

引用格式: ZHANG Jianxin, ZHANG Jiahong, CHEN Fushen. Design and Implementation of Integrated Optical Waveguide DC Electric Field Sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5):0513003

张建鑫, 张家洪, 陈福深. 集成光波导直流电场传感器设计与实现[J]. 光子学报, 2021, 50(5):0513003

集成光波导直流电场传感器设计与实现

张建鑫^{1,2}, 张家洪^{1,2}, 陈福深³

(1 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 昆明 650500)

(2 昆明理工大学 云南省计算机应用技术重点实验室, 昆明 650500)

(3 北京森馥科技股份有限公司, 北京 102209)

摘要: 针对集成光波导电场传感器无法直接对直流电场响应的问题, 基于场磨式电场传感器的基本原理, 研制了一种由直流电机、屏蔽电极、集成光波导和感应电极构成的直流电场传感器, 其体积为 $87.5\text{ mm} \times 58.5\text{ mm} \times 17.5\text{ mm}$ 。推导给出了集成光波导直流电场传感器的工作原理, 利用 COMSOL 软件构建了传感器的三维仿真模型, 仿真得出了感应电极上的电场强度随着屏蔽电极的旋转进行周期性的变化。建立直流电场测试系统, 对研制的集成光波导直流电场传感器的动态范围进行测试。结果表明: 传感器的最小可测电场为 5 kV/m , 最大可测电场大于 140 kV/m , 线性相关系数为 0.9951 , 适合用于直流电场测量。

关键词: 集成光学; 直流电场测量; 光波导传感器; 场磨式原理; 电光调制

中图分类号: TM935

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215005.0513003

Design and Implementation of Integrated Optical Waveguide DC Electric Field Sensor

ZHANG Jianxin^{1,2}, ZHANG Jiahong^{1,2}, CHEN Fushen³

(1 Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

(2 Yunnan Key Laboratory of Computer Technology Application, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

(3 Beijing Safety Test Technology Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: To solve the problem that the integrated optical waveguide electric field sensor can not directly respond to the DC electric field, based on the basic principle of the field milling electric field sensor, a DC electric field sensor composed of a DC motor, a shield electrode, an integrated optical waveguide Mach-Zehnder Interferometer (MZI), and an induction electrode is designed. Its volume is $87.5\text{ mm} \times 58.5\text{ mm} \times 17.5\text{ mm}$. The working principle of the integrated optical waveguide DC electric field sensor is derived and a three-dimensional simulation model of the sensor is constructed using the COMSOL software. The simulation results show that the electric field intensity on the sensing electrode changes periodically with the rotation of the shielding electrode. A DC electric field experimental measurement system is established to test the dynamic range of the integrated optical waveguide DC electric field sensor. The results show that the minimum measurable electric field of the sensor is 5 kV/m , the maximum measurable electric field is greater than 140 kV/m , and the linear correlation coefficient is 0.9951 , which is suitable for DC electric field measurement.

基金项目: 国家自然科学基金(No.61765009), 云南省应用基础研究项目(No.2018FB106)

第一作者: 张建鑫(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为集成光波导直流电场传感器及应用。Email: 1490123284@qq.com

导师(通讯作者): 张家洪(1986—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为集成光波导电磁场传感器及应用。Email: zjh_mit@163.com

收稿日期: 2020-12-10; 录用日期: 2021-03-15

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

Key words: Integrated optics; DC electric field measurement; Optical waveguide sensor; Field grinding principle; Electro-optical modulation

OCIS Codes: 130.3120; 130.2790; 230.0250; 130.6750

0 引言

近年来,随着我国在直流输电技术领域的迅速发展,已经投入使用的或者是正在建设的直流输电线路越来越多,公众以及相关部门对于直流电场的测量问题越来越关注^[1]。目前国内外已经研制出许多对直流电场测量的电场传感器,包括有场磨式电场传感器^[2-3],基于微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)的电场传感器^[4-5],光纤直流电场传感器^[6]及光学电场传感器^[7]等。场磨式直流电场传感器性能好,能对输电线路的直流电场进行测量,但是传感器使用金属制作,体积较大,金属结构对被测电场干扰大,同时需要接地,使用不方便。扭转谐振式MEMS电场传感器体积较小,但是少量电荷在感应电极之间会产生较大的电场,因此需要解决由电荷引起的电场畸变问题。光纤光栅直流电场传感器不受外界电磁干扰,但是温度等因素容易对被测电场产生干扰。旋转式电光晶体直流电场传感器,通过旋转消除空间电荷引起的的影响,但是传感器需要光纤准直器、起偏器、电光晶体、检偏器等元件,结构较复杂,实际使用不方便。

集成光波导电场传感器体积小、结构简单,已经被研制用于强电磁脉冲的时域测量、工频电场测量和密集瞬态电场等^[8-10]。但是,集成光波导电场传感器直接放置在直流电场中时,铌酸锂晶体中的电荷重新分布成与外电场方向相反的电场,内外电场相叠加,导致加再传感器上的电场会衰减近似为零,使得集成光波导电场传感器无法直接测量直流电场^[11]。

本文以场磨式电场传感器原理为基础,设计一种集成光波导直流电场传感器结构,将被测的直流电场转化成交流电场,实现对直流强电场的测量。最后搭建实验平台,对研制的集成光波导直流电场传感器的动态性能进行测试。

1 传感器结构及工作原理

1.1 传感器结构

集成光波导直流电场传感器结构如图1。由图1(a)可知,屏蔽电极为三个扇形切口,切口的圆心角为 60° ,每两个切口之间的间隔为 60° 。由图1(b)可知,屏蔽电极与直流电机转轴相连,左边紧挨平行于 yz 平面的集成光波导电场传感器。由图1(c)可知,非对称马赫曾德尔光波导干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)和感应电极集成在铌酸锂晶体表面,并且感应电极制作在MZI直波导臂两侧。使用集成光波导直流电场传感器进行直流电场测量时,感应电极固定不动,屏蔽电极与直流电机转轴相连做恒速旋转。由于屏蔽电极的遮挡,感应电极暴露在直流电场中的面积随着时间做周期性的变化,在感应电极上产生周期性感应电荷,形成的电压信号通过电光效应调制到光载波上,使传感器输出光强发生变化,最后通过光电探测器输出的电信号提取输入的电场信息,完成对直流电场的测量。

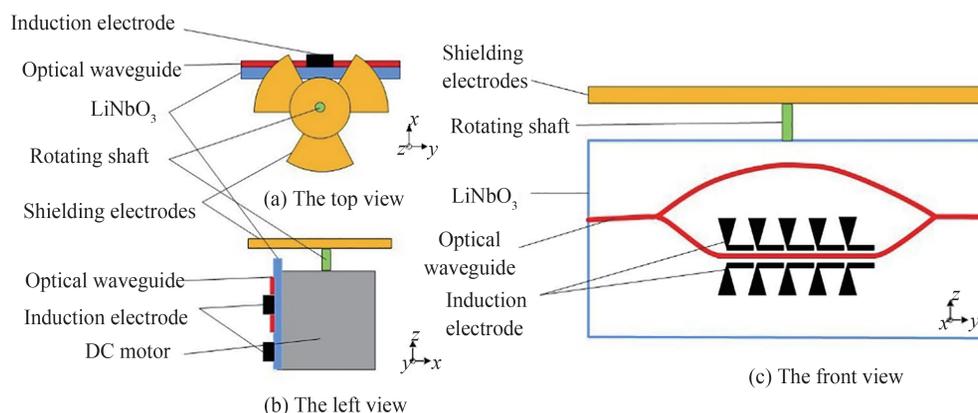


图1 传感器结构

Fig.1 Schematic of the sensor structure

集成光波导直流电场传感器测量系统如图2,从图2中可以看到激光源通过保偏光纤(Polarization Maintaining Fiber, PMF)与集成光波导直流电场传感器的输入端相连。被测直流电场信号通过直流电场传感器调制到光载波上,该信号通过单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)进入光电探测器。通过光电探测器将光信号转换成电信号后,接到示波器上观测探测到的电场信号波形。

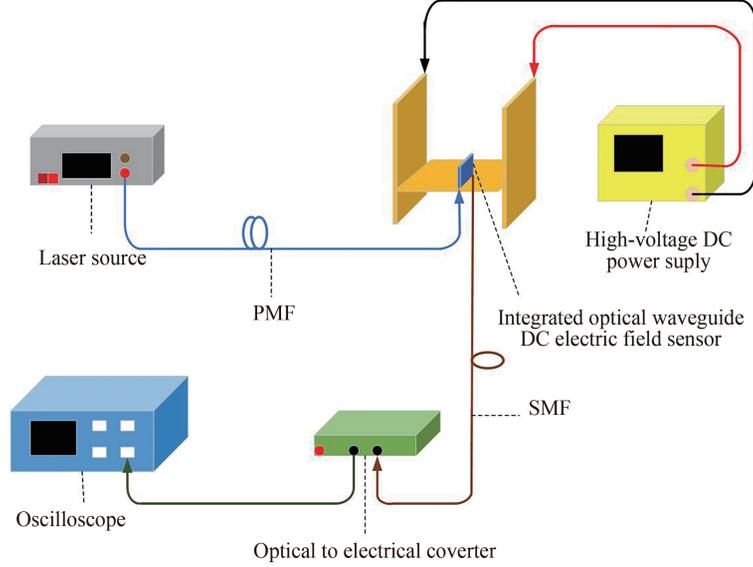


图2 集成光波导直流电场传感器测量系统

Fig.2 Schematic of the integrated optical waveguide DC electric field sensor system

1.2 传感器工作原理

基于铌酸锂(LiNbO_3)晶体的电光效应,MZI型集成光波导的输出光功率 P_{out} 可以表示为^[12]

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{2} P_{\text{in}} \left[1 + \cos \left(\varphi + \frac{V_{\text{E}}(t)}{V_{\pi}} \pi \right) \right] \quad (1)$$

式中, P_{in} 为输入光功率, φ 为光波导两支路的相移和, $V_{\text{E}}(t)$ 为外部电场对应的调制电压, V_{π} 为传感器的半波电压。

当 φ 值为 $\pi/2$,光电转换因子为 ρ 时,光波导传感器可以正常工作,此时传感系统的输出电压为^[13]

$$V_{\text{out}} = \frac{1}{2} P_{\text{in}} \rho \left[1 - \sin \left(\frac{V_{\text{E}}(t)}{V_{\pi}} \pi \right) \right] \approx \frac{1}{2} P_{\text{in}} \rho \left[1 - \left(\frac{V_{\text{E}}(t)}{V_{\pi}} \pi \right) \right] \quad (2)$$

定义光波导传感器的感应电极与屏蔽电极重合时为初始时刻,即 $t=0$ 。当屏蔽电极转动一定角度后,感应电极完全暴露在空间被测量的电场中时,感应电极暴露面积为 S_{max} ,随后,屏蔽电极再转动,感应电极又一次完全被屏蔽电极遮挡住,感应电极暴露面积为0,由此可以得到感应电极上感应电荷的面积随时间变化的表达式为^[14]

$$S(t) = \begin{cases} 2S_{\text{max}} \frac{t}{T} & (0 \leq t < \frac{T}{2}) \\ 2S_{\text{max}} (1 - \frac{t}{T}) & (\frac{T}{2} \leq t < T) \end{cases} \quad (3)$$

式中,周期 $T=2\pi/\omega n$, ω 为电机的转动角速度, n 为屏蔽电极的切口个数。由于 $\omega=2\pi n_0/60$, n_0 为电机的转速,所以 $T=60/n n_0$ 。

假定被测量的电场强度为 E ,介电常数为 ϵ_0 ,感应电极上产生的感应电荷为 $Q(t)$,即^[15]

$$Q(t) = \epsilon_0 E S(t) = \begin{cases} 2\epsilon_0 S_{\text{max}} \frac{t}{T} E & (0 \leq t < \frac{T}{2}) \\ 2\epsilon_0 S_{\text{max}} (1 - \frac{t}{T}) E & (\frac{T}{2} \leq t < T) \end{cases} \quad (4)$$

由公式 $U=Q/C$,可得感应电极的调制电压 $V_{\text{E}}(t)$ 为

$$V_E(t) = \begin{cases} \frac{2\varepsilon_0 S_{\max} \frac{t}{T} E}{C} & (0 \leq t < \frac{T}{2}) \\ \frac{2\varepsilon_0 S_{\max} (1 - \frac{t}{T}) E}{C} & (\frac{T}{2} \leq t < T) \end{cases} \quad (5)$$

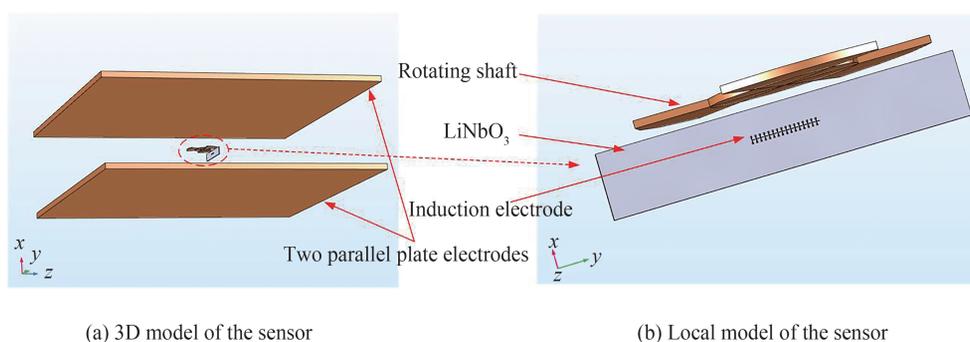
式中, C 为感应电极间电容。将式(5)带入式(2)可得输出电压与待测直流电场的关系式为

$$V_{\text{out}} = \begin{cases} \frac{1}{2} P_{\text{in}} \rho \left[1 - \left(\frac{2\varepsilon_0 S_{\max} \frac{t}{T} E}{C V_{\pi}} \pi \right) \right] & (0 \leq t < \frac{T}{2}) \\ \frac{1}{2} P_{\text{in}} \rho \left[1 - \left(\frac{2\varepsilon_0 S_{\max} (1 - \frac{t}{T}) E}{C V_{\pi}} \pi \right) \right] & (\frac{T}{2} \leq t < T) \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知,当屏蔽电极的转速恒定,感应电极上的电压呈周期性变化,在一个周期内,输入的光功率 P_{in} 、光电转换因子 ρ 和半波电压 V_{π} 保持相对恒定,输出电压与被测量的电场强度 E 呈线性关系。因此,在测量时,可通过输出电压得出被测量的电场强度。

2 传感器的三维建模仿真

利用 COMSOL 三维有限元计算软件,对集成光波导直流电场传感器进行三维建模,并重点对感应电极和屏蔽电极的结构进行建模分析。图 3(a) 给出了集成光波导直流电场传感器和两平行板电极的三维仿真模型,图 3(b) 给出了屏蔽电极、感应电极和铌酸锂晶体结构的三维仿真模型。传感器的屏蔽电极为 3 个扇形切口,切口圆心角为 60° ,每两个切口间隔 60° ,切口内外半径分别为 10 mm 和 20 mm,材质为铜。感应电极为倒三角和长方体组合而成,倒三角的底面边长为 0.125 mm,高为 0.51 mm,长方体的长为 0.5 mm,宽为 0.125 mm,厚度为 0.01 mm,感应电极在 x 轴方向的间距为 0.01 mm,在 y 轴方向的间距为 0.1 mm,沿空间直角坐标系的 x 轴方向排列,感应电极为铜材质。两平行板电极为长方体,长和宽都为 350 mm,厚度为 7 mm,两平行板电极间的距离为 100 mm,材质为铜。铌酸锂晶体为长方体,长为 50 mm,宽为 9 mm,厚度为 1 mm。



(a) 3D model of the sensor

(b) Local model of the sensor

图3 集成光波导直流电场传感器的三维仿真模型

Fig.3 3D simulation model of integrated optical waveguide DC electric field sensor

屏蔽电极与感应电极置于被测量的电场中,由于屏蔽电极与感应电极的相对位置随屏蔽电极的旋转角度变化,感应电极上的电场分布也随屏蔽电极的旋转作周期性变化。在两平行板电极上加上 2 kV 的电压,即在两平行板电极间产生 20 kV/m 的电场。取屏蔽电极与感应电极重合时为屏蔽电极旋转 0° ,图 4 给出了置于两平行板电极之间的屏蔽电极在一个周期内顺时针旋转不同旋转角度时的屏蔽电极与感应电极电场分布。从图中可以看出,屏蔽电极旋转 $0^\circ \sim 120^\circ$ 范围内,感应电极上的电场值随着屏蔽电极的旋转呈现先增大后减小的规律。当屏蔽电极旋转角度为 60° 时,感应电极上的电场最大。

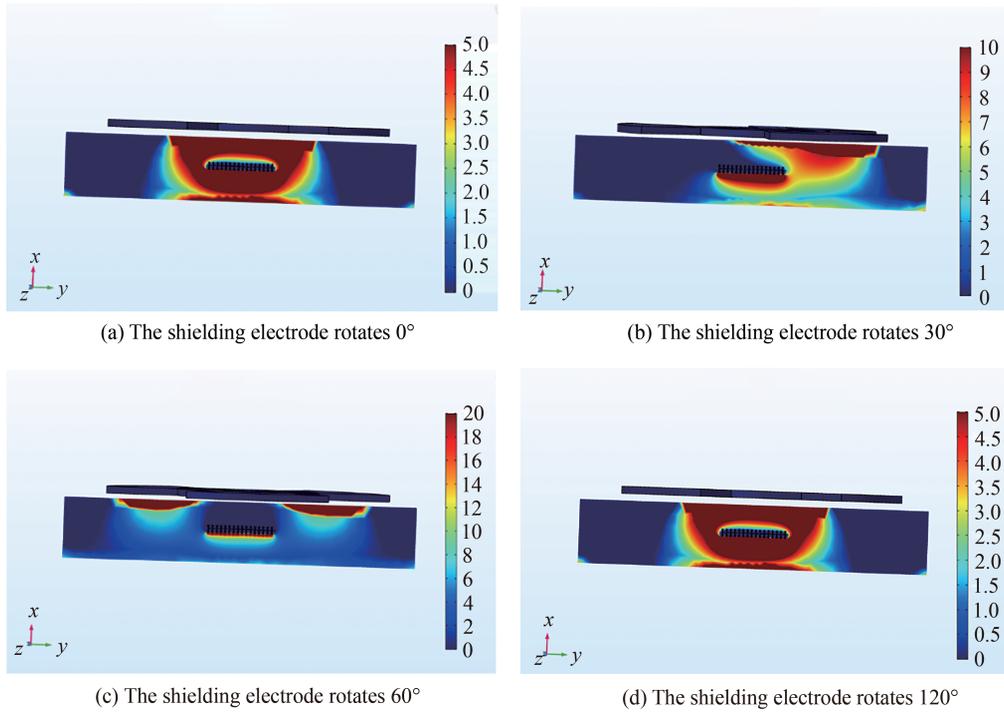


图4 屏蔽电极旋转角度不同时感应电极电场分布

Fig.4 Electric field distribution of the induction electrode under different rotation angles of the shielding electrode

通过探针检测两平行板电极间和感应电极间的电场强度随屏蔽电极旋转角度的变化。记录屏蔽电极每旋转 10° ，两平行板电极间和感应电极间的电场强度，得出两平行板电极间与感应电极间的电场强度随屏蔽电极旋转角度变化曲线，如图5所示。从图中可以看出，随着屏蔽电极旋转，两平行板电极间的电场强度几乎稳定在 20 kV/m ，而感应电极间的电场强度随着屏蔽电极的旋转作周期性变化，由 3.93 kV/m 开始电场强度不断增大，当电场强度达到 11.10 kV/m 后，随着屏蔽电极的继续旋转减小至 3.93 kV/m 。仿真结果表明设计的集成光波导直流电场传感器的结构可以实现直流电场转换为交流电场。

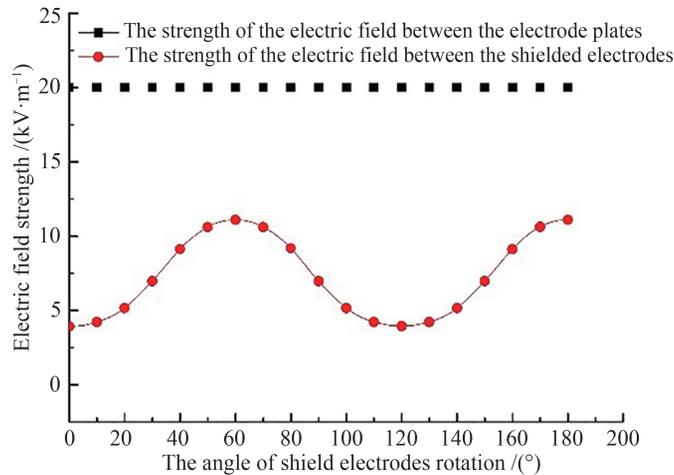


图5 电极板间与感应电极间的电场强度随屏蔽电极旋转角度变化曲线

Fig.5 Electric fields of the electrode plates and the sensing electrode varying with the rotation angles of the shielding electrode

3 传感器的制备

集成光波导直流电场传感器包括集成光波导电场传感器、屏蔽电极和直流电机。集成光波导电场传感器选用非对称马赫曾德尔型，尺寸为 $78 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。屏蔽电极是将金属薄板制作成3个扇形切口，每个扇形切口圆心角为 60° ，每两个切口间隔 60° ，外半径为 20 mm ，内半径为 10 mm ，厚度为 1 mm 。直流电

机电电压为 1.5 V, 额定转速为 2 350 r/min, 直径为 24.4 mm, 高为 12.4 mm, 轴径为 2 mm。屏蔽电极固定在直流电机的转轴上, 使屏蔽电极可以随直流电机做恒速转动。设计并制作一个尺寸为 87.5 mm×58.5 mm×17.5 mm 的塑料封装盒, 将直流电机、电池、光波导传感器集成在一起。图 6(a) 为制作的集成光波导电场传感器的实物图, 图 6(b) 为封装后的集成光波导直流电场传感器实物图。

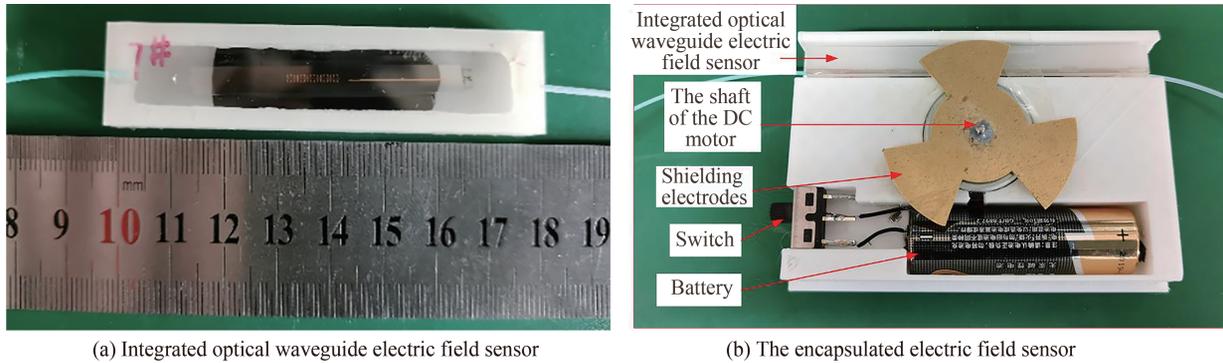


图 6 集成光波导直流电场传感器实物
Fig.6 The integrated optical waveguide DC electric field sensor

4 直流电场测量实验

为了获得集成光波导直流电场传感器的输入和输出之间的关系, 进行了集成光波导直流电场测试实验。实验装置如图 7, 直流高压电源接入 220 V/50 Hz 的市电, 电源的输出端(输出范围为 0~30.6 kV)连接在两平行板电极上, 从而可以在两平行板电极间产生不同强度的直流电场。集成光波导直流电场传感器放置在两平行板电极中间, 激光器的输出信号通过保偏光纤连接到传感器的输入端, 传感器的输出信号经过单模光纤连接到光电探测器, 转换成电信号后接到示波器上观测探测到的电场信号波形。

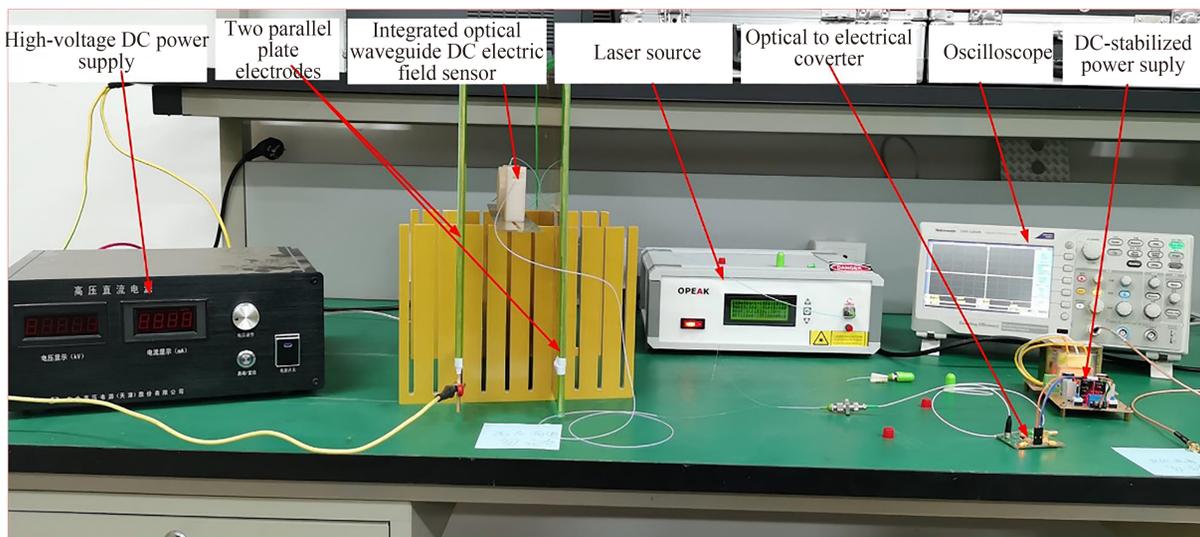


图 7 直流电场测量实验系统
Fig.7 Experimental system of DC electric field measurement

实验系统中使用的两平行板电极尺寸为 350 mm、宽为 350 mm、厚为 7 mm, 距离为 116 mm。调节直流电源在两平行板电极间形成不同强度的直流电场。选取直流电场分别为 5 kV/m、10 kV/m、35 kV/m、75 kV/m、135 kV/m、140 kV/m 时, 传感器系统的输出电压波形如图 8 所示。从图 8 可以看出, 当电场值为 5 kV/m 时, 传感器系统的输出值为 9.4 mV, 可以看出波形中夹杂部分噪声; 当电场峰值为 10 kV/m、35 kV/m、75 kV/m 和 135 kV/m 时, 传感器系统的输出值分别为 11.6 mV、21.2 mV、36.8 mV 和 54.4 mV; 当电场值为 140 kV/m 时, 传感器系统的输出值为 56.0 mV, 电压波形较好且未达到饱和。

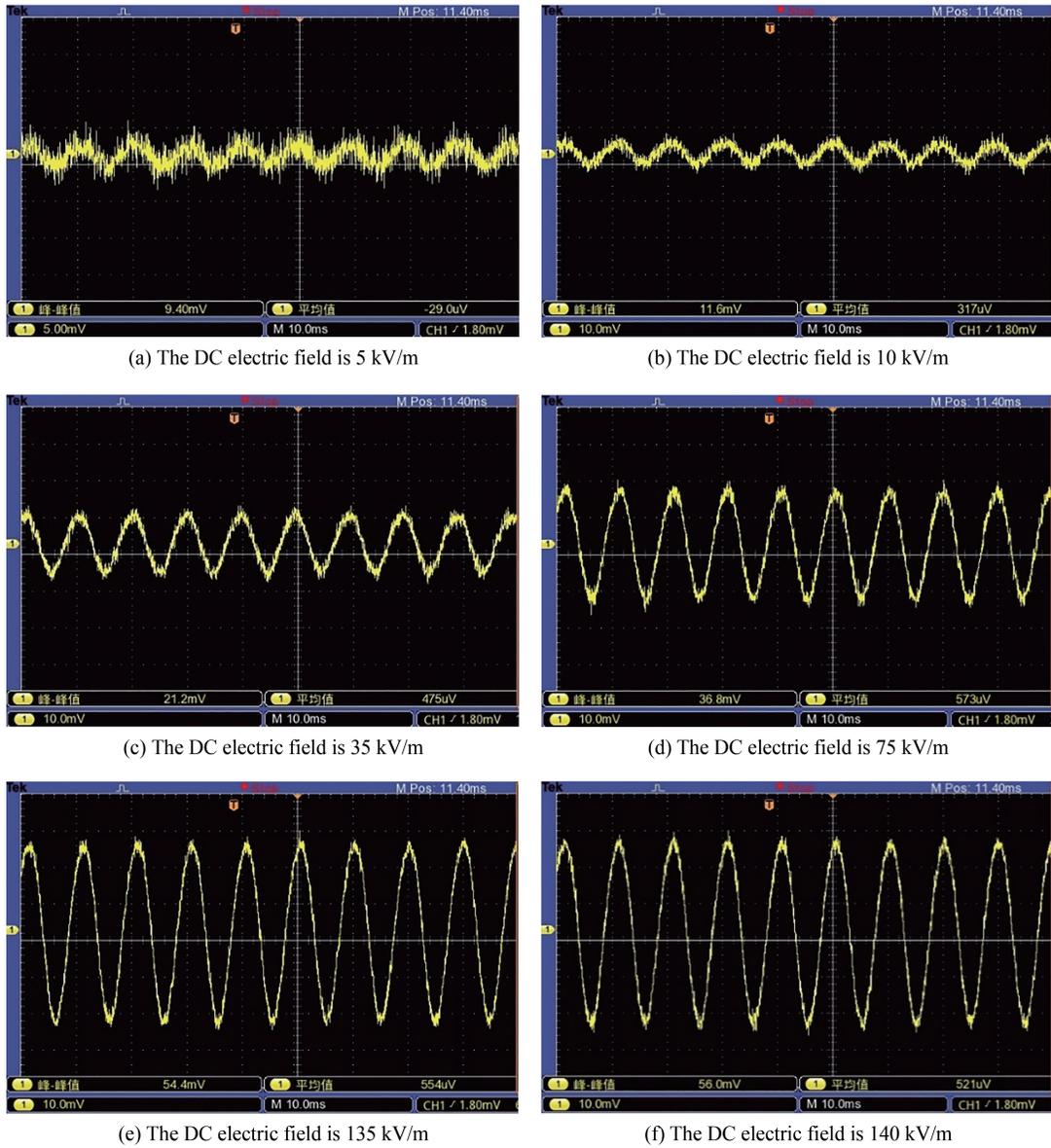


图8 传感器在不同场强下的输出波形

Fig.8 Output waveforms of the sensor system under different DC electric fields

对传感器测得的数据进行线性拟合,绘制成曲线图,如图9所示。从图中可以看到,在5~140 kV/m范围内,线性相关系数为0.995 1。注意到传感器系统输出噪声为4.52 mV,当输出电压信噪比为6 dB时,即输出电压信号约为9.4 mV时,可得传感器最小可测电场为5 kV/m。此外,当电场为140 kV/m时,传感器系统的输出波形未饱和,由此可得传感器的最大可测电场大于140 kV/m。

根据图9得出传感器系统输入输出标定拟合曲线($y=0.34183x+9.3746$),代入传感器系统的输出电压值,可求出各电压值对应的电场强度测量值,进一步根据式(7)计算得出测量结果的均方根误差。均方根误差 σ 可以表示为

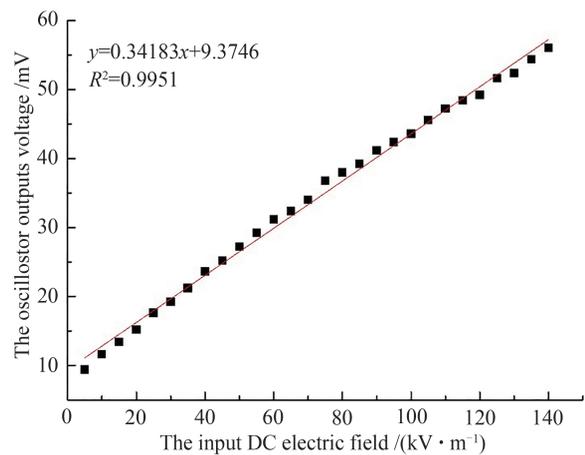


图9 传感器输入输出特性曲线

Fig.9 Input and output characteristic curve of the sensor

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_{M,i} - E_{T,i})^2} \quad (7)$$

式中, $i=1, 2, \dots, n$, n 为所测数据的个数, $E_{M,i}$ 为电场强度测量值, $E_{T,i}$ 为电场强度理论值。将 $n=28$ 以及各电场强度的理论值和测得值代入式(7)中, 计算得到测量结果的均方根误差如表1所示, 同时表1还给出了对测量结果进行直线($y=kx+b$)拟合的结果。

表1 拟合结果和均方差误差计算结果
Table 1 Fitting results and mean square error calculation results

k	b	R^2	σ
0.341 83	9.374 6	0.995 1	2.718 4

从表1中可以看出测量系统的线性度较好, 但是存在一定的误差, 误差为 2.718 4 kV/m。误差产生的主要原因是由于传感器结构中的屏蔽电极的转动由其中的直流电机驱动, 而直流电机由电池提供能量, 如果传感器持续工作, 很可能导致电池电量不足, 从而使直流电机的转速降低, 最终使得测量结果产生误差。除此之外, 由于传感系统使用激光器输出光信号作为待测电场信号的载体, 并且使用光电探测器进行光电转换, 因此激光器输出光功率的不稳定以及光电探测器的不稳定都将使测量结果产生误差。为了提高测量的准确度, 下一步考虑使用激光-光电池取代干电池给直流电机供电, 由于激光可长时间连续工作, 避免了因电池电量不足引起的误差。同时还需要采用输出光功率稳定性更好的激光器和性能更可靠稳定的光电探测器。

此外, 需要说明的是, 由于实验条件限制, 本文设计的直流电场传感器只是在实验室进行了强电场的测量, 并没能进行实际现场的测量。目前从实验室强电场的测量情况来看, 传感器在几百 kV/m 的强电场环境中可以正常工作。但是考虑到在实际现场测量中传感器所处的环境条件包括温度、湿度、机械强度等复杂多变。因此, 为了提高传感器的抗干扰能力, 下一步可以考虑使用绝缘、全密封、耐老化、导热系数小、机械强度好的材料, 对传感器的封装盒进行优化设计, 增强传感器对复杂测量环境的适应能力。

5 结论

本文基于场磨式电场传感器的基本原理, 设计了一种由直流电机、屏蔽电极和集成光波导构成的能够测量直流电场的传感器。利用 COMSOL 软件构建了集成光波导直流电场传感器的三维仿真模型, 仿真得出感应电极上的电场强度随着屏蔽电极的旋转进行周期性的变化。建立直流电场测试系统, 测试得出研制的光波导直流电场传感器的最小可测电场为 5 kV/m, 最大可测电场大于 140 kV/m, 线性相关系数为 0.995 1。本文研制的直流电场传感器体积小, 便于携带, 为直流电场的测量提供了一种新的技术手段。

参考文献

- [1] ZHEN Yongzen, CUI Xiang, LU Tiebing, et al. Ion flow field analysis considering the finite conductivity of the building near HVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3): 1-4.
- [2] CUI Yong, SONG Xiao, WANG Chen, et al. Ground-level DC electric field sensor for overhead HVDC/HVAC transmission lines in hybrid corridors [J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2020, 14(19): 4173-4178
- [3] ZHANG Bo, WANG Wenzhuo, HE Jinliang. Impact factors in calibration and application of field mill for measurement of DC electric field with space charges[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(3): 31-36.
- [4] MA Qing, HUANG Kaitian, YU Zhanqing, et al. A MEMS-based electric field sensor for measurement of high-voltage DC synthetic fields in air[J]. IEEE Sensord Journal, 2017, 17(23): 7866-7876.
- [5] YANG Pengfei, CHEN Bo, WEN Xiaolong, et al. A novel MEMS chip-based ground atmospheric electric field sensor[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2016, 38(6): 1536-1540.
杨鹏飞, 陈博, 闻小龙, 等. 一种基于 MEMS 芯片的新型地面大气电场传感器[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(6): 1536-1540.
- [6] FABRIZIO M, ENZO D S, SAVERIO A, et al. Fiber bragg grating sensor for electric field measurement in the end windings of high-voltage electric machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 2796-2802.
- [7] FRANJO C, MICHAEL B, WAMADEVA B. Electro-optic sensor for measurement of DC fields in the presence of space charge[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(2): 282-286.
- [8] ZHANG Jiahong, LUO Chuan, ZHAO Zhengang. Design and application of integrated optics sensor for measurement of

- intense pulsed electric field[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(4): 1440-1448.
- [9] LI Jiawen, ZHANG Jiahong, XU Xiaoping, et al. Integrated optical waveguide mach-zehnder interferometer power frequency intensive electric field sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(9): 1-8.
李佳文, 张家洪, 许晓平, 等. 集成马赫曾德型光波导工频强电场传感器[J]. 光子学报, 2019, 48(9): 1-8.
- [10] ZENG Rong, WANG Bo, YU Zhanqing, et al. Design and application of an integrated electro-optic sensor for intensive electric field measurement[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1): 312-319.
- [11] FRANIO C, MICHAEL B, WAMADEBA B. Lithium niobate sensor for measurement of DC electric fields[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(2): 465-469.
- [12] HAO Chongzheng, LI Hongzuo, SUN Quan, et al. Stable bias control technique for any-point locking in mach-zehnder modulator[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(10): 1-9.
郝崇正, 李洪祚, 孙权, 等. 马赫-曾德尔调制器任意偏置点稳定控制技术[J]. 光子学报, 2017, 46(10): 1-9.
- [13] ZHANG Jiahong, CHEN Fushen, SUN Bao, et al. 3D integrated optical E-field sensor for lightning electromagnetic impulse measurement[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(23): 2353-2355.
- [14] CUI Yong, YUAN Haiwen, SONG Xiao, et al. Model, design and testing of field mill sensors for measuring electric fields under high-voltage direct-current power lines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 608-615.
- [15] TANT P, BOLSENS B, SELS T, et al. Design and application of a field mill as a high-voltage DC meter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(4): 1459-1464.