sup>, 介电常数  $\chi=4.62 \times 10^{-10}$  As/Vm。密度  $\rho=4648$  kg/m<sup>3</sup>,  $x$  方向声速  $c=(E/\rho)^{0.5}=6100.8$  m/s。定义无量纲压电耦合参数  $\Delta=e^2/(C/\chi)=0.027143$ 。则谐振时  $x$  方向振动幅值  $\nu_1$ , 谐振电压幅值  $U_1$  和相位差幅值  $\delta_1$  关系<sup>[18]</sup>如下:

$$\begin{aligned} \frac{\nu_1}{U_1} &\propto \frac{1}{\pi} \frac{e}{E} \frac{l}{b} \frac{1}{r}, \\ \frac{\delta_1}{U_1} &\propto 2\pi \frac{L}{\lambda} \frac{n_0^3}{2} [\nu_1 (p_{12} - p_{11})] \frac{e}{Ebr}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $r$  为阻尼系数,  $l, b, L$  分别为晶体  $x, y, z$  方向

的尺寸。(9)式表明, 调制电压-相位差-振幅之间满足线性关系, 且调制相位差  $\delta_1$  与调制电压  $U_1$ 、晶体通光厚度  $L$ 、晶体振动位移量  $\nu_1$ 、弹光系数差  $(p_{12} - p_{11})$ 、自然折射率  $n_0$  和压电系数  $e$  成正比, 与晶体  $y$  方向宽度  $b$ 、阻尼系数  $r$  以及杨氏模量  $E$  成反比。

## 4 实验结果与讨论

实际测量时, 采用如图 5 所示实验装置, 尺寸为:  $41 \text{ mm} \times 7.7 \text{ mm} \times 17.1 \text{ mm}$  ( $l \times b \times L$ ),  $0^\circ$  切割角,  $z$  轴为光轴, SCPEM 与一个  $R=100 \Omega$  的电阻串联, 用以测量其反馈电流的大小与相位。

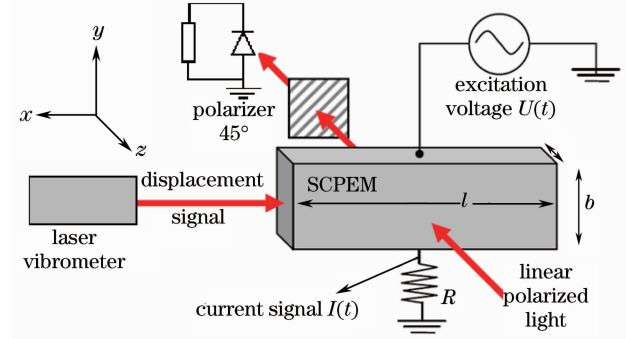


图 5 单晶体弹光调制器实验装置示意图

Fig. 5 Scheme for a single crystal photo-elastic modulator

采用氦氖激光器作为光源, 经过检偏器后的调制光用一个 Thorlab 公司的 FDS02 光电探测器获得, LiNbO<sub>3</sub> 晶体采用夹簧式固定方式, 即用两片夹簧夹住晶体上下电极面的中心位置, 并通过夹簧引出导线与驱动器相连, 该固定方式可以较好的保证晶体在  $x$  方向的自由伸缩振动; 通过新加坡舜新公司生产的 SV-01 型激光多普勒测振仪测得其实测谐振基频为 73.71 kHz, 该频率误差部分是由所采用的夹簧式固定方式造成, 部分是由于连接过程中的一些寄生电容产生。

图 6(a) 给出了当调制相位差为  $\pi$  时, 电压-相位差的实测曲线; LiNbO<sub>3</sub> 晶体的驱动电压为 1.6 V 时, 测量了 LiNbO<sub>3</sub> 晶体在不同频率下的振幅, 绘制出了幅频特性曲线, 如图 6(b) 所示, 并计算出系统阻尼比  $\zeta = \Delta f_m / (2f_m) = 4.4 \times 10^{-5}$ , 对应的阻尼系数  $r = 2mf_m \zeta = 0.1745$ , 其中  $m$  为晶体质量。

文献[19]曾采用未经过角度优化的 LiTaO<sub>3</sub> 晶体进行过同样的测量, 当调制相位差为  $\pi$  时, 所需要的电压为 21 V。表 2 是基于 LiNbO<sub>3</sub> 和 LiTaO<sub>3</sub> 的 SCPEM 参数对比表, 二者厚度  $b$  相同, 因此, 在同样电压下产生的电场强度是一致的, 长度  $l$  的差异

主要影响 SCPEM 的谐振频率,不影响对入射光的调制效果,实验中所定制的  $\text{LiNbO}_3$  晶体厚度上比 Bammer 等<sup>[10]</sup>的  $\text{LiTaO}_3$  晶体大 3.42 倍,由(9)式可以看出,调制相位差  $\delta$  正比于电压  $U$  乘以距离  $L$ ,

因此需要在同一距离情况下进行对比;根据线性关系,可以得出  $\text{LiNbO}_3$  晶体在晶体厚度  $L=5\text{ mm}$  时,其调制电压应为 5.47 V,其调制电压比  $\text{LiTaO}_3$  晶体降低了 4 倍左右。

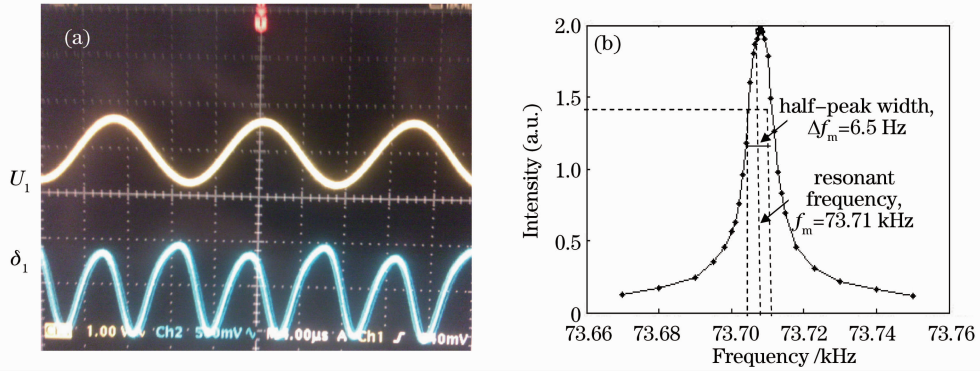


图 6 (a)电压-相位差实测曲线; (b)幅频特性曲线

Fig. 6 (a) Measured curves of voltage-retardation; (b) amplitude-frequency characteristic curve

表 2 基于  $\text{LiNbO}_3$  和  $\text{LiTaO}_3$  的 SCPEM 参数对比表

Table 2 SCPEM parameter contrast of  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$

Crystal	$\text{LiNbO}_3$	$\text{LiTaO}_3$
Size ( $l \times b \times L$ ) /mm	$41 \times 7.7 \times 17.1$	$20.6 \times 7.7 \times 5$
Modulated light	633 nm He-Ne laser	633 nm He-Ne laser
Propagation distance $L$ /mm	17.1	5
Vibration model	Exciting in $y$ -direction, longitudinal oscillations in $x$ -direction	Exciting in $y$ -direction, longitudinal oscillations in $x$ -direction
Eigenfrequency /kHz	73.71	127.16
$n_0$	2.19	2.18
$E$ /GPa	173	202.8
$v_1$ /nm	600	550
$d_{21}$ pC/N	2.6	0.85
$k_{21}$	0.3937	0.2~0.25
$\Delta p$	0.35	0.27
Half-wave voltage $U$ /V	1.6	21

(9)式给出了弹光调制相位差与晶体各参数的关系,将  $\text{LiNbO}_3$  晶体和  $\text{LiTaO}_3$  晶体的参数代入公式中,可以分别得到两组正比关系式为

$$\delta_{\text{LiNbO}_3} \propto 0.058 \times 2\pi \frac{U_1}{r_1},$$

$$\delta_{\text{LiTaO}_3} \propto 0.0033 \times 2\pi \frac{U_2}{r_2}. \quad (10)$$

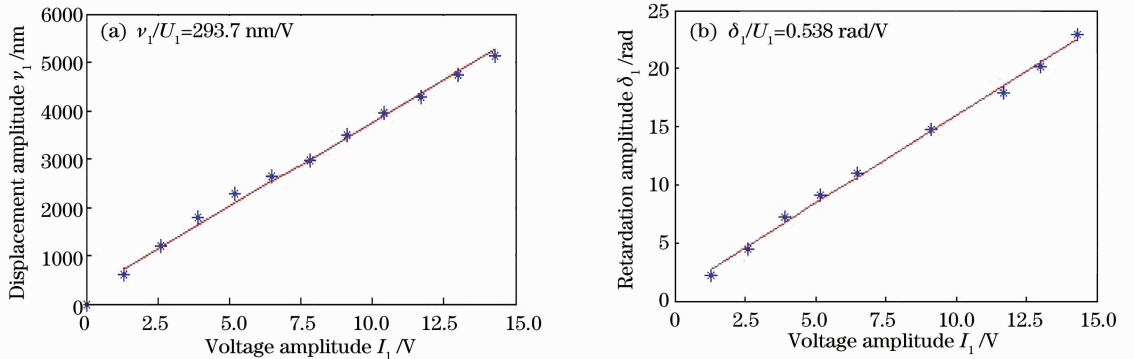


图 7 (a)位移-电压实测曲线; (b)相位差-电压实测曲线

Fig. 7 Measured results of the displacement amplitude versus voltage amplitude; (b) measured results of retardation amplitude versus voltage amplitude

从(10)式可以看出,二者的系数相差约 17.6 倍,因此,如果不考虑二者阻尼系数的差异,则如果要达到相同的调制延迟,LiNbO<sub>3</sub> 晶体是 LiTaO<sub>3</sub> 晶体的 1/13,再换算成同一通光厚度,其倍率约为 1/5。因此,实验结果与理论比较符合,其误差可能源于二者的阻尼差异。

图 7 给出了基于 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的 SCPEM 的位移-电压,相位差-电压实测曲线。可以看出,该关系满足(9)式的线性预测。另外,图 7(b)的电压-相位差曲线未能完全进过零点,这主要是由于夹簧式固定方式导致的残余应力造成。

## 5 结 论

本文对 LiNbO<sub>3</sub> 晶体压电、机电耦合以及弹光系数随空间变换的分析,对晶体切型进行了优选,建立了相应的单弹光调制理论模型,并搭建相关实验系统进行了测试,给出了调制电压与振动幅值以及调制相位差之间的线性关系。结果表明,采用经过切型优化后的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体作为 SCPEM 材料,在调制效率、调制相位差幅度等方面,均得到较大提高,因此,该 SCPEM 将具有更大的动态调制范围、更低的调制功耗;另外,该 SCPEM 的光损伤阈值很高,且调制频率还可以进一步提高至数十万赫兹至几兆赫兹,在激光脉冲调制,超高速干涉调制等领域具有重要的应用前景。下一步工作主要是降低该 SCPEM 的尺寸,缩短调制周期,并对其进行精确定标,进一步提高其调制光程差以及对热效应的反馈控制研究等。

## 参 考 文 献

- 1 J. C. Kemp. Piezo-optical birefringence modulators; new use for a long-known effect[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1969, **59**(8): 950~954
- 2 Jie Han, Aijun Zeng, Chunxia Feng *et al.*. A single channel spatial polarization encoding and decoding method based on photoelastic modulator[C]. International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems, 2009. 7511
- 3 Changsheng Li. Optical stress sensor based on electro-optic compensation for photoelastic birefringence in a single crystal[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(27): 5315~5320
- 4 T. Nakagawa, T. Yokoyama, M. Hosaka *et al.*. Measurements of threshold photoemission magnetic dichroism using ultraviolet

- lasers and a photoelastic modulator[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, **28**(2): 023907
- 5 T. N. Buican. Real-time Fourier transform spectrometry for fluorescence imaging and flow cytometry [C]. *Bio-Imaging and Two-Dimensional Spectroscopy SPIE*, 1990, **1205**: 126~133
- 6 T. N. Buican, A. H. Carrieri. Ultra-high speed solid-state FTIR spectroscopy and applications for chemical defense[C]. Proceedings for the Army Science Conference (24th), 2004. ADA431953
- 7 T. N. Buican, A. H. Carrieri. Multivariate PEM/FT spectroscopy: intrinsic data fusion and applications for IED and CB defense[C]. Proceedings for the Army Science Conference (26th), 2006. ADA481200
- 8 T. N. Buican. High Retardation-Amplitude Photoelastic Modulator: US, 7764415 B2[P]. 2010-07-28
- 9 J. C. Cheng, L. A. Nafie, S. D. Allen *et al.*. Photoelastic modulator for the 0.55~13 μm range [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(8): 1960~1965
- 10 F. Bammer, B. Holzinger, T. Schumi. A single crystal photoelastic modulator[C]. *SPIE*, 2007, **6469**: 646900
- 11 R. Petkovšek, F. Bammer, D. Schuöcker *et al.*. Dual-mode single-crystal photoelastic modulator and possible applications [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(7): 86~91
- 12 Li Changsheng. Linear electrooptic and electrogyration intensity modulation using crystalline quartz [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0123002  
李长胜. 利用石英晶体的线性电光和电致旋光强度调制[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0123002
- 13 Su Shida, Wan Lingyu, Zhou Yu *et al.*. Transversal electro-optic effect of light propagating in arbitrary direction in LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2972~2977  
苏世达, 万玲玉, 周煜等. 任意传播方向下铌酸锂晶体的横向电光效应研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2972~2977
- 14 Wang Nannan, Sun Meizhi, Xu Tingting *et al.*. Analysis of optical parametric chirped pulse amplification spectrum and conversion efficiency resulting from time characteristics of signal pulse based on YCOB crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 0502013  
王楠楠, 孙美智, 徐婷婷等. 基于 YCOB 晶体分析信号光脉冲时间特性对光参变啁啾脉冲放大光谱和转换效率的影响[J]. *中国激光*, 2012, **39**(5): 1~6
- 15 R. S. Weis, T. K. Gaylord. Lithium niobate; summary of physical properties and crystal structure [J]. *Appl. Phys. A*, 1985, **37**(4): 191~203
- 16 Wang Yue, Jiang Yijian. Crystal orientation dependence of piezoelectric properties in LiNbO<sub>3</sub> and LiTaO<sub>3</sub> [J]. *Opt. Mater.*, 2003, **23**(1-2): 403~408
- 17 D. Yang, J. C. Canit, E. Gaigebet. Photoelastic modulator: polarization modulation and phase modulation [J]. *J. Opt. (Paris)*, 1995, **26**(4): 151~159
- 18 F. Bammer. Single Crystal Photo-Elastic Modulators in High-Power and Femtosecond Lasers: Properties [M]. New York: Nova Science Publishers, 2009
- 19 F. Bammer, R. Petkovšek, J. Petelin. Measurements on a single crystal photo-elastic modulator [C]. Optical Society of America, Proceeding of CLEO, 2011. JTu80