

弹光调制高灵敏测量晶体电光系数

王 爽¹, 王志斌², 张敏娟², 李 晓^{1,2}

¹中北大学计算机与控制工程学院, 山西 太原 030051;

²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 为了实现对晶体电光系数高速率、高精度和高灵敏的测量,提出了一种基于弹光调制的电光系数测量新方案。运用低通滤波和数字锁相技术分别提取出调制信号的直流项和一倍频项数据,进而解调出晶体的电光系数。详细分析了该新方案的原理,搭建了实验系统,并对铌酸锂(LiNbO₃)晶体样品的电光系数进行了测试。实验结果表明,系统测量精度为 2.3%,灵敏度为 1.7×10^{-14} m/V,测量速率为每数据点 100 ms。

关键词 物理光学; 晶体光学; 电光系数; 弹光调制; 灵敏度

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0326001

High Sensitive Measurement of Crystal Electro-Optic Coefficients Based on Photo-Elastic Modulation

Wang Shuang¹, Wang Zhibin², Zhang Minjuan², Li Xiao^{1,2}

¹School of Computer Science and Control Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

²Engineering and Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electric Information and Instrument, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract In order to realize the measurement with high speed, high accuracy and high sensitivity of crystal electro-optic coefficients, a novel electro-optic coefficient measurement method based on photo-elastic modulation is proposed. By means of low-pass filtering and digital phase-locked technologies, the data of the DC term and the first harmonic term of the modulated signals are extracted, respectively, then the crystal electro-optic coefficient is demodulated. The principle of this new scheme is analyzed in detail, the experimental system is set up and the electro-optic coefficient of lithium niobate (LiNbO₃) crystal sample is measured. The experimental results show that the measurement accuracy is 2.3%, the sensitivity is 1.7×10^{-14} m/V, and the measurement speed is 100 ms per data point.

Key words physical optics; crystal optics; electro-optic coefficient; photo-elastic modulation; sensitivity

OCIS codes 260.1180; 260.5430; 120.3930

1 引 言

通过外加直流(DC)电场或交流(AC)电场来改变晶体光学性质的现象叫做电光效应^[1]。电光晶体由于其线性电光效应,被设计制作为电光调制器、电光开关以及电光偏转器等器件,在激光技术以及通信领域获得了广泛的应用^[2-5]。电光系数是电光晶体的一项重要性能指标,与电光器件的设计和应用关系密切,对新型电光晶体的研究尤为重要。因此,对晶体电光系数的测量具有十分重要的意义。

目前测量电光晶体电光系数的方法有很多,如极值测量法^[6]、干涉补偿法^[7]、椭圆偏测量法^[8]和半波电压法^[9]等。极值测量法需要以很小的电压间隔进行测量以描绘电压-光强曲线,受激光光源光强稳定性、环境以及测量条件的影响,误差较大,很难准确确定极值位置。干涉补偿法测量偏差小于 4%,测量光路一般为麦

收稿日期: 2016-10-09; **收到修改稿日期:** 2016-10-30

基金项目: 国家国际科技合作专项(2013DFR10150)、国家自然科学基金(61127015,61505180)

作者简介: 王 爽(1990—),女,硕士研究生,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: S1507038@st.nuc.edu.cn

导师简介: 李 晓(1972—),女,博士,副教授,主要从事控制工程方面的研究。E-mail: lixiaoydx@163.com(通信联系人)

克耳孙或马赫-曾德尔干涉结构光路,受环境振动干扰严重,并且需采用已知电光系数或压电系数的晶体对测量样品电光效应所引起的光程差进行补偿,才能进一步测量出样品电光系数,过程比较繁琐。椭圆偏振法对椭圆偏振仪的测量精度要求较高,高精度椭圆偏振仪价格昂贵,测量成本相对较高。半波电压法操作简单,较为常用,但测量过程中,电光晶体样品的半波电压对应光强极大值处,变化缓慢,半波电压测量精度不高,进而限制了电光系数测量的精度和灵敏度。

因此,为了提高电光系数测量灵敏度,并提供一种测量快速、操作简单、系统稳定性好、集成度高的电光系数测量方法,本文利用弹光调制器(PEM)调制频率大、调制效率高和调制稳定等偏振调制优势^[10-11],将弹光调制技术应用于电光系数测量,提出一种基于弹光调制的电光系数测量新方案。该方案有望提高电光系数测量的灵敏度以及测量的速率和效率,具有便于工业制自动化集成、无机械调节运动部件和成本低等优点。

2 原 理

电光系数能够定量描述晶体电光效应。电光系数均是通过施加一定的电压,观察入射光通过电光晶体的相位变化并进行反演获得。一般情况下,晶体的电光系数很小(一般为 10^{-12} m/V 量级),半波电压较高(一般为上千伏)。在外电场作用下,电光晶体样品的折射率发生变化,进而改变入射光强度。入射光通过施加电场的电光晶体时,两个偏振分量之间产生的相位差记为 $\delta_{(\gamma,V)}$,其中, γ 为电光系数, V 为施加的电场电压。

采用弹光调制并结合数字锁相数据提取技术测量晶体电光系数,图 1 为测量原理示意图。

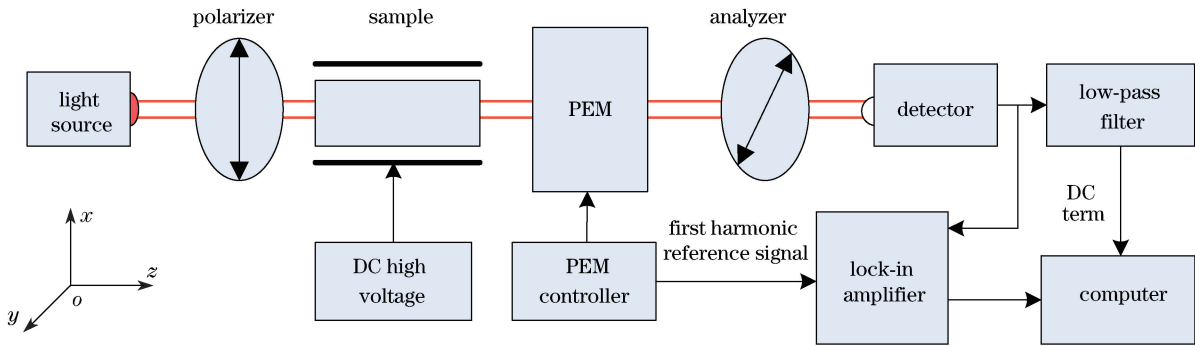


图 1 测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement

将起偏器和检偏器的透光轴方向分别设置为 0° 和 45° ,放置电光晶体样品,使施加电场后的折射率短轴与 x 轴成 45° 角,PEM 调制快轴方向为 0° ,利用 Stokes 矢量和 Muller 矩阵可以容易地求解出探测器探测到的信号光强。通过 0° 起偏器后的入射光 Stokes 参量可描述为^[12]

$$\mathbf{S}_{in} = I_0 [1 \quad 1 \quad 0 \quad 0]^T, \quad (1)$$

式中 I_0 为检测激光通过起偏器后的总强度。待测电光样品和 PEM 均使入射光产生双折射^[13],其偏振特性用 Mueller 矩阵可表述为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cos \delta & \cos 2\theta \sin 2\theta (1 - \cos \delta) & -\sin 2\theta \sin \delta \\ 0 & \cos 2\theta \sin 2\theta (1 - \cos \delta) & \sin^2 2\theta + \cos^2 2\theta \cos \delta & \cos 2\theta \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta \sin \delta & -\cos 2\theta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

对于电光样品,式中 θ 取 45° ,相位差 δ 取 $\delta_{(\gamma,V)}$;对于 PEM,式中 θ 取 0° ,相位差 δ 取 $X = X_0 \sin(2\pi ft)$, X_0 为 PEM 相位调制幅值, f 为 PEM 谐振频率。忽略检测光在传播过程中的损失,经检偏器出射后的出射光 Stokes 参量为

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{M}_A \mathbf{M}_{PEM} \mathbf{M}_{sample} \mathbf{S}_{in}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{M}_A 为 45° 检偏器 Muller 矩阵, \mathbf{M}_{PEM} 和 \mathbf{M}_{sample} 分别为 PEM 和电光样品的 Muller 矩阵^[14],结合(2)式,

考虑到探测器能够探测到的 Stokes 矢量为第一个分量,探测器探测到的光强为

$$I = \frac{I_0}{2} [1 + \sin \delta_{(\gamma, V)} \sin X]。 \quad (4)$$

利用第一类贝塞尔级数将 $\sin X = \sin[X_0 \sin(2\pi ft)]$ 展开,即 $\sin X = 2 \sum_{2k-1} J_{2k-1}(X_0) \sin[(2k-1) \cdot 2\pi ft]$, 其中 k 为正整数, $J_{2k-1}(X_0)$ 为第 $2k-1$ 阶贝塞尔级数的系数。因此(4)式可以改写为

$$I = \frac{I_0}{2} \{1 + 2 \sin \delta_{(\gamma, V)} [J_1(X_0) \sin(2\pi ft) + J_3(X_0) \sin(6\pi ft) + \dots]\}。 \quad (5)$$

由(5)式可以看出,被调制后的光信号中包括直流项和弹光调制的奇数倍频项,将信号低通滤波后输出直流项 $V_{DC} = \frac{I_0}{2}$, 数字锁相后提取得到一倍频项 $V_{1f} = I_0 J_1(X_0) \sin \delta_{(\gamma, V)}$ 。将直流项和一倍频项求比值,可得出电光样品产生的相位差为

$$\delta_{(\gamma, V)} = \arcsin \frac{V_{1f}}{2J_1(X_0)V_{DC}}。 \quad (6)$$

结合(6)式,已知电光晶体材料的初始折射率、尺寸和施加的直流电压便可求解出晶体电光系数。

本文以测量铌酸锂(LiNbO_3)电光晶体的电光系数 γ_{22} 为例^[15],沿铌酸锂电光晶体 x 轴方向施加电场。在沿 x 轴电场作用下, LiNbO_3 电光晶体沿晶体 x 轴和 y 轴的两个折射率主轴旋转 45° ,并且折射率的大小发生改变。入射光通过时,沿两个折射率主轴的分量产生的相位差为

$$\delta_{(\gamma, V)} = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{22} \frac{L_z}{L_x} V, \quad (7)$$

式中 λ 为入射光在真空中的波长, n_0 为施加电场前电光晶体的折射率, L_x 和 L_z 分别为电光晶体样品在晶体 x 轴方向和晶体 z 轴方向上的长度。将(7)式代入(6)式,得

$$\gamma_{22} = \frac{\lambda L_x}{2\pi n_0^3 V L_z} \arcsin \frac{V_{1f}}{2J_1(X_0)V_{DC}}。 \quad (8)$$

3 实 验

根据图 1,搭建了电光系数测试系统,光源选用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器;起偏器和检偏器均为 Thorlabs 公司生产的 GT10 格兰泰勒偏振棱镜,消光比优于 $10^5:1$;电光样品为 LiNbO_3 晶片,晶片尺寸为 $4.62 \text{ mm} \times 11.45 \text{ mm} \times 31.10 \text{ mm}$,晶片用平整的薄铝板夹持作为导电极,沿晶片 x 方向施加电场,沿晶片光轴 z 方向通光,针对 632.8 nm 的入射光, $n_0 = 2.29$ ^[16]。PEM 是本课题组研制的压电石英驱动的八角对称状结构 PEM,通光晶体为熔融石英,PEM 谐振频率为 49.90 kHz;探测器为 Thorlabs 公司的 PDA10A 硅基跨阻放大光电探测器,并设计制作了低通滤波电路;一倍频项采用 AMETEK 公司 7270 锁相放大器锁相提取。经低通滤波后,得到的直流项数据和锁相放大器输出的一倍频数据均由采集卡采集并输入计算机,完成电光系数的解调、显示和存储。

通过直流高压电源对电光样品施加电场,测量了 100, 200, 300, 400 V 的 4 组电压值下的电光情况,并用示波器观察了 PEM 驱动信号和被调制后的光信号,对电光样品施加电压为 100 V 时,示波器显示信号如图 2 所示。

图 2 中通道 1 为 PEM 驱动电压信号,通道 2 为系统经弹光调制后的光信号。由图 2 可知,PEM 为纯交流高压信号调制,调制频率为 PEM 谐振频率 (49.90 kHz),实验中对 PEM 施加的调制电压峰峰值 $V_{pp} = 60.8 \text{ V}$,对应的 PEM 相位调制幅值 $X_0 = 0.600 \text{ rad}$,且贝塞尔级数 $J_1(0.600) = 0.2867$ 。通道 2 表明,被调制后光信号包含交流和直流成分。该信号经低通滤波器和锁相放大器提取数据,将 NI 采集卡的频率设置为 10 Hz,测量结果如图 3 所示。给电光样品施加电压过程会造成信号的波动,并存在一定的延迟。将图 3(a)、(b)数据连同 $J_1(0.600) = 0.2867$ 代入(6)式,求解得到样品外加电压时入射光产生的相位差,如图 3(c)所示。

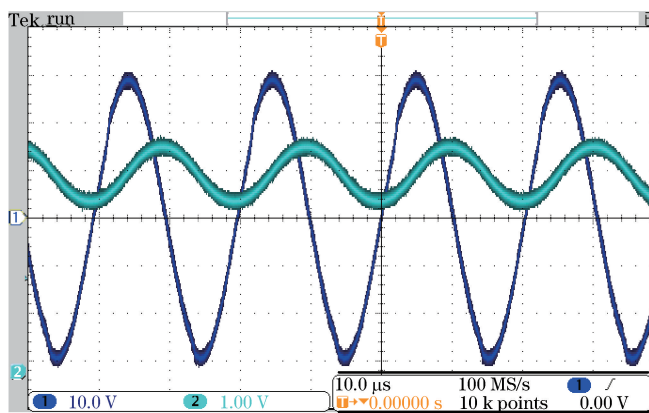


图 2 示波器显示信号图

Fig. 2 Signal display on oscilloscope

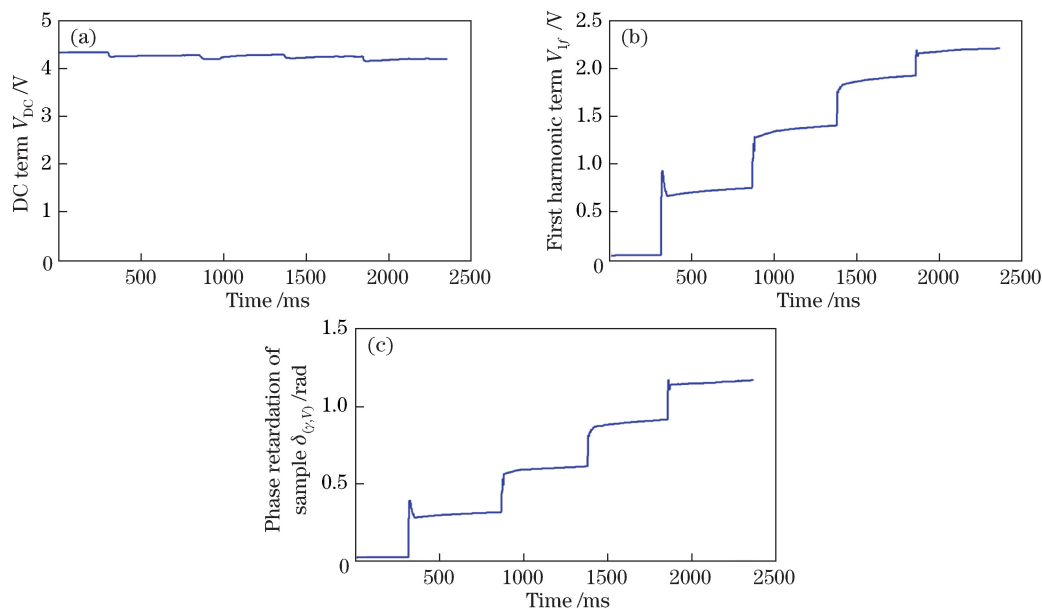


图 3 (a)直流项;(b)一倍频项;(c)样品相位差

Fig. 3 (a) DC term; (b) first harmonic term; (c) phase retardation of sample

4 分析与讨论

不计施加电压过程的延迟影响数据,记录每个外加电压下电光样品相位延迟平均值和标准偏差,并代入(8)式,求解得出的电光系数平均值和标准偏差,见表1。

表 1 样品相位差和电光系数

Table 1 Phase retardation and electro-optic coefficients of sample

DC voltage /V	Phase retardation of sample $\delta_{(\gamma,V)}$ /rad	Standard deviation of phase retardation $\sigma_{\delta_{(\gamma,V)}}$ /rad	Electro-optic coefficients γ_{22}	Standard deviation of electro-optic coefficients $\sigma_{\gamma_{22}}/(10^{-12} \text{ m/V})$
0	0.0099	0.0002	—	—
100	0.2806	0.0008	3.372	0.010
200	0.5605	0.0029	3.429	0.017
300	0.8610	0.0032	3.534	0.013
400	1.1281	0.0053	3.483	0.016

由表 1 可知,未给样品施加电压时($V=0$),由直流项和一倍频项数据计算得出的电光相位延迟并不为 0,但数值很小,这主要是测量过程中电光样品光轴与通光方向不完全重合造成的,因此将其近似为系

统的初始偏移值,在后面的计算中均减掉。测量得到该样品的电光系数平均值为 3.454×10^{-12} m/V,最大相对偏差为 2.3%,并且当 $V=200$ V 时,电光系数标准偏差取最大值 1.7×10^{-14} m/V,代表了本系统的测量灵敏度。

本系统测量得到的 LiNbO₃ 晶体电光系数 γ_{22} 与文献[15-16]报道的室温下 LiNbO₃ 晶体线性电光系数 $\gamma_{22}=3.4 \times 10^{-12}$ m/V 非常接近,但本系统的最大相对偏差为 2.3%,这是系统中选用的高压直流电源测量值读数与实际输出值的偏差造成的。此外,晶体尺寸的测量精度也对本系统的测量精度造成了影响。但从电光系数的标准偏差可以看出,基于弹光调制的电光系数测量系统具有较高的测量灵敏度;并且本系统 NI 采集卡频率设置为 10 Hz,即测量每个数据点仅耗时 100 ms,鉴于 PEM 较高的调制频率,在保证测量精度和灵敏度的情况下,相信系统的测量速率还可以进一步提高。

5 结 论

提出了一种基于弹光调制的晶体电光系数测量的新方案,将弹光偏振调制应用于电光系数测量系统,并运用低通滤波和锁相放大技术实现信号提取。实验结果显示,实验系统的最大测量偏差为 2.3%,灵敏度为 1.7×10^{-14} m/V,测量速率为每数据点 100 ms。提出的晶体电光系数测量方案无机械调节部件、工作稳定、重复度高、测量快速、成本相对较低,为晶体电光系数测量提供了一种新方法。

参 考 文 献

- [1] Yu Kuanxin. Advanced optics[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2009: 109.
俞宽新. 高等光学[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2009: 109.
- [2] Firby C J, Elezabi A Y. A magnetoplasmonic electrical-to-optical clock multiplier[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(5): 051111.
- [3] 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.
- [4] Ye C, Liu K, Soref R A, *et al.* A compact plasmonic MOS-based 2×2 electro-optic switch[J]. Nanophotonics, 2015, 4(1): 261-268.
- [5] Sasaki Y, Kobayashi J, Yagi S, *et al.* Microsecond optical switching of five channels by KTN electro-optic deflector[J]. Electronics Letters, 2014, 50(21): 1540-1541.
- [6] Shang Youkui, Shen Qishun, Shi Jian, *et al.* Measurement of piezoelectric and electro-optical coefficients of crystal with ATR method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(4): 63-65.
尚有魁, 沈启舜, 史 坚, 等. 用 ATR 法测量晶体的压电系数和电光系数[J]. 光电工程, 2005, 32(4): 63-65.
- [7] Yin Xin. Improvement of experimental setup of interferometric method for measuring electro-optic coefficients of crystals[J]. Acta Optica Sinica, 1989, 9(4): 353-356.
尹 鑫. 干涉法测量晶体电光系数实验装置的改进[J]. 光学学报, 1989, 9(4): 353-356.
- [8] Xu Jiandong, Yang Kun, Liu Shutian, *et al.* Ellipsometry techniques in poled polymer electrooptic coefficients measurements[J]. Chinese J Lasers, 1995, 22(9): 661-665.
徐建东, 杨 昆, 刘树田, 等. 椭偏法测量极化聚合物的电光系数[J]. 中国激光, 1995, 22(9): 661-665.
- [9] Pei Liyan, Ma Jing, Xu Canhua, *et al.* Measurement of half-wave voltage of electro-optic crystal based on crystal wedge[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(9): 98-103.
裴丽燕, 马 靖, 许灿华, 等. 基于晶体劈的电光晶体半波电压测量[J]. 光子学报, 2015, 44(9): 98-103.
- [10] Li Kewu, Wang Zhibin, Zhang Rui, *et al.* High sensitive measurement of optical rotation based on photo-elastic modulation[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(18): 184206.
李克武, 王志斌, 张 瑞, 等. 基于弹光调制的高灵敏旋光测量[J]. 物理学报, 2015, 64(18): 184206.
- [11] Duan L, Fang J, Li R, *et al.* Light intensity stabilization based on the second harmonic of the photoelastic modulator detection in the atomic magnetometer[J]. Optics Express, 2015, 23(25): 32481-32489.
- [12] Zeng A J, Li F Y, Zhu L L, *et al.* Simultaneous measurement of retardance and fast axis angle of a quarter-wave plate using one photoelastic modulator[J]. Applied Optics, 2011, 50(22): 4347-4352.
- [13] Li Kewu, Wang Liming, Wang Zhibin, *et al.* Measurement of residual birefringence combined photo-elastic modulation

with electro-optic modulation[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0508003.

李克武, 王黎明, 王志斌, 等. 弹光调制和电光调制联合测剩余双折射[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0508003.

- [14] Alali S, Vitkin I A. Optimization of rapid Mueller matrix imaging of turbid media using four photoelastic modulators without mechanically moving parts[J]. Optical Engineering, 2013, 52(10): 103114.
- [15] Chen Gang, Liao Liji, Hao Wei. Fundamentals of crystal physics[M]. Beijing: Science Press, 2007: 329.
陈 纲, 廖理儿, 郝 伟. 晶体物理学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 329.
- [16] Liao Yanbiao. Polarization optics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 117.
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 117.