

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311673

# 一种新型电光晶体半波电压测量方法研究\*

王佳荣, 贺 博

(西安交通大学电气工程学院 西安 710049)

**摘 要:**本文通过分析晶体电光效应及折射率随电场变化规律,建立了电光调制数学模型并提出一种新的半波电压测量方法。该方法基于晶体两端所加电压幅值与系统输出波形之间数学模型,通过确定输出波形失真临界点推演晶体半波电压。为优化系统,分析了半波电压附近输出波形特性及光源、电源和时间分辨率与系统误差之间的关系并提出了两种优化方案——时间分辨率优化及对称优化。时间分辨率优化的方式通过放大单个波形细节可降低数据离散程度及误差。对称优化则是利用半波电压附近对应波形极值点对称特性,通过多次采样取平均或中值的方法降低误差。结果表明,临界值法是一种结构简单且有效的测量半波电压的方法,其优化方案在降低数据波动及误差方面效果良好。

**关键词:** 折射率椭球;半波电压;临界值法;电光效应;调制特性

**中图分类号:** TH741 TM452 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

## Novel half-wave voltage measurement method for electro-optical crystal

Wang Jiarong, He Bo

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** By analyzing the electro-optical effect of crystal and varied refractive index with electric field, a mathematical model of electro-optical modulation is established and a new half-wave voltage measurement method is proposed. Based on the mathematical model between the amplitude of voltage applied at both ends of the crystal and the output waveform of system, the half-wave voltage of crystal is deduced by determining the output distortion point. The characteristics of output waveform near the half-wave voltage and the relationship among the light source, power supply, time resolution and the system error are analyzed. Accordingly, two optimization schemes based on time resolution optimization and symmetric optimization are proposed, respectively. Specifically, the time resolution optimization amplifies individual waveform details to reduce data dispersion and error. While the symmetric optimization is to use the symmetry characteristics of corresponding waveform extreme points near the half-wave voltage and take the average or median value through multiple samples to reduce the error. The results show that the critical value method is a simple and effective method for measuring half-wave voltage, whose optimization scheme is efficient in reducing data fluctuation and error.

**Keywords:** refractive index ellipsoid; half-wave voltage; critical value method; electro-optic effect; modulation characteristics

## 0 引 言

电光强度调制器是实现光通信的重要器件之一,通常由电光晶体、波导、光纤等组成。相比结构简单的相位调制器,强度调制器可以实现单边带调制,抑制载波调制等多种调制方法<sup>[1-3]</sup>。基于晶体横向电光效应的调制器是一种常用的强度调制器,其利用电信号对光载波进行

相位调制,通过干涉结构实现从相位调制到强度调制的转换<sup>[4-6]</sup>。这种强度调制器结构简单器件尺寸小且可实现大带宽调制应用广泛<sup>[7-9]</sup>。

半波电压是指调制器工作时,电光效应使电光延迟相位差为 $\pi$ 时晶体的外加电压,是强度调制器的重要参量。半波电压测量在光电器件的灵敏度评估、响应速度评估及光功率计算等方面具有广泛的应用。通过对光电器件灵敏度、响应速度、光功率等参数评估,可有效表征

调制效率和调制功耗,有助于及时发现系统工作特性及故障<sup>[10]</sup>。目前测量半波电压的方法主要有极值法、倍频调制法和光谱分析法<sup>[11-13]</sup>。其中极值法是在不加载调制信号时改变调制器直流偏置电压,通过分析调制器输出光强度变化曲线,找出曲线极大值点和极小值点,两点间所对应的直流偏压之差即为半波电压。该方法简单易用、成本低、实时性好<sup>[14]</sup>。但该方法精度较低且需将被测器件接入电路,因此也会对被测器件产生一定损伤<sup>[15]</sup>。倍频法则是对晶体加载调制电压,将调制电压和输出信号输入示波器,通过对比波形是否出现倍频失真来确定半波电压<sup>[16]</sup>。用倍频法测量时波形必须稳定对称且需用到频率计、信号发生器等,故测量要求和成本较高<sup>[17]</sup>。光谱分析法是用光谱分析仪对调制器输出光信号进行检测,利用光谱载波或者边带信息推导半波电压<sup>[18]</sup>,该方法是在频域中分析调制信号,故抗干扰能力较强<sup>[19]</sup>。但其测量时需使用精密光谱仪等设备,成本较高。且对环境要求非常严苛,需要及其稳定的温湿度及无噪声干扰环境<sup>[20]</sup>。

本文结合横向电光效应调制器的结构和输出特性,分析了晶体电光效应及折射率随电场的变化规律,建立了电光调制特性的数学模型并提出一种新的半波电压测量方法。该方法通过分析晶体两端电压与输出波形的关系,探究了波形极值点失真临界点与半波电压之间的关系。由于临界值失真点附近系统输出波形相似,故进一步优化了测量误差和数据处理方式,并通过相应实验验证了理论分析和优化方案的有效性。

## 1 临界值法测量半波电压

### 1.1 $o$ 光和 $e$ 光相位差计算

本文所用电光调制系统如图 1 所示。入射光  $l$  通过起偏器  $P_1$  垂直入射到晶体表面并分解成  $o$  光和  $e$  光。为方便描述,现以晶体一个顶点为原点建立坐标系如图 1 所示,则晶体的光轴平行于  $z$  轴方向。若在晶体  $x$  轴方向施加电场,该电场将致出射的  $o$  光和  $e$  光产生电致相位差。接着  $o$  光和  $e$  光沿检偏器  $P_2$  方向分解并相互干涉,通过光电转换装置测量干涉光光强便可探究电致相位差或所加电场对系统的影响。系统晶体选用铌酸锂 ( $\text{LiNbO}_3$ , LN) 晶体。

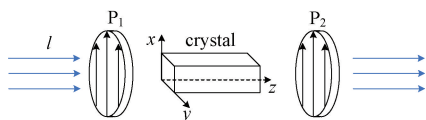


图 1 电光调制光路

Fig. 1 Optical path of electro-optical modulation

LN 晶体的折射率椭球体系如图 2 所示。

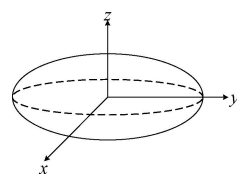


图 2 LN 晶体折射率椭球

Fig. 2 Refractive index ellipsoid of LN crystal

图 2 中,  $z$  轴为光轴方向。当晶体两端没有施加电场时,其折射率椭球可表示为:

$$B_1^0 x^2 + B_2^0 y^2 + B_3^0 z^2 = 1 \quad (1)$$

其中,  $B_1^0 = B_2^0 = \frac{1}{n_o^2}$ ,  $B_3^0 = \frac{1}{n_e^2}$ ,  $n_o$  为  $o$  光主折射率,  $n_e$  为  $e$  光主折射率。当晶体受到  $x$  轴方向上外加电场作用时,新折射率椭球将变为:

$$B_1^0 x^2 + B_2^0 y^2 + B_3^0 z^2 + 2\gamma_{51} E_1 xz - 2\gamma_{22} E_1 xy = 1 \quad (2)$$

其中,  $E_1$  为电场在  $x$  轴分量,  $\gamma_{22}$ 、 $\gamma_{51}$  为晶体电光系数。

在晶体两端施加电压后,折射率椭球如图 3 所示。令法向量  $\vec{k}$  与  $z$  轴平行,作平面  $\Pi k$  垂直于  $\vec{k}$ 。

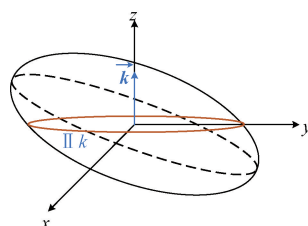


图 3 电场作用后折射率椭球

Fig. 3 Refractive index ellipsoids in an electric field

图 3 中平面  $\Pi k$  表达式为:

$$z = 0 \quad (3)$$

联立式(2)和(3)可得  $o$  光和  $e$  光相位差  $\Delta\varphi$ :

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda} n_o^3 \gamma_{22} E_1 \quad (4)$$

其中,  $L$  为晶体长度,  $\lambda$  为入射光波长。

### 1.2 通光比的计算

图 1 中,假设  $P_1$  与  $x$  轴夹角为  $\theta_1$ ,  $P_2$  与  $x$  轴夹角为  $\theta_2$ 。当光通过  $P_2$  时,其入射光表达式为:

$$E_i = A e^{j(\omega t - kx)} \quad (5)$$

其中,  $E_i$  是入射光波振动量,  $A$  为振幅,  $\omega$  为角频率。

晶体中  $o$  光和  $e$  光可表示为:

$$\begin{cases} E_{io} = A \cos \theta_1 e^{j(\omega t - kx)} \\ E_{ie} = A \sin \theta_1 e^{j(\omega t - kx)} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $E_{io}$  是  $o$  光分量,  $E_{ie}$  是  $e$  光分量。出射光可表示为:

$$\langle \vec{S}_{so} \rangle = \frac{A^2 \left\{ \cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 \cdot \cos \left[ \frac{2\pi L}{\lambda} n_o^3 \gamma_{22} E_1 \right] \right\}}{2c} \quad (7)$$

式中: 令  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ , 又  $c = 3 \times 10^8$  m/s。故:

$$\frac{\langle \vec{S}_{so} \rangle}{\langle \vec{S}_{si} \rangle} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi L}{\lambda} n_o^3 \gamma_{22} E_1 \right) \right] \quad (8)$$

其中, 输入光强度  $\langle S_{si} \rangle = A^2/c$ ,  $\langle S_{so} \rangle / \langle S_{si} \rangle$  为通光比。由式(8)可知, 通光比与施加在晶体两端电场呈余弦关系。

### 1.3 半波电压的测量

假设施加在图 1 中晶体  $x$  轴上的电压为:

$$V = E_0 d \quad (9)$$

其中,  $d$  为晶体厚度。

将式(9)代入式(4):

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi VL}{\lambda d} n_o^3 \gamma_{22} \quad (10)$$

由式(8)和(10)可知:

$$\frac{\langle \vec{S}_{so} \rangle}{\langle \vec{S}_{si} \rangle} = \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2} \quad (11)$$

式中: 当  $\Delta\varphi = 2\pi$  时, 输出光强最大, 对应电压记为  $V_{2\pi}$ 。则  $V_{2\pi}$  可表示为:

$$V_{2\pi} = \frac{\lambda d}{n_o^3 \gamma_{22} L} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11):

$$\frac{\langle \vec{S}_{so} \rangle}{\langle \vec{S}_{si} \rangle} = \cos^2 \frac{\pi V}{V_{2\pi}} \quad (13)$$

由式(13)可得图 1 调制曲线如图 4 所示。

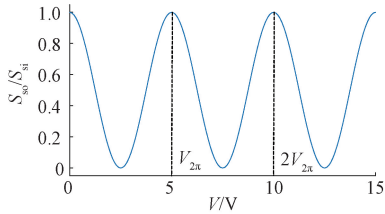


图 4 调制曲线

Fig. 4 Modulation curve

图 4 中, 当  $V$  取  $mV_{2\pi}$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ) 时,  $S_{so}/S_{si}$  最大,  $V$  与  $S_{so}/S_{si}$  之间呈余弦关系。半波电压  $V_\pi$  可表示为:

$$V_\pi = \frac{V_{2\pi}}{2} \quad (14)$$

假设系统输入信号为:

$$V = V_0 + V_m \sin \omega_1 t \quad (15)$$

其中,  $V_0$  是直流电压,  $V_m$  是交流电压幅值,  $\omega_1$  为交流电角频率。则:

$$\frac{\langle \vec{S}_{so} \rangle}{\langle \vec{S}_{si} \rangle} = \cos^2 \frac{\pi (V_0 + V_m \sin \omega_1 t)}{V_{2\pi}} \quad (16)$$

对式(16)分两种情况讨论:

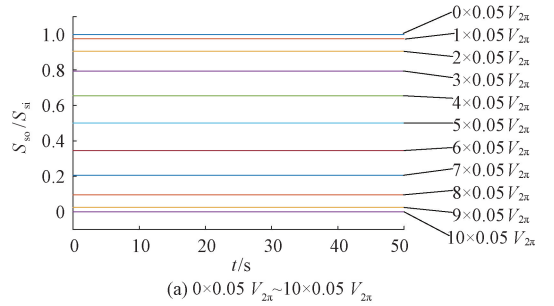
1) 交流为 0, 直流不为 0 且与  $V_{2\pi}$  有以下关系:

$$\begin{cases} V_0 = nV_{2\pi}, n = (0, 1 \times 0.05, 2 \times 0.05, \dots) \\ V_m = 0 \end{cases} \quad (17)$$

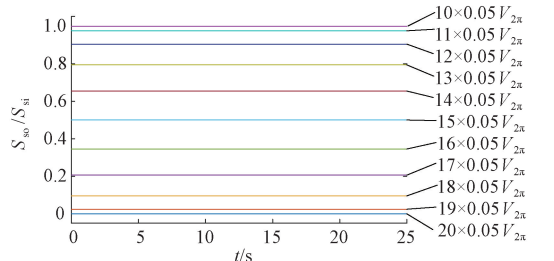
将式(17)代入式(16)可得:

$$\frac{\langle \vec{S}_{so} \rangle}{\langle \vec{S}_{si} \rangle} = \cos^2 n\pi \quad (18)$$

式(18)图像如图 5 所示。



(a)  $0 \times 0.05 V_{2\pi} \sim 10 \times 0.05 V_{2\pi}$



(b)  $10 \times 0.05 V_{2\pi} \sim 20 \times 0.05 V_{2\pi}$

图 5 输入只有直流时通光比时序图

Fig. 5 Timing diagram for the DC input

从图 5 中可以看出,  $S_{so}/S_{si}$  在  $0.5V_{2\pi} = V_\pi$  处最小, 在  $V_0 = 0$  或  $V_{2\pi}$  处达到最大值。说明电压幅值增加时, 波形极值在  $0V_{2\pi}$  和  $20V_{2\pi}$  两点相等。

2) 直流为 0, 交流不为 0 且其幅度与  $V_{2\pi}$  呈线性关系:

$$\begin{cases} V_0 = 0 \\ V_m = nV_{2\pi}, n = (0, 1 \times 0.05, 2 \times 0.05, \dots) \end{cases} \quad (19)$$

同理可得:

$$\frac{\langle \vec{S}_{so} \rangle}{\langle \vec{S}_{si} \rangle} = \cos^2 n\pi \sin \omega_1 t \quad (20)$$

将式(18)和(20)图像绘制在同一坐标系中,如图6所示。

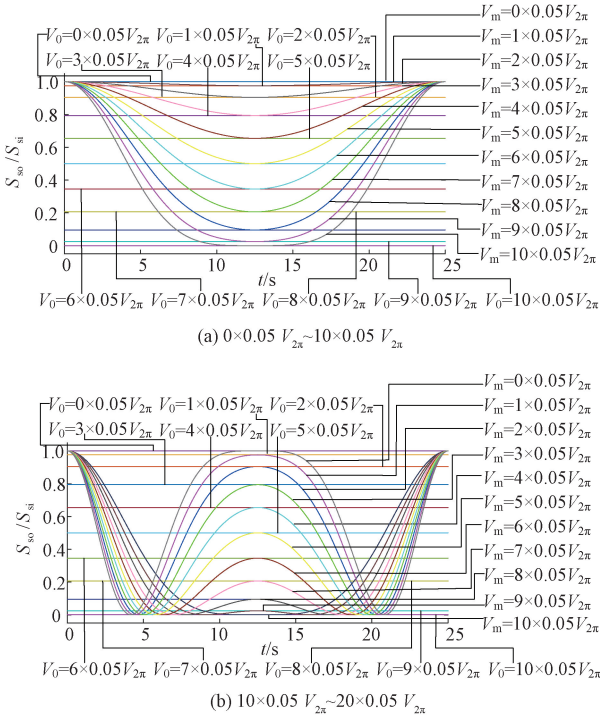


图6 交直流分别作为输入时通光比时序图

Fig. 6 Transmission ratio timing comparison when the input signals are AC and DC signals, respectively

由图6可知,输入为交流信号时,其输出波形在1/2周期处的极值与相同幅值的直流信号输入时对应的输出波形值相同。当输入电压为 $[0, 0.5V_{2\pi}]$ 时,交流输入对应 $S_{so}/S_{si}$ 最小值等于直流输入对应 $S_{so}/S_{si}$ 最小值。当输入电压属于 $[0.5V_{2\pi}, V_{2\pi}]$ 时,交流输入对应 $S_{so}/S_{si}$ 最大值等于直流输入对应 $S_{so}/S_{si}$ 最大值。而 $n=10$ 正是波形在交流输入端失真临界点。故与该点对应输入电压值即为晶体半波电压。由于半波电压附近对应输出波形极为相似,故需对电压幅值为 $(9\sim 11)\times 0.05V_{2\pi}$ 时波形作进一步研究,其波形如图7所示。

由图7(a)和(b)可知,当电压幅值在半波电压附近时,系统输出波形底部差异不明显,但对其局部放大后不同电压幅值对应输出曲线之间差异变得清晰。由图7(c)可知,当晶体两端施加交流电幅值为 $9\times 0.05V_{2\pi}$ 与 $11\times 0.05V_{2\pi}$ ,  $9.2\times 0.05V_{2\pi}$ 与 $10.8\times 0.05V_{2\pi}$ ,  $9.4\times 0.05V_{2\pi}$ 与 $10.6\times 0.05V_{2\pi}$ ,  $9.6\times 0.05V_{2\pi}$ 与 $10.4\times 0.05V_{2\pi}$ ,  $9.8\times 0.05V_{2\pi}$ 与 $10.2\times 0.05V_{2\pi}$ 时其在1/2周期处的极值点值相等,即,半波电压附近对应波形极值点具有对称性。图7(c)中1~5极值点对应半波电压的相对误差分别为2.51%、1.66%、0.93%、0.39%及0.08%。

为量化误差分析现结合测量机理及实验平台就激光光源波动、电源波动及示波器时间分辨率等参数对临界值

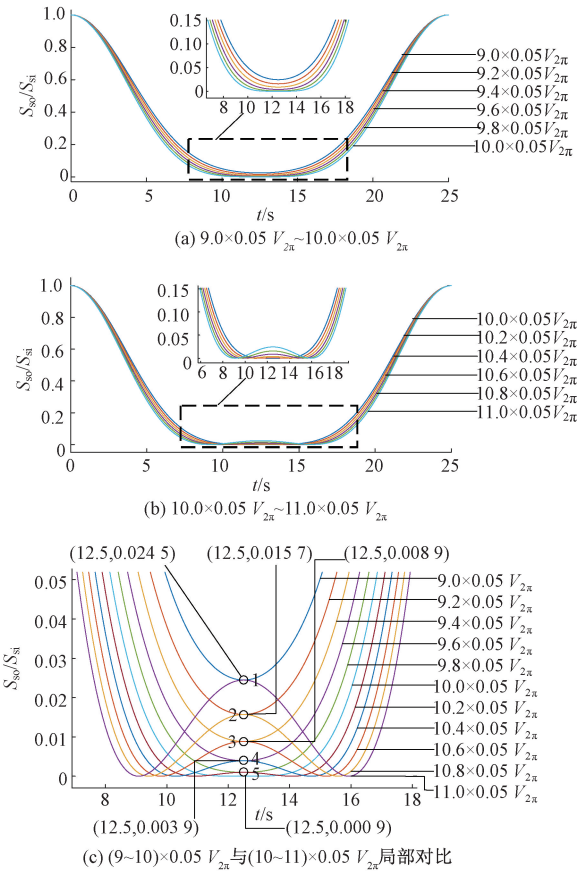


图7 电压幅值为 $(9\sim 11)\times 0.05V_{2\pi}$ 时通光比时序图

Fig. 7 Transmission ratio timing diagram when the voltage amplitude is  $(9\sim 11)\times 0.05V_{2\pi}$

法测量半波电压的误差进行定量分析。电源和光源波动对输出结果的影响主要通过传递函数将误差传导至最终结果,而时间分辨率所致误差对系统的影响则是通过直接影响读数。假设电源和光源的波动分别为 $\Delta e_1$ 与 $\Delta e_2$ ,由时间分辨率 $r$ 引起的误差为 $\Delta e_3$ 。由图7可知,时间分辨率增大时 $\Delta e_3$ 会减小。且随着时间分辨率的增大, $\Delta e_3$ 单位变化量也将变小,该变化趋势与指数函数近似,故 $r$ 与 $\Delta e_3$ 之间关系可近似表示为:

$$\Delta e_3 = pe^{-r} \quad (21)$$

其中, $p$ 表示由时间分辨率可引起的最大误差,在特定的光路系统中可认为其为常数。

式(21)中 $r$ 越高 $\Delta e_3$ 越小且 $\Delta e_3$ 与 $r$ 之间呈指数函数关系。令 $r=1/q$ , $q$ 为示波器横坐标每格显示毫秒数,单位为ms/格,即 $q$ 越小时间分辨率越大。设 $q\in[0.1, 0.002]$ ,则 $r\in[10, 500]$ 。结合式(16)可知半波电压总误差 $\Delta e_s$ 可表示为:

$$\Delta e_s = \Delta e_3 + 0.5\pi(V_m + \Delta e_1) \sin \omega_1 t \left| \arccos \frac{\langle \vec{S}_{so} \rangle}{\sqrt{\langle \vec{S}_{si} \rangle + \Delta e_2}} \right|$$

$$0.5\pi V_m \sin \omega_1 t \left/ \arccos \frac{\sqrt{\langle S_{so} \rangle}}{\sqrt{\langle S_{si} \rangle}} \right. \quad (22)$$

其中,当只有  $\Delta e_1$  作用时,  $\Delta e_s$  可表示为:

$$\Delta e_s = 0.5 \Delta e_1 \pi \sin 314 t \left/ \arccos \frac{\sqrt{\langle S_{so} \rangle}}{\sqrt{\langle S_{si} \rangle}} \right. \quad (23)$$

式(23)中出现  $\sin 314 t$  项是因为此处电源输出为交流电,但是在测量半波电压时,是通过观察对应交流幅值与输出波形之间的关系来确定半波电压的,因此式(23)中  $\sin 314 t = 1$ 。在输入交流幅值逐渐增大使波形逐渐接近半波电压对应波形的过程中  $S_{so}/S_{si}$  是逐渐增大的。故半波电压相对误差  $\Delta e_{rs}$  可近似为:

$$\Delta e_{rs} = \frac{\Delta e_1 / \arccos \sqrt{0.0001 V_m}}{V_m / \arccos \sqrt{0.05}} \quad (24)$$

式(24)图像如图 8 所示。

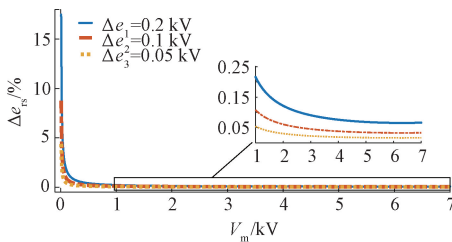


图 8 电源波动对输出的影响

Fig. 8 The effect of power supply fluctuations on the output

由图 8 可知,  $\Delta e_1$  相同时随着  $V_m$  的增大  $\Delta e_{rs}$  逐渐减小, 同一  $V_m$  时  $\Delta e_1$  越大,  $\Delta e_{rs}$  也越大, 但是随着  $V_m$  的增大, 不同  $\Delta e_1$  对  $\Delta e_{rs}$  的影响相差不大。对某一尺寸的晶体而言其半波电压是固定的, 因此当该晶体的半波电压值越大时,  $\Delta e_1$  对其输出影响越小。

当只有  $\Delta e_1$  作用时,  $\Delta e_{rs}$  可表示为:

$$\Delta e_{rs} = \frac{\arccos \sqrt{0.05}}{\arccos \sqrt{\frac{0.001 V_m}{10 + \Delta e_2}}} - 1 \quad (25)$$

式(25)的图像如图 9 所示。

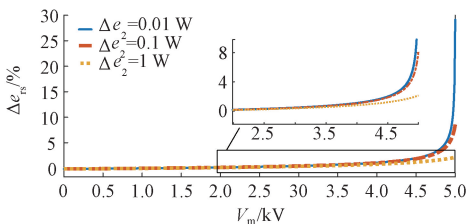


图 9 光源波动对输出的影响

Fig. 9 The effect of light source fluctuations on output

由图 9 可知,  $\Delta e_2$  相同时, 随着  $V_m$  的增大  $\Delta e_{rs}$  逐渐增大, 同一  $V_m$  时,  $\Delta e_2$  越大  $\Delta e_{rs}$  也会越大。即由于 pockels 效应,  $\Delta e_2$  较大时其在输出端产生的误差会随着  $V_m$  的增大而被放大, 在  $V_m$  大于 4.8 kV 时不同  $\Delta e_2$  对系统的影响明显变大, 而这之前不同  $\Delta e_2$  对输出影响较小且相近。总体而言, 当晶体半波电压值越大时,  $\Delta e_2$  对输出影响将增大。

同理, 当只有  $\Delta e_3$  作用时,  $\Delta e_{rs}$  可表示为:

$$\Delta e_{rs} = \frac{pe^{-r}}{0.5\pi V_m / \arccos \sqrt{0.05}} \quad (26)$$

式(26)的图像如图 10 所示。

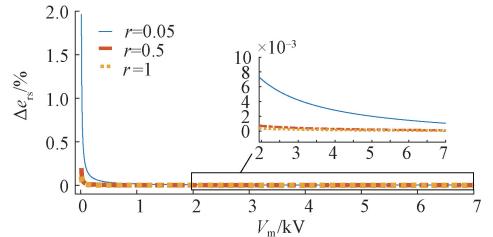


图 10 时间分辨率对输出的影响

Fig. 10 The effect of timing resolution on output

由图 10 可知, 同一时间分辨率时, 随着  $V_m$  的增大  $\Delta e_{rs}$  逐渐减小, 同一  $V_m$  时,  $\Delta e_3$  越大  $\Delta e_{rs}$  越小。即当  $V_m$  增大时  $\Delta e_3$  对输出造成的误差会随着  $V_m$  的增大而减小。而同一  $V_m$  时, 时间分辨率越高系统误差越小, 但这种差距会随着  $V_m$  的增大变得越来越小。因此当晶体半波电压越大时, 时间分辨率  $r$  对系统造成的误差越小。

由此可知, 当电光晶体半波电压较小(小于 0.2 kV)或过大(大于 4.8 kV)时, 临界值法测量半波电压系统误差较大。而当所测半波电压值大于 0.2 kV 小于 4.8 kV 时, 通过提高示波器时间分辨率或降低电源波动可一定程度上减小系统误差。

故在实际使用时可通过两种方法降低误差: 1) 使用示波器放大功能对波形进行局部放大, 这样能达到类似图 7(a) 或 (b) 中清晰化曲线局部特征的作用, 可降低临界值模糊程度和系统误差; 2) 读数时采用中值法(即读取数据时取样本中间值)或平均值法对数据进行处理, 由图 7(c) 可知, 若在电压区间  $[9 \times 0.05 V_{2\pi}, 10 \times 0.05 V_{2\pi}]$  和  $[10 \times 0.05 V_{2\pi}, 11 \times 0.05 V_{2\pi}]$  各读取相同数量的数据, 则通过平均值法或中值法能从一定程度上降低测量误差。

## 2 实 验

根据图 1 搭建实验平台如图 11 所示。图 11 中, 激光通过保偏光纤连接到准直器, 准直器输出即为偏振片



图 11 实验平台  
Fig. 11 Experimental platform

输入。起偏器、检偏器通光方向一致且均与  $x$  轴正向夹角  $45^\circ$ 。起偏器出射光通过晶体经检偏器发生干涉,干涉

后的光由准直器输入光电转换器进行测量。激光波长为  $1\,550\text{ nm}$  红外光,功率  $10\text{ mW}$ 。电源可输出幅值  $0\sim 10\text{ kV}$  工频电压。晶体采用  $x$  切  $z$  传,尺寸  $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ,平行于晶体长边(边长为  $10\text{ mm}$ )为光轴方向,此方向也是铌酸锂晶体的  $z$  方向,如图 12 所示。

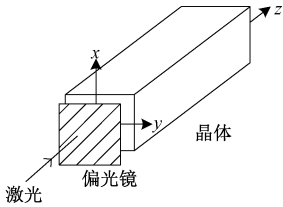


图 12 光束沿铌酸锂晶体  $z$  轴方向入射  
Fig. 12 The beam is incident in the  $z$ -axis direction of the lithium niobate crystal

晶体表面无电极通光方向为晶体光轴方向,晶体其他参数如表 1 所示<sup>[15-17]</sup>。

表 1 晶体的主要性能参数  
Table 1 The main performance parameters of the crystal

| 参数   | 值                                          | 参数    | 值                                                                                                                                             |
|------|--------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 生长方法 | 提拉法                                        | 折射率   | $n_o=2.208\ n_e=2.133(1\,550\text{ nm})$                                                                                                      |
| 晶格常数 | $a=b=5.14\text{ \AA}\ c=13.863\text{ \AA}$ | 电光系数  | $\gamma_{13}=8.6\text{ pm/V}, \gamma_{22}=6.8\text{ pm/V},$<br>$\gamma_{33}=30.9\text{ pm/V}, \gamma_{51}=28.0\text{ pm/V}(1\,550\text{ nm})$ |
| 熔点   | $1\,250^\circ\text{C}$                     | 损伤阈值  | $250\text{ mW/cm}^2@1\,550\text{ nm}, t\sim 10\text{ nsec}$                                                                                   |
| 居里温度 | $1\,140^\circ\text{C}$                     | 透光率   | $370\sim 5\,000\text{ nm}>68\%(1\,550\text{ nm})$                                                                                             |
| 密度   | $4.64\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$         | 热膨胀系数 | $//a, 2.0\times 10^{-6}/\text{K}; //c, 16.7\times 10^{-6}/\text{K}$                                                                           |
| 硬度   | $5(\text{mohs})$                           | 吸收损失  | $@1\,550\text{ nm}<0.1\%/ \text{cm}$                                                                                                          |

将晶体放置于晶体槽内部,令光轴方向平行于放置槽,两个平行电极之间距离调节到  $3\text{ mm}$  使其紧贴晶体两个侧面,当给极板施加电压时电场方向垂直于放置槽内侧面侧壁。输入光在经过整个光路到达光电转换器前会有损失,损失主要发生在起偏器和晶体内部。由 pockels 效应可知在光电转换器输入端的光强与输入光之间呈一定比例关系,比例系数可设为  $k_1$ 。而光电转换器又可将关信号成比例放大,比例系数可设为  $k_2$ 。结合式(13)及图 6 可知,当给极板两端施以交流电时,示波器输出  $V_{\text{out}}$  与半波电压的关系为:

$$V_{\text{out}}=k_1k_2\cos^2\frac{\pi V_{\pi}}{V_{2\pi}}\sin\omega_1t$$

(27)

由式(27)及图 6 可知,当交流电所加电压幅值与半波电压相等时,输出波形最小值应为  $0\text{ V}$  且波形刚好不发生畸变。在两个平行板上施加电压并进行测试,电压由小到大增加,实验结果如图 13 所示。

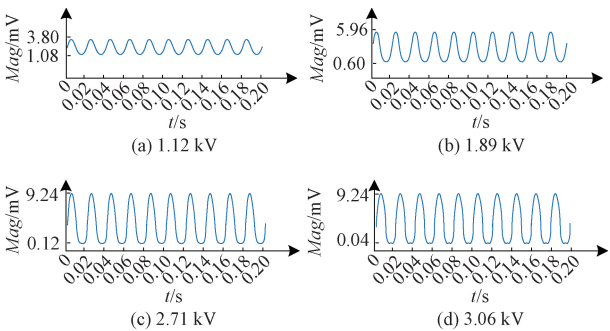


图 13 电压幅值由小到大变化时实验波形图  
Fig. 13 Experimental waveform when the voltage amplitude increases

由图 13 可知,电压幅值由小到大的过程中波形变化情况同图 6(a)一致。电压幅值在  $1.89\text{ kV}$  之前输出波形随着电压的增大而增大。当电压继续增加时,波形底

部开始变得扁平,当电压为 2.71 和 3.06 kV 时,波形底部扁平部分变得明显且一个周期内扁平部分逐渐变宽。依据图 6(a)分析,当波形底部达到最大扁平(即底部刚好不出现局部极大值)状态时晶体两端所加电压即为半波电压。当电压增加至 3.06 kV 时,波形扁平宽度接近半波电压对应波形。根据图 7 分析,接着实验应从波形底部明显出现局部尖峰开始,将电压降低至波形底部最大扁平状态并再次记录,结果如图 14 所示。

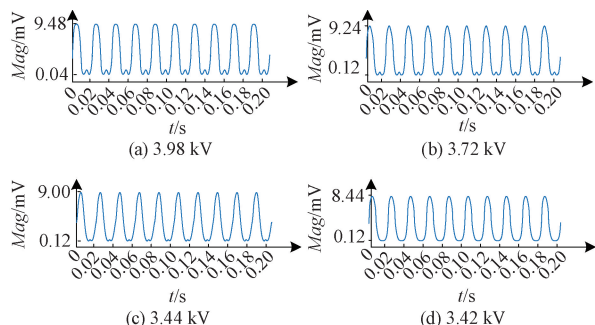


图 14 电压幅值由大到小变化时实验波形图

Fig. 14 Experimental waveform when the voltage amplitude increases

图 14 中首先将电压调至 3.98 kV(如图 14(a)所示)使波形底部明显出现一个小尖峰,然后降低电压幅值(如图 14(b)~(c)所示)直至刚好不出现局部尖峰(如图 14(d)所示)。此时半波电压为 3.42 kV。考虑到实际示波器中输出的波形总会有噪声且半波电压附近波形前后具有对称性,故该晶体的半波电压应为  $(3.42 + 3.06)/2 = 3.24$  kV。晶体参数代入式(12)及(14)计算可得半波电压理论值为 3.176 kV,系统的相对误差为 2.05%。

接着继续探究将提高示波器时间分辨率后读数对测量结果的影响,实验结果如图 15~16 所示。

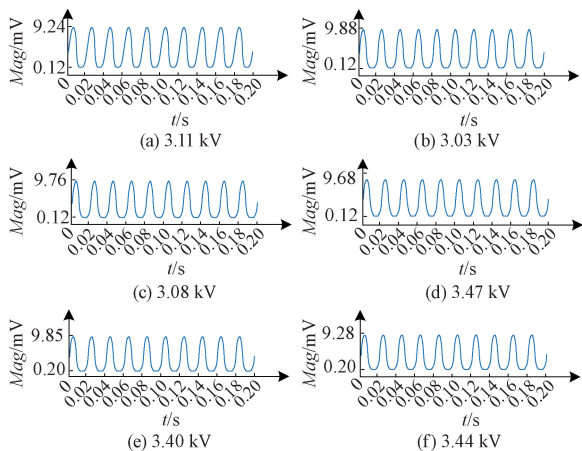


图 15 示波器横坐标调节为每格 20 ms 所得波形

Fig. 15 The waveform obtained by adjusting the oscilloscope abscissa to 20 ms per cell

图 15 中,前 3 组数据为电压从小到大调节所得半波电压对应波形,后 3 组为电压从大到小调节所得半波电压对应波形。当示波器界面一次显示波形个数较多时,会影响观察者对半波电压对应波形的判断导致所读数据波动较大,样本最大值和最小值相差 0.54 kV。用均值法对图 15 数据处理可得此次测量半波电压结果为:  $(3.08 + 3.03 + 3.11 + 3.47 + 3.40 + 3.44)/6 = 3.255$  kV,相对误差 2.4%。而中值法(若样本数量为奇数则取最中间一个样本作为最终结果,若样本数量为偶数则取中间两个采样值的平均值作为最终结果)所得半波电压为:  $(3.08 + 3.47)/2 = 3.275$  kV,相对误差 3.1%。现将示波器横坐标刻度调小后再次实验,结果如图 16 所示。

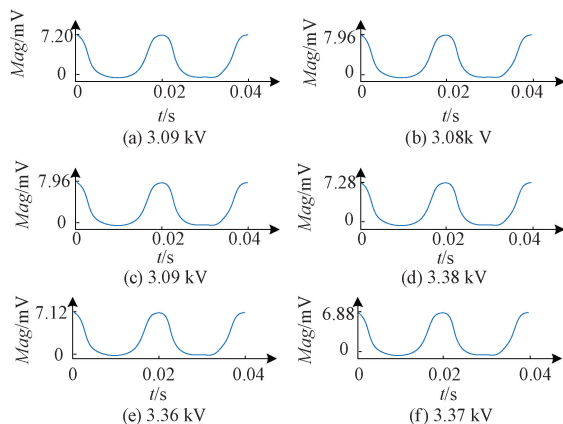


图 16 示波器横坐标调节为每格 4 ms 所得波形

Fig. 16 The waveform obtained by adjusting the oscilloscope abscissa to 4 ms per division

图 16 所得数据波形性较图 15 所得数据小,说明将提高示波器时间分辨率后更利于观察出波形微小变化从而确定的半波电压值离散度更低。同样用平均值法对图 16 数据处理得半波电压为 3.23 kV,相对误差 1.7%,而中值法处理后所得半波电压为 3.24 kV,相对误差 2.0%。相较于低时间分辨率时测得的数据,提高示波器时间分辨率后不仅提升了样本数据的稳定性且具有一定的降低误差的作用。

结合理论分析和实验可知,临界值法测量半波电压是将调制信号转换为电信号,在外调输入处连接交流电源,输出信号通过示波器显示,波形形态由调制信号幅值控制,在交流电压幅值逐渐增大的过程中,示波器上显示的波形底部会经历光滑,扁平至畸变出一个尖峰的过程,波形底部由扁平至畸变出尖峰时的临界点对应的电压即为所测量的半波电压。该方法的优点是测量简单。和倍频法及光通信模拟法相比,该方法不需要信号调制及解调装置,设计和实施过程相对简单,不需要额外的控制电路和设备支持。通过误差分析可知,该方法测量小信号(200 V 以下)时受电源波动及示波器时间分辨率影响较

大,而当测量大信号(4.8 kV 以上)时受光源波动影响较大,因此该方法在小信号和大信号测量时对设备精度要求较高。

### 3 结 论

本文根据折射率椭球体理论、光波干涉原理和电磁场理论建立了光路模型,分析了晶体两端电压与波形的关系,提出了一种临界值测量半波电压的方法,优化了测量方案并设计实施了相应的实验。结果表明:

1) 晶体电光效应主要是因为所加电场改变了  $o$  光和  $e$  光折射率使其内部电场与光强透射率呈三角函数关系。当输入增大到半波电压时,电场对电致相位差的影响反映在输出波形上表现为波形极小值的变化。故可通过确定波形底部失真的临界点反推晶体半波电压。

2) 不管晶体两端电压幅值从小到大变化还是从大到小变化,在接近波形极小值变化的临界点时输出波形都极为相似。由于电压幅值为  $9 \times 0.05 V_{2\pi}$  与  $11 \times 0.05 V_{2\pi}$ ,  $9.2 \times 0.05 V_{2\pi}$  与  $10.8 \times 0.05 V_{2\pi}$ ,  $9.4 \times 0.05 V_{2\pi}$  与  $10.6 \times 0.05 V_{2\pi}$ ,  $9.6 \times 0.05 V_{2\pi}$  与  $10.4 \times 0.05 V_{2\pi}$  及  $9.8 \times 0.05 V_{2\pi}$  与  $10.2 \times 0.05 V_{2\pi}$  时输出在  $1/2$  周期处的极值点值对称,故可通过半波电压附近左右侧各读取相同数据并取平均值或中值的方法降低测量误差。

3) 当示波器横坐标刻度较大时,屏幕上波形个数较多,单个波形细节观察困难致测量数据离散程度较大,调小横坐标刻度后可降低测量数据波动程度。相较于倍频法和光通信模拟法临界值法测量半波电压实施过程相对简单且不需要外围调制解调电路及控制电路。结合晶体误差分析及晶体半波电压左右两侧电压对应输出波形形态可知,当所测晶体半波电压在 0.2~4.8 kV 之间时,临界值法是一种简单有效的测量晶体半波电压的方法。

### 参考文献

- [1] 邸志刚,陈佳旗. 基于马赫-曾德干涉仪的光纤电流互感器设计[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 228-237.  
DI ZH G, CHEN J Q. Design of fiber optic current transformers based on Mach Zehnder interferometer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 228-237.
- [2] 韩国庆,刘显明,雷小华,等. 光纤传感技术在航空发动机温度测试中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 145-164.  
HAN G Q, LIU X M, LEI X H, et al. The application of fiber optic sensing technology in temperature testing of aircraft engines [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 145-164.
- [3] 张元英,张家洪,李英娜,等. 铌酸锂晶体工频强电场

传感器[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 272-227.

ZHANG Y Y, ZHANG J H, LI Y N, et al. LN crystal power frequency strong electric field sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 272-227.

- [4] TONEY E, TARDITI A G, PONTIUS P. Detection of energized structures with an electro-optic electric field sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 5(14): 1364-1369.
- [5] 周扬,卜乐平. 电光晶体的 Pockels 效应仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 123-129.  
ZHOU Y, BU L P. Simulation study of Pockels effect in electro-optic crystals [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 123-129.
- [6] YANG Q, DONG F, CHEN N. Micro-Ring sensor with electro-optic for wide-band electric field [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(8): 2577-2584.
- [7] ENOK R. Unbiased electro-optic waveguide as a sensitive nuclear magnetic resonance sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(26): 1266-1269.
- [8] HSU J M, ZHENG W H, CHEN J Z. Temperature fiber sensors based on Mach-Zehnder with sturdy structure[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(15): 6995-7000.
- [9] ZENG R, ZHUANG C. Measurement of transient electric fields with an integrated electro-optic sensor[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(4): 955-960.
- [10] 黄奕钊,徐启峰,陈昊. 光学电压传感器分压结构的缺陷及改进方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 166-171.  
HUANG Y Y, XU Q F, CHEN H. Defects and improvement method of voltage divider structure of optical voltage sensor [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 166-171.
- [11] 李潮锐. 电光调制通信的频谱测量[J]. 物理实验, 2017, 37(6): 28-31.  
LI CH R. Spectrum measurement of electro-optical modulation communication [J]. Physical Research Experiment, 2017, 37(6): 28-31.
- [12] 贾喻鹏,王大勇. 基于光谱分析的强度调制器半波电压测量[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(12): 1867-1871.  
JIA Y P, WANG D Y. Half-wave voltage measurement based on spectral analysis [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(12): 1867-1871.
- [13] CHEN H, ZHANG B. Power dither technique for measuring half-wave voltage of a silicon Mach-Zehnder modulator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(4): 217-220.

- [14] WANG H, ZHANG S, ZOU X H. Half-wave voltage self-calibration measurement method of electro-optical modulator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(12): 246-252.
- [15] 朱文营, 王辉林. 晶体半波电压测量方法[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 25(6): 101-108.  
ZHU W Y, WANG H L. Crystal half-wave voltage measurement method[J]. *Journal of Shandong University of Technology*, 2011, 25(6): 101-108.
- [16] 郭明磊, 韩新风. 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.  
GUO M L, HAN X F. Discussion on half-wave voltage measurement of electro-optical modulation crystal[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(1): 105-109.
- [17] 孙鉴, 牟海维, 刘世清. 电光调制中半波电压测量方法的研究[J]. *大学物理*, 2008(10): 40-43.  
SUN J, MOU H W, LIU SH Q. Research on half-wave voltage measurement method in electro-optical modulation[J]. *University Physics*, 2008(10): 40-43.
- [18] LI H, GUO Q Y. Low half-wave voltage in waveguide modulators for ECG signal acquisition [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2023, 1(35): 55-58.
- [19] 庞叔鸣, 唐伟. 波导调制器的半波电压的测量[J]. *电子器件*, 2007(4): 45-48.  
PANG SH M, TANG W. Measurement of half-wave voltage of waveguide modulator[J]. *Electronic Devices*, 2007(4): 45-48.

- [20] LIU X, LEI P W. Broadband meandered thin-film lithium niobate modulator with ultra-low half-wave voltage[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 8(34): 424-427.

## 作者简介



王佳荣, 2014 年于兰州交通大学获得学士学位, 2019 年于兰州交通大学获得硕士学位, 现为西安交通大学博士生, 主要研究方向为电场感知、电磁场耦合。

E-mail: wangjiaorong@stu.xjtu.edu.cn

**Wang Jiarong** received his B.Sc. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2014 and his M.Sc. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2019. He is currently a doctoral student at Xi'an Jiaotong University, focusing on electric field perception and electromagnetic field coupling.



贺博(通信作者), 1998 年于西北工业大学获得学士学位, 2002 年于西北工业大学获得硕士学位, 2006 于西北工业大学获得博士学位, 现为西安交通大学教授, 主要研究方向为电力设备状态智能评价及检测预警。

E-mail: hebo@mail.xjtu.edu.cn

**He Bo** (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 1998, his M.Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2002, and his Ph.D. from Northwestern Polytechnical University in 2006. He is currently a professor at Xi'an Jiaotong University, and his main research direction is intelligent evaluation and detection and early warning of power equipment.