光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20240918003

改进谐振微环结构的集成硅光子电场传感器

朱雪琼*，李　群，胡成博，路永玲，杨景刚，刘子全，尹康涌
（国网江苏省电力有限公司电力科学研究院，南京 211103）

摘　要： 随着电力系统智能化不断推进，新型电力系统对光学电场传感技术提出更高的要求。针对当前绝缘体上硅（SOI）基马赫-曾德尔干涉仪（MZI）型电场传感器存在线性工作范围窄、灵敏度不足等问题，提出利用非谐振态微环自身的相位响应补偿MZI三阶交调失真的优化方案。通过建立微环辅助MZI器件的理论模型开展结构分析，并基于Lumerical仿真平台进行光电耦合仿真验证微环结构的优化效果，最终选用两种典型电光聚合物完成器件制备。实验测试表明，采用狭缝跑道型微环结构的MZI传感器，相较于双微环辅助MZI结构，其线性范围提升77%，并采用高电光系数的电光聚合物后，灵敏度最高可达1.034 mV/(kV·m^{-1})，相较于未改进的传感器提升290%；交流响应测试显示该传感器拥有良好的电场跟随特性。通过理论建模、数字仿真与实验测试等研究方法，证实所提出的微环补偿机制可显著提升传感器的性能，为SOI光学电场传感器拓扑优化提供参考。

关键词： MZI；微环谐振器；电光聚合物；电场传感器；硅光子
中图分类号： TN252　**文章编号：** 1001－5868(2025)01－0049－08

Integrated Silicon Photonic Electric Field Sensor with Improved Resonant Microring Structure

ZHU Xueqiong, LI Qun, HU Chengbo, LU Yongling, YANG Jinggang, LIU Ziquan, YIN Kangyong
(**State Grid Jiangsu Electric Power Company Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, CHN**)

Abstract: Owing to the continuous advancement of power-system intelligence, new power systems have imposed higher requirements for intelligent power-sensing technology. The current SOI platform of the MZI-type electric-field sensor features a narrow linear operating range, low sensitivity, and other issues. Hence, in this study, we proposed using the non-resonant state of the phase response of the microring to compensate for the MZI third-order cross-modulation distortion solution. Additionally, we performed a theoretical analysis of the different structures of the microring-assisted MZI and the use of the Lumerical software for structural simulation to verify the feasibility of the improved microring. Ultimately, we proposed the combination of two types of typical electro-optic polymers to complete the preparation of the electric-field sensor. The results of input - output testing and AC response tests of the prepared electric-field sensor show that the linear range of the slit runway-type microring-assisted MZI electric-field sensor improves by 77% and that the sensitivity of the electro-optic polymer with a high electro-optic coefficient can reach up to 1.034 mV/(kV/m), which is 2.9 times higher than that afforded by an unimproved sensor. Good responses are indicated in the AC response test. Research methods, such as theoretical analysis, simulation models, and

收稿日期：2024－09－18.
基金项目：国网江苏省电力有限公司科技项目（J2023133）.
* **通信作者：**朱雪琼

experimental tests, confirm that the optimization strategy adopted in this study effectively improves the performance of the sensor and provides a reference for improving the direction of the topological structure of SOI optical electric-field sensors.

Key words: MZI; microring resonator; electro-optical polymer; electric-field sensor; silicon photonics

0 引言

随着电力系统智能化不断推进,新型电力系统对于全域信息可观、可测、可控的需求逐步增加[1-2],其中电场参数不仅是反映设备运行状态的重要参数,还是电力节点、输配电线路上的重要状态量[3-5]。目前常用的电压互感器等设备虽然可以实现电压参数的监测,但受其体积、频带、成本等因素的限制,难以在电网上进行广泛的布置。因此,亟需研发高灵敏度、宽频带、微型化的新型感知方法[6-7]。

近年来,随着集成技术与电光材料的快速发展,具备高精度、宽频带特点集成光学电场传感器受到广泛关注[8-10]。根据波导结构和工作原理,集成光学电场传感器主要可分为:马赫-曾德尔干涉(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)型、共路干涉型以及耦合干涉型[11-12]。其中,基于MZI结构的(Integrated Optical Electric Field Sensors, IOES)因配置简单、无需添加其他分立元件且具备更高的灵敏度而备受关注[13-14]。Bulmer等利用不对称干涉臂将初始相位点移动至线性区,无需外置设备即可实现固定的相位差[15]。但该传感器结构与敏感材料的限制线性工作区较窄,且中心工作点易发生漂移,因此其结构需进一步优化,改进敏感材料以提升性能。Wang等将较高电光系数的电光聚合物填充至玻璃基板的凹槽中,构成聚合物波导,改进敏感材料使其测试频带提升至12 GHz[16-17]。Rutirawut等对硅氮化物平台上的狭缝波导结构进行实验,结果表明该结构增加光场与电光聚合物的重叠面积,从而提高了传感器的性能[18]。综上所述,硅基集成电场传感器能规避由传统电光晶体缺陷所带来的影响,并且更易于实现电场传感器的高度集成化,但由于片上集成的MZI调制器的结构尚不完善,片上能量耦合机理尚不清晰,需要进一步研究探索。

本文研究绝缘体上硅(SOI)片上电-光能量耦合机理,引入新型电光聚合物作为敏感材料实现电光能量转换,利用非谐振状态微环自身的相位响应补偿MZI存在的三阶交调失真,通过理论推导、仿真分析与实验测试相结合的方式,从理论层面提出结构优化思路与方案,以数值仿真的方式验证改进结构的可行性,最终通过实验测试证明优化策略的有效性,为MZI型硅基电场传感器的结构优化提供参考。

1 感知原理及其结构优化

1.1 片上电-光能量耦合原理

在SOI片上引入具有一次电光效应的电光聚合物,通过倏逝场效应达到电-光能量耦合的目的,关于光学集成电光传感器的整体原理如图1所示。

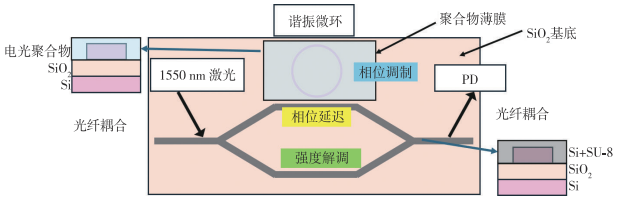


图1 电场传感器整体结构原理示意图

IOES基片上的结构主要包括MZI调制器、微环谐振器以及光栅耦合器,其中MZI调制器负责光强变化的调制与解调,覆盖电光聚合物薄膜的微环谐振器负责外部电场感应。由于微环中的相位变化难以直观地测量,通过MZI结构实现光强的解调,至此微环相位差转化为光强信息,实现电场参数到输出信号值的线性变化。

1.2 MZI结构非线性失真分析

通过MZI结构实现电场的准确测量需要建立施加电场与输出光波的线性关系,图2为对称性MZI结构示意图。E_{in}为输入光波,E_{out}为输出光波,φ_1为信号臂光波相位,φ_2为参考臂光波相位,根据光波叠加原理,输出光场功率P_{out}可表示为:

$$P_{out}=\frac{1}{2}P_{in}\left[1+\cos(\varphi_1-\varphi_2)\right] \tag{1}$$

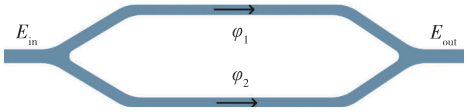


图2 对称性MZI结构示意图

图 3 显示了对称 MZI 的传输特性，其中红色 P_2 和橙色 P_3 分别代表公式(1)的二阶和三阶导数。可以看出，MZI 传输频谱中不存在理想的线性传输区间，因此需要额外的辅助结构来有效抑制严重的高阶谐波失真[19-20]。

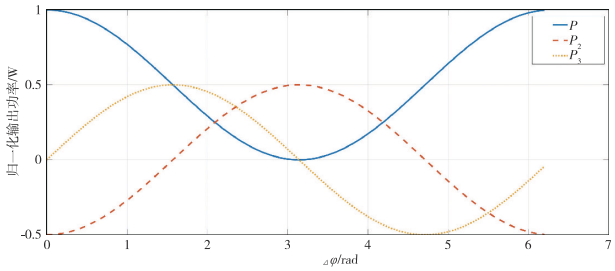


图 3　对称 MZI 传输图谱

1.3　微环辅助 MZI 的结构优化

图 4 为基本微环谐振器结构图，入射光 E_1 在经过微环时，由于倏逝场效应部分光 E_{r1} 耦合至环形波导中，光波 E_{r1} 绕环一圈后，E_{r2} 重新与条波导中的光波发生干涉[21]。

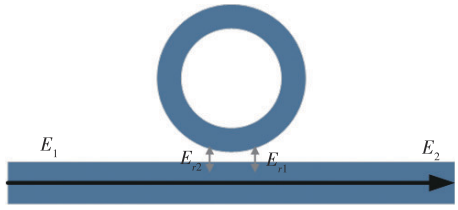


图 4　微环谐振器结构示意图

微环相位响应本身并不存在完美的线性区间，但在 $\theta=\pi$ 处，有一段传输曲线呈现出超线性，可利用该处的超线性弥补 MZI 存在的自身三阶交调失真，将微环结构的相位响应函数在 $\theta=\pi$ 处进行泰勒展开，即：

$$\Phi_r|_{\theta=\pi}=\frac{-\alpha(t^2-1)}{\alpha^2 t+\alpha t^2+t}(\theta-\pi)-\left[\frac{\left[a^3(t^2-1)\right]^3}{3(a+t+at^2+a^2t)^3}-\frac{a(t^2-1)(2at^2-a^2t+2a-t)}{6(a+t+at^2+a^2t)^2}\right](\theta-\pi)^3 \tag{2}$$

由公式(2)可知，可通过调整微环结构改变衰减系数 α 与透过系数 t，使得微环自身相位响应补偿 MZI 自身存在的三阶交调失真，从而扩大 MZI 结构的线性工作区。根据此理论设计双微环辅助 MZI 的电场传感器，其结构如图 5 所示。

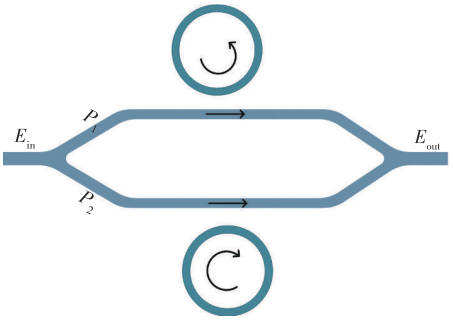


图 5　双微环辅助的 MZI 结构示意图

使用双微环辅助 MZI 结构作为电场传感器的敏感单元结构，一方面可以通过谐振相位的改变来实现电场的测量，有效降低传感器整体尺寸。在适当的微环投射系数下，正弦传递函数与微环超线性相互补偿，从而扩大电场传感器的线性工作区间。另一方面，双微环结构的 MZI 工作点处于非谐振工作点，其测试效果受耦合效率与波导损耗影响。如图 6 所示，通过增加微环谐振器可以明显优化 MZI 结构的线性区间。

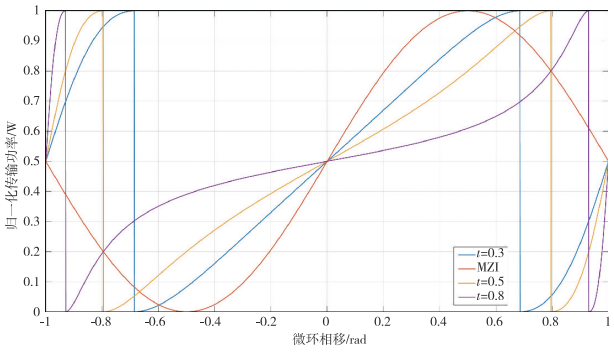


图 6　MZI 与微环辅助 MZI 的传输谱

为保证 MZI 在解调过程中拥有较宽线性范围，通过增大单位微环相移 $\Delta\theta$ 引起的光强变化幅值 ΔI，在谐振微环中增加一段直波导进行光波耦合，从而提升其相位调制长度。并且谐振微环辅助的 MZI 传感器在加工时会存在一定的加工误差，采用普通微环辅助的 MZI 存在耦合间距与微环半径间的冲突，非常容易受到加工误差的影响，而跑道微环辅助的 MZI 耦合系数不受微环半径大小的限制，大大提升了器件对工艺误差的包容性。其次，对波导结构进行调整，用狭缝波导取代条状波导，并增加相应的引导结构。这种调整有利于光场与电光聚合物的平滑耦合，从而最大限度地扩大波导光场与外加电场之间的重叠面积，实现微环辅助 MZI 灵敏度与线性度的双向优化。

经过优化的狭缝波导微环辅助MZI结构如图7所示。公式(3)为微环中光波环绕一圈后的光波相移改变量。式中，L_m代表微孔中狭缝结构的长度，n_{eff}是波导的有效折射率，η是聚合物薄膜折射率与波导有效折射率之间的转换效率，r_{33}是电光系数，R_r是微孔结构的半径，L_t是跑道长度。

$$\Delta\theta=\frac{L_m}{2\pi}\eta\Delta n=\frac{\eta n_{eff}^3 r_{33}(2\pi R_r+L_t)}{4}E \quad (3)$$

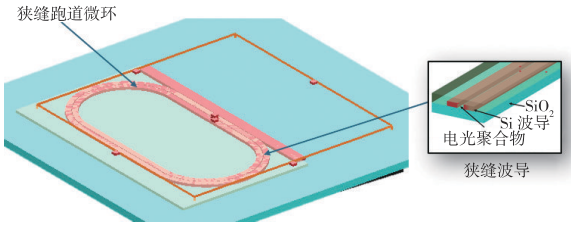


图7 狭缝跑道微环辅助MZI结构示意图

以理论推导的方式确定片上拓扑结构改进方向，并提出狭缝跑道微环辅助MZI的改进方案。采用Lumerical仿真平台验证该微环改进方案的必要性与可行性。

1.4 微环辅助MZI传感器的结构仿真验证

1.4.1 微环的设计与优化

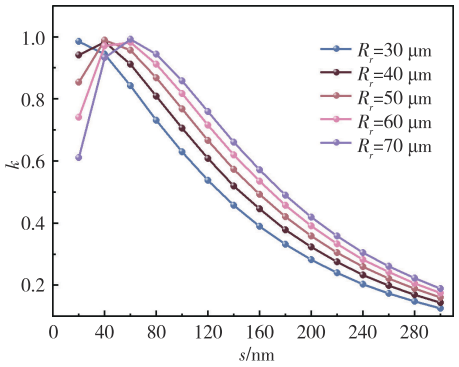
根据上述分析，需要调整微环的结构尺寸使得微环的超线性相位响应抵消MZI中的三阶交调失真，假设当$\alpha=0.8$时，为优化器件解调结构线性度，微环的k应该在0.942附近，k值的计算式为：

$$k=\frac{2\Gamma_{TE}r_1^2r_2^2}{\beta k_0^2(n_{si}^2-n_{sio_2}^2)(2+r_2d)}e^{-r_2(d+2R_r\sin\frac{\theta_c}{2})} \quad (4)$$

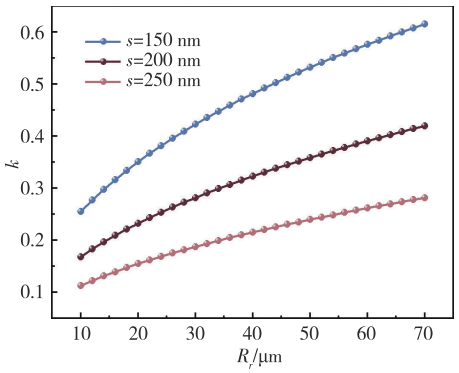
式中，d为波导厚度，θ_c为微环与直波导耦合角度，r_1和r_2可分别写：

$$r_1=\sqrt{k_0^2n_1^2-\beta^2},\ r_2=\sqrt{\beta^2-k_0^2n_2^2} \quad (5)$$

由公式(4)可知，耦合系数k与耦合间距s、微环半径R_r以及介质折射率有关。因此，利用Lumerical仿真系统对30～70 μm的微环分别计算s在20～300 nm间的耦合系数，结果如图8所示。从图中可以看出，随着耦合间距的增加，不同微环的k值逐步下降。从横向看，在同等耦合间距的情况下，微环半径越大，k值越大。这是由于弯曲波导与直波导间发生功率交换，当直波导中的光完全耦合至弯曲波导后，弯曲波导的光也会向直波导中渗透。因此，可以得出，在微环半径一定的情况下，耦合间距越小，波导间的倏逝场交互作用越大，k值越高；微环半径越大，与直波导发生的有效耦合区间越大，因此可具备更高的耦合效率。仿真结果与理论推导的结果相互验证，通过弯曲波导与直波导的耦合难以达到较高的耦合系数，因此采用跑道微环来改进原微环结构是可行的。



(a) 耦合间距曲线



(b) 微环半径曲线

图8 微环耦合系数随耦合间距、微环半径的变化曲线

1.4.2 狭缝波导模式转换器及微环整体仿真

在跑道微环中用于MZI耦合的跑道波导为宽度500 nm的条波导，而用于相位调制的其他部分为电光聚合物填充的狭缝波导。如果狭缝波导与条波导直接对接会由于传输模式不匹配引起较大的衰减，如图9所示。可以看出，直波导与狭缝波导的衔接处光场不稳定，波动较大，为使光场在狭缝的电光聚合物中分布，添加模式转换器引导光场从条波导向狭缝波导过渡。

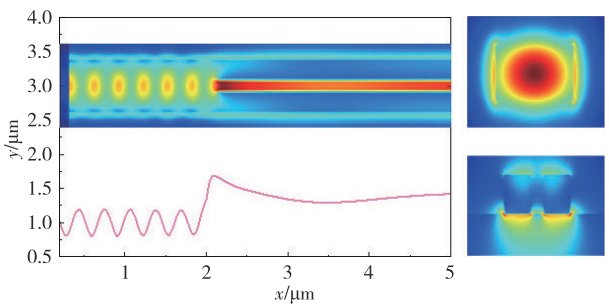
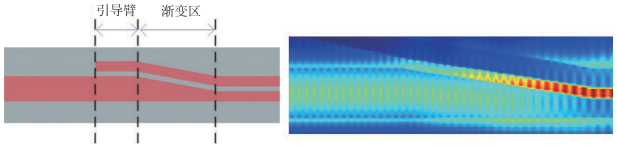


图9 条波导与狭缝波导直接对接光场图

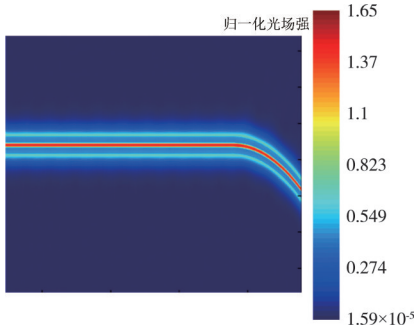
本研究的模式转换器由引导臂和线性渐变区组成，如图 10 所示。利用引导臂吸引条形波导的光场向狭缝结构过渡，并将倏逝场的范围限制于狭缝内，之后线性渐变区中的光场随着波导的宽度降低而完全耦合至狭缝区域中，最终实现从条形波导到狭缝波导的模式转换。



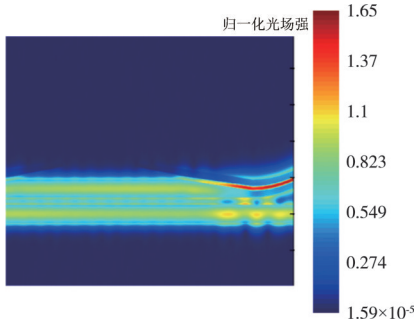
（a）器件示意图　　（b）仿真光场图

图 10　模式转换器示意图及其仿真光场图

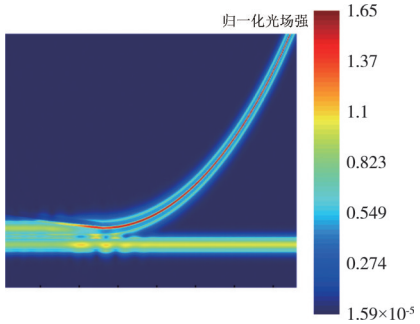
对狭缝跑道微环整体在 Lumerical 的 FDTD 模块建立模型，设置仿真时间为 8 000 fs，使得光波可以在微环结构中完全振荡，从而验证该结构改进的可行性，仿真结果如图 11 所示。



（a）狭缝跑道光场分布



（b）直波导与微环跑道耦合情况



（c）模式转换器

图 11　微环整体长时仿真光场分布图

从光场分布 11(b)中可以判断拓扑结构的耦合情况，直波导与微环跑道间配合较好，不存在多余的耦合损耗；图 11(c)中模式转换器除了狭缝跑道内部，其他位置不存在光场汇聚，线性渐变区中光场过度平滑，且没有明显的转换衰减，此外引导臂对于倏逝场的限制作用良好，只有少量的光场未被耦合至转换器内部，证明模式转化器的设计达到预期目标；最后观察图 11(a)狭缝中光场的分布情况，环绕多圈后光场的大部分能量集中于狭缝内部中，其中归一化场强的峰值可以达到 1.6 以上。

仿真结果证明，该微环改进符合传感结构原理和传感器性能提升需求，采用跑道微环改进原微环结构是切实可行的改进方案。接下来，采用实验测试的方式验证优化策略的有效性。

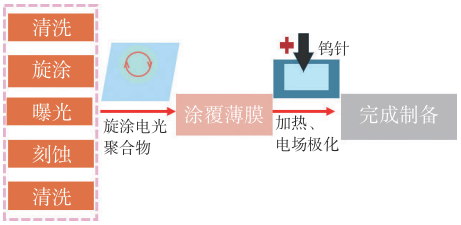
2　谐振微环辅助 MZI 传感器的制备与性能测试

2.1　谐振微环辅助 MZI 传感器的制备

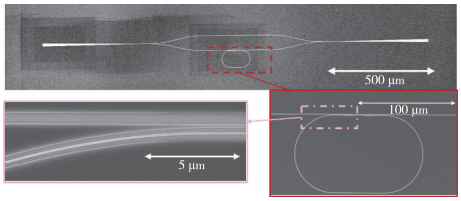
采用 SOITEC 公司生产的 SOI 晶圆片进行波导结构的制备，该 SOI 晶片单晶硅芯层厚度为 220 nm、Si 衬底厚度为 500 μm、SiO_2 下包层厚度为 2 μm，为了后期的旋涂与极化方便，将晶片分割为 4 片，每片尺寸为 7.5 mm×7.5 mm。通过 FTDT 仿真可得出，当硅波导宽度在 400～500 nm 之间时，波导只支持基模传输。值得注意的是波导加工质量和蚀刻公差也会对性能产生显著影响，狭缝波导的加工质量会直接改变光路的稳定性，最终导致传感器在高频率或强场状态下出现波动。受限于 SOI 硅光子光刻性能，光刻机在狭缝线宽较窄时存在明显的趋近效应，会导致波导尺寸与狭缝宽度不符合设计要求，进一步改变波导传播特性、折射率分布，最终影响信号的传输及传感器的灵敏度。因此，狭缝波导间的间距最好选择 100～120 nm 之间，狭缝波导宽度保持在 200 nm 左右。

在硅基光学集成器件制造中，SOI 晶圆的加工步骤包括清洁、整平、紫外光刻、曝光和蚀刻等标准程序。由于使用对电场敏感的电光聚合物作为敏感材料，还需要额外的加工步骤，如聚合物薄膜的旋涂和偏振。硅基光学波导加工的完整工艺流程如图 12 所示。

为了研究谐振微环结构与电光聚合物对硅基集成电场传感器的性能影响，制备了双微环辅助的



（a）制备过程



（b）扫描电镜图

图 12　硅基光波导芯片的制备过程和芯片的扫描电镜图

MZI结构、跑道微环辅助的MZI结构、跑道狭缝微环辅助的MZI结构，如图13所示，并利用两种不同的发色团作为电场敏感材料，一种为常见的甲基丙烯酸甲酯-co-分散红1丙烯酸酯（PPMA/DR1）发色团，简称为发色团A，其电光系数为11 pm/V，另一种为久洛尼定、二乙烯基噻吩桥、三氟甲基苯基三氰基呋喃（CF3-PH-TCF）合成的久洛尼定型发色团，简称为发色团B，其电光系数为256 pm/V。

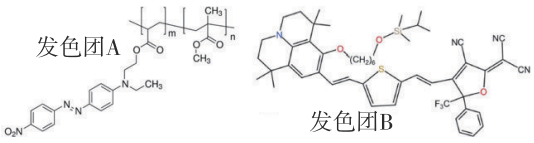


图 13　电光聚合物发色团分子结构

2.2　不同微环结构对MZI传感器输入-输出特性分析

为了研究不同微环结构与电光聚合物对MZI传感器的性能影响，根据上文对谐振微环辅助MZI结构的优化结构分析，利用发色团A与发色团B制备了四种结构的微环辅助MZI电场传感器，分别为发色团A的双微环辅助MZI、发色团A的普通跑道微环辅助MZI、发色团A的狭缝跑道微环辅助MZI、发色团B的狭缝跑道微环辅助MZI。

搭建光学电场传感器实验平台，使用任意函数发生器产生高频小信号，通过AMT高压放大器放大信号，并接入两块平行极板中，在极板中间发生均匀电场，将电场传感器置入极板中央进行输入-输出性能测试，测试结果如图14所示。测试结果表明，所有四种电场传感器结构在特定的电场区间范围内都表现出良好的线性特性，发色团A的双微环辅助MZI与发色团A的跑道微环辅助MZI的灵敏度相差不大，但线性范围得到了显著提升。如上述分析结果，通过将传统的矩形跑道光波导改进为填充电光聚合物材料的狭缝跑道波导，传感器的灵敏度显著提高。狭缝结构有效将光场集中在聚合物包层内，从而增加光场与电光聚合物的重叠面积，提高微环辅助MZI电场传感器的灵敏度。

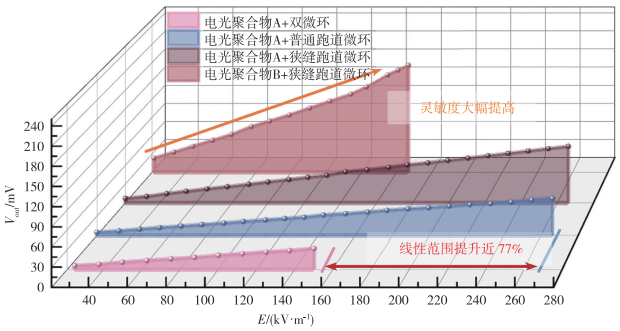


图 14　具有不同微环结构的MZI传感器的输入-输出图

使用电光系数为256 pm/V的发色团B的狭缝跑道微环辅助MZI电场传感器的灵敏度大幅提高，达到1.034 mV/(kV·m^{-1})。与传统铌酸锂光学电场传感器相比灵敏度更高，这种增强有利于检测微弱电场[22-23]。这凸显了将狭缝结构与具有高电光系数的电光聚合物相结合以提高灵敏度的有效性。下一步验证发色团B的狭缝跑道微环辅助MZI的电场传感器交流响应情况。

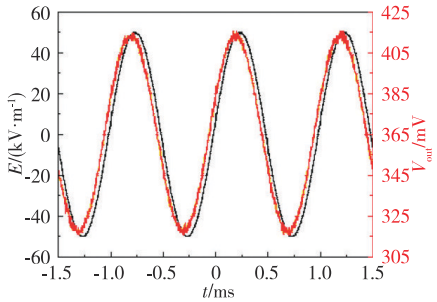
2.3　优化后的狭缝跑道微环辅助MZI传感器交流响应测试

图15为优化后的狭缝微环辅助MZI传感器的交流响应，可以看出优化后的狭缝跑道微环辅助MZI电场传感器对于高频电场拥有良好的跟随效应。为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[24-25]。

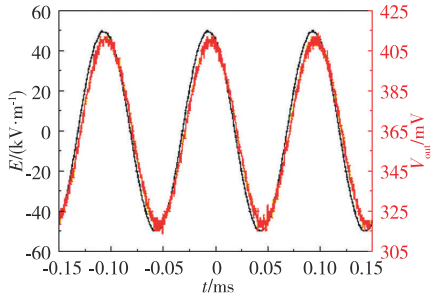
$$\rho_{V,E}=\frac{Cov(V,E)}{\sigma_V\sigma_E}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(V_i-\mu_V)(E_i-\mu_E)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(V_i-\overline{V})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(E_i-\overline{E})^2}} \tag{6}$$

式中，$Cov(V,E)$是传感器输出与标准电场之间的协方差，σ_V，σ_E是传感器输出与标准电场之间的标准偏差。传感器的交流响应可通过皮尔逊系数来测

量，其值越接近1，表示两个变量之间的相关性越强。通过公式(6)计算传感器在50 kV/m标准电场下，频率为1 kHz时，皮尔逊系数为0.991，频率为10 kHz时，皮尔逊系数为0.992。



(a) 1 kHz交流电场



(b) 10 kHz交流电场

图15　优化后的狭缝微环辅助MZI传感器的交流响应

实验测试证明了优化策略的有效性，改进的狭缝跑道谐振微孔结构能有效提高电场传感器的线性工作区域和灵敏度，对正弦电场具有良好的响应，并具有一定的高频工作能力。该拓扑结构与不同的电光聚合物材料相结合，在测试中表现出显著的性能差异，证明电光聚合物可以进一步提高传感器的性能，展示了该拓扑结构的巨大潜力。

3　结论

本文探索SOI片上电光能量耦合方法，针对目前MZI结构自身线性区域窄、灵敏度低的问题，提出利用非谐振状态微环超线性补偿器三阶交调失真，设计狭缝跑道谐振微环辅助的MZI结构，并探索电光聚合物与微环结构对电场传感器线性范围、灵敏度的影响。测试结果表明，狭缝波导结构与调制长度的增加，可以提升77%的线性区域范围，结合更高电光系数的电光聚合物后，传感器灵敏度最高可达1.034 mV/(kV·m^{-1})，相对于未改进的传感器提升290%，并且拥有良好的交流电场跟随性。改进后的芯片光电场传感器实现了线性工作范围和灵敏度的增加，并具备一定的高频工作能力，非常适合应用于电力场景中输电线路非接触检测、设备故障识别以及操作过电压预警等领域。

参考文献：

[1] 江俊杰，胡　军，马国明，等. 数字化电力装备专用传感应用需求与发展趋势[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3271-3307.
Jiang Junjie，Hu Jun，Ma Guoming，et al. Application requirements and development trend of special sensors in digital electrical equipment[J]. High Voltage Engineering，2024，50(8)：3271-3307.

[2] 史明明，刘瑞煌，张宸宇，等. 考虑输电网与柔性互联配电网交互影响的可靠性评估方法[J]. 电力工程技术，2024，43(4)：77-87.
Shi Mingming，Liu Ruihuang，Zhang Chenyu，et al. Analytical evaluation method of reliability considering interaction between transmission network and flexible interconnected distribution network [J]. Electric Power Engineering Technology，2024，43(4)：77-87.

[3] Ma G，Wang Y，Qin W，et al. Optical sensors for power transformer monitoring：a review[J]. High Voltage，2021，6(3)：367-386.

[4] 张东东，常泽中，万武艺，等. 基于局部电场的零值绝缘子检测技术研究[J]. 电力工程技术，2024，43(4)：193-201.
Zhang Dongdong，Chang Zezhong，Wan Wuyi，et al. Zero-value insulator detection technology based on local electric field [J]. Electric Power Engineering Technology，2024，43(4)：193-201.

[5] 刘泳斌，高景晖，钟力生，等. ±320kV直流电缆交联聚乙烯/三元乙丙橡胶附件击穿特性[J]. 电力工程技术，2023，42(3)：72-80.
Liu Yongbin，Gao Jinghui，Zhong Lisheng，et al. Breakdown property of ±320 kV HVDC cable system XLPE/EPDM accessories [J]. Electric Power Engineering Technology，2023，42(3)：72-80.

[6] 栗晓政，崔凤庆，宋晓燕，等. 基于MEMS传感器的线路电压测量方法研究[J]. 工业仪表与自动化装置，2024(3)：123-127.
Li Xiaozheng，Cui Fengqing，Song Xiaoyan，et al. Research on line voltage measurement method based on MEMS sensor [J]. Industrial Instrumentation & Automation，2024(3)：123-127.

[7] 马国明，王思涵，张晓星，等. 变电设备状态信息光纤/光学传感研究[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3354-3386.
Ma Guoming，Wang Sihan，Zhang Xiaoxing，et al. Research on optical fiber/optical sensing for state information of transformer equipment[J]. High Voltage Engineering，2024，50(8)：3354-3386.

[8] 高吉普，吴世林，张缘圆，等. 微型宽频交流电场传感器设计及其电场无失真测量评价[J]. 南方电网技术，2024，18(5)：

31-38.
Gao Jipu, Wu Shilin, Zhang Yuanyuan, et al. Design of micro-broadband AC electric field sensor and evaluation of electric field distortion-free measurement [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(5): 31-38.

[9] 曾 嵘, 俞俊杰, 牛 犇, 等. 用于宽频带时域电场测量的光电集成电场传感器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5234-5243.
Zeng Rong, Yu Junjie, Niu Ben, et al. Integrated optical sensors for wide band time domain electric field measurement [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5234-5243.

[10] 石跃武, 陈 伟, 聂 鑫, 等. 基于集成光学的兆伏每米强脉冲电场传感器研制[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(4): 85-92.
Shi Yuewu, Chen Wei, Nie Xin, et al. Development of the integrated-optics-based sensor for MV/m intense pulse electric field [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2024, 36(4): 85-92.

[11] Zhang N, Wang M, Wu B, et al. Temperature-insensitive magnetic field sensor based on an optoelectronic oscillator merging a Mach - Zehnder interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(13): 7053-7059.

[12] Zeng R. Integrated optical E -field sensor based on balanced Mach - Zehnder interferometer [J]. Optical Engineering, 2011, 50(11): 114404.

[13] Li X, Zhao X, Wang D, et al. Integrated optical electric field sensor based on asymmetric Mach-Zehnder interferometer with straight waveguide arms [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(5): 4422-4429.

[14] 邓世耀, 彭佳豪, 王李波, 等. 基于铌酸锂电光效应的电场传感器研究进展(特邀)[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(11): 1116009.
Deng Shiyao, Peng Jiahao, Wang Libo, et al. Research progress on electric field sensors based on the lithium niobate electro-optic effect (invited) [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(11): 1116009.

[15] Bulmer C H, Burns W K, Moeller R P. Linear interferometric waveguide modulator for electromagnetic-field detection[J]. Optics Letters, 1980, 5(5): 176.

[16] Wang W C, Lin W, Marshall H, et al. All-dielectric miniature wideband rf receive antenna [J]. Optical Engineering, 2004, 43: 673-677.

[17] Wang W C. Optical electric-field sensors [J]. Optical Engineering, 2006, 45(12): 124402.

[18] Rutirawut T, Talataisong W, Gardes F Y. Designs of silicon nitride slot waveguide modulators with electro-optic polymer and the effect of induced charges in Si-substrate on their performance [J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(2): 6600715.

[19] Chen S, Zhou G, Zhou L, et al. High-linearity Fano resonance modulator using a microring-assisted Mach - Zehnder structure [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(13): 3395-3403.

[20] Yoshida S, Ishihara S, Arakawa T, et al. Highly sensitive optical biosensor based on silicon-microring-resonator-loaded Mach-Zehnder interferometer[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 56(4S): 04CH08.

[21] 杨国辉, 安士龙, 高劭宏. 基于光学微环谐振器的甲醛传感器模拟研究[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(8): 68-71.
Yang Guohui, An Shilong, Gao Shaohong. Simulation study of formaldehyde sensor based on optical microring resonator [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(8): 68-71.

[22] Zhang J, Lei H. Design of a lithium niobate electric field sensor with improved sensitivity [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 362: 114611.

[23] 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.

[24] Yang P, Wen X, Lv Y, et al. Improved microsensor-based fieldmeter for ground-level atmospheric electric field measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 71: 2001510.

[25] 敖 刚, 王智勇, 陈庭宇, 等. 基于一次电光效应的交直流复合电压传感器设计[J]. 光学技术, 2022, 48(5): 604-609.
Ao Gang, Wang Zhiyong, Chen Tingyu, et al. Design of AC/DC composite voltage sensor based on Pockels effect[J]. Optical Technique, 2022, 48(5): 604-609.

作者简介:

朱雪琼(1990—),男,博士,高级工程师,研究方向为输变电设备状态智能传感。