

doi:10.3788/gzxb20154409.0912005

基于晶体劈的电光晶体半波电压测量

裴丽燕^a, 马靖^a, 许灿华^a, 邱鑫茂^a, 徐启峰^b

(福州大学 a. 物理与信息工程学院; b. 电气工程与自动化学院, 福州 350108)

摘要:通过测量外加电压下电光晶体的相位延迟来获取半波电压. 基于双折射晶体劈的偏光干涉法, 将通过电光晶体后的偏振光相位延迟量转化为干涉条纹的平移, 通过定位暗纹位置进行精密的线性测量. 实验结果表明: 偏光干涉法测量铌酸锂晶体相位延迟的测量准确度为 4.4×10^{-3} rad, 所测量铌酸锂晶体的半波电压为 480.0 V, 其测量误差为 0.10%, 远小于极值法 0.96% 的测量误差. 偏光干涉法光路结构简单、测量准确度高、测量结果不受光功率波动的影响, 且电光晶体相位延迟量的测量范围不受限制.

关键词:物理光学; 双折射晶体劈; 偏光干涉法; 铌酸锂晶体; 相位测量; 半波电压

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)09-0912005-6

Measurement of Half-wave Voltage of Electro-optic Crystal Based on Crystal Wedge

PEI Li-yan^a, MA Jing^a, XU Can-hua^a, QIU Xin-mao^a, XU Qi-feng^b

(a. College of Physics and Information Engineering; b. College of Electric Engineering and Automation, Fuzhou University, Fujian 350108, China)

Abstract: The half-wave voltage was obtained by measuring the phase retardation of the electro-optic crystal under the applied external voltage. Based on polarization interference of birefringent crystal, phase shift of polarized light is transferred to the movement of interference fringes, and the linear accurate measurement is complemented by locating dark fringes position. The experimental results indicate that the accuracy of phase retardation of lithium niobate crystal is 4.4×10^{-3} rad, the half-wave voltage that LN crystal is measured as 480.0 V with experimental error of 0.10%. Compared with the experimental error of 0.96% that half-wave voltage is measured by extremum method, the measuring error of polarization interferometry method is reduced obviously. The optical structure of polarization interferometry method is simple with high measuring accuracy, the measurement result is insensitive to the power fluctuation of the light source and the measurement range of phase retardation of electro-optic crystal can be largely expanded.

Key words: Physical optics; Birefringent crystal wedge; Polarization interference; Lithium niobate crystal; Phase measurement; Half-wave voltage

OCIS Codes: 120.5050; 260.1440; 260.3160; 100.2960

0 引言

1875 年克尔第一次发现了电光效应, 即某些各向同性的透明介质在外电场作用下变为各向异性, 表现

出双折射现象. 晶体折射率改变正比于外加电场强度平方的现象称为克尔效应^[1-2], 折射率的改变正比于外加电场强度的现象称为泡克尔斯效应^[2]. 目前, 晶体的电光效应在保密通信系统^[3]、光开关^[4]、传感器^[5]及滤

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61177072, 51177016)资助

第一作者: 裴丽燕(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为偏振光学. Email: 18649845007@163.com

导师(通讯作者): 马靖(1977-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光光谱及信息光学. Email: majing@fzu.edu.cn

收稿日期: 2015-02-06; 录用日期: 2015-06-01

<http://www.photon.ac.cn>

波器^[6-7]等方面都有着重要应用.半波电压是光通过晶体时,由于电光晶体的电光效应使其相位改变 π 所加的驱动电压,是电光调制晶体的一个重要物理参量.半波电压对电光采样技术、量子密钥和光纤通信等有着重要的影响和作用^[8-11].目前,测量半波电压的常用方法主要有极值法^[12]、倍频调制法^[13]和光通信模拟法^[14]等.这些方法或受光源及实验器件引入的不稳定因素的影响,或受调制振幅波形畸变的影响,都存在着各种缺陷.为消除这些因素的影响,近年来,用光纤干涉仪测量半波电压的方法被提出.其中,萨尼亚克光纤干涉仪测量法^[15]采用嵌入式系统产生可变的矩形波调制方式,利用萨尼亚克干涉仪实现测量目的,克服了极值法存在的缺陷;光纤干涉仪解调微波光链路测量法^[16]采用非平衡式光纤干涉仪利用矢量网络分析仪测光链路的增益峰值实现测量目的.这两种方法测量结果的可靠性及使用性都较高.

鉴于干涉法的可行性,文献^[17]提出一种基于晶体劈偏光干涉的相位延迟测量方法,该方法相位延迟的测量范围不受限制,测量结果不受光强波动的影响,测量准确度高,已被用于石英波片相位延迟的温度特性研究^[17].铌酸锂(Lithium Niobate, LN)晶体属于三角晶系,3 m 晶类,是重要的非线性光学晶体,具有良好的热稳定性和化学稳定性,加工成本低、驱动电压低,在相位调制器^[18]、电光开关^[19]等方面有着广泛的应用.本文以横向调制的 LN 晶体为研究对象,利用基于晶体劈偏光干涉的相位延迟测量方法,结合电光晶体半波电压与其引入的相位延迟成正比的关系,通过测量相位延迟来获得半波电压.采用双折射晶体劈的偏光干涉将光斑转化成等间隔亮暗相间的条纹,相位延迟变化对应条纹移动,通过 CCD 相机采集图像,利用 Labview 程序定位暗纹位置,由此获得条纹移动量,进而实现对电光晶体半波电压的测量.

1 测量原理

采用双折射晶体劈偏光干涉法测量偏振光相位延迟的原理及各光学器件的琼斯矩阵如图 1,其中电光晶体的矩阵对应的是加电压后对应 x 轴的矩阵.以光传播方向为 z 轴建立直角坐标系.偏振片 P_1 和偏振片 P_2 的偏振方向 t_1 和 t_2 与 x 轴间的夹角为 $\pi/4$.未加电场时,电光晶体原主轴与 x 轴的夹角为 $\pi/4$,对其加载与电光晶体原主轴 x' 方向相同的直流电压后,晶体折射率会发生变化,其感应轴 f 和 s 分别与 x, y 轴方向重合.晶体劈是具有一定劈角的双折射晶体,将其水平放置,快轴 f 和慢轴 s (主折射率方向)分别平行于 x, y 轴,光束垂直入射晶体劈后在光束的不同水平位置(y 轴方向)会引入不同的光程差.光束通过 P_1 产生的线偏光,垂直入射到加载偏置电压的电光晶体上,由

于电光晶体两感应轴方向的光所对应的折射率不同,引入了相位延迟量 δ ,通过晶体劈和 P_2 后会形成明暗相间的干涉条纹.

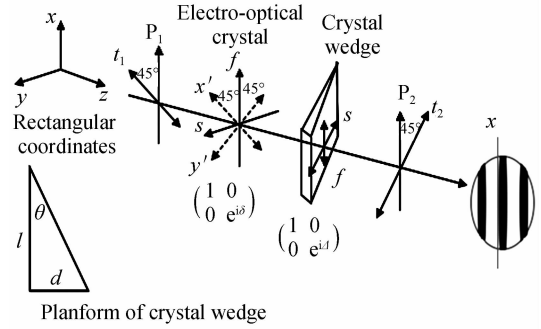


图 1 晶体劈偏光干涉法测电光晶体相位延迟的原理图
Fig. 1 The schematic diagram of phase retardation measurement electro-optic crystal based on polarization interference of crystal wedge

假设入射光的振幅为 1,经过 P_1 后光束偏振态的琼斯矩阵可表示为 $\sqrt{2}/2(1 \ 1)^T$,经过加电压的电光晶体后,其偏振态为

$$\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \pi/4 \\ \sin \pi/4 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ e^{i\delta} \end{pmatrix} \quad (1)$$

可见,经过电光晶体后的偏振光是相位差为 δ 的等振幅椭圆偏振光.

图 1 中给出了晶体劈的俯视图,晶体劈的厚度为 d ,长度为 l ,劈角为 θ ,则 $d=l \cdot \tan \theta$.晶体劈在快慢轴方向上引入的光程差为

$$\delta(l) = (n_e - n_o)d = (n_e - n_o)l \cdot \tan \theta \quad (2)$$

则相应的相位差为 $\Delta(l) = \frac{2\pi}{\lambda}\delta(l)$,其中 n_e 和 n_o 分别为晶体劈 e 光和 o 光的折射率.相邻暗条纹(或亮条纹)的间隔或条纹移动周期即光程差为一个波长时所对应的 l 值即 l_λ ,其表达式为

$$l_\lambda = \frac{\lambda}{(n_e - n_o) \tan \theta} \quad (3)$$

光经过晶体劈后偏振态为

$$\begin{pmatrix} A_{x1} \\ A_{y1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta(l)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ e^{i(\delta+\Delta(l))} \end{pmatrix} \quad (4)$$

再经过 P_2 后,其光强为

$$I(l) = \frac{1}{2} \left| \cos \frac{\pi}{4} + e^{i(\delta+\Delta(l))} \sin \frac{\pi}{4} \right|^2 = \frac{1}{2} [1 + \cos(\delta + \Delta(l))] \quad (5)$$

从式(5)可以看出,干涉条纹的强度不仅与电光晶体的相位延迟有关,也与晶体劈引入的相位延迟有关.当 $\delta + \Delta(l) = 2k\pi$ (k 是整数)时,光强最大;当 $\delta + \Delta(l) = (2k+1)\pi$ (k 是整数)时,光强为零.最终会在 x 方向形成明暗相间的条纹,条纹间隔由式(3)给出.调节加载在电光晶体上的直流电压使晶体引入的相位差发生

的变化体现为水平方向(即 y 方向)上条纹的移动,通过电光晶体的偏振光相位差变化 2π ,条纹移动一个周期. 相位差变化量 $\Delta\delta$ 与暗纹移动量 Δl 的关系为

$$\Delta\delta = \frac{\Delta l}{l_\lambda} 2\pi \quad (6)$$

根据电光晶体的折射率椭球理论^[20],可得电光晶体的相位延迟量 δ 与晶体上加载的偏置电压 U 的关系为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{22} U \frac{1}{d} \quad (7)$$

由晶体相位延迟与施加在晶体上的偏置电压的线性关系,即可得到电光晶体的半波电压.

2 实验结果及讨论

2.1 偏光干涉法

双折射晶体劈偏光干涉法测量电光晶体半波电压的实验装置如图 2,从左向右依次为:He-Ne 激光器、偏振片 P_1 、LN 晶体、扩束镜、晶体劈、偏振片 P_2 、像屏及 CCD 相机. 实验采用的 He-Ne 激光器是基横模,输出光斑直径约为 1 mm,输出波长为 632.8 nm;采用的 LN 晶体的长度 $l=48.0$ mm,厚度 $d=6.0$ mm,折射率 $n_o=2.297$,电光系数为 $\gamma_{22}=6.8 \times 10^{-12}$ m/V;所用扩束镜可将经过电光晶体的光束扩大为直径约 10 mm 的光斑;所用的晶体劈劈角为 1° ,材料为石英,折射率 $n_o=1.544$, $n_e=1.553$,尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,CCD 面阵相机的像素为 1280×1024 . 考虑到实验中晶体劈受温度的影响、光路的振动和光源波长的稳定性及外界光线的干扰等均可能影响测量结果,因此实验在室温条件下及气垫式精密隔震平台上进行,光源采用稳频 He-Ne 激光器,并尽可能缩短了各光学器件之间的距离.

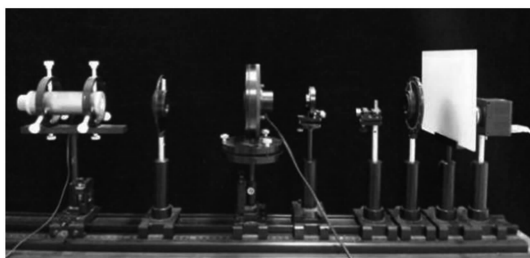


图 2 晶体劈偏光干涉法测 LN 晶体半波电压实验装置图
Fig. 2 Experimental setup of half-wave voltage measurement of LN crystal based on polarization interference of crystal wedge

在 Labview 环境下驱动 CCD 相机所采集的干涉图样如图 3,从图中可以看出干涉图样是明暗相间的条纹. 由式(6)可知条纹间隔仅与劈角和晶体劈的折射率差有关,相邻明条纹(或者暗条纹)间隔对应 2π 的相位变化.

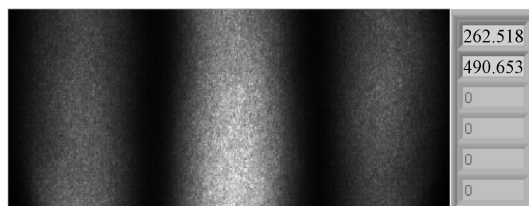


图 3 干涉图及波谷位置

Fig. 3 Interference patterns and trough position

图 3 所示的光斑是通过 CCD 转换而来的光强二维矩阵,将此矩阵的各行数据相加,可以得到如图 4(a)的光强曲线,曲线出现中间高两边低的现象,原因在于光斑对应的光强呈高斯分布,导致光强曲线也呈高斯分布. 光强曲线整体不够光滑,在测量过程中对测量结果有较大的影响,而不光滑的原因可能是光路中杂质、灰尘等外界因素带来的光强不均匀造成的. 为消除这些影响,利用 Labview 程序对光强曲线进行了中值滤波处理,处理后的光强曲线如图 4(b). 通过图 4(a)、(b)的对比可见,处理后曲线较平滑且波谷位置对应的像素值更为稳定.

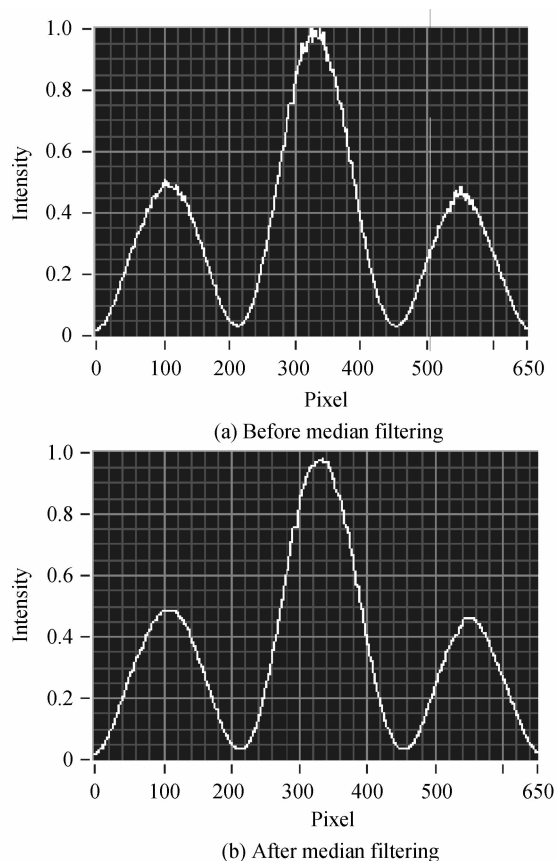


图 4 中值滤波前后光强曲线

Fig. 4 Intensity curve before and after median filtering

为得到波谷位置及波谷间距(条纹周期),在数据处理时调用 Labview 寻找波谷算法,对曲线的波谷进行定位,最终得到相邻暗纹之间的间距约为 230.0 像素,波谷位置对应的像素波动小于 0.2 像素,相位测量准确度为 4.4×10^{-3} rad.

实验过程中改变加载在 LN 晶体上的偏置电压即可使干涉条纹发生移动,通过测量暗纹移动量并利用晶体相位差与条纹移动量的线性关系式(6)便可以获得相位的变化值,进而得到电光晶体的半波电压.光源功率的波动使条纹的亮度发生变化,但不影响 CCD 相机对条纹位置的准确定位,因此测量过程不受光源功率波动的影响.未加载电压时,先确定某一暗纹的初始位置,调节电光晶体上的偏置电压,利用 Labview 程序记录波谷的移动量,多次测量得到电光晶体引入的相位延迟与加载的偏置电压关系的平均结果如图 5,对其进行线性拟合, $R^2=0.99996$,说明在 $0\sim 600\text{ V}$ 的电压范围内测量晶体相位延迟量线性度较好,与理论分析结果相符.实验数据及分析见表 1,可以看出,多次测量的重复性较好,计算得到半波电压结果为 $(480.0\pm 0.5)\text{ V}$.而根据式(7)及实验所用 LN 晶体的相关参量计算得出其半波电压的理论值为 $U_\pi = 479.9\text{ V}$.

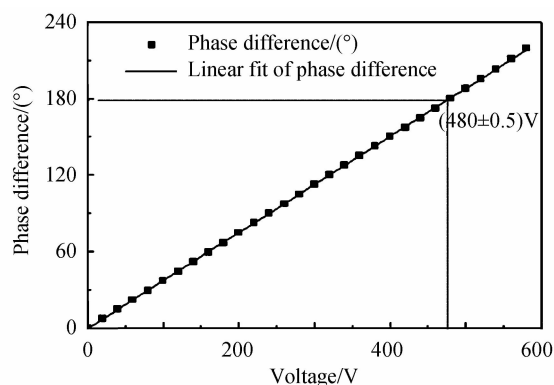


图 5 偏置电压与 LN 晶体引入的相位延迟的关系
Fig. 5 Relationship between phase retardation and bias voltage of LN crystal

表 1 偏光干涉法测量结果

Measured value/V	Mean value/V	Difference value/V	Standard deviation/V
480.0		0.0	
479.2		-0.8	
480.4		0.4	
480.0	480.0	0.0	0.5
479.6		-0.4	
480.8		0.8	
480.0		0.0	

2.2 极值法

极值法是测量电光晶体最常用的方法,该方法通过测量光强来获取电光晶体的半波电压.实验原理如图 6.其中 P_1 和 P_2 的透射方向正交,透射方向 t_1 和 t_2 分别与 x 的夹角为 $\pi/4$, $1/4$ 波片的快慢轴方向分别与 P_1 和 P_2 的透射方向 t_1 和 t_2 平行,加偏置电压后电光晶体的感应主轴分别平行于图 5 坐标系的 x 和 y 轴.

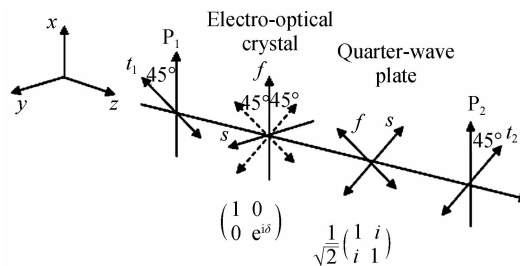


图 6 LN 晶体横向电光效应原理图
Fig. 6 The schematic diagram of transverse electro-optic effect of LN crystal

设入射光振幅大小为 A ,则入射光强为 $I_0 = A^2$.最终的光强^[5]为

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (8)$$

结合式(7)可知,光强 I 与加载电压成正弦平方的关系.

为保证实验结果具有更好的对比性,极值法实验仍采用晶体劈偏光干涉法实验所用的激光器、偏振片 P_1 和偏振片 P_2 .装置如图 7,器件摆放从左至右依次为 He-Ne 激光器、起偏器 P_1 、LN 电光晶体、 $1/4$ 波片、检偏器 P_2 和光率计.

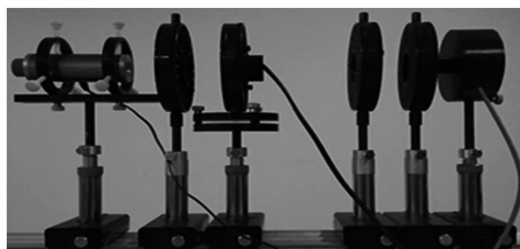


图 7 极值法测半波电压装置图
Fig. 7 Experimental setup of half-wave voltage measurement of LN crystal by extremum method

实验过程中光功率随着偏置电压的逐渐增加,会有不同的变化规律,经过 7 次测量输出光功率与偏置电压的关系曲线如图 8,对图中的实验数据用式(6)进行非线性拟合得到连续性曲线,曲线中极大值和极小值所对应电压的差值即是所测 LN 晶体的半波电压,

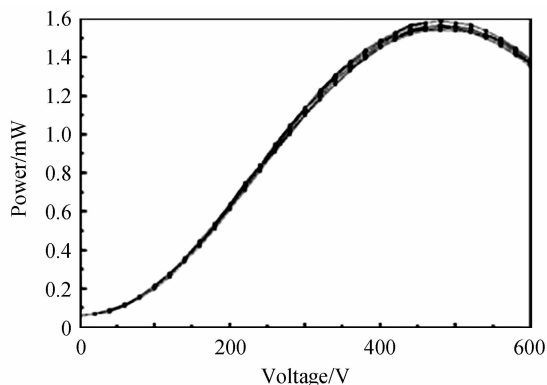


图 8 偏置电压与输出功率的关系
Fig. 8 The relationship between output intensity and bias voltage and

即 $U_{\pi} = U_{\max} - U_{\min}$. 由于激光功率存在微小波动,每次测量得到的电压—光强曲线的峰值对应的电压有所不同,导致计算出的半波电压存在较大误差.

表 2 给出了极值法测量半波电压的测量结果、算术平均值及标准差偏差等.

表 2 极值法测量结果

Table 2 Experimental results of extremum method

Measured value/V	Mean value/V	Difference/V	Standard deviation/V
476.5		-3.7	
477.0		-3.2	
474.0		-6.2	
480.0	480.2	-0.2	4.6
483.5		3.3	
487.0		6.8	
483.0		2.8	

从表 1 和表 2 的比较可见,晶体劈偏光干涉法比极值法测半波电压的测量结果稳定. 二者的误差定义为标准差与对应算术平均值的比值,其中极值法的测量误差为 0.96%,而偏光干涉法的测量误差仅为 0.10%,相对降低了近一个量级. 偏光干涉法在测量 LN 晶体的相位延迟量时,测量的是暗纹对应光强曲线的波谷位置,与光强大小无关,所以测量结果不会受到光源功率波动的影响,并且对任意的相位延迟量都可进行测量. 同时测量过程中条纹移动量始终与偏置电压呈线性关系,避免了传统方法中所加电压与所测光功率的非线性关系产生的不良影响.

3 结论

本文提出了采用双折射晶体劈偏光干涉法测量电光晶体相位延迟量和半波电压的方法,并与极值法测量结果进行了比较. 偏光干涉法采用波谷定位方法测量相位延迟,避免了光源功率波动的影响;实现了对电光晶体相位延迟量的实时线性测量,测量范围不受限制;测量准确度高,比极值法提高了近一个数量级. 偏光干涉法实验中影响相位测量准确度的主要因素是条纹间隔的大小和 CCD 相机的分辨率. 在实验中可以调节相邻暗条纹间隔至约 1000 像素,则相位测量准确度可提高至 1.3×10^{-3} rad. 通过使用更高分辨率的 CCD 相机可进一步提高测量准确度.

参考文献

[1] HSU Chia-chun, HU Shui-shang, CHEN Tien-jung, *et al.* The essentials of the kerr effect for polymer-stabilized blue phase liquid crystal[J]. *Optics Communications*, 2014, **322**: 78-81.

[2] ZHU Jing-cheng, CHEN Zhan-guo, LIU Xiu-huan, *et al.* Investigation on the electric-field-induced pockels effect and optical rectification in near-intrinsic silicon samples[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**: 582-586.

[3] ZHONG Dong-zhou, DENG Tao, ZHENG Guo-liang,

Manipulation of the complete chaos synchronization in dual-channel encryption system based on polarization-division-multiplexing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(7): 0705041.

钟东洲, 邓涛, 郑国良. 双信道偏振复用保密通信系统的完全混沌同步的操控性研究[J]. *物理学报*, 2014, **63**(7): 0705041.

- [4] TRUONG G D, TRAN D H, TRAN T A, *et al.* 3×3 Multimode interference optical switches using electro-optic effects as phase shifters[J]. *Optics Communications*, 2013, **392**: 78-83.
- [5] LI Chang-sheng. Optical stress sensor based on electro-optic compensation for photoelastic birefringence in a single crystal[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(27): 5315-5320.
- [6] GHOUIMID K, MEKAOUI S, OUARIACH A, *et al.* Tunable filter based on cavity electro-optic modulation for DWDM applications[J]. *Optics Communications*, 2015, **334**: 332-335.
- [7] ZHANG Ai-ling, LI Yu-xiang. Design of multi-parameter tunable bragg waveguide grating filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 0823001.
- 张爱玲, 李玉祥. 多参量可调谐的 Bragg 波导光栅滤波器设计[J]. *光子学报*, 2014, **43**(8): 0823001.
- [8] LIANG Hua-wei, SHI Xue-shun, RUAN Shuang-chen, *et al.* Design of electro-optic crystal in ultra high speed electrooptic sampling technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 0123004.
- 梁华伟, 史学舜, 阮双琛, 等. 超高速电光采样技术中的电光晶体设计[J]. *光子学报*, 2014, **43**(1): 0123004.
- [9] WEI Zheng-jun, WAN Wei, WANG Jin-dong, *et al.* A new method to acquire the half-wave voltage by the quantum bit error rate in the deterministic quantum key distribution system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(9): 0942161.
- 魏正军, 王伟, 王金东, 等. 一种基于确定性量子密钥分发误码判据的相位调制器半波电压的精确测定方法[J]. *物理学报*, 2011, **60**(9): 0942161.
- [10] DI Y, GARDNER P, GHAFOURISHIRAZ. Methods for measuring the RF half-wave voltage of LiNbO_3 optical modulators[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, **45**(5): 440-443.
- [11] XIE Shu-ping, XU Guo-liang. Suppression on fiber stimulated brillouin scattering based on phase modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(2): 0206003.
- 谢淑平, 许国良. 基于相位调制法的光纤受激布里渊散射抑制[J]. *光学学报*, 2013, **33**(2): 0206003.
- [12] GUO Ming-lei, HAN Xin-feng, ZHANG Mao-lian. Frequency doubling method for half-wave voltage measurement based on electro-optical modulation [J]. *Applied Optics*, 2010, **31**(1): 105-109.
- 郭明磊, 韩新风, 章毛连. 电光调制晶体半波电压倍频测量方法的讨论[J]. *应用光学*, 2010, **31**(1): 105-109.
- [13] SUN Jian, MOU Hai-wei, LIU Shi-qing, *et al.* Measurement of half-wave voltage in electro-optic modulation experiment[J]. *Optoelectronic Technology*, 2007, **27**(3): 212I-215I.
- 孙鉴, 牟海维, 刘世清, 等. 电光调制实验中半波电压的测量[J]. *光电子技术*, 2007, **27**(3): 212I-215I.
- [14] OIKAWA S, KAWANISHI T, IZUTSU M. Measurement of chirp parameters and halfwave voltage of mach-zehnder-type optical modulators by using a small signal operation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(5): 682-684.
- [15] WEI Zheng-jun, LI Hua-zeng, WANG Jin-dong, *et al.* A new method to measure half-wave voltage of phase modulator based on sagnac optical-fiber interferometer[J]. *Acta Optical*

- Sinica*, 2011, **31**(6): 0612006.
- 魏正军, 李华程, 王金东, 等. 基于萨尼亚克光纤干涉仪的相位调制器半波电压的测量方法[J]. 光学学报, 2011, **31**(6): 0612006.
- [16] YE Quan-yi, YANG Chun, CHONG Yu-hua, *et al.* Half-wave voltage measurement of phase modulator based on fiber interferometer [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, **24**(6): 1169-1173.
- 叶全意, 杨春, 崇毓华, 等. 基于光纤干涉仪的相位调制器半波电压的测量[J]. 光电子 • 激光, 2013, **24**(6): 1169-1173.
- [17] XU Can-hua, XU Qi-feng, XIE Nan. Using crystal wedge to measure temperature dependence of quartz wave plates' phase retardation [J]. *Acta Optical Sinica*, 2014, **34**(2): 02120041.
- 许灿华, 徐启峰, 谢楠. 用晶体斜劈方法测量石英波片相位延迟的温度特性[J]. 光学学报, 2014, **34**(2): 02120041.
- [18] MULVAD H, DAROS F, GALILI, M, *et al.* Phase regeneration of a BPSK data signal using a lithium niobate phase modulator [J]. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(11): 2189-2198.
- [19] CHIANG K S, JIN W. Mode switch based on electro-optic long-period waveguide grating in lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(2): 237-240.
- [20] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.