

用于旋光检测的高频率小延迟量弹光调制器设计

吕健宁 张瑞 薛鹏 郭浩杰 徐承雨 王志斌

Design of high frequency and small delay elastic modulator for optical rotation detection

LYU Jianning, ZHANG Rui, XUE Peng, GUO Haojie, XU Chengyu, WANG Zhibin

引用本文:

吕健宁, 张瑞, 薛鹏, 等. 用于旋光检测的高频率小延迟量弹光调制器设计[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 676–681. DOI: 10.5768/JAO202546.0303003

LYU Jianning, ZHANG Rui, XUE Peng, et al. Design of high frequency and small delay elastic modulator for optical rotation detection[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 676–681. DOI: 10.5768/JAO202546.0303003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0303003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

弹光调制器延迟量幅值分布测量

Measurement of delay amplitude distribution of elastic light modulator

应用光学. 2025, 46(2): 404–411 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0203006>

100 kHz弹光调制器多功能调制仿真

Multi-function modulation simulation of 100 kHz photoelastic modulator

应用光学. 2024, 45(1): 63–69 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0101009>

利用反馈光路的弹光调制器定标及稳定控制

Calibration and stability control for photoelastic modulator using feedback optical path

应用光学. 2022, 43(5): 935–942 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0503002>

弹光调制器动态参数测量与高效驱动匹配研究

Dynamic parameter measurement and efficient drive matching method for PEM

应用光学. 2024, 45(2): 415–421 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0203003>

基于双弹光的椭偏参量稳定测量系统设计

Design of ellipsometry parametric stable measurement system based on double-elastic light

应用光学. 2025, 46(2): 372–379 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0203002>

基于空间光调制器的光束大角度扫描技术研究

Large angle range beam scanning control based on crystal spatial light modulator

应用光学. 2020, 41(4): 816–821 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409803>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0676-06

引用格式: 吕健宁, 张瑞, 薛鹏, 等. 用于旋光检测的高频率小延迟量弹光调制器设计 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 676-681.

LYU Jianning, ZHANG Rui, XUE Peng, et al. Design of high frequency and small delay elastic modulator for optical rotation detection[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 676-681.



在线阅读

用于旋光检测的高频率小延迟量弹光调制器设计

吕健宁^{1,4}, 张 瑞^{1,4}, 薛 鹏^{2,4}, 郭浩杰^{1,4}, 徐承雨^{1,4}, 王志斌^{3,4}

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051; 3. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051; 4. 中北大学 山西省智能微波光电技术创新中心, 山西 太原 030051)

摘 要: 针对弹光调制器 (photoelastic modulator, PEM) 在高精度旋光检测中对小延迟量测量的需求, 提出了一种旋光检测高频小延迟 PEM 方案。通过 COMSOL (COMSOL multiphysics) 有限元仿真模拟驻波模式下的谐振频率在 120 kHz 附近的 PEM, 进行振动模态分析和尺寸确定, 并设计加工高频小延迟 PEM 样品。对 PEM 样品进行实验验证, 通过 FPGA (field programmable gate array) 提取出 1~4 倍频信号幅值作为主要研究对象, 实现了小延迟 PEM 相位延迟幅值的自动计算以及待测旋光角度测量。实验结果表明: 测量系统的高频小延迟 PEM 频率达 120.32 kHz, 相位延迟幅值平均值为 0.11 rad, 重复性为 0.000 7, 相位延迟幅值较传统单 PEM 减小 2.9 倍, 对微弱高精度旋光检测具有较大的现实意义。

关键词: 弹光调制; 高频率; 小延迟量; 旋光检测

中图分类号: TN202

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0303003

Design of high frequency and small delay elastic modulator for optical rotation detection

LYU Jianning^{1,4}, ZHANG Rui^{1,4}, XUE Peng^{2,4}, GUO Haojie^{1,4}, XU Chengyu^{1,4}, WANG Zhibin^{3,4}

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. School of Instrumentation and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China; 4. Shanxi Intelligent Microwave Photoelectric Technology Innovation Center, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the demand of small delay measurement of photoelastic modulator (PEM) in high-precision optical rotation detection, a high frequency and small delay PEM scheme for optical rotation detection was proposed. COMSOL (COMSOL multiphysics) finite element simulation was used to simulate the vibration mode analysis and size determination of a 120 kHz PEM in standing wave mode, and to design and process high-frequency small-delay PEM samples. It was verified by experiments, and the amplitudes of one to four octave signals were extracted by field programmable gate array (FPGA) as the main research object, which realized the automatic calculation of small-delay PEM phase delay amplitude and the measurement of rotation angle. The experimental results show that the PEM frequency of the measuring system is 120.32 kHz, the average phase delay amplitude is 0.11 rad, and the repeatability is 0.000 7. The amplitude of phase delay is 2.9 times smaller than that of traditional single PEM, which has great practical

收稿日期: 2024-06-07; 修回日期: 2024-08-29

基金项目: 国家自然科学基金 (62105302)

作者简介: 吕健宁 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事弹光调制器、旋光检测等研究。E-mail: 118834163230@163.com

通信作者: 张瑞 (1987—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电探测、光谱偏振成像、光谱椭圆偏测量等研究。

E-mail: zhangrui@nuc.edu.cn

significance for weak and high-precision optical rotation detection.

Key words: elastic light modulation; high frequency; small delay; optical rotation detection

引言

由于物质分子的不对称性, 线偏振光在通过某种透明物质后, 存在着使线偏振光的偏振面旋转一定角度的能力, 这种现象叫做旋光现象。如通过石英、葡萄糖溶液、淀粉、施加磁场的旋光玻璃等所产生的旋光现象被广泛研究^[1-5]。旋光通常是由圆双折射效应产生的^[6-7]。例如, 在光泵磁强计中碱原子集合感知磁场, 然后导致线偏振探测光的磁光旋转。光学旋转检测系统 (ORDS) 由 2 个透射轴正交的偏振器组成, 第 2 个偏振器后的光强与光旋转角度成正比。近年来, 随着原子陀螺、磁强计等旋光测量技术的快速发展, 对旋光频率和延迟量的测量提出了更高的要求^[8-9]。

早期旋光角度测量使用消光法, 随后研究者们相继提出了声光调制、电光调制、磁光调制和弹光调制等检测方法^[10-12]。由于弹光调制器具有高灵敏度、宽光谱范围、大通光孔径、高调制频率等优势^[13], 使得弹光调制技术在高频率和小延迟量测量领域得到了较好的发展与应用。

目前, 王志斌课题组提出的基于弹光调制的高灵敏旋光测量中, 使用了单个压电石英驱动的长棒状 PEM, 通光晶体为熔融石英, 谐振频率为 49.86 kHz, 最终实现了较高灵敏度的旋光测量^[14]。随后又提出了一种基于弹光调制的微小旋光度测量系统, 主要应用谐振频率为 49.95 kHz 的弹光调制器, 采用新型旋光度测量方法实现了高分辨率旋光度测量^[15]。对于低频率的弹光调制器, 存在着当电压幅值降低到某个阈值时, 调制信号会淹没于噪声信号中的问题。所以在提高旋光测量精度和灵敏度的同时, 需要考虑如何实现高频率弹光调制和降低延迟量, 这对后续旋光测量领域的发展很有意义^[16-17]。

针对以上需求, 我们设计并加工了一种高频小延迟量八角形 PEM, 通过 LC 谐振电路提供给 PEM 足够大的电压驱动信号, FPGA 与上位机通过数字锁相来获得对应倍频信号幅值, 实现了对旋光角度和小延迟量的测量。通过实验结果验证了系统的可行性以及是否满足需求。

1 旋光测量原理

本文设计的光学旋光测量系统示意图如图 1

所示。测试系统由激光光源、0°起偏器、旋光样品、0°四分之一波片、45°弹光调制器、90°检偏器、探测器、弹光驱动控制及多路数字锁相放大电路和计算机构成。

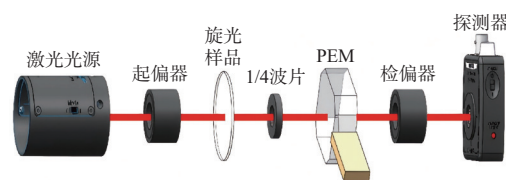


图 1 旋光测量光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical rotation measurement

以 x 轴方向为参考 0°方向, 光源的光依次通过 0°起偏器、待测旋光样品、0°1/4 波片、45°高频小延迟弹光调制器、90°检偏器和探测器构成测量光路。根据弹光驱动控制及多路数字锁相放大电路提供的 PEM 频率信号, 数字锁相电路对探测器获得的调制信号进行锁相放大, 最后通过计算机数据处理, 实时获得 PEM 的相位延迟幅值, 进而精确获得待测旋光样品的旋光角度。具体方案如下:

光源激光在经过起偏器、待测旋光样品后发生偏转, 样品旋光方向为左旋时 θ 取正, 右旋时取负。旋光用 Stokes 矢量法可以表示为 $\mathbf{S}=[s_0 s_1 s_2 s_3]^T$ 。

$\mathbf{S}$ 经过后续测量光路调制后的 Stokes 参量 $\mathbf{S}_{\text{out}}$ 为

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

0°四分之一波片、45°PEM 调制器、90°检偏器的穆勒矩阵分别为

$$\mathbf{M}_W = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{\text{PEM}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & 0 & -\sin \delta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin \delta & 0 & \cos \delta \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_A = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

式中: $\delta = \delta_0 \sin \omega t$, δ_0 为 PEM 的调制幅值, δ 为 PEM 的调制相位, $\omega = 2\pi f$ 为 PEM 的调制驱动圆频率,

f 为 PEM 的调制驱动角频率^[18]。

通过系统中的探测器只能得到 S_{out} 中的 I_{out} ，因此将式(2)带入式(1)，可得探测器探测光强 I_{out} 为

$$I_{\text{out}} = \frac{I_{\text{in}}}{2} \left[(\tan^2 \theta + 1) + \cos \delta (\tan^2 \theta - 1) - 2 \sin \delta \tan \theta \right] \quad (3)$$

利用第一类贝塞尔函数将式(3)展开为

$$I_{\text{out}} = \frac{I_{\text{in}}}{2} \left[(\tan^2 \theta + 1) - 4J_1(\delta_0) \tan \theta \sin \omega t + 2J_2(\delta_0) (\tan^2 \theta - 1) \cos 2\omega t - \right. \\ \left. 4J_3(\delta_0) \tan \theta \sin 3\omega t + 2J_4(\delta_0) (\tan^2 \theta - 1) \cos 4\omega t + \dots \right] \quad (4)$$

分析式(4)可知，等式右侧只展开到4倍频项信号，分别为常数项以及参数相关项的1、2、3、4倍频信号。测量系统通过FPGA与LC谐振放大电路共同产生的驱动电压，使PEM正常工作并达到谐振频率状态。此时，FPGA控制AD采样频率，将AD转换后的检测光强数字信号序列输入FPGA中，采用数字锁相处理获得PEM的信号幅值 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 为

$$\begin{cases} V_1 = 4J_1(\delta_0) \tan \theta \\ V_2 = 2J_2(\delta_0) (\tan^2 \theta - 1) \\ V_3 = 4J_3(\delta_0) \tan \theta \\ V_4 = 2J_4(\delta_0) (\tan^2 \theta - 1) \end{cases} \quad (5)$$

在实验中已知 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 幅值的情况下，分析式(5)可以得到 X 和 Y 这2个幅值的比值为

$$\begin{cases} X = \frac{V_3}{V_1} = \frac{J_3(\delta_0)}{J_1(\delta_0)} \\ Y = \frac{V_2}{V_1} = \frac{J_2(\delta_0) (\tan^2 \theta - 1)}{2J_1(\delta_0) \tan \theta} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)中的 X ，可以求得调制幅值 δ_0 ，在已知信号幅值和调制幅值的情况下，通过等式 Y 即可求得旋光角度 θ 。

2 弹光调制器理论分析与仿真

PEM 结构简单并且调制效率高，八角形(Series II)光学元件在给定厚度下更加有效率，因此在红外波段有更多的优势。本文采用单压电晶体八角对称结构，具有良好的通光孔径与静态残余双折射，如图2所示。

石英晶体的机械性能具有稳定性，温度变化也不能使其压电系数与介电常数发生较大的变化，并且石英晶体有着良好的单一振动模态，所以常用作 PEM 的制作材料。压电石英晶体选用具有特定切型以及单一振动模态的压电石英晶体，本文采用(xyt)-18.5°切型。弹光晶体的材料为熔融石英晶体，优点是纯度高且热稳定性较好。在相同的电压驱动下，熔融石英晶体的谐振频率更高，如

图3(a)所示。因此，本文采用的八角形弹光晶体具有良好的对称性，谐振时也能达到较高的频率，如图3(b)所示。

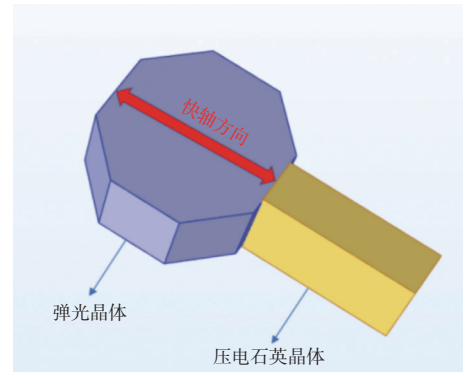
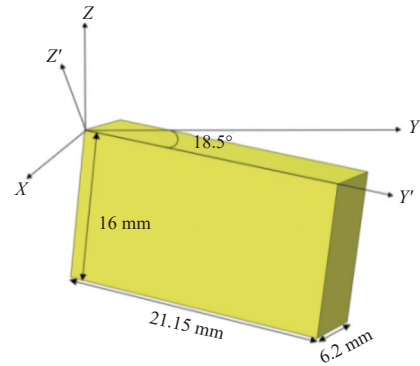
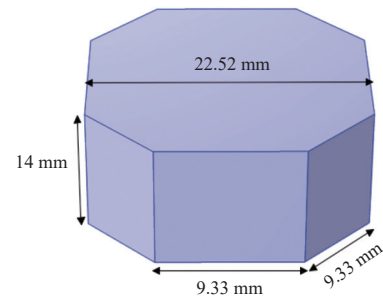


图2 120 kHz PEM 结构图

Fig. 2 Structure diagram of 120 kHz PEM



(a) 压电石英晶体



(b) 正八角形弹光晶体

图3 PEM 组成结构

Fig. 3 Composition structure of PEM

对于 $(xyt)-18.5^\circ$ 切型的压电石英晶体, 在交流电压驱动下, 其振动频率为

$$y = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{1}{\rho_1 S_{22}}} \quad (7)$$

式中: L 为压电石英晶体的长度; 一般情况下, 压电石英晶体工作在基频时, $n=1$; ρ_1 为压电石英晶体的密度, $\rho_1=2.684 \text{ g/cm}^3$; S_{22} 为压电石英晶体的弹性柔顺系数, $S_{22}=1.4454 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ 。通过频率公式(7)可计算得出 120 kHz 频率时压电石英晶体长度为 21.15 mm, 宽度主要与弹光晶体的厚度有关, 经过 COMSOL 模型的建立与模拟后, 宽度与高度分别确定为 16 mm 与 6.2 mm。

在压电驱动器驱动下, 对应弹光晶体的谐振频率为

$$f = \frac{1}{2D} \sqrt{\frac{P}{\rho_2(1+\varepsilon)}} \quad (8)$$

式中: P 为杨氏模量, $P=72.6 \times 10^9 \text{ Pa}$; ρ_2 为熔融石英晶体密度, $\rho_2=2.201 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; ε 为泊松比, $\varepsilon=0.16$; D 为弹光晶体的对边距离。通过式(8)计算可得在弹光晶体的谐振频率为 120 kHz 时, 弹光晶体的对边距离为 22.52 mm。由于本实验中所用弹光晶体为正八角形弹光晶体, 所以各短边长经过计算可确定为 9.33 mm。弹光晶体的厚度则根据低延迟量的需求, 经过 COMSOL 模拟后确定为 14 mm。

当压电石英晶体的振动频率和弹光晶体的振动频率一致时, PEM 处于共振状态, 调制效率最高。根据振动频率公式(7)推导可得, PEM 工作在 120 kHz 频率下压电石英晶体长度为 21.15 mm。为了验证 PEM 的共振频率, 利用 COMSOL 进行仿真^[19]。首先将压电驱动器参数设置为理论参数值, 利用特征频率求解器, 求解出在理论压电驱动器长度下的特征频率值为 120.45 kHz。可以看出, 理论值和仿真值存在一定偏差。

经过上述分析可知, 在 120 kHz 频率下, 压电驱动器的长度为 21.15 mm, 最终得到 120 kHz 谐振频率下 PEM 应力分布仿真图和位移分布仿真图, 如图 4(a)和图 4(b)所示。

通过图 4(a)可以看出, 此时 PEM 表面应力分布高度对称, 并且压电驱动器内部产生周期性稳定驻波, 证明此时 PEM 已经达到谐振状态, 同时可以看出, 在弹光晶体中心处应力最大。通过图 4(b)可以看出, PEM 在发生位移时, 边缘处位移变化较大, 中心处位移变化最小。

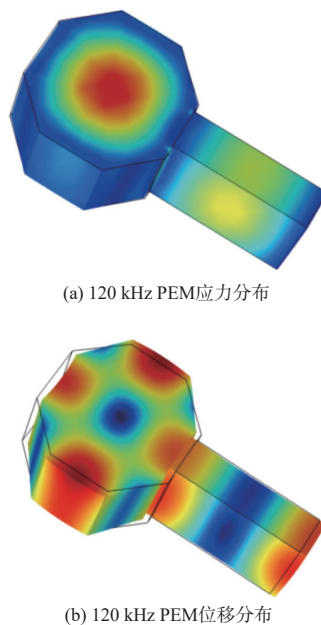


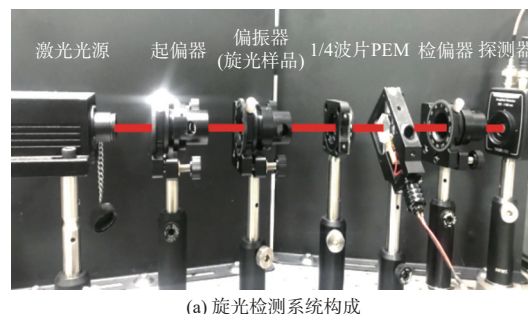
图 4 120 kHz PEM 稳态仿真结果

Fig. 4 Simulation results of 120 kHz PEM steady state

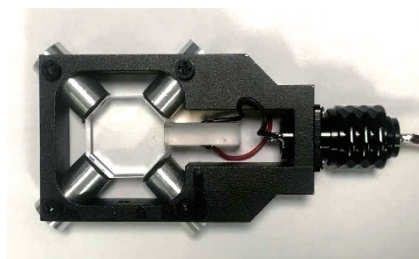
通过以上分析可知, 在弹光晶体中心处应力最大, 位移变化最小。当光从弹光晶体中心通过时, 调制效率可达到最大。

3 旋光测量实验与结果分析

旋光检测系统实验平台如图 5 所示。图 5(a)所示实验装置中光源最终选择了 632 nm 波长 He-Ne 激光器, 使用 Thor-labs 格兰泰勒偏振器作为系



(a) 旋光检测系统构成



(b) 高频小延迟量PEM

图 5 旋光检测系统实验平台

Fig. 5 Experimental platform of optical rotation detection system

统中的起偏器和检偏器,消光比优于 100 000 : 1。实验中旋光样品将由偏振器代替,自主设计并加工的高频小延迟 PEM 如图 5(b)所示,晶体材料选用熔融石英,谐振频率为 120.32 kHz。探测器选择了硅基雪崩光电探测器,并设计制作了弹光驱动控制及多路数字锁相放大电路。直流项信号和倍频项均由 FPGA 电路输入计算机,经计算机数据处理后输出相位延迟幅值与旋光角度。

根据式(6)可知,三阶贝塞尔系数和一阶贝塞尔系数比值在 0.001~0.2 之间为线性变化,所以对于 2、4 倍频幅值的比值,可以通过贝塞尔函数进行反解得到拟合函数,根据实时的 2、4 倍频幅值的比值确定对应的相位延迟幅值。

在确保搭建的实验装置满足要求后,分别向 FPGA 主控板与 LC 电压驱动电路提供电压,保证调制信号不会淹没于噪声信号中。在检查电路无异常问题后,运行 FPGA 与上位机程序,使 LC 电压驱动电路能够使 PEM 处于驱动状态并达到谐振频率。经过 FPGA 数字锁相与上位机的下发、采集与计算后,可在上位机程序页面实时得到相位延迟幅值与旋光角度。此时,为实现低延迟量的测量,在上位机程序页面实时调节电压占空比值,在输入一个合适的占空比值后,将得到正确且较小的相位延迟幅值 δ 。实验中每一次测量间隔时间为 1 s,共测量近 900 组数据,并按下式计算测量的重复性精度:

$$A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} \quad (9)$$

式中: n 为实际测量次数; d_i 为每次测量结果; $\bar{d}$ 为多次测量的平均值。

经过测量与计算后,得到的相位延迟幅值如图 6 所示。

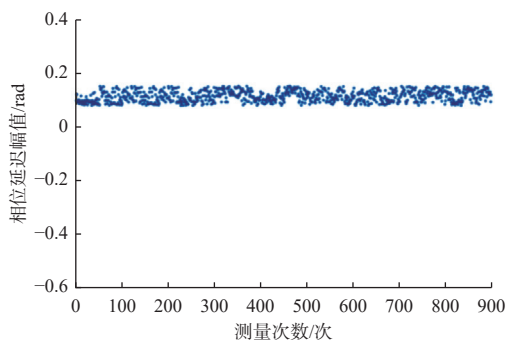


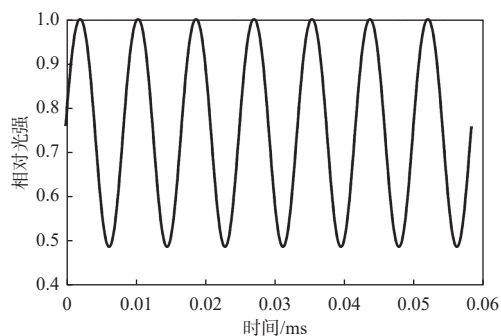
图 6 相位延迟幅值测量结果

Fig. 6 Delay phase amplitude measurement results

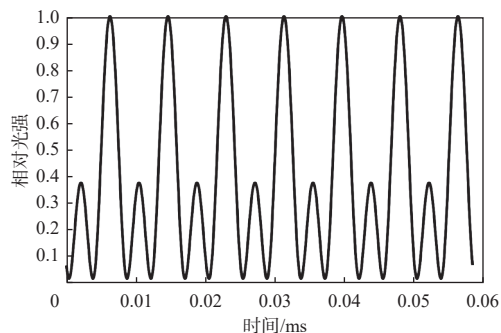
此时,提供给 LC 电压驱动电路的电压为 15 V,通过上位机程序页面修改的占空比值为 0.28。经过数据计算可知,相位延迟幅值平均值为 $\delta=0.11$ rad,方差为 0.000 4 rad²,重复性为 0.000 7。

传统的单弹光调制系统的相位延迟幅值为 $\delta=0.32$ rad,相比之下,本系统的相位延迟幅值减小了 2.9 倍。方差与重复性精度较小,符合实验要求,测量的数据具有有效性。

我们在搭建实验装置的同时,使用上位机实时显示由式(6)计算的延迟量和旋光角度,谐振频率则通过观察示波器频率确定,确保示波器调制信号的频率与上位机下发频率一致。示波器采集的波形如图 7 所示。图 7(a)为旋光角度为 0 时的调制信号,图 7(b)为代表旋光样品的偏振器旋转一定角度后的调制信号,此时弹光晶体的谐振频率为 120.32 kHz。



(a) 未经过旋光样品的调制信号



(b) 经过旋光样品后的调制信号

图 7 检测激光经过光路系统后的调制信号

Fig. 7 Modulated signals of detected lasers after passing through optical path system

4 结论

本文提出一种旋光检测高频小延迟 PEM 方案,设计并加工了高频小延迟 PEM,建立了旋光测量系统实验平台,再应用电压驱动电路、FPGA 与上位机共同实现了对谐振频率与延迟量的实时测

量。测量结果表明,本系统高频小延迟 PEM 的谐振频率为 120.32 kHz,延迟量平均值为 0.11 rad,测量重复性为 0.000 7。与传统弹光调制旋光测量系统进行了比较,验证了装置的有效性。本文实现了高频小延迟量的 PEM 设计,为磁强计和原子陀螺等旋光测量研究提供了参考。

参考文献:

- [1] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 334-360.
YU Daoyin, TAN Hengying. Engineering optics [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 334-360.
- [2] 邢敏钰, 冉淦侨, 殷红, 等. 旋光法快速测定 D-阿洛酮糖的实验研究[J]. 化学试剂, 2020, 42(7): 822-827.
XING Minyu, RAN Ganqiao, YIN Hong, et al. Experimental study on rapid determination of D-aloxone by polarimetry [J]. Chemical Reagent, 2020, 42(7): 822-827.
- [3] 彭云梦. 基于 ARM 的旋光法甜菜糖度快速测量仪研制[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2021.
PENG Yunmeng. Development of a fast measuring instrument for sugar content of beet with optical rotation method based on ARM [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2021.
- [4] PENG J, HOU J Y, XIAO J X, et al. Influence of solvent properties on the measurement accuracy of specific rotation of chiral molecular solutions based on photonic spin Hall effect[J]. Physica Status Solidi (B), 2023, 260(6): 220614.
- [5] SHANG H N, ZHOU B Q, QUAN W, et al. Measurement of rubidium vapor number density based on Faraday modulator[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(33): 5106.
- [6] SELTZER S J. Developments in alkali-metal atomic magnetometry[D]. Princeton, USA: Princeton University, 2008.
- [7] BUDKER D, GAWLIK W, KIMBALL D F, et al. Resonant nonlinear magneto-optical effects in atoms[J]. Reviews of Modern Physics., 2022, 74(4): 1153-1201.
- [8] YANG Y, CHEN D, JIN W, et al. Investigation on rotation response of spin-exchange relaxation-free atomic spin gyroscope[J]. IEEE Access, 2019, 7: 148176-148182.
- [9] CAO L, TANG J J, ZHANG Y H, et al. Signal-enhanced spin-exchange relaxation-free atomic magnetometer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 353: 114247.
- [10] XING L, FU Y, ZHAI Y Y, et al. Optical rotation detection method based on acousto-optic modulation in an atomic spin co-magnetometer[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(2): 025112.
- [11] ZENG A, LI F, ZHU 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.
- [12] LIN J F. Glucose concentration measurement using an electro-optically modulated circular polariscope[J]. Journal of Modern Optics, 2009, 56(8): 992-999.
- [13] 武燕婷, 熊伟, 李超波. 光弹调制器研究综述及原理验证[J]. 压电与声光, 2021, 43(3): 352-358.
WU Yanting, XIONG Wei, LI Chaobo. Research review and principle verification of photoelastic modulators[J]. Piezoelectricity and Acoustooptic, 2021, 43(3): 352-358.
- [14] 李克武, 王志斌, 陈友华, 等. 基于弹光调制的高灵敏旋光测量[J]. 物理学报, 2015, 64(18): 293-298.
LI Kewu, WANG Zhibin, CHEN Youhua, et al. Highly sensitive optical rotation measurement based on elastic optical modulation[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(18): 293-298.
- [15] 谭绪祥, 王志斌, 张瑞, 等. 基于弹光调制的微小旋光度测量系统设计与实现[J]. 工业技术创新, 2015, 2(4): 423-428.
TAN Xuxiang, WANG Zhibin, ZHANG Rui, et al. Design and implementation of micro-rotatory measurement system based on elastic light modulation[J]. Industrial Technology Innovation, 2015, 2(4): 423-428.
- [16] PEI H, QUAN W, YUAN L, et al. Real-time in situ quantum feedback control of electron spin in atomic spin gyroscopes[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-9.
- [17] JPENG J, XU A N, YIN Y. Measurement of relaxation mechanism for the spin-exchange relaxation-free magnetometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(2): 1333-1339.
- [18] 张瑞, 王志斌, 李晓, 等. 单弹光调制傅里叶偏振光谱测量研究[J]. 应用光学, 2014, 35(1): 95-99.
ZHANG Rui, WANG Zhibin, LI Xiao, et al. Spectropolarimeter measurement based on photoelastic-modulator and Fourier transform[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(1): 95-99.
- [19] 刘燕霖, 张瑞, 薛鹏, 等. 100 kHz 弹光调制器多功能调制仿真[J]. 应用光学, 2024, 45(1): 63-69.
LIU Yanlin, ZHANG Rui, XUE Peng, et al. Multi-function modulation simulation of 100 kHz photoelastic modulator[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(1): 63-69.