

文章编号 1004-924X(2015)01-0063-07

基于铌酸锂制作光弹调制器用压电驱动器

王志斌^{1,2}, 李克武^{1,2*}, 张 瑞^{1,2}, 王立福^{1,2}, 王国梁^{1,2}

- (1. 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;
2. 中北大学 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: 基于石英(SiO_2)制作光弹调制器(PEM)的压电驱动器时,存在机电耦合系数小、需高压驱动且谐振频率随温度漂移严重等缺陷,故本文研究了 PEM 的优化设计方法。考虑铌酸锂(LiNbO_3)特殊的晶体结构,从理论上推导了 LiNbO_3 晶片作为压电驱动器的可行性,并确定其切型为 $zyw/35^\circ$ 切。基于有限元分析软件 COMSOL4.3a 仿真,确定了晶片体积和共振频率,设计了 LiNbO_3 压电驱动器。对设计出的压电驱动器进行了压电性能测试,并和 SiO_2 压电驱动器进行了比较。将 LiNbO_3 压电驱动器和硒化锌(ZnSe)光弹晶体组合成 PEM,用 671 nm 激光进行了光弹调制实验。实验结果表明:实现相同位移时, SiO_2 压电驱动器需要的驱动电压是 LiNbO_3 压电驱动器的 100 多倍,且后者横向长度伸缩振动模式单一性和稳定性均优于前者。驱动电压为 3.76 V 时,671 nm 的激光通过基于 LiNbO_3 压电驱动器的 PEM 的调制光程差为 3.7 μm 。得到的结果表明:基于 LiNbO_3 压电驱动器的 PEM 易于驱动控制,调制性能优于基于 SiO_2 驱动器的 PEM。

关键词: 压电驱动器;光弹调制器;铌酸锂晶体;谐振

中图分类号: TN384;TN761 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152301.0063

Fabrication of piezoelectric actuator for photoelastic modulator based on lithium niobate

WANG Zhi-bin^{1,2}, LI Ke-wu^{1,2*}, ZHANG Rui^{1,2}, WANG Li-fu^{1,2}, WANG Guo-liang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement of the Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Engineering and Technology Research Center of Shanxi Provincial for Optical-electric Information and Instrument,

North University of China, Taiyuan 030051, China)

* Corresponding author, E-mail: kewuli1990@gmail.com

Abstract: When the quartz(SiO_2) is used as the piezoelectric actuator of a photoelastic modulator (PEM), it has shortcomings of smaller electromechanical coupling coefficient, high driving voltage required, and serious frequency drifting with a temperature. Therefore, this paper designs an optimized PEM. In consideration of the special crystal structure of lithium niobate (LiNbO_3), the feasibility of LiNbO_3 crystal to be a piezoelectric actuator was verified and its cut shape was set as

收稿日期:2014-03-12;修订日期:2014-05-13.

基金项目:国家国际科技合作专项资助项目(No. 2012DFA10680, No. 2013DFR10150);国家自然科学基金仪器专项基金资助项目(No. 61127015)

$zyw/35^\circ$ cut. Based on the finite element analysis software COMSOL4. 3a simulation, the chip size and the resonant frequency were determined. Then, a LiNbO_3 piezoelectric actuator was designed. The piezoelectric performance of the piezoelectric actuator was tested and compared with SiO_2 piezoelectric actuator. Finally the LiNbO_3 piezoelectric actuator was combined with a ZnSe crystal to construct a PEM, and it was performed a photoelastic experiment by a 671 nm laser. The experiment for achieving the same displacement show that the drive voltage for the SiO_2 based piezoelectric actuator is 100 times that of LiNbO_3 based piezoelectric actuator, and the unity and stability of lateral length stretching vibration mode for the latter is better than that for the former. Moreover, when the drive voltage is 3.76 V, the optical path difference of 671 nm laser will be modulated to $3.7 \mu\text{m}$ through the LiNbO_3 piezoelectric actuator based PEM. These results demonstrate that proposed LiNbO_3 piezoelectric actuator based PEM is easy to drive and control and the modulation performance is better than that of previous PEMs.

Key words: piezoelectric actuator; photoelastic modulator; lithium niobate; resonance

1 引言

光弹调制器(Photoelastic Modulator, PEM)是一种基于光弹效应的人工双折射^[1]光机电器件,具有高速、高分辨率、高灵敏度、高偏振精度、抗振性好的光谱测量优势,在国防、安全生产、环境监测等方面具有很好的应用前景^[2-4]。根据压电驱动器与光弹晶体耦合方式的不同,PEM主要分为 Kemp 型^[5], Canit&Badoz 型^[6]和 Bammer 型^[7]。J. C. Chang, L. A. Nafie 等人^[8]首次提出了用两个石英(SiO_2)压电驱动器驱动硒化锌(ZnSe)光弹晶体的改进 Kemp 型 PEM 设计,实现了光波长 $0.55 \sim 13 \mu\text{m}$ 的宽光谱测量。该类 PEM 通光晶体的可选材料广泛、通光孔径大、损伤阈值高、相位延迟可控。现在常用的 PEM 是美国 Hinds Instruments 公司改进生产的 Kemp 型 PEM,由八角型的 ZnSe 光弹晶体和两个 $x-18.5^\circ$ 切 SiO_2 压电驱动器构成,调制频率为 $20 \sim 100 \text{ kHz}$ 。但作为压电驱动器, $x-18.5^\circ$ 切 SiO_2 的机电耦合系数小;大光程差调制时,需 LC 振荡电路高压驱动,实现难度大;频率随温度漂移严重^[9],进而限制了该类型 PEM 在高分辨率光谱测量中的应用。

为了克服上述缺点,充分发挥 PEM 的优势,需要寻求 PEM 的最优化设计。由于铌酸锂(LiNbO_3)与 SiO_2 属于同一晶系,并且具有更加优异的机械品质,本文将 LiNbO_3 作为研制压电驱动器的晶体材料。根据 LiNbO_3 独特的晶体结

构,通过理论推导及仿真分析得到了 LiNbO_3 作为压电驱动器时振动模态比较单一、机电耦合系数较大的切型。按该切型设计了压电驱动器,通过实验测试了其压电性能,并与 SiO_2 压电驱动器进行了比较。实验表明, LiNbO_3 作为压电驱动器能工作在较低的驱动电压下,其压电性能突出;用它作为驱动器的 PEM 易于控制、效率较高。

2 铌酸锂切型选择及优化

LiNbO_3 晶体属于三方晶系中的 $3m$ 晶类,无对称中心, z 是 3° 轴、与 x 垂直的平面是反射面,且这种等同的反射面共 3 个,互成 120° 角,其重要的物理参数如表 1 所示。 LiNbO_3 独特的晶体结构使它具有很好的压电性能,是目前用量最大的压电晶体。

表 1 LiNbO_3 的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of LiNbO_3

弹性刚度系数	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}	c_{33}	c_{44}
$c_{ij}/(\times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2})$	20.3	5.3	7.5	0.9	24.5	6.0
弹性柔顺系数	s_{11}	s_{12}	s_{13}	s_{14}	s_{33}	s_{44}
$s_{ij}/(\times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	5.78	-1.01	-1.47	-1.02	5.02	17.0
压电系数	e_{15}	e_{22}	e_{31}	e_{33}		
$e_{ij}/(\text{C} \cdot \text{m}^{-2})$	3.7	2.5	0.2	1.3		
介电系数	ϵ_{11}	ϵ_{33}				
$\epsilon_{ij}/(\times 10^{-10} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1})$	3.89	2.57				

在晶体物理学中,通常将晶体中的振动传递作为声波来研究^[10],晶体中的声学性质用体波声学的基本方程描述,将体声波视为平面单色波,令 l_1, l_2, l_3 为声传播矢量的方向余弦,则声矢量方向为 $\mathbf{l}_i = (l_1, l_2, l_3)$,定义声波矢量方向矩阵为:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} l_1 & 0 & 0 & 0 & l_3 & l_2 \\ 0 & l_2 & 0 & l_3 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & l_3 & l_2 & l_1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

通常体波声学的基本方程可表示为:

$$(\mathbf{L}_{il} \mathbf{c}_{IJ} \mathbf{L}_{Jj} - \rho v^2 \delta_{ij}) u_j = 0, \quad (2)$$

其中: $\mathbf{L}_{il} = \mathbf{L}$, \mathbf{L}_{Jj} 为 \mathbf{L} 的转置, \mathbf{c}_{IJ} 为弹性劲度系数矩阵, ρ 为晶体密度, δ_{ij} 为克罗内克尔算符, v 为波速, u_j 为质点位移。

当压电驱动器工作时,由于晶体中存在压电与逆压电效应,并且机械波的速度远小于电磁波的速度,故可以将压电晶体中的电磁场近似为准静电场^[11],认为机械波只激发静电场。在晶体中可以实现机械运动与电磁运动的相互转化,具体表现为弹性劲度系数的变化:

$$\bar{\mathbf{c}}_{IJ} = \mathbf{c}_{IJ} + \frac{(\mathbf{e}_{Ik} \mathbf{l}_k)(\mathbf{l}_i \mathbf{e}_{ij})}{\mathbf{l}_i \boldsymbol{\varepsilon}_{ik} \mathbf{l}_k}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{e}_{ij} 为压电系数矩阵,逆压电系数矩阵 \mathbf{e}_{ik} 实际上是 \mathbf{e}_{ij} 的转置, \mathbf{l}_k 为 \mathbf{l}_i 的转置, $\boldsymbol{\varepsilon}_{ik}$ 为介电系数矩阵。

此时,体波声学基本方程式(2)改写为:

$$(\mathbf{L}_{il} \bar{\mathbf{c}}_{IJ} \mathbf{L}_{Jj} - \rho v^2 \delta_{ij}) u_j = 0. \quad (4)$$

比较式(2)与式(4),为了定量描述晶体压电性能的强弱,定义机电耦合系数 K :

$$K = \sqrt{\frac{|\mathbf{v}^2 - \bar{\mathbf{v}}^2|}{\bar{\mathbf{v}}^2}}. \quad (5)$$

体波声学基本方程(2)和(4)都是本征方程,在给定声波矢量传播方向的条件下,解该本征方程,3个本征值即波速 $v = (v_1, v_2, v_3)$ 分别对应3个偏振模态的声波 $u = (u_1, u_2, u_3)$ 。声波的3个偏振模态中包含一个纵波模态和两个横波模态,这里将纵波模态对应伸缩振动,横波模态对应剪切振动。

考虑到 LiNbO_3 特殊的晶体结构,分析 yz 平面上的声波,设声波矢量与 y 轴的夹角为 φ ,则声

波矢量的方向余弦 $\mathbf{l}_i = (0, \cos\varphi, \sin\varphi)$,将 LiNbO_3 的弹性劲度系数矩阵、压电系数矩阵和介电系数矩阵、密度 $\rho = 4.628 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 代入式(1)~式(5),求解得 K 与 φ 的关系,如图1所示。

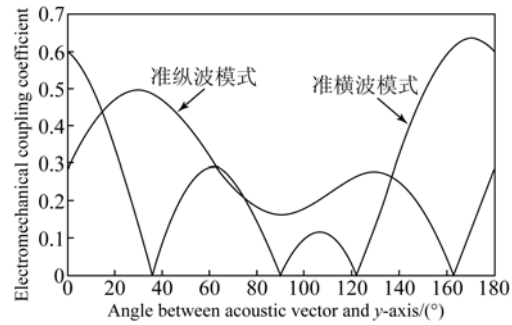


图 1 LiNbO_3 在 yz 平面上的声波机电耦合系数
Fig. 1 Acoustic electromechanical coupling coefficient on the yz plane

据图1可知, φ 在 35° 附近时,准纵波模式的机电耦合系数达 0.5,而准横波模式的机电耦合系数接近于 0,即沿该方向的声波,机电耦合系数较大,振动模态为比较单一的伸缩振动模式。对应 yz 平面上的声波,研究切型为 $z\gamma w/\varphi$ 的 LiNbO_3 晶片(如图2所示),长度方向沿 y' ,电极面垂直于 z' 。当长度远大于宽度和厚度时,晶片中的声波主要是在电场 E'_3 和应力场 T'_2 的作用下,通过压电系数 e'_{32} 和弹性柔顺系数 s'_{22} 做横向长度伸缩振动产生的。

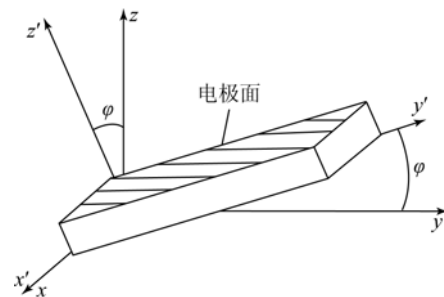
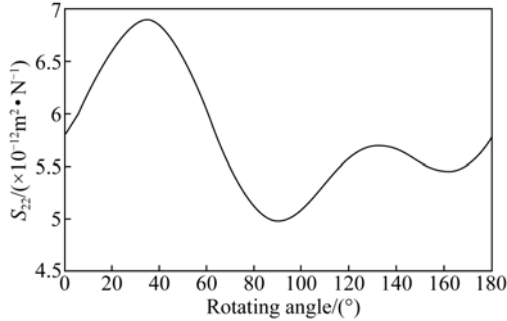


图 2 LiNbO_3 长度伸缩模式切型
Fig. 2 Extension mode-cut of lithium niobate length

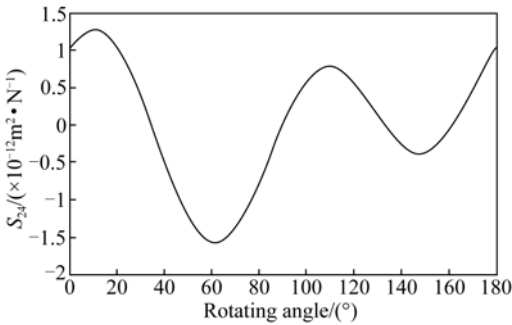
如图2所示, LiNbO_3 的弹性柔顺系数矩阵

做旋转^[12]变化,可绘出其中元素 S'_{22} 和 S'_{24} 与旋转角 φ 的函数关系,如图 3 所示。



(a) S'_{22} 与旋转角 φ 的关系

(a) Relationship between S'_{22} and rotating angle φ



(b) S'_{24} 与旋转角 φ 的关系

(b) Relationship between S'_{24} and rotating angle φ

图 3 弹性柔顺系数矩阵中元素与与旋转角 φ 的关系
Fig. 3 Relationships between supple elasticity coefficient matrix elements and rotating angle φ

由图 3(a)可知,旋转角 φ 取 35° 时, S'_{22} 取最大值, $S'_{22} = 6.8807 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, 而 $x-18.5^\circ$ 切 SiO_2 的 $S'_{22} = 1.4454 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ ^[13]; 相同的应变条件下, $zyw/35^\circ$ 切 LiNbO_3 产生的应力是 $x-18.5^\circ$ 切 SiO_2 的 2.1 倍。由图 3(b)可知,旋转角 φ 取 35° 时 $S'_{24} = 0$, 且旋转变前后柔顺系数矩阵中的元素 S'_{25} 和 S'_{26} 均为 0, 因此沿 z' 施加电场时该切型的晶片中几乎不存在剪切振动。

综上所述,切型为 $zyw/35^\circ$ 的 LiNbO_3 晶片具有高效、单一的横向长度伸缩振动模式。此外, $zyw/35^\circ$ 切 LiNbO_3 晶片具有零温度系数点^[14], 因此该切型晶体是 PEM 理想的压电驱动器。

3 铌酸锂压电驱动器设计及测试

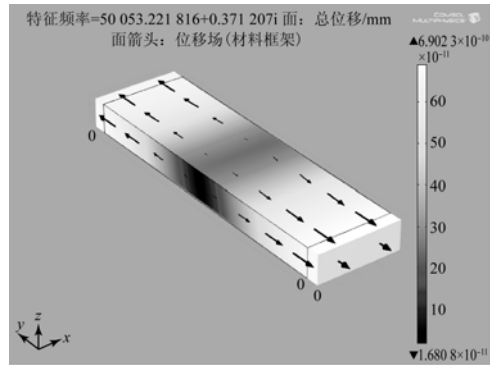
该类型压电驱动器的长度伸缩振动模式的频

率方程^[15]为:

$$f = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{1}{\rho S_{22}}}, n = 1, 2, 3, \dots, \quad (6)$$

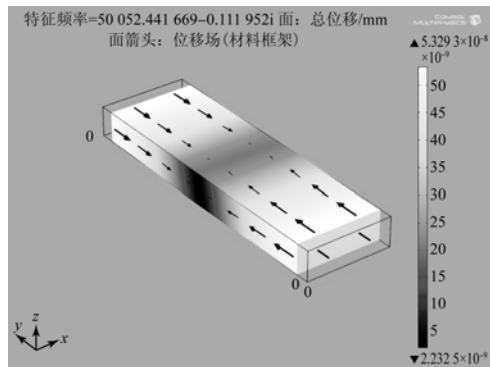
式中: l 为晶片长度, ρ 为晶体密度。因为长度伸缩模式的晶片长度 l 通常很长, 因此该振动模式的振子适用于中、低频范围。根据项目的需要, 本文所需要的驱动器谐振基频(即式(6)中 $n=1$) f 在 50 kHz 左右, 据式(6)可反解得此谐振频率对应的 $zyw/35^\circ$ 切 LiNbO_3 晶片的长度 $l = 56.04 \text{ mm}$ 。

利用有限元分析软件 COMSOL 4.3a 中的特征频率求解器, 将 $zyw/35^\circ$ 切 LiNbO_3 晶片尺寸设为 $56.04 \text{ mm} \times 19.01 \text{ mm} \times 6.35 \text{ mm}$, 此时特征频率为 50.04 kHz, 与理论值接近, 振动特性如图 4 所示。



(a) LiNbO_3 伸长

(a) Lithium niobate elongation



(b) LiNbO_3 收缩

(b) Lithium niobate shortened

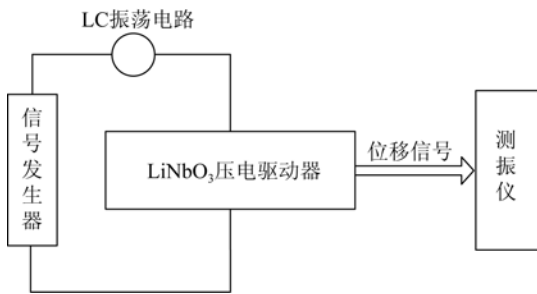
图 4 LiNbO_3 横向振动 COMSOL 仿真图

Fig. 4 COMSOL simulation on horizontal vibration of lithium niobate

图中箭头表示晶片振动位移场, 箭头方向表示振动时晶片中质点的位移方向, 箭头越长表示

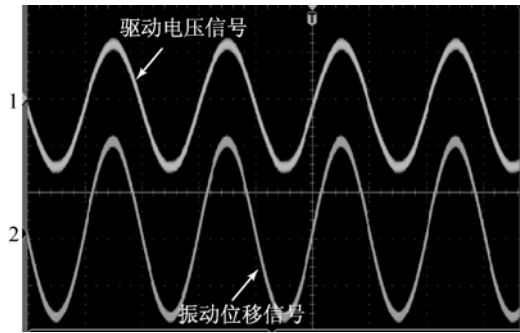
质点位移越大。由图可以看出,晶片横向长度伸缩振动模式单一。

按上述切型和尺寸设计 LiNbO_3 压电驱动器,按装置 5(a)施加驱动交变电压。用 LV-S01 型激光多普勒测振仪测得驱动器长度端面的振动位移信号,如图 5(b)所示。



(a) 谐振测试装置

(a) Resonance test device



(b) 驱动电压和振动位移信号

(b) Driving voltage and vibration displacement signal

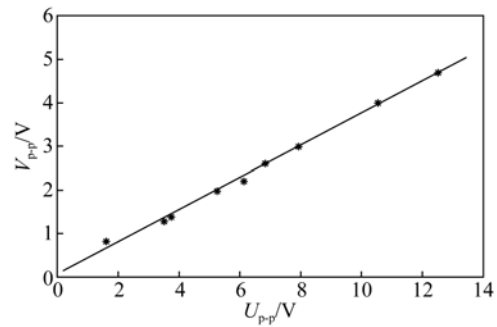
图 5 LiNbO_3 驱动器谐振测试

Fig. 5 Resonance test of lithium niobate actuator

调节装置图 5(a)中信号发生器的输出频率,让驱动电路做扫频驱动。当驱动电压的频率为 50.01 kHz 时,振动位移信号与驱动电压信号的频率相同,相位相同,且振动幅值最大,在示波器上显示见图 5(b)。其中示波器 1 通道接入驱动电压(探测表笔 $\times 10$ 档),2 通道接入测振仪输出的振动位移信号。可以确定,该 LiNbO_3 压电驱动器工作在谐振状态,且谐振基频为 50.01 kHz,振动模式比较单一,与理论和仿真结果基本吻合。

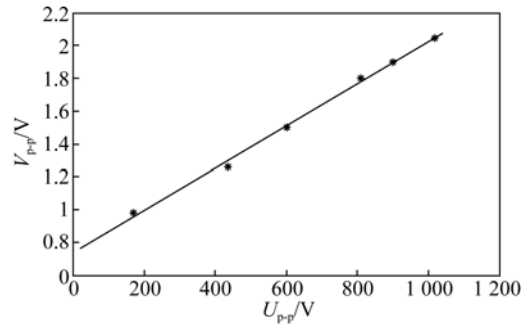
显然位移振幅电压峰峰值 V_{p-p} 和驱动电压峰峰值 U_{p-p} 是一一对应的。保持驱动电压频率为 50.01 kHz 不变,使 LiNbO_3 压电驱动器一直工作在谐振状态,调节 U_{p-p} 的大小,并记录对应的 V_{p-p} ,拟合测得的数据,结果如图 6(a)所示;而特

征频率相近的 $x-18.5^\circ$ 切 SiO_2 压电驱动器谐振时, V_{p-p} 随 U_{p-p} 的变化如图 6(b)所示。



(a) LiNbO_3 驱动器

(a) Lithium niobate actuator



(b) SiO_2 驱动器

(b) Quartz actuator

图 6 压电驱动器的位移振幅电压峰峰值 V_{p-p} 和驱动电压峰峰值 U_{p-p} 的关系图

Fig. 6 Relations between vibration displacement peak voltage and driving peak voltage of piezoelectric actuators

由图 6 可知, $x-18.5^\circ$ 切 SiO_2 压电驱动器需高压驱动,而 $zyw/35^\circ$ 切 LiNbO_3 压电驱动器需要的驱动电压一般为几伏或十几伏,所以实现相同的振动位移, SiO_2 压电驱动器需要的驱动电压高于 LiNbO_3 100 多倍。同时考虑晶片和相应驱动电路的承受限度,适当将 LiNbO_3 压电驱动器的位移振幅电压峰峰值增大至 4.7 V 时,所需驱动电压峰峰值仅为 12.53 V;而对于 $x-18.5^\circ$ 切 SiO_2 压电驱动器,当驱动电压峰峰值增大至 1 020 V 时,其位移振幅电压峰峰值仅为 2.05 V。实际上,当驱动电压上千伏时, SiO_2 压电驱动器已经工作在非线性区,热效应引起的频率漂移严重,驱动器的振动状态极不稳定,效率低下。

4 PEM 实验与分析

为了便于实现入射光折射率的二维调制,通

光晶体硒化锌设计为八角形晶体,利用 COMSOL4. 3a 仿真求解可知体积为 $33.27 \text{ mm} \times 33.27 \text{ mm} \times 16.00 \text{ mm}$,倒角到端点距离为 6 mm 的硒化锌与本文设计的 LiNbO_3 驱动器能够很好地匹配,且整个 PEM 的谐振频率为 49.99 kHz 。

实际设计的 PEM, LiNbO_3 与硒化锌用脱酰胺型 RTV 硅橡胶实现软链接。胶粘好的 PEM 焊接上电极线后按文献[16]中的支撑方式装入支撑盒。实验装置如图 8 所示,以波长为 671 nm 的激光作为被调制光,对 PEM 进行试验,用示波器测得驱动电压与被调制光的干涉信号,如图 9 所示。

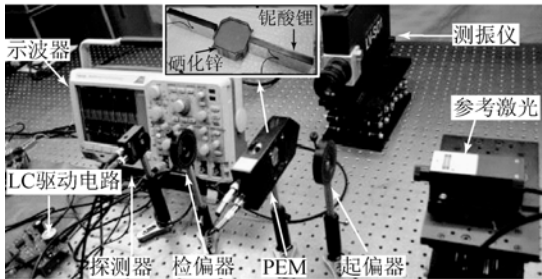


图 8 LiNbO_3 作为驱动器的 PEM 调制装置

Fig. 8 Lithium niobate PEM

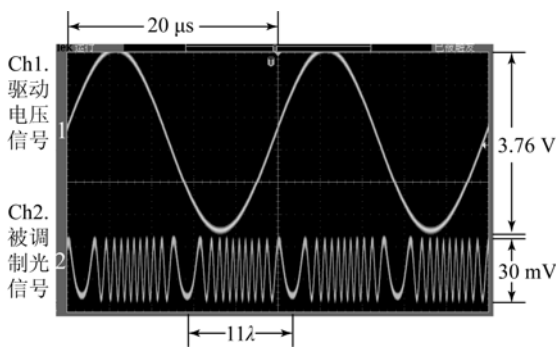


图 9 PEM 实验结果

Fig. 9 Test results of PEM

图 9 中,通道 1 为驱动电压信号,通道 2 为被调制光干涉信号。其中,驱动电压峰峰值 $U_{pp} = 3.76 \text{ V}$,采集到的被调制光信号峰峰值为 30 mV 。做扫频驱动,当驱动电压频率为 49.99 kHz 时,驱动电压半周期内被调制激光出现的干涉信号最多含有 11 个周期,此时 PEM 处于谐振状态,并且对应傅里叶变换反演光谱的调制光程差^[17] $L = \frac{11}{2}\lambda = 3.7 \mu\text{m}$ 。实际上,增加驱动电压峰峰值可以增大调制光程差。从图 9 中可以看到清晰可辨的调制信号。该类型的 PEM 不需高压驱动,易于驱动控制。

5 结 论

本文首次提出了用 $z\gamma w/35^\circ$ 切 LiNbO_3 作为压电驱动器的 PEM 设计。从理论上分析了该切型 LiNbO_3 晶片作为压电驱动器的可行性;基于 COMSOL4. 3a 仿真得到了特征频率为 50 kHz 的 LiNbO_3 晶片的具体尺寸;对设计出的 LiNbO_3 压电驱动器进行了压电性能测试,并和相同特征频率 $x-18.5^\circ$ 切 SiO_2 压电驱动器进行了比较。实验结果显示, LiNbO_3 压电驱动器不需要高压驱动,驱动容易实现和控制,并且横向长度振动模式单一,机电耦合效率较高,其压电性能优于石英压电驱动器。以该驱动器设计的 PEM 的测试实验表明,该类型的 PEM 工作稳定,调制性能突出。

通过增大驱动电压峰峰值,串联多个 PEM,使入射光在通光晶体界面上多次反射等方法可以实现大光程差调制,进而提高反演复原光谱的分辨率^[18]。所以,以 LiNbO_3 为压电驱动器的 PEM 在光谱测量领域具有无可比拟的潜在优势。下一步工作主要是进一步分析和研究该类型 PEM 的调制效率和稳定性。

参考文献:

- [1] BILLARDON M M, BADOZ J. Modulateur de biréfringence [R]. C. R. 262B, 1966: 1672-1675.
- [2] 弓洁琼,詹海刚,刘大召. 遥感遥测中偏振信息的研究进展 [J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30 (4):

1088-1095.

GONG J Q, ZHAN H G, LIU D ZH. A review on polarization information in the remote sensing detection [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(4): 1088-1095. (in Chinese)

- [3] CARRIERI A H, OWENS D J, SCHULTZ J C. In-

- frared Muller matrix acquisition and preprocessing system and method: U. S. Patent 7,737,399 [P]. 2010-6-15.
- [4] 王志斌,张瑞,赵冬娥,等.光弹调制差频偏振测量及误差分析[J].光学精密工程,2013,21(4):268-274. WANG ZH B,ZHANG R,ZHAO D E, *et al.*. Photoelastic-modulator-based differential frequency polarization modulation measurement and error analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 268-274. (in Chinese)
- [5] JAMS C. Piezo-optical birefringence modulators; new use for a long-known effect [J]. *Journal of The Optical Society of America*, 1969, 59(8): 950-953.
- [6] CANITT J C, BADOZ J. New design for a photoelastic modulator [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(4): 592-594.
- [7] BAMMER F, HOLZINGER B, SCHUMI T. A single crystal photoelastic modulator [C]. *Integrated Optoelectronic Devices 2007, International Society for Optics and Photonics*, 2007: 64690O-64690O-8.
- [8] CHENG J C, NAFIE L A, ALLEN S D. Photoelastic modulator for the 0.33–13 μm range [J]. *Applied Optics*, 1976, 15(8): 1960-1965.
- [9] 马静,王志斌,陈友华.弹光晶体频率温度系数对弹光调制系统的影响[J].半导体光电,2012,33(3): 390-392. MA J, WANG ZH B, CHENG Y H. Influence of frequency-temperature coefficient of elastic-optic crystal on elastic-optic modulation system [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(3): 390-392. (in Chinese)
- [10] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬.声学基础[M].南京:南京大学出版社,2001. DU G H, ZHU ZH M, GONG X F. *Acoustics* [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2001. (in Chinese)
- [11] 冯若.超声手册[M].南京:南京大学出版社,1999. FENG R. *Ultrasound Manual* [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1999. (in Chinese)
- [12] 陈友华,张记龙,王艳超,等.基于铌酸锂压电弹光双效应的单晶体弹光调制器[J].光学学报,2012, 32(11): 11160002-1-6. CHENG Y H, ZHANG J L, WANG Y CH, *et al.*. Single crystal photo-elastic modulator based on lithium niobate piezoelectric and photo-elastic effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 11160002-1-6. (in Chinese)
- [13] 景宁.基于弹光效应的高速红外光谱获取方法[D].太原:中北大学,2009. JING N. *The High Speed Infrared Spectra Measured Method based on Photoelastic Effect* [D]. Taiyuan: The North University of China, 2009. (in Chinese)
- [14] 秦自楷.压电石英晶体[M].北京:国防工业出版社,1980. QIN Z K. *Piezoelectric Quartz Crystal* [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1980. (in Chinese)
- [15] 张福学.现代压电学[M].北京:科学出版社,2001. ZHANG F X. *Modern Science Piezoelectric* [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [16] 陈友华.遥测用多次反射式弹光调制傅里叶变换光谱技术研究[D].太原:中北大学,2013. CHENG Y H. *The Study on Multi-reflected Photo-Elastic Modulator-Based Fourier Transform Spectroscopy for Telemetry* [D]. Taiyuan: The North University of China, 2013. (in Chinese)
- [17] BUICANN T, CARRIERI H A. Ultra-high speed solid-state FTIR spectroscopy and applications for chemical defense [R]. 2004, Vol. 9.
- [18] 张瑞,王志斌,杨强,等.新型光弹调制干涉具研究[J].应用光学,2013,34(6):938-942. ZHANG R, WANG ZH B, YANG Q, *et al.*. The new research of interferometer based on photoelastic modulator [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(6): 938-942. (in Chinese)

作者简介:



王志斌(1966—),男,山西长治人,教授,硕士生导师,现任山西省光电信息与仪器工程技术研究中心主任、中北大学物理系副主任,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



李克武(1990—),男,云南文山人,硕士研究生,2013年于中北大学获得学士学位,主要从事光学系统设计及光谱成像技术方面的研究。E-mail: kewuli1990@gmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)