

doi:10.3788/gzxb20174610.1012001

弹光调制测晶体电光系数的数字锁相实现

王爽^{1,2}, 王志斌², 李晓^{1,2}, 李晋华², 张敏娟², 景宁²

(1 中北大学 计算机与控制工程学院, 太原 030051)

(2 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 太原 030051)

摘 要:在弹光调制测晶体电光系数系统中,对弹光调制器工作控制和调制信号数据处理进行了优化设计,并实现一种灵敏度高、测量快速、成本低和系统集成度高的晶体电光系数测量方案.针对弹光调制及调制信号的特点,采用现场可编程门阵列完成弹光调制器的工作控制和测量数据的提取.现场可编程门阵列提供弹光调制器工作电压信号,控制模数转换器的采样频率,同时产生正弦和余弦参考序列来提取直流项、一倍频项的同向分量和正交分量,并输入计算机中求解得出晶体电光系数.对铌酸锂样品进行了测试,实验结果表明系统重复度和灵敏度为 0.0016×10^{-12} m/V,测量速率为 1ms/数据点.较其他晶体电光系数测量方法,本文方法具有更高的测量灵敏度和更快的测量速率,为实现弹光调制测量晶体电光系数的智能系统奠定了基础.

关键词:晶体光学;电光系数;弹光调制;数字锁相;系统设计

中图分类号:O436.3

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)10-1012001-6

Realizing the Measurement of the Crystal Electro-optic Coefficient by Photoelastic Modulation with Digital Phase Locking

WANG Shuang, WANG Zhi-bin, LI Xiao, LI Jin-hua, ZHANG Min-juan, JING Ning

(1 School of Computer Science and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

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

Abstract: In order to integrate and optimize the manipulation of photoelastic modulator and data processing in the measurement system of crystal electro-optic coefficient by photoelastic modulation, and realize a highly sensitive, fast, low cost and highly integral crystal electro-optic coefficient measurement scheme. According to the characteristics of the photoelastic modulation and modulation signal, a field programmable gate array is used to fulfill the control of the photoelastic modulator and the extraction of measuring data. The field programmable gate array provides the drive signal of the photoelastic modulator and controls the AD sampling simultaneously, and it also produces the cosine and sine reference sequences to achieve the DC term, the co-component and quadrature component of the first term, these terms are input in a computer to solve out the crystal electro-optic coefficient. A lithium niobate sample was tested, the results show that the repeatability and sensitivity of the system is 0.0016×10^{-12} m/V, the measurement rate is 1 ms/ data point. Compared to the other crystal electro-optic coefficient measurement methods, the proposed method has higher measurement sensitivity and faster measurement speed, which lays the foundation for the realization of the intelligent system for measuring the the crystal electro-optic coefficient by photoelastic modulation.

Key words: Crystal optics; Electro-optic coefficient; Photo-elastic modulation; Digital phase locking; System design

OCIS Codes: 120.3930; 260.1180; 260.5430

基金项目:国家国际科技合作专项项目(No.2013DFR10150)和国家自然科学基金(Nos.61127015,61505180)资助

第一作者:王爽(1990-),女,硕士研究生,主要研究方向为光电检测技术.Email:S1507038@st.nuc.edu.cn

导师(通讯作者):李晓(1972-),女,博士,副教授,主要研究方向为控制工程.Email:lixiaoydx@163.com

收稿日期:2017-02-17;录用日期:2017-04-07

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

0 引言

利用晶体电光效应制作的电光调制器、电光开关、乘法器和偏转器等电光器件,在激光技术以及通信领域获得了广泛的应用^[1-6].电光系数是电光晶体的关键性能指标,与电光器件的设计和应用关系密切,并且对新型电光晶体的研制具有重要意义.因此,探索高准确度、高灵敏、测量快速、工作稳定并且便于工业化集成的晶体电光系数测量新方案是十分必要的.

目前,测量晶体电光系数的常用方法有:干涉补偿法^[7],椭圆测量法^[8],半波电压法^[9]等.但这些方法抗环境干扰能力差,测量过程繁琐耗时,进而限制了电光系数测量的准确度和灵敏度.为了克服上述方法存在的不足,我们将弹光调制技术运用于晶体电光系数测量,获得了一种测量快速,准确度和灵敏度较高的晶体电光系数测量新方案^[10].但该方案数据解调采用商业锁相放大器,系统成本昂贵,集成度有限.

本文根据弹光调制器(Photoelastic Modulator, PEM)工作方式及调制信号的特点^[11],采用现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)发出 PEM 谐振频率相同的方波信号,经 LC 谐振电路放大后驱动 PEM 工作.同时将被调制光信号经模数(Analog to Digital, AD)转换后输入 FPGA 中完成数字锁相解调,进而求解得出被测晶体电光系数.所设计的晶体电光系数测量系统,实现了弹光调制器工作控制和调制信号数据解调在同一个 FPGA 中完成,因而有望在保证测量准确度、灵敏度和测量速率的同时,提高系统的工业化集成度,降低系统成本,为实现弹光调制测量晶体电光系数的智能系统奠定基础.

1 原理

1.1 光学系统设计

弹光调制测晶体电光系数原理图如图 1 所示.检测激光经过 0° 的起偏器,入射到待测电光晶体样品,经 PEM 调制,并经过 45° 检偏器出射后被光电探测器检测.通过直流(DC)高压电源对电光晶体样品施加电场,晶体折射率发生改变.入射光通过时,两偏振分量之间产生的相应的相位差,通常记为 $\delta_{(r,V)}$ (其中, r 为电光系数, V 是所施加的电场电压),电光样品加电场后的折射率快轴设置在 45° . PEM 调制轴调节到 0° , 驱动信号由 FPGA 产生,经 LC 谐振电路放大后驱动 PEM 工作.调制光信号经 AD 转换后输入 FPGA 完成直流项和倍频项数据提取,提取数据输入计算机(PC)进一步求解得到电光系数,然后存储或输出显示.

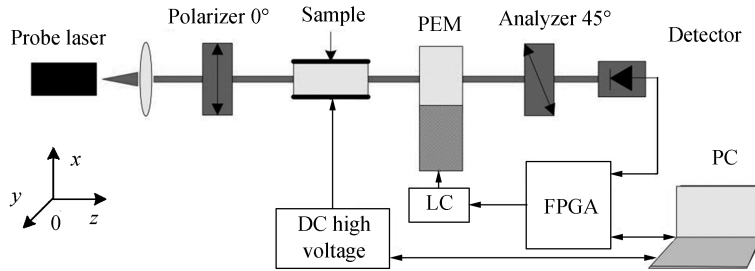


图 1 系统原理图

Fig.1 System schematic diagram

如图 1,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可以用 Stokes 参量表示为^[12]

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M}_A \mathbf{M}_{\text{PEM}} \mathbf{M}_{\text{sample}} \mathbf{S}_{\text{in}} \quad (1)$$

式中 \mathbf{M}_A 为 45° 检偏器 Muller 矩阵, PEM 和电光样品的 Muller 矩阵分别为 \mathbf{M}_{PEM} 和 $\mathbf{M}_{\text{sample}}$ ^[10,13], 连同经过 0° 起偏器后的入射光 Stokes 矢量 $\mathbf{S}_{\text{in}} = I_0 [1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$, 其中 I_0 为总光强, 带入上式, 并且考虑到探测器能够探测到的是 Stokes 矢量的第一个分量, 因此探测器探测到的光强为

$$I_{(r)} = \frac{I_0}{2} (1 + \sin \delta_{(r,V)} \sin X) \quad (2)$$

式中, PEM 的相位调制为 $X = X_0 \sin(2\pi f_0 t)$, X_0 为 PEM 相位调制幅值, f_0 为 PEM 谐振频率. 将式(2)中的 $\sin X = \sin[X_0 \sin(2\pi f_0 t)]$ 利用第一类贝塞尔级数展开得 $\sin X = 2 \sum_{2k-1} J_{2k-1}(X_0) \sin[(2k-1) \cdot 2\pi f_0 t]$, 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. 因此式(2)可以改写为

$$I_{(t)} = \frac{I_0}{2} \{1 + 2\sin \delta_{(\gamma, V)} [J_1(X_0) \sin(2\pi f_0 t) + J_3(X_0) \sin(6\pi f_0 t) + \dots]\} \quad (3)$$

1.2 基于 FPGA 数据处理

系统中 PEM 的驱动和 AD 的工作均由 FPGA 控制,信号直流项和倍频项在 FPGA 中完成提取.如图 2 所示,FPGA 提供 PEM 的驱动信号,并且控制 AD 采样的同时,在其内部产生一倍频的正弦和余弦参考序列.

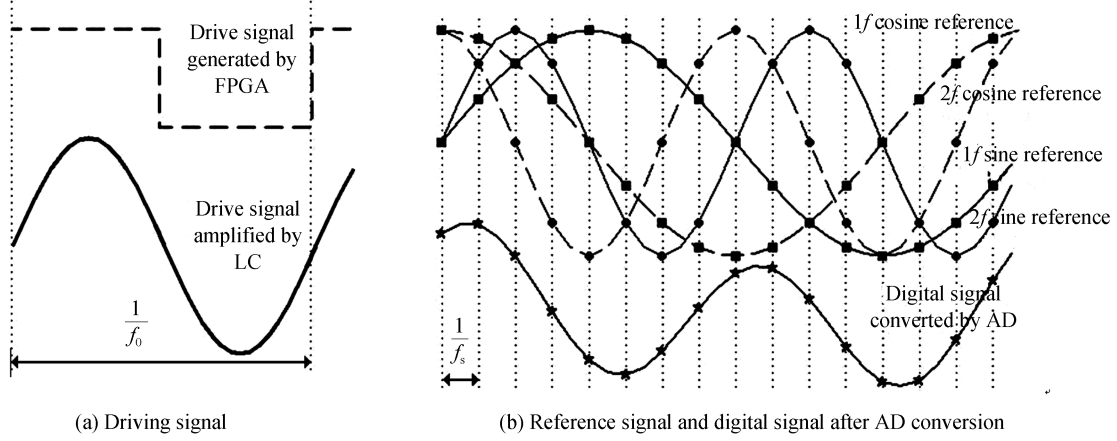


图 2 FPGA 控制 PEM 及数据处理原理

Fig.2 The principle of PEM control and data processing based on FPGA

设 FPGA 为 AD 设置的采样频率为 f_s , 则一个周期内对一倍频信号采样点数为 $N = f_s/f_0 (N \geq 3)$. 因此 q 个周期内对输入信号进行采样, 得到总的信号采样点数为 $M = N \times q$. 对输入信号 $I_{(t)}$ 进行 AD 转换后获得的数字信号序列为

$$I_{(k)} = K \frac{I_0}{2} \left\{ 1 + 2\sin \delta_{(\gamma, V)} \left[J_1(X_0) \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) + J_3(X_0) \sin\left(\frac{6\pi k}{N}\right) + \dots \right] \right\} \quad (k=0, 1, \dots, M-1) \quad (4)$$

式中, K 为探测器的光电转换系数. 对于式(4)的数字信号序列, 直接累加求和便可得到直流项

$$V_{DC} = \sum_{k=0}^{M-1} I_{(k)} = MK \frac{I_0}{2} \quad (5)$$

$I_{(k)}$ 与 FPGA 在内部 ROM 中存储的正弦参考序列 $R_{s(k)} = B \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right)$ 相乘, 并累加求和可得锁相的同向分量 S 为

$$S = \sum_{k=0}^{M-1} I_{(k)} R_{s(k)} = MB \frac{KI_0 J_1(X_0) \sin \delta_{(\gamma, V)}}{2} \cos \varphi - MB \frac{KI_0 J_1(X_0) \sin \delta_{(\gamma, V)}}{2} \cdot \sum_{k=0}^{M-1} \cos\left(\frac{4\pi k}{N} + \theta\right) = MB \frac{KI_0 J_1(X_0) \sin \delta_{(\gamma, V)}}{2} \cos \varphi \quad (6)$$

式中, φ 为调制信号与参考信号之间的相位延迟. 同理, 和余弦参考序列 $R_{c(k)} = B \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)$ 相乘, 再累加求和可得锁相的正交分量 C

$$C = \sum_{k=0}^{M-1} I_{(k)} R_{c(k)} = MB \frac{KI_0 J_1(X_0) \sin \delta_{(\gamma, V)}}{2} \sin \varphi \quad (7)$$

结合式(6)和(7)可以求得一倍频项和调制信号与参考信号之间的相位延迟

$$\begin{cases} V_{1f} = 2\sqrt{S^2 + C^2} = MKBI_0 J_1(X_0) \sin \delta_{(\gamma, V)} \\ \varphi = \arctan\left(\frac{C}{S}\right) \end{cases} \quad (8)$$

最后求解获得电光相位变化为

$$\delta_{(\gamma, V)} = \arcsin\left(\frac{\sqrt{S^2 + C^2}}{BJ_1(X_0)V_{DC}}\right) \quad (9)$$

将上式结合电光相位公式进一步求解待测晶体样品的电光系数.本文以测量铌酸锂(LiNbO₃)电光晶体的电光系数 γ_{22} 为例,选用沿 LiNbO₃ 电光晶体 x 轴方向施加电场的样品.在沿 x 轴电场作用下,LiNbO₃ 电光晶体沿晶体 x 轴和 y 轴的两个折射率主轴旋转 45°,并且大小发生改变^[14].入射光通过时,沿两个折射率主轴的分量产生的相位差为

$$\delta_{(\gamma,V)} = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{22} \frac{L_z}{L_x} V \quad (10)$$

式中 λ 为入射光在真空中的波长, n_0 为电光晶体施加电场前的折射率, 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, V 为给样品施加的直流电压.将式(9)与(10)联立,求解得到电光系数为

$$\gamma_{22} = \frac{\lambda L_x}{2\pi n_0^3 V L_z} \arcsin \left(\frac{\sqrt{S^2 + C^2}}{BJ_1(X_0)V_{DC}} \right) \quad (11)$$

FPGA 数字锁相输出的一倍频项数据与直流项数据一一对应,能够有效消除检测激光的光强不稳定性对测量造成的影响.此外,在 FPGA 中所有数据处理程序并行执行,所有数据处理都是同步运行,并且参考信号与调制信号同频,因此保证了数据处理的速度和准确度.

2 实验

为了验证本方案的可行性,按照原理图 1 搭建了电光系数测试系统,光源选用波长为 632.8nm 的 He-Ne 激光;起偏器和检偏器均为格兰泰勒偏振器;电光样品为 x 切 LiNbO₃ 晶片,晶片尺寸(L_x, L_y, L_z)为 4.62 mm×11.45 mm×31.10 mm,沿晶片光轴 z 方向通光,在晶片 x 方向上施加电场.PEM 选用通光晶体为熔融石英的八角对称状结构 PEM,谐振频率为 49.90 kHz;探测器为 Thorlabs 公司的硅基跨阻放大光电探测器 PDA10A.采用 Altera FPGA 芯片提供 PEM 驱动信号的同时,控制 12 位高精度 AD 的时钟采样频率,同时完成数字锁相获取 V'_{DC}, S, C 序列.

在计算机中编写 Labview 上位机程序,建立与 FPGA 的通信,实现通过上位机可视化输入调节 PEM 工作频率及驱动正弦电压幅值,调节驱动弹光调制幅值,接收 FPGA 完成的锁相数据 V'_{DC}, S, C .结合式(8)~(11)求解测量的电光系数数据,最后进行存储或显示.通过直流高压电源对电光样品施加 100 V 直流电压,并用示波器观察了 PEM 驱动信号和被调制后的光信号,信号波形记录如图 3 所示.

如图 3 所示,两通道波形分别为 PEM 驱动电压信号和经弹光调制后的光信号.PEM 的驱动信号为纯交流高压,驱动频率为 49.90kHz,实验中驱动电压峰峰值选择为 $V_{pp} = 59.6$ V,对应的 PEM 相位调制幅值为 $X_0 = 0.580$ rad,且贝塞尔级数 $J_1(0.580) =$

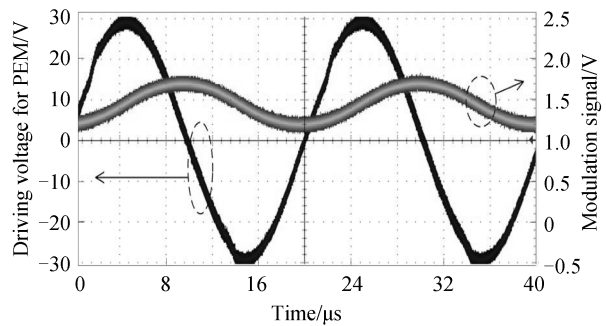
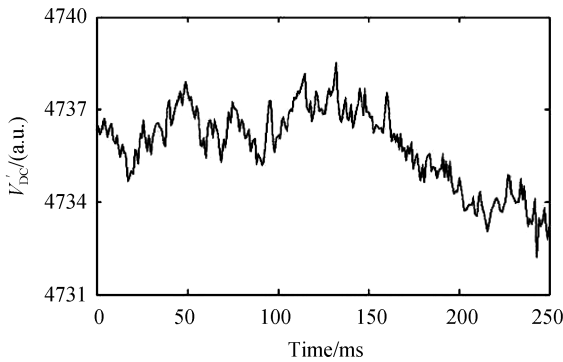
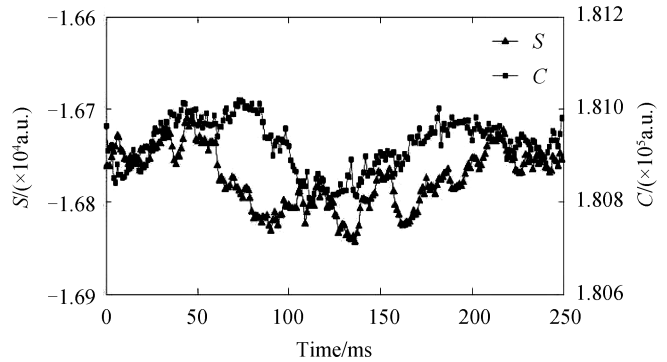


图 3 示波器显示信号图
Fig.3 Signal display on the oscilloscope



(a) DC term V'_{DC}



(b) The components S and C

图 4 FPGA 直接获取的数据
Fig.4 Direct acquisition data by FPGA

0.278.将 AD 的采样频率 f_s 设置为 3.2 MHz, 则一个周期内对一倍频信号采样点数为 $N=64$, 参考序列幅值 B 取 $B=512$, 并且每 50 个周期, 3200 个采样数据进行数字锁相得出一个数据点, 每数据点获取时间为 $t = \frac{3200}{3.2\text{MHz}} = 1 \text{ ms}$. 锁相数据 V_{DC}, S, C 输出如图 4 所示.

由图 4(b) 的数据根据式(8), 求解得到一倍频项和调制信号与参考信号之间的相位延迟如图 5 所示.

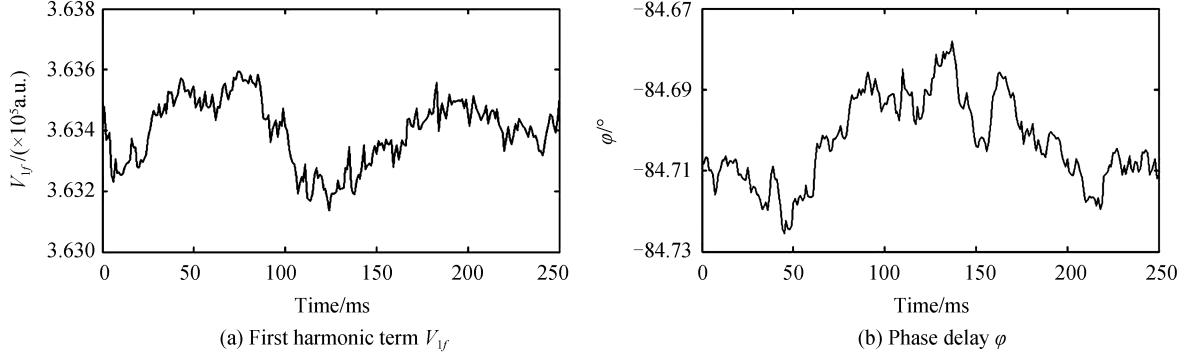


图 5 一倍频信号值及相位延迟

Fig.5 The value and phase delay of the first harmonic signal

将图 4(a) 和 (b) 的数据, 连同 $J_1(0.600) = 0.2867$, 电光样品参量 $L_x = 4.62 \text{ mm}, L_z = 31.10 \text{ mm}$ 和 $n_o = 2.29 (@632.8 \text{ nm})$, 直流电压 $V = 100 \text{ V}$ 带入式(11), 求解得到 LiNbO_3 样品电光系数 γ_{22} , 记录入图 6.

根据图(6), 电光系数测量结果为 $\bar{\gamma}_{22} = 3.414 \times 10^{-12} \text{ m/V}$, 标准偏差 $\sigma_{\gamma_{22}} = 0.0016 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 代表了本系统的重复度和灵敏度. 测量速率高达 1 ms/数据点 . 本系统测量得到的电光系数平均值与文献[15-16]报道的电光系数 ($\gamma_{22} = 3.40 \times 10^{-12} \text{ m/V}$) 相对偏差 0.4% .

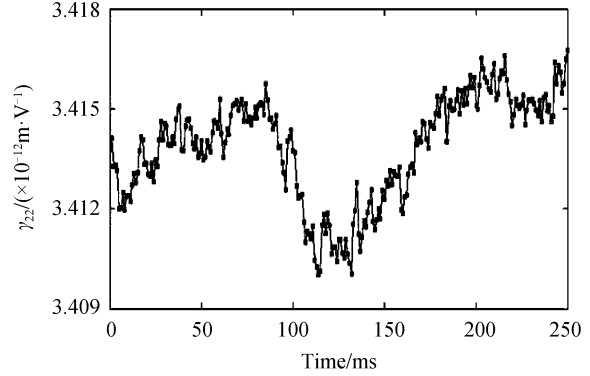


图 6 电光系数 γ_{22}

Fig.6 Electrooptic coefficient γ_{22}

3 讨论

为了对比说明, 将典型的几种晶体电光系数测量方法和弹光调制测电光系数方法进行总结, 并记录入表 1 中.

表 1 晶体电光系数测量方法比较

Table 1 Comparison of measurement methods for electro-optic coefficients of crystals

Measurement method	Sample	Relative deviation	Sensitivity ($\times 10^{-12} \text{ m/V}$)	Data acquisition time/s	Reference
Interferometric compensation	KDP γ_{63}	5%	0.1	10^2	[7]
Ellipometry technique	Poled polymer	-	1	10	[8]
Half wave voltage	ADP γ_{41}	1%	0.2	10^3	[9]
Photoelastic modulation	$\text{LiNbO}_3 \gamma_{22}$	2.3%	0.017	10^{-1}	[10]
Photoelastic modulation+Digital phase locking	$\text{LiNbO}_3 \gamma_{22}$	0.4%	0.0016	10^{-3}	This work

由表 1 可知, 弹光调制测电光系数方法较其他方法具有更高的测量灵敏度和更快的测量速率. 并且本文所采用方法获得了最高的测量灵敏度和测量速率, 这得利于弹光调制器工作控制和数字锁相均在同一个 FPGA 中完成, 参考信号与调制信号同频、同源, 有效降低了调制信号与参考信号不同步, 商业锁相放大器相敏稳定性有限等对测量结果造成的影响. 此外, 本文方法提高了系统的工业化集成度, 降低了系统成本, 为实现弹光调制测量晶体电光系数的智能系统提供了技术支持.

4 结论

本文将数字锁相技术应用于弹光调制测电光系数系统,实现直流项,一倍频项的同向分量和正交分量提取,进而在计算机中求解得出电光系数.本文对数据处理过程进行了详细的介绍,并对铌酸锂样品进行了测试,实验结果显示该系统重复度和灵敏度为 0.0016×10^{-12} m/V,测量速率为 1 ms/数据点.本文在弹光调制高速、高灵敏测晶体电光系数测量方案的基础上,根据 PEM 工作原理和调制信号特点,基于 FPGA 完成 PEM 工作控制的同时实现调制信号的数据处理,实现了目前灵敏度最高和测量速率最快的晶体电光系数测量.本方案有望设计实现高灵敏、快速、低成本和高集成的晶体电光系数测量智能系统.

参考文献

- [1] FIRBY C J, ELEZZABI A Y. A magnetoplasmonic electrical-to-optical clock multiplier[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **108**(5): 051111.
- [2] HU Yun, ZHAO Xue-qing, XUE Quan-xi, *et al.* ASE suppression in the high power excimer laser MOPA system based on electro-optical switch[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **22**(9): 70-76.
胡云, 赵学庆, 薛全喜, 等. 基于电光开关的高功率准分子激光 MOPA 系统 ASE 抑制[J]. 中国激光, 2013, **22**(9): 70-76.
- [3] PEI Li-yan, MA Jing, XU Can-hua, *et al.* Measurement of half-wave voltage of electro-optic crystal based on crystal wedge[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(9): 0912005.
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): 0912005.
- [4] LI Chang-sheng. Linear electrooptic and electrogyration intensity modulation using crystalline quartz[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 228-234.
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): 228-234.
- [5] YE C, LIU K, SOREFF R A, *et al.* A compact plasmonic MOS-based 2×2 electro-optic switch[J]. *Nanophotonics*, 2015, **4**(1): 261-268.
- [6] 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.
- [7] YIN Xin, SHAO Zong-shu. Interferometric compensating method (static) for measuring electro-optic coefficients of crystals[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 1986, **15**(3): 215-217.
尹鑫, 邵宗书. 干涉补偿法(静态)测量晶体的电光系数[J]. 人工晶体, 1986, **15**(03): 215-217.
- [8] XU Jian-dong, YANG Kun, LIU Shu-tian, *et al.* Ellipsometry techniques in poled polymer electrooptic coefficients measurements[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1995, **22**(9): 661-665.
徐建东, 杨昆, 刘树田, 等. 椭圆法测量极化聚合物的电光系数[J]. 中国激光, 1995, **22**(9): 661-665.
- [9] LI Zheng-dong, HUANG Xiang-jin, XIONG Ke-ming. Measurement of electro-optic coefficients of ADP[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2001, **30**(2): 163-166.
李征东, 黄祥金, 熊克明. ADP 晶体电光系数测量[J]. 人工晶体学报, 2001, **30**(02): 163-166.
- [10] WANG Shuang, WANG Zhi-bin, ZHANG Min-juan, *et al.* High sensitive measurement of the crystal electro-optic coefficient based on the photo-elastic modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **3**: 2-11.
王爽, 王志斌, 张敏娟, 等. 弹光调制高灵敏测量晶体电光系数[J]. 光学学报, 2017, **3**: 2-11.
- [11] WANG Guo-liang, LI Xiao, WANG Zhi-bin, *et al.* Design of high voltage resonant circuit based on the photoelastic modulator[J]. *Laser and Infrared*, 2014, **44**(6): 668-671.
王国梁, 李晓, 王志斌, 王艳超, 黄艳飞. 弹光调制高压谐振电路设计[J]. 激光与红外, 2014, **44**(6): 668-671.
- [12] AIJUN ZENG, FANYUE LI, LINGLIN ZHU, *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] 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.
- [14] LI Ke-wu, WANG Zhi-bin, ZHANG Rui, *et al.* LiNbO₃ transverse electro-optical modulation characteristics for light pass along optical axis[J]. *Optic and Precision Engineering*, 2015, **23**(5): 1227-1232.
李克武, 王志斌, 张瑞, 等. 沿光轴通光的 LiNbO₃ 的横向电光调制特性[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(5): 1227-1232.
- [15] 陈纲, 廖理儿, 郝伟. 晶体物理学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [16] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.