

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107779

保偏光纤耦合型铌酸锂晶体工频强电场传感器*

张元英¹, 张家洪^{1,2}, 李英娜^{1,2}, 雷鸿毅¹

(1. 昆明理工大学信息工程与自动化学院 昆明 650500; 2. 云南省计算机应用技术重点实验室 昆明 650500)

摘要:随着我国特高压技术的发展,工频强电场的测量变得越来越重要。为了适应工频强电场时域测量的需要,基于Pockels效应,设计并研制了一种保偏光纤耦合型铌酸锂晶体工频强电场传感器。通过保偏光纤准直器耦合进行光输入和光输出,避免了起偏器、1/4波片等分离光学元件的使用,将传感器的光耦合效率提高到了66.7%,并且通过将输入保偏光纤准直器前端1/2拍长的保偏光纤扭转90°,可将传感器的静态工作点设置为 $\pi/2$,从而使传感器工作在近线性区。使用工频强电场对传感器进行测试得出:传感器的线性可测范围为10.5~527 kV/m,线性相关系数为0.998 6,线性动态范围为34 dB。相比于现有的铌酸锂晶体强电场传感器,研制的传感器具有结构简单紧凑、耦合效率高优点,为工频强电场的时域测量提供了一种新的方案。

关键词: 强电场测量; Pockels效应; 保偏光纤耦合; 工频强电场传感器; 静态工作点

中图分类号: TH744 TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Polarization-maintaining fiber coupling type LiNbO₃ intensive power frequency electric field sensor

Zhang Yuanying¹, Zhang Jiahong^{1,2}, Li Yingna^{1,2}, Lei Hongyi¹

(1. Faculty of Information and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Computer Technology Application, Kunming 650500, China)

Abstract: With the development of ultra high-voltage technology in our country, the measurement of intensive power frequency electric field has become more and more important. In order to suit the measurement requirement of the intensive power frequency electric field, based on the Pockels effect, a polarization-maintaining fiber coupling type lithium niobate crystal intensive power frequency electric field sensor is designed, fabricated and experimentally investigated. The optical input and output of the sensor are carried out through the coupling of the polarization-maintaining fiber (PMF) collimators, which avoids the use of polarizer, 1/4 wave plate and other separated optical components. As a result, the optical coupling efficiency of the sensor is improved to 66.7%. In addition, through twisting the PMF at 1/2 beat length in the front end of the input PMF collimator by 90°, the static operating point of the sensor can be set to $\pi/2$, which makes the sensor work in the nearly linear region. The intensive power frequency electric field was used to test the input/output characteristics of the sensor. It is concluded that the linear measurable range of the sensor is 10.5~527 kV/m, the linear correlation coefficient is 0.998 6 and the linear dynamic range is 34 dB. Compared with the existing lithium niobate crystal intensive electric field sensor, the sensor developed has the advantages of simple and compact structure, and high coupling efficiency, which provides a new solution for the measurement of power frequency intensive electric field in the time domain.

Keywords: intensive electric field measurement; Pockels effect; polarization-maintaining fiber (PMF) coupling; intensive power frequency electric field sensor; static working point

收稿日期: 2021-04-19 Received Date: 2021-04-19

* 基金项目: 国家自然科学基金(61765009, 61962031)、云南省应用基础研究(2018FB106)项目资助

0 引言

根据我国电力系统以及电力负荷分布状况,采用特高压输电在技术、经济上更为合理,可以更好的推进“西电东送”战略的实施。但是特高压等级的输电导线和变电站周围产生的强电场会对人体健康与生态环境造成不良影响^[1],精确测量该环境中的工频强电场就显得尤为重要。传统的电磁式和电容分压式电场传感器^[2]使用的金属探头会干扰被测电场的分布,且只能测量电场强度数值的大小,无法测量该区域内电场的时域波形。新型光学电场传感器不仅克服了传统电场传感器的以上缺点,还具有绝缘性好、抗电磁干扰能力强、响应速度快等优点,可以实现外部强电场时域波形的精确测量^[3]。

自从1893年普克尔斯(Pockels)发现电光效应以来,利用光波导或者块状电光晶体实现外部电场的时域测量成为了研究的热点。从2006年~2020年,清华大学、电子科技大学等高校就在集成光学电场传感器的扩宽测量频率^[4-5]、优化静态工作点设置^[6-7]、增加可测电场维度^[8]等方面不断地做着研究。虽然集成光学电场传感器具有灵敏度高、体积小等优势,但是传感器的制作工艺复杂、成本相对较高。相比于集成光学电场传感器,基于Pockels效应研制的块状晶体光学电场传感器具有制作容易、适用高场强测量等优点^[9]。早在1982年,东京大学的Hidaka等^[10]通过具有电光效应的光学元件观察到了外部电场的快速变化。1999年,该团队^[11]研制了一种采用纵向调制布置的块状晶体光学电场传感器,在直流到116 MHz的宽频带内,可测50 kV的高压。从2007年到2012年,华盛顿海军研究实验室的Garzarella等^[12-13]利用块状铌酸锂晶体光学电场传感器进行了电场传感过程中提高灵敏度、最佳晶体几何、最佳晶体取向的分析。2013年,Kumada等^[14]在纵向调制的基础上利用双波长、双激光系统设计的块状铌酸锂晶体光学电场传感器可以实现直流到GHz范围内高达正负450 kV/m的电场测量。2020年,Choi等^[15]为了克服块状铌酸锂晶体光学电场传感器半波电场对最大可测电场的限制,采用极坐标的方法对采集到的 $\cos(\pi V/V_\pi)$ 和 $\sin(\pi V/V_\pi)$ 的数据进行分析,提高了电场的测量范围。在国内,2001年,北京航空航天大学Li等^[16]基于双横向克尔效应设计了电光晶体乘法器并应用于铌酸锂晶体光学电场传感器的设计中,令传感器在不附加1/4波片的条件下实现外部电场的线性测量。2018年到2020年,重庆大学的Yang等^[17-18]使用单模光纤准直器、起偏器、铌酸锂晶体、检偏器和1/4波片研制出可在-10℃~50℃下使用的铌酸锂晶体光学电场传感器,随后通过在传感器中加入旋转的接地电极作为直流电场转换装置,实现了直流、交流混合

电场的测量。但是国内外设计的块状铌酸锂晶体光学电场传感器,利用起偏器、检偏器完成光路干涉;使用1/4波片或者复杂的光路设计^[16]实现静态工作点的设置,这些不仅增加了传感器的制作难度,也降低了光路的耦合效率。

本文研制了一种保偏光纤(polarization maintaining fibre, PMF)耦合型铌酸锂晶体(LiNbO₃, LN)工频强电场传感器,传感单元由保偏光纤准直器与铌酸锂晶体制成,结构简单紧凑,同时提高了耦合效率。此外,通过保偏光纤的扭转可以方便地将传感器的静态工作点设置为 $\pi/2$,减少1/4波片的使用。最后搭建了工频强电场实验测试系统,完成了传感器在工频强电场下的实验测试。

1 传感系统原理及设计

1.1 传感器工作原理

传感器结构如图1所示,由输入保偏光纤准直器、铌酸锂晶体、输出保偏光纤准直器组成,其中输入、输出保偏光纤准直器与晶体透光轴(z轴)保持平行。

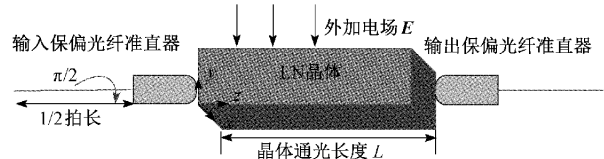


图1 传感器结构

Fig. 1 Sensor structure

根据铌酸锂晶体的电光效应,沿z方向入射到晶体的偏振光,经过y方向电场的相位调制后,引起的相位差 $\Delta\varphi_E$ 为:

$$\Delta\varphi_E = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n l = \frac{2\pi}{\kappa\lambda} n_0^3 r_{22} E L \quad (1)$$

式中:L为晶体透光长度;E为外加电场强度; λ 为入射光波长; n_0 为o光的折射率; r_{22} 为铌酸锂晶体的电光系数; κ 为铌酸锂晶体外部电场与内部电场的比值^[12]。令两束光波产生 π 相位差的外加电场称为半波电场,表示为:

$$E_\pi = \frac{\kappa\lambda}{2Lr_{22}n_0^3} \quad (2)$$

传感器输出的偏振光由保偏光纤传输到光纤检偏器中,干涉后输出的光功率 P_{out} 为:

$$P_{out} = \frac{1}{2} a P_{in} \left(1 - b \cos \left(\varphi_0 + \frac{\pi}{E_\pi} E(t) \right) \right) \quad (3)$$

式中:a为光路损耗系数;b为传感系统消光比; P_{in} 为输入光功率; φ_0 为扭转保偏光纤形成的静态相位差。将l长度的保偏光纤扭转 θ 角度后,因为扭转保偏光纤后产生的圆双折射效应,使得输出偏振光 E_{out} 为^[19]:

$$E_{\text{out}} = \begin{bmatrix} E_{\xi} \\ E_{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -2\theta/\delta \sin(\delta/2) e^{i(\delta/2)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: E_{ξ} 、 E_{η} 分别为扭转保偏光纤后新的快慢轴上的光分量, δ 为 l 长度的保偏光纤扭转 θ 角度后快慢轴之间产生的相位差。注意到相位差 δ 与扭转保偏光纤长度 l 及扭转角度 θ 存在如下关系:

$$\delta = l/\theta \quad (5)$$

所以将输入保偏光纤准直器前端长度等于 $1/2$ 拍长的保偏光纤扭转 $\pi/2$ 角度后, 快慢轴之间相位差 δ 变化了 π , 此时保偏光纤输出的光矢量 E_{out} 变为:

$$E_{\text{out}} = \begin{bmatrix} E_{\xi} \\ E_{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: E_{out} 为右旋圆偏振光。可见, 保偏光纤的扭转为传感器引入了 $\pi/2$ 的静态相位差, 将 $\varphi_0 = \pi/2$ 代入式(3)得传感器输出光强 P_{out} 变为:

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{2} a P_{\text{in}} \left(1 + b \sin \left(\frac{\pi}{E_{\pi}} E(t) \right) \right) \quad (7)$$

此时, 若 $\pi E(t)/E_{\pi} \ll 1$, (7)式可写为:

$$P_{\text{out}} \approx \frac{1}{2} a P_{\text{in}} \left(1 + b \frac{\pi}{E_{\pi}} E(t) \right) \propto E(t) \quad (8)$$

分析式(8)可知, 在设置传感器静态工作点为 $\pi/2$ 后, 传感器输出的光强与外加电场之间成线性关系, 此时可以实现对外部电场的线性测量。

为了计算传感器的半波电场 E_{π} , 需要确定铌酸锂晶体外部电场与内部电场的比值 κ 。通过仿真软件 COMSOL Multiphysics 建立铌酸锂晶体与极板的仿真模型, 如图 2 所示, 其中铌酸锂晶体尺寸为 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 42.2 \text{ mm}$ ($x \times y \times z$), 极板尺寸为 $0.35 \text{ m} \times 0.35 \text{ m} \times 0.003 \text{ m}$, 极板间距为 0.19 m 。铌酸锂晶体位于平行极板的中央位置, 两块极板分别施加 50 Hz 的高电势和零电势, 确保传感器处于匀强电场中。仿真过程中, 通过改变极板上施加电压大小来获得不同强度的匀强电场; 通过放置在 LiNbO_3 晶体上的电场探针来确定铌酸锂晶体的内部电场, 得出铌酸锂晶体外部电场与内部电场 z 分量之间的关系曲线如图 3 所示。

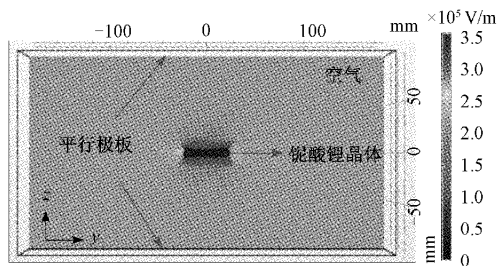


图 2 铌酸锂晶体电场仿真图

Fig. 2 Electric field simulation diagram of lithium niobate crystal

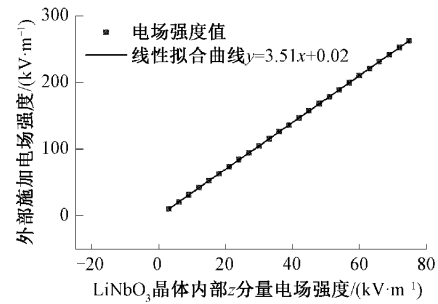


图 3 外部电场与晶体内部电场关系

Fig. 3 Relationship between external electric field and crystal internal electric field

从图 3 可知, 铌酸锂晶体的内外电场之间呈正比关系, $\kappa = 3.51$, 将 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $l = 42.2 \text{ mm}$, $r_{22} = 3.4 \text{ pm/v}$, $n_o = 2.212$ 代入(2)式可得 $E_{\pi} \approx 1750 \text{ kV/m}$, 根据文献[1]可知光学电场传感器的最大线性可测电场 $E_{\text{max}} \approx 0.3E_{\pi} \approx 525 \text{ kV/m}$ 。

1.2 传感系统组成

传感系统组成如图 4 所示。传感系统由保偏光源、传感器、光接收机和示波器组成。其中, 保偏光源输出高消光比的部分偏振光可近似为线偏振光; 为了减少外部环境因素的干扰, 将保偏光纤检偏器与光电探测器封装成光接收机。光源输出的偏振光经过保偏光纤传输到传感器内, 偏振光在铌酸锂晶体内因外部电场的调制发生了偏振态的变化, 这种变化携带了外部的电场信息。偏振光通过传感器输出后, 进入光接收机, 在光接收机内部, 先由检偏器将光偏振态的变化转化为光强度的变化, 再由光电探测器将光强度变化转化为电压信号的变化, 最终实现光偏振信号到电压信号的转换, 由示波器采集光接收机输出的电压信号。

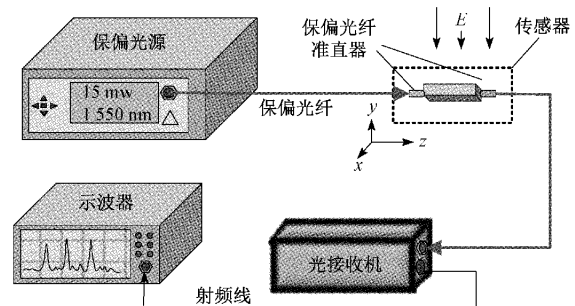


图 4 传感系统

Fig. 4 Sensing system

设光电探测器的光电转换系数为 β , 则由(8)式可得传感系统输出电压信号 V_{out} 为:

$$V_{\text{out}} \approx \frac{1}{2} \beta a P_{\text{in}} + \frac{a b \beta \pi}{2 E_{\pi}} P_{\text{in}} E(t) \quad (9)$$

通过式(9)可以看出,传感系统输出的电压信号与外加电场之间成线性关系,传感器可以实现对外部电场的线性测量。

2 传感器研制与测试

2.1 传感器的研制

传感器中使用的保偏光纤准直器由保偏光纤尾纤与光纤准直器粘结制成,因为保偏光纤的主轴与准直器的主轴方向一致,保证了偏振信号以最小损耗传输到准直器,然后以高斯光束的形式进行输出^[20]。根据设计的铌酸锂晶体尺寸为 $6\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 42.2\text{ mm}$ ($x\times y\times z$),采用耦合距离为 48 mm 的光纤准直器进行光路耦合,这是因为耦合距离过长会增加传感器的尺寸,影响传感器的稳定性与紧凑性;耦合距离太近会令光信号的耦合效率降低,散失较多的有效光信号。传感器的制作分为以下4步完成。第1步,将输入保偏光纤准直器的输出端面与铌酸锂晶体通光面保持平行,嵌入到封装底座中;第2步,先将保偏光纤准直器前端 1.5 mm ($1/2$ 拍长)处的保偏光纤固定,然后将准直器扭转 90° ,在空隙中通过注胶固定;第3步,将输出保偏光纤准直器的主轴方向与输入保偏光纤准直器的主轴方向对准后,在封装底座中通过注胶固定;第4步,等待封装底座的封装胶完全固化后(24 h),装上封装盖板,在封装底座和封装盖板接触的缝隙中通过注胶固定。图5所示为传感器在调整架上完成光路耦合的照片;图6为制作完成的传感器照片,传感器尺寸为 $17\text{ mm}\times 19\text{ mm}\times 77\text{ mm}$ 。

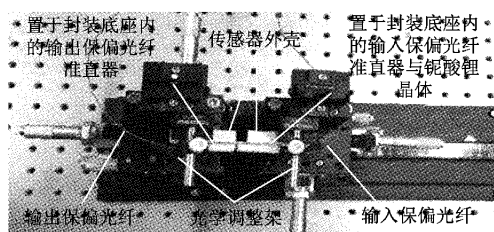


图5 传感器耦合照片

Fig. 5 Photograph of the sensor coupling

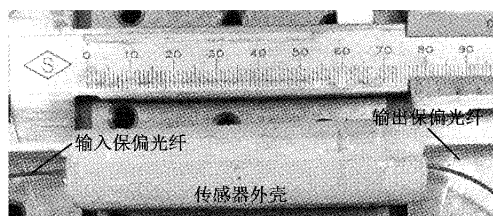


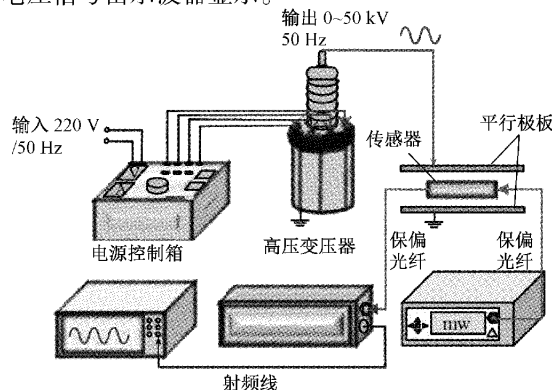
图6 制作完成的传感器照片

Fig. 6 Photograph of the fabricated sensor

传感器制作完成后,取下传感器进行光路耦合效率测试。将传感器的输入端连接可调谐保偏光源,输出端连接光功率计,通过将光功率计显示的光功率与光源输出的光功率相比后得到光路的耦合效率。设置光源输出的光功率为 15 mW ,通过光功率计测得传感器输出的光功率为 10 mW ,可知传感器的耦合效率为 66.7% 。考虑到保偏光纤准直器耦合过程中本身存在约为 0.2 dB 的耦合损耗,且使用的光学级铌酸锂晶体的通光率约为 70% ,由此可得理论上光路的最大耦合效率约为 68% ,而传感器光路的实际耦合效率低于 68% ,其原因可能是准直器没有完全对准,但是与分立式铌酸锂晶体光学电场传感器相比^[17],本文设计的传感器将光路的耦合效率提高了 25.3% 。

2.2 工频强电场测试

为了对传感器进行标定,搭建了如图7所示的工频强电场实验测试系统。电源控制箱输入端接入 $220\text{ V}/50\text{ Hz}$ 市电,通过变压器升压输出 $0\sim 50\text{ kV}$ 的高电压,变压器输出的电压由控制箱旋钮稳定控制。传感器放在极板的中心位置,确保传感器处于匀强电场中。传感器输入端连接保偏光源,输出端连接光接收机,光接收机输出的电压信号由示波器显示。



(a) 工频强电场测量系统框图

(a) Block diagram of the intensive power frequency electric field measurement system



(b) 工频强电场测量系统照片

(b) Photograph of intensive power frequency electric field measurement system

图7 工频强电场测量

Fig. 7 Intensive power frequency electric field measurement

高电压通过铜线连接到两块平行极板上,极板长 0.35 m、宽 0.35 m、极板间距 0.19 m,符合国标 GB/T 12720-1991 对平板标定系统的尺寸规定。实验过程中旋转控制箱旋钮令极板间分别形成 10.5 kV/m、63 kV/m、116 kV/m、178.9 kV/m 的匀强电场,传感器输出的电压信号通过示波器的交流耦合模式显示,输出波形如图 8 所示。从图 8 可以看出当电场峰值为 10.5 kV/m 时,输出信号峰值约为 8.80 mV;当外部电场峰值从 63 kV/m 增加到 178.9 kV/m 时,传感器可以不失真的检测到外部电场的时域波形。通过示波器读取传感系统输出电压信号的周期分别为 49.91 Hz、49.98 Hz、49.97 Hz、50.02 Hz,还原了工频强电场的时域波形,证明了通过扭转保偏光纤产生 $\pi/2$ 的静态相位差后,令传感器具有良好的线性特性。

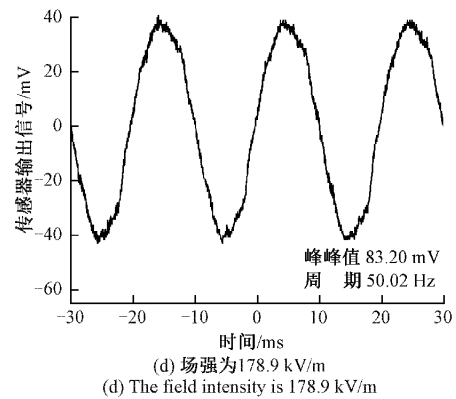
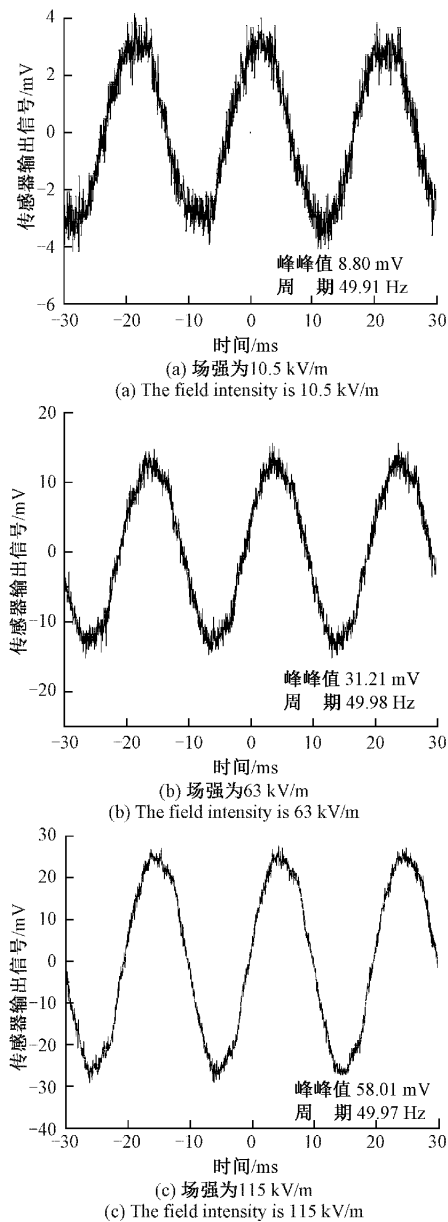


图 8 传感器在不同场强下的输出波形

Fig. 8 Output waveforms of the sensor under different field intensities

实验过程中按照控制箱旋钮刻度进行多次升压、降压测试,对获得的数据取均值后进行线性拟合得到图 9,拟合曲线的参数值如表 1 所示。通过拟合曲线可知在 10.5~178.9 kV/m 范围内,线性相关系数为 0.998 6。因为实验室所能产生的最大电场为 179 kV/m,所以没有实际测量到最大的线性可测电场。但是已知式(9)中 $a \times P_{in} = 0.34 \text{ mW}$, $b \approx 1$,使用的光电探测器的光电转换系数 $\beta = 745.9 \text{ mV/mW}$,标定曲线斜率 $k = 0.453 \text{ mV} \cdot \text{kV}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,可以求得传感器的 $E_{\pi} \approx 1757 \text{ kV/m}$,与理论计算基本吻合。根据标定曲线,进一步可知传感系统的输出噪声为 4.4 mV,在有效信号高于噪声信号 3 dB 的条件下,最小可测电场 $E_{\min} \approx 10.5 \text{ kV/m}$ 。因此,测量系统在 10.5~527 kV/m 的范围内可以实现外部强电场的线性测量,动态范围为 34 dB。

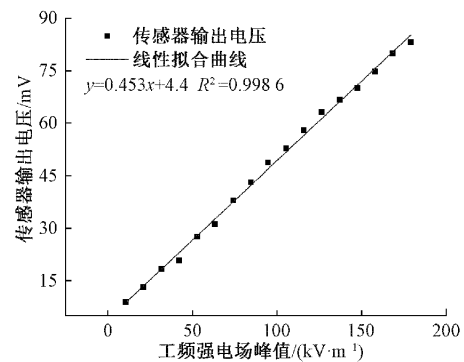


图 9 传感器的线性特性

Fig. 9 Linear characteristics of the sensor

为了分析传感器的测量效果,需要对实验室测得的数据进行均方根误差分析。将传感系统输出电压代入线性特性曲线 $y = 0.453x + 4.4$ 中,求解出的电场强度作为系统的测量值 $E_{m,i}$;将实际测量过程中施加的电场强度

($E=U/d$, U 为加到两平行电极板上的电压, d 为两极板之间的距离) 视为待测外部电场强度的真值 $E_{i,i}$, 将两组数据代入均方根误差 σ 的计算式(10)中, 得到的结果如表1所示。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_{i,i} - E_{m,i})^2} \quad (10)$$

式中: N 为传感器的测量次数, i 依次取 1, 2, 3, ..., N , $E_{i,i}$ 为待测电场强度的真值, $E_{m,i}$ 为电场强度的观测值。通过表1可以看出: 线性相关系数 $R^2=0.9986$ 、均方根误差 $\sigma=2.7542$, 说明传感器的线性拟合程度良好, 但是还存在一定的测量误差。

表1 线性拟合及均方根误差的分析结果

Table 1 Analysis results of linear fitting and root mean square error

拟合曲线斜率 (k)	拟合曲线常数 (b)	线性相关系数 (R^2)	均方根误差 (σ)
0.453	4.4	0.9986	2.7542

分析误差产生的主要原因为: 传感器是通过光偏振态的变化实现对外部电场的测量, 因此静态条件下光偏振态的稳定性直接关系到输出信号的稳定, 而实验过程中传感器的输入输出均使用拍长为 3 mm、直径为 0.9 mm 的保偏光纤, 因此外界扰动容易引起光纤内光偏振态的变化, 从而导致传感器存在一定的测量误差。为了提高测量的稳定性, 减少测量误差, 未来实际应用中可以使用拍长更小、带保护套管的保偏光纤, 以减小外部扰动对保偏光纤内光偏振态的影响, 从而减小传感器的测量误差。

此外, 通过目前传感器在实验室条件下的测试效果和数据分析结果来看, 传感器的线性拟合程度较高、测量误差较小, 可以用来对实际工频强电场进行测量。但考虑到实际测量环境中可能存在温度、湿度、外部应力等诸多复杂不可控因素, 为了提高传感器的实际应用能力, 下一步将考虑使用密封性好、耐老化、热膨胀系数小、机械强度高的材料对传感器进行封装, 以增强其在复杂测量环境中的适应能力。

3 结 论

在传统的铌酸锂晶体光学电场传感器中, 传感单元一般由单模光纤准直器、起偏器、1/4 波片、电光晶体、检偏器和多模光纤准直器组成, 以实现外部电场的线性测量。本文设计的传感单元由铌酸锂晶体与保偏光纤准直器制成, 减少了分离光学元件的使用, 提高了光路的耦合效率; 通过保偏光纤扭转实现静态工作点的设置, 令传感

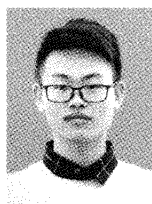
器工作在线性区。研制的传感器的尺寸为 17 mm × 19 mm × 77 mm ($x \times y \times z$), 线性可测电场范围为 10.5 ~ 527 kV/m, 为工频强电场的时域测量提供了一种工作点设置简单、耦合效率较高的铌酸锂晶体光学电场传感器的设计方案。

参考文献

- [1] ZHANG J, YANG L, LI Y. Non-invasive measurement of intensive power-frequency electric field using a LiNbO₃-integrated optical waveguide sensor [J]. IET Science, Measurement and Technology, 2020 (1): 101-108.
- [2] XIAO D, MA Q, XIE Y, et al. A power-frequency electric field sensor for portable measurement [J]. Sensors, 2018, 18(4): 1053.
- [3] 刘丰, 王健, 毕卫红. 一种光学电压互感器结构的电场分析 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27 (S2): 1088-1089.
LIU F, WANG J, BI W H. Electric field analysis of optical potential transformer structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27 (S2): 1088-1089.
- [4] SUN B, CHEN F, CHEN K, et al. Integrated optical electric field sensor from 10 kHz to 18 GHz [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24 (13): 1106-1108.
- [5] ZHANG J, CHEN F, LIU B. Integrated photonic electric field sensor operating more than 26 GHz [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(10): 1009-1012.
- [6] ZENG R, BO W, YU Z, et al. Integrated optical e-field sensor based on balanced Mach-Zehnder interferometer [J]. Optical Engineering, 2011, 50(11): 828-832.
- [7] ZHANG J, CHEN F, SUN B, et al. A novel bias angle control system for LiNbO₃ photonic sensor using wavelength tuning [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 25 (2013): 1993-1995.
- [8] ZHANG J, YANG D, ZHANG C, et al. A single chip LiNbO₃ photonic 2D electric field sensor using two perpendicular electrodes [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(23): 1501-1504.
- [9] 杨庆, 孙尚鹏, 司马文霞, 等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展 [J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 349-367.
YANG Q, SUN SH P, SIMA W X, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid [J]. High Voltage Technology, 2019, 45 (2): 349-367.

- [10] HIDAHA K, KOUNO T. A method for measuring electric field in space charge by means of pockels device [J]. Journal of Electrostatics, 1982, 11(3): 195-211.
- [11] SANTOS J C, TAPLAMACIOGLU M C, HIDAHA K. Optical high voltage measurement using Pockels microsingle crystal [J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(8): 3271-3276.
- [12] GARZARELLA A, QADRI S B, WIETING T J, et al. Dielectrically induced sensitivity enhancements in electro-optic field sensors [J]. Optics Letters, 2007, 32(8): 964-966.
- [13] GARZARELLA A, WU D H. Optimal crystal geometry and orientation in electric field sensing using electro-optic sensors [J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 2124-2126.
- [14] KUMADA A, HIDAHA K. Directly high-voltage measuring system based on pockels effect [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1306-1313.
- [15] CHOI S, SUGIANTO A A, LEE D G, et al. Polar-coordinate-based data analysis scheme for high-voltage measurement system using the Pockels electro-optic effect [J]. Journal of Instrumentation, 2020, 15(3): C03030.
- [16] LI C, XIANG C, YOSHINO T. Measurement of AC electric power based on dual transverse Pockels effect [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(5): 1375-1380.
- [17] YANG Q, SUN S, HE Y, et al. Intense electric-field optical sensor for broad temperature-range applications based on A piecewise transfer function [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1648-1656.
- [18] YANG Q, LIU R Y, HE Y X, et al. AC/DC hybrid electric field measurement method based on Pockels effect and electric field modulation [J]. The Review of Scientific Instruments, 2020, 91(5): 55004.
- [19] 焦斌亮, 郑绳植, 王朝晖. 一种利用保偏光纤产生圆偏振光的方法 [J]. 光电工程, 2004, 31(5): 49-51.
JIAO B L, ZHENG SH X, WANG ZH H. A method for producing circular polarization light with polarization-maintain fiber [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(5): 49-51.
- [20] 朱昌, 郭芮, 朱保文. 基于提高准直器插入损耗的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(z1): 111-112.
ZHU CH, GUO R, ZHU B W. Research on improving insertion loss of collimator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(z1): 111-112.

作者简介



张元英, 2019年于青岛科技大学获得工学学士学位, 现为昆明理工大学硕士研究生, 主要研究方向为光学晶体电场传感器的研制与测量技术。

E-mail: zyy178luck@163.com

Zhang Yuanying received his B. Sc. degree in 2019 from Qingdao University of Science and Technology. Now, he is a master student at Kunming University of Science and Technology. His main research interest includes the development and measurement technology of optical crystal electric field sensors.



张家洪 (通信作者), 2010年于云南师范大学获得理学学士学位, 2016年于电子科技大学获得博士学位, 现为昆明理工大学副教授, 主要研究方向为集成光波导与光学晶体电磁场传感器、微波光子技术等。

E-mail: zjh_mit@163.com

Zhang Jiahong (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2010 from Yunnan Normal University, received his Ph. D. degree in 2016 from University of Electronic Science and Technology of China. Now, he is an associate professor in Kunming University of Science and Technology. His main research interest includes integrated optical waveguide and optical crystal electromagnetic field sensor, microwave photonic technology.