

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.009

## 基于电光聚合物薄膜的芯片式光学硅基电场传感器传感及温度特性研究

饶宇飞<sup>1</sup>, 魏诗超<sup>1</sup>, 刘 阳<sup>1</sup>, 刘景轩<sup>2</sup>, 李海峰<sup>1</sup>, 梁 纲<sup>1</sup>,  
杨 庆<sup>3</sup>, 陈 柠<sup>3</sup>

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450000; 2. 河南诺盾科技有限公司, 郑州 450000; 3. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400000)

**摘要:**“双碳”背景下,新型电力系统的数字化转型对电力传感技术提出了更高的要求。文中针对光学电场传感器温度稳定性差的问题,提出了基于电光聚合物薄膜的芯片式光学硅基电场传感器。首先介绍了电光效应原理,电光聚合物的2阶非线性光学效应以及电光能量耦合方法,其次设计了传感器的加工流程并完成了制备,同时在敏感芯片上成功涂覆电光聚合物,最后通过搭建实验测试平台,完成了传感器的线性度、交流响应以及温度特性测试。实验结果表明,所制备的光学电场传感器在工频电场下拥有较好的线性度且灵敏度高达 $0.945\text{ mV}\cdot(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})^{-1}$ ,传感器在 $0\sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内输出幅值及相位稳定,其幅值比最大波动为 $0.481\text{ dB}$ ,相位差最大为 $3.82^{\circ}$ 。文中提出的传感结构切实可行地提升了光学硅基集成电场传感器的温度特性,为硅基集成光学电场传感器在电力系统中的应用提供参考方案。

**关键词:**电光聚合物;光学芯片;电场传感器;温度特性

### Research on Sensing and Temperature Characteristics of Chip Type Optical-Silicon-based Electric Field Sensor Based on Electro-optical Polymer Film

RAO Yufei<sup>1</sup>, WEI Shichao<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, LIU Jingxuan<sup>2</sup>, LI Haifeng<sup>1</sup>, LIANG Gang<sup>1</sup>,  
YANG Qing<sup>3</sup>, CHEN Ning<sup>3</sup>

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450000, China; 2. Henan Nuodun Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China; 3. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400000, China)

**Abstract:** Under the background of ‘dual Carbon’, the digital transformation of the new power system places higher demands on power sensor technology. In view of weak temperature stability of optical electric field sensor, a chip type optical silicon based electric field sensor based on electro-optical polymer film is proposed in this paper. Firstly, the principle of electro-optical effect, the second-order nonlinear optical effect of electro-optical polymer and the electro-optical energy coupling method are introduced; Then, the processing flow of the sensor is designed and the preparation is finished and, at the same time, the electro-optical polymer is successfully coated on the sensitive chip; Finally, the linearity, AC response and temperature characteristic of the sensor are carried out by setting up the experimental test platform. The experimental results show that the prepared optical electric field sensor has good linearity and high sensitivity up to  $0.945\text{ mV}\cdot(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})^{-1}$  under the power frequency electric field, and both output amplitude and phase of the sensor are stable in the temperature range of  $0\sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ , with the maximum fluctuation of the amplitude ratio of  $0.481\text{ dB}$  and the maximum phase difference of  $3.82^{\circ}$ . The structure of the sensor proposed in this paper practically and feasibly improves the temperature characteristics of the silicon-based integrated optical electric field sen-

收稿日期:2023-12-29; 修回日期:2024-02-26

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52077019)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52077019).

sor, and provides a reference for the use of silicon-based integrated optical electric field sensors in power systems.

**Key words:** electro-optical polymers; optical chips; electric field sensors; temperature characteristics

## 0 引言

目前,传统的PT、CT设备虽然可以实现对电网电压电流参数的测量<sup>[1-2]</sup>,但是其设备体积、重量较大,造价昂贵,且存在频带上的限制,难以在电网上实现广泛的布置<sup>[3-5]</sup>,因此亟需研发新型的传感器件。随着集成光学的快速发展,光学电场传感器凭借其宽频带、大量程、抗干扰能力强、结构紧凑等优点进入学者的视野中<sup>[6-8]</sup>。但光学电场传感器受限于敏感材料、拓扑结构、制备工艺等因素,其传感性能难以得到进一步的提升<sup>[9-10]</sup>。近年,随着以集成光学电场传感器(integrated optical e-field sensors, IOES)为代表的新型集成技术发展,光学电场传感器迎来了新的发展机遇。集成光学电场传感器采用先进的集成技术和电光材料,相比早前采用大体积电光晶体的传感结构<sup>[11]</sup>,IOES采用电光聚合物材料,将光信号限制在微纳尺度下的传导介质材料中<sup>[12]</sup>,从而极大地降低光学传感器的整体尺寸,并规避铌酸锂材料所带来的传感器缺陷,契合当前传感器微型化的发展趋势<sup>[13-15]</sup>。

电光聚合物集成光学电场传感器打破了铌酸锂晶体对IOES调制效果的限制,IPITEK公司的Wang等人通过光刻和旋涂形成聚合物波导槽,并将电光聚合物填充在波导槽内构成波导结构,从而实现了光路的传输与调制,制备的传感器检测频率高达12 GHz<sup>[16]</sup>。重庆大学杨庆团队的罗曼丹等人将谐振微环与MZI结构结合,制备了一种硅基集成的电光聚合物包覆微环谐振器<sup>[17]</sup>,利用波导的倏逝场效应,实现芯片上的电光能量转换,所制备的传感器可以进行强度6.2~150 kV/m、带宽在50 Hz~13.56 MHz范围内的电场测量,但温度稳定性较差,且灵敏度较低。采用电光聚合物为敏感单元材料的IOES,可以实现传感器的敏感元件的高度集成与高灵敏度测试,但是输出性能容易受到温度因素影响,并且使用条形波导形式进行倏逝波耦合的传感器灵敏度较低,这也是当前该类传感器所面对的主要问题,因此于片上实现电光耦合的方式以及性能提升方法上还需要进一步探究。

文中针对现有IOES所存在的不足,从电光能量耦合原理出发,以电光聚合物电光效应为落脚点,采用新型的狭缝跑道型谐振微环拓扑结构,实

现IOES敏感单元的高度集成,并对所制备的电场传感器进行传感及温度特性测试,验证该狭缝跑道型谐振微环结构的性能优势与可行性。

## 1 理论方法

### 1.1 电光效应原理

将电场参量利用电光效应耦合为光学参量进行测试是目前光学电场传感的主流方案。电光效应为电光材料内部受束缚程度较低的价电子在外电场作用下发生极化,因此导致电光材料内部的电子分布发生变化,此时当激光射入后,材料的极化会表现为折射率的变化<sup>[18]</sup>。通过泰勒级数展开后电光效应为

$$n = n_0 + aE + bE^2 + \dots \quad (1)$$

式(1)中: $n_0$ 为无外电场作用时的初始折射率; $aE$ 为Pockels Effect所带来的折射率变化,也叫一次电光效应; $bE^2$ 代表Kerr Effect所带来的折射率变化,也叫二次电光效应。由于二次电光效应的作用效果相对于一次电光效应较为微弱<sup>[19]</sup>,因此在SOI片上进行电光能量耦合时通常只考虑一次电光效应。

### 1.2 电光聚合物的结构及其二阶非线性光学效应

有机电光材料是一种具备电光效应的高分子化合物,是进行电光信息交互的重要媒介<sup>[20]</sup>。相较于常用的无机电光晶体,电光聚合物依靠电荷转移所产生的非线性极化,获得远高于无机电光晶体的电光系数与响应速度。

发色团结构示意图见图1,电光聚合物的非线性电光效应来源于其发色团中易于极化和移动的非定域 $\pi$ 电子体系。发色团是一种由电子受体与给体及含有 $\pi$ 键共轭桥构成的共轭分子,在无电场作用下,共轭分子的正负电荷平衡,具有偶极子结构特征,在外电场作用下<sup>[21]</sup>,分子内的受体通过共轭桥发生电子转移,从而使得电光材料显示出极化现象,此时电光聚合物的极化强度与施加电场 $E$ 的关系可表示为

$$P = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E + \varepsilon_0 \chi^{(2)} EE + \varepsilon_0 \chi^{(3)} EEE + \dots \quad (2)$$

式(2)中, $\chi^{(1)}$ 、 $\chi^{(2)}$ 、 $\chi^{(3)}$ 分别为线性、2阶非线性和3阶非线性极化率,由于电光聚合物中的2阶极化率系数远高于3阶极化率,因此在电光聚合物的分析中只考虑2阶非线性光学效应。对于电光聚合

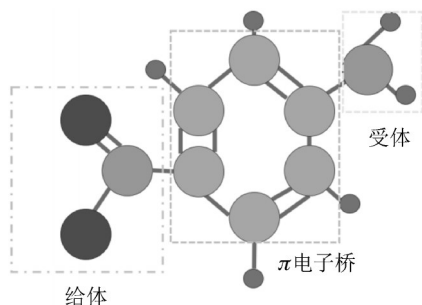


图1 发色团结构示意图

Fig. 1 Chromophore structure diagram

物而言,其本身的 $\chi^{(2)}$ 越大,聚合物所产生的极化越明显,电光转化的能力越强。通过气体模型建立 $\chi^{(2)}$ 与发色团1阶超极化率 $\beta$ 两者之间的关系<sup>[22]</sup>

$$\chi_{ijk}^{(2)} = N f_i f_j f_k <\beta>_{ijk} \quad (3)$$

式(3)中: $N$ 为电光聚合物材料中发色团的密度; $f_{i,j,k}$ 为外加电场施加与聚合物薄膜的局域场关系因子。由式(3)可知,电光聚合物的2阶极化率不仅受 $\beta$ 值影响,还受聚合物材料发色团浓度与电场施加方向影响。

### 1.3 电场传感器的电学—光学能量耦合方法

文中设计的硅基集成光学电场传感器通过光刻技术在SOI基片上进行刻蚀波导,从而实现传输在微纳尺度下的高度集成,并基于电光聚合物的电光效应与倏逝场效应以达到片上电光能量耦合。为了能实现对电场传感器的传感特性与温度特性的优化,文中设计了一种狭缝跑道型谐振微环结构的电场传感器,关于该传感器的整体模型见图2。

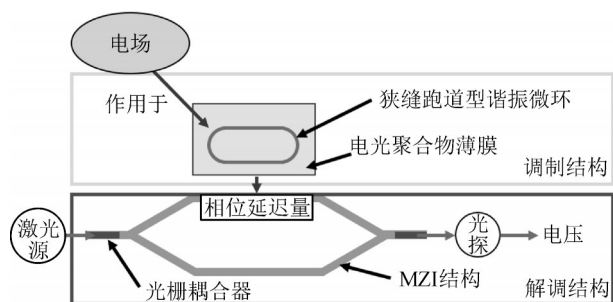


图2 电场传感器整体结构原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the overall structure of electric field sensor

IOES基片上的传感区域包括负责光强解调的MZI结构与进行电场感应与线性度优化的微环谐振器。由于传感器线性解调对于微环结构高耦合系数的需求,并考虑MZI整体对占地面积与相位调制长度的因素,增加谐振微环与MZI条波导的耦合长度,采用狭缝跑道微环结构以改善感应单元的性能。狭缝跑道微环包括与MZI感应臂的直波导耦合的条形波导与条波导两侧的模式转换器以及被电

光聚合物包覆的狭缝波导,通过狭缝结构实现在不影响微环衰减系数 $\alpha$ 的情况下增大光场与电光聚合物重叠面积,并且相对于直波导结构,狭缝结构利用狭缝中的电光聚合物直接参与电光调制,增加传感器的电光耦合强度,从而增强传感器的温度稳定性。

## 2 硅基集成电场传感器的制备

### 2.1 制备工艺

硅基光波导的制备工艺主要包括:基片清洗、匀胶、曝光、刻蚀、去胶等,下面对波导结构的主要制备流程进行介绍<sup>[23-25]</sup>,加工流程示意图见图3。

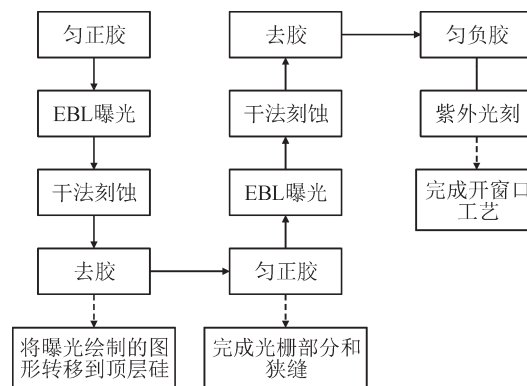


图3 工艺加工流程图

Fig. 3 Process flow chart

1)匀胶。在基片经过有机溶剂超声清洗后,基片的刻蚀需要旋涂一层光刻胶来配合后续曝光制作光刻的掩膜版,为了达到更高的刻蚀精度,利用负胶PMMA进行匀胶,以获得更高的旋涂曝光对准率和更高的波导光滑度。

2)曝光。通过电子束光刻机对匀胶后的基片进行改性,曝光过程决定了掩膜版的质量和整体的精度,利用电子束光刻机可以达到比紫外线光刻机更高曝光对准率。

3)刻蚀。在刻蚀过程中,掩膜版可以防止掩膜版下层的区域不被刻蚀,将曝光所画出的结构转移到顶层硅中。

4)清洗并套刻。光栅耦合器中的光栅部分位于波导结构上层,其次电场传感模块中的狭缝对于精度要求较高,这两者皆需要通过刻套工艺来实现,通过氮气与热烘板对芯片进行清洗,随后重复1)、2)、3)过程,以完成对光栅耦合器光栅部分和狭缝的构造。

5)最后在基片上进行“开窗”,也就是在MZI波导结构上面精准覆盖一层可以隔绝电光薄膜的上包层。考虑到窗口的作用只是为了遮掩MZI的波导结构,故对精确度的要求不高,可采用紫外光光刻

胶SU8作为掩膜,具体的制作过程与之前掩膜版的制作过程类似。最后在经过等离子体水的超声清洗后即可用于后续实验测试。

经过上述步骤所制备的波导结构见图4,采用该加工流程成功实现了该传感器传感波导的制备。

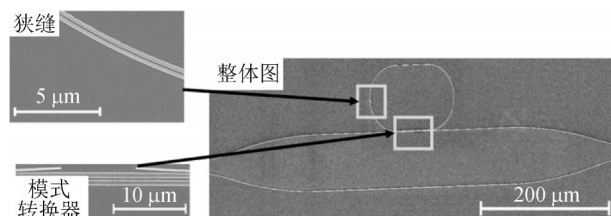


图4 电场传感器敏感结构SEM图

Fig. 4 SEM image of sensitive structure of electric field sensor

## 2.2 电光聚合物薄膜的旋涂与极化

为了实现片上电光能量的耦合,还需要在芯片上进行电光聚合物的旋涂与极化,以此来完成芯片敏感单元的制备。文中所使用发色团为中科院研发的久洛尼定型发色团,分子结构见图5,通过久洛尼定强电子给体与三氟甲基苯基三氰基呋喃强电子受体的电荷转移,使其具备极高1阶超极化率 $\beta$ 和较高的线性电光效应。

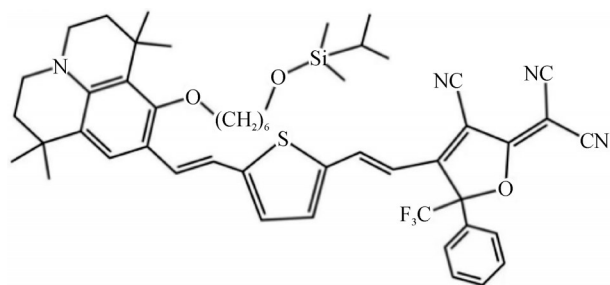


图5 发色团分子结构图

Fig. 5 Chromophore molecular structure diagram

使用电子天平先称取适量PMMA溶于二溴乙烷溶剂中,再加入适量发色团,搅拌均匀后过滤杂质并静置一段时间,随后用台式匀胶机将其旋涂在SOI基片表面,之后将其放入真空干燥箱烘烤使薄膜成型固化,通过简单反射法测量其电光系数为256 pm/V,其折射率对波长为1 550 nm的入射光约为1.57。

为了使得电光聚合物具备良好的电光效应,还需对其进行极化处理,搭建电晕极化平台见图6。根据PMMA聚合物性质,将芯片加热至玻璃化转变温度附近,此时给钨针施加适当的直流电压,对芯片进行极化处理,此时极化电压要满足聚合物偶极子旋转的需求,又要防止施加电压过高使得空气击穿,整个极化过程要保持10 min以上,以确保聚合物中的发色团有充足的时间克服分子间作用力进

行极化,极化完成后在保持极化电压的情况下降低温度,聚合物薄膜将重新固化,将发色团固定在极化后的位置。

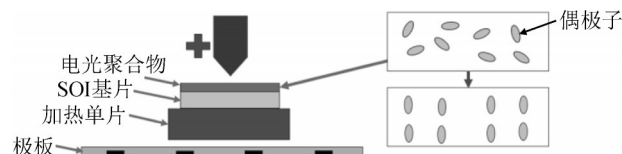


图6 薄膜电晕极化平台

Fig. 6 Thin film corona polarization platform

## 3 电场传感器的特性试验

### 3.1 试验平台搭建

为了对光学传感器进行传感特性测试,以验证其性能表现,搭建标准电场发生平台见图7。使用任意函数发生器产生小信号,通过AMT高压放大器将小信号放大,而后接入两块平板电极以产生标准电场,为了与芯片所产生的光强信号做对比,使用分压器连接示波器以读取校准电压波形。

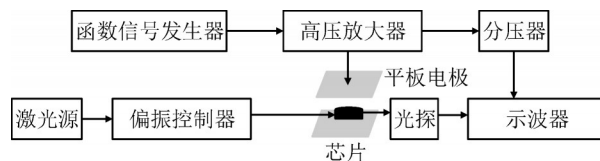


图7 标准电场发生平台示意图

Fig. 7 Schematic diagram of standard electric field generation platform

### 3.2 光学电场传感器的线性度测试

在图7所搭建的标准电场发生平台对制备的光学电场传感器进行输入输出线性度测试。将电场传感器放置于两极板中间,调整光路,在室温条件下逐步增加电压幅值,并通过分压器与光电探测器读取施加电场与光学传感器输出信号。测试结果见图8。从图8中可以看出,在两极板间电场小于148.2 kV/m时,文中所制备的光学电场传感器具有较好的线性度,对于该范围内的测试数据进行线性拟合。线性结果显示该皮尔逊系数为0.999,曲线拟合优度为0.998 72,表明该传感器在该范围内输入输出为线性关系,且灵敏度可达 $0.975 \text{ mV} \cdot (\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ ,具备电场测试的能力。

### 3.3 传感器的交流响应测试

通过前述标准电场测试平台对光学传感器的传感特性进行测试。制备的光学传感器工频交流电场响应图见图9。

从图9中可以看出,光学电场传感器具有良好的跟随效应。为了进一步量化两者之间的关系,利用皮尔逊相关系数来衡量传感器输出信号与极板

间电场的相关度。

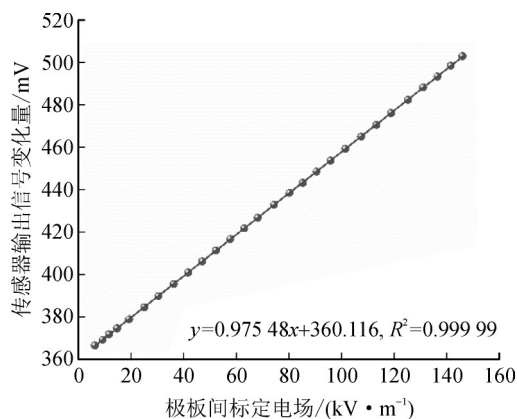


图8 光学电场传感器线性度测试

Fig. 8 Measurement of linearity of optical electric field sensor

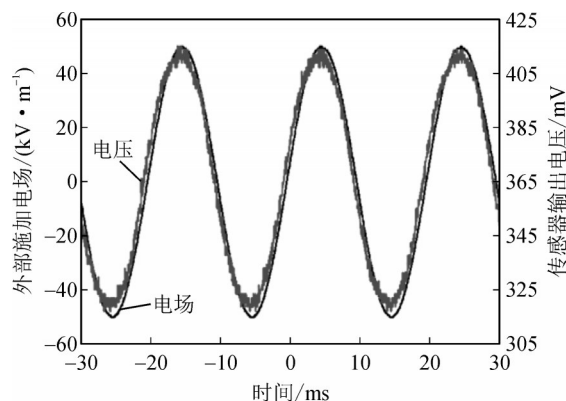


图9 工频交流电场响应图

Fig. 9 Power frequency AC electric field response diagram

$$\rho_{V,E} = \frac{\text{Cov}(V,E)}{\sigma_V \sigma_E} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \mu_V)(E_i - \mu_E)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}} \quad (4)$$

式(4)中,  $\text{Cov}(V, E)$  为传感器输出和外电场的协方差。传感器的交流响应可以通过皮尔逊系数来衡量, 如果皮尔逊相关系数在 0.8~1 之间, 即可证明两组数强相关, 数值越接近 1, 两者相关性越强。通过皮尔逊公式计算出传感器在 50 Hz 交流电场的皮尔逊系数为 0.99, 相位偏差为  $-1.08^\circ$ , 结合图 8 响应图可推断该狭缝跑道结构的光学传感器在高电场情况下拥有较好的交流响应能力。

### 3.4 传感器的温度特性测试

为了评估温度因素对电场传感器的电光聚合物影响, 通过搭建温度特性测试平台对工频信号下的传感器进行温度特性试验。在极板间施加 50 kV/m 的电场, 将传感器与对接光纤放置在受热电冷却器 (thermo-electric cooler, TEC) 控制的温度感应芯片上并一同安放在极板中心。每次施加电场前需要确保 TEC 达到目标温度, 且维持目标温度 10 min 以

上, 以确保芯片均匀受热。调节 TEC 温度从 0 °C 阶梯升温至 75 °C, 步长为 5 °C, 记录传感器在每个温度下输出信号的幅值比与相位差随温度的变化曲线, 见图 10。

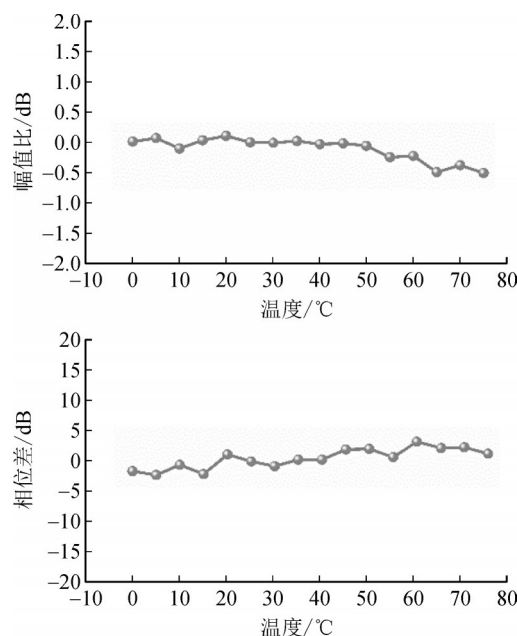


图10 传感器的温度特性曲线

Fig. 10 Temperature characteristic curve of the sensor

从图 10 中可以看出在 0~50 °C 的温度范围内, 该传感器幅值比及相位差仅存在小幅波动, 相对于文[15]中的光学硅基集成电场传感器, 该传感器只需要一个谐振微环实现电场—光学信号的耦合, 并且采用狭缝波导结构极大地降低了温度对传感器输出特性的影响, 实现了工作范围内传感器温度稳定性的提升。但随着温度的进一步升高, 传感器幅值比出现一定程度的下降, 相位差也出现一定程度的增加, 这可能是由于温度过高所引起的发色团退极化倾向所导致的。但在工作温度范围内, 该传感器的输出结果均在可接受误差范围之内, 证明该传感器在正常工作温度范围内拥有较好的温度稳定性。对此在今后的工作中, 可在芯片封装中采用导热陶瓷沉积与安装温控模块, 对芯片温度进行限制, 从而进一步降低温度对电光聚合物性能的影响。

## 4 结语

文中研究电光能量耦合原理与电光聚合物电光效应机理, 提出适用于 SOI 片上电光能量耦合方法, 针对目前 IOES 的不足, 采用狭缝跑道型谐振微环结构以提升光学电场传感器的性能, 并成功制备该基于电光聚合物薄膜的芯片式光学硅基电场传感器。对传感器的传感及温度特性进行测试, 测试结果表明, 该结构传感器在工频下拥有良好的线性

度与交流信号幅值响应,并且在0~75℃环境下,传感器输出信号幅值变动小于0.481 dB、相位差最大为3.82°,证明该传感器在工作温度下拥有极强的抗温度干扰能力。

## 参考文献:

- [1] 韩志飞,胡 军,李立涅,等. 面向新型电力系统的微型电场传感技术[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 399-414.  
HAN Zhifei, HU Jun, LI Liying, et al. Progress of micro electric field sensing technology for new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 399-414.
- [2] 李建林,丁子洋,游洪灏,等. 构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 1-11.  
LI Jianlin, DING Ziyang, YOU Honghao, et al. Research on stable operation of new power system supported by grid-forming energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 1-11.
- [3] 陈伟根,张知先,李 剑,等. 电气设备状态参量智能传感技术[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(z1): 323-342.  
CHEN Weigen, ZHANG Zhixian, LI Jian, et al. Intelligent sensing technology for power equipment state parameters [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(z1): 323-342.
- [4] 杨 庆,董富宁,罗曼丹,等. 宽频电压感知方法及其数据应用[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 1969-1983.  
YANG Qing, DONG Funing, LUO Mandan, et al. Wideband voltage sensing methods and sensing data applications[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1969-1983.
- [5] 柯 锟,杨 庆,邱震辉,等. 非接触式电压/电场传感器研究综述[J]. 湖南电力, 2023, 43(5): 71-78.  
KE Kun, YANG Qing, QIU Zhenhui, et al. Review on non-contact voltage/electric field sensors[J]. Hunan Electric Power, 2023, 43(5): 71-78.
- [6] 庞福滨,袁宇波,戴 锋,等. 全光纤电流互感器性能干扰因素分析及解决方案综述[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 64-72.  
PANG Fubin, YUAN Yubo, DAI Feng, et al. Analysis of interference factors of all - fiber - current - transformer performance and summary of solutions[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 64-72.
- [7] 司马文霞,韩 睿,杨 庆,等. 双晶体温度补偿型非接触式光学过电压传感器[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3465-3473.  
SIMA Wenxia, HAN Rui, YANG Qing, et al. Contactless optical overvoltage sensor based on dual - crystal compensation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3465-3473.
- [8] 李岩松,高 利,刘 君. 基于光学传感的交直流混合场一体化测量实现[J]. 电测与仪表, 2023, 60(8): 150-156.  
LI Yansong, GAO Li, LIU Jun. Integrated measurement of AC and DC mixed field based on optical sensing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(8): 150-156.
- [9] 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.
- [10] 赵录兴,崔 翔,陆家榆,等. 直流输电线路地面合成电场测量方法探讨[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 644-652.  
ZHAO Luxing, CUI Xiang, LU Jiayu, et al. Discussion on ground synthetic electric field measurement method for HVDC lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 644-652.
- [11] 孙尚鹏,杨 庆,何彦霄,等. 适用于宽温区的LiNbO<sub>3</sub>体效应电光干涉型强电场传感器[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 1913-1921.  
SUN Shangpeng, YANG Qing, HE Yanxiao, et al. Intense electric-field sensor for broad temperature-range applications based on the electro-optic interferometer of bulk Lithium niobate[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1913-1921.
- [12] TAGHAVI I, MORIDSADAT M, TOFINI A, et al. Polymer modulators in silicon photonics: Review and projections[J]. Nanophotonics, 2022, 11(17): 3855-3877.
- [13] HECK M J R, BAUTERS J F, DAVENPORT M L, et al. Hybrid Silicon photonic integrated circuit technology[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 6100117.
- [14] WON R. Integrating Silicon photonics[J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 498-499.
- [15] JOKERST N M, LUAN Lin, PALIT S, et al. Progress in chip-scale photonic sensing[J]. IEEE Transactions on Bio-medical Circuits and Systems, 2009, 3(4): 202-211.
- [16] WANG W C, LIN W, MARSHALL H, et al. All-dielectric miniature wideband RF receive antenna[J]. Optical Engineering, 2004, 43(3): 673-677.
- [17] LUO Mandan, YANG Qing, DONG Funing, et al. Miniature micro - ring resonator sensor with electro - optic polymer cladding for wide - band electric field measurement[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(8): 2577-2584.
- [18] NAKAMURA K, MIYAZU J, SASAKI Y, et al. Space-charge-controlled electro-optic effect: Optical beam deflection by electro-optic effect and space-charge-controlled electrical conduction[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104(1): 013105-1-013105-10.
- [19] ZHANG J, LI Y, JIANG C, et al. Optical waveguide

- electric field sensor based on dual parallel mach-zehnder interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(18): 20099-20106.
- [20] KAZANSKIY N L, KHONINA S N, BUTT M A. Advancement in Silicon integrated photonics technologies for sensing applications in near-infrared and mid-infrared region: A review[J]. Photonics, 2022, 9(5): 331.
- [21] CHANG C C, CHEN C P, CHOU C C, et al. Polymers for electro-optical modulation[J]. Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews, 2005, 45(2): 125-170.
- [22] KIELICH S. Optical second-harmonic generation by electrically polarized isotropic media[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1969, 5(12): 562-568.
- [23] 涂正瑞. 硅基光学微环谐振器及其应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- TU Zhengrui. Silicon based optical micro-ring resonator and its applications[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018.
- [24] MARGALIT N, XIANG C, BOWERS S M, et al. Perspective on the future of Silicon photonics and electronics[J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(22): 220501.
- [25] LEUTHOLD J, KOOS C, FREUDE W, et al. Silicon-organic hybrid electro-optical devices[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(6): 114-126.
- 饶宇飞(1984—), 男, 教授级高级工程师, 长期从事电力系统、电网安全监督等研究(E-mail: ryf326@163.com)。
- 杨 庆(1981—), 男, 博士, 博导, 主要从事高电压与绝缘技术专业研究(E-mail: yangqing@cqu.edu.cn)。

## 《高压电器》2024年4期广告单位

### 彩色广告

封一: 朗松珂利(上海)仪器仪表有限公司

封二: 新乡市裕诚电气有限公司

封三: 西安高压电器研究院股份有限公司(认证)

封四: 上海乐研电气有限公司

前彩1: 北京京东方真空电器有限责任公司

前彩2-3: 威卡国际贸易(上海)有限公司

前彩4: 南平德赛技术装备有限公司

前彩5: 正泰电气股份有限公司

前彩6: 陕西龙翔电器有限公司

前插7: 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司

前插8: 征稿启事

前插9: 征稿启事

前插10: 浙江聚弘凯智能电气股份有限公司

前插11: 陕西斯瑞新材料股份有限公司

前彩12: 山东哈大电气有限公司

特约主编寄语

中彩1: 安徽伽德罗工业技术有限公司

中彩2: 珠海康晋电气股份有限公司

中彩3: 东莞市利群裕兴高分子科技有限公司

中彩4: 山东电工电气日立高压开关有限公司

后彩1: 北京明源科技发展有限公司

后彩2: 中山市永淇自动化设备有限公司

后彩3: 杭州旭虹真空电器有限公司

后彩4: 西安西电高压开关操动机构有限责任公司

后彩5: 北京力码科信息技术股份有限公司

后彩6: 湖南电科院检测集团有限公司

后彩7: 台州昱峰智能装备有限公司

后彩8: 西电电工材料有限责任公司

后彩9: 西一电气集团有限公司

后彩10: 陕西维珂瑞电气有限责任公司

后彩11: 北京维通利电气有限公司

后彩12: 浙江途远电气有限公司