

基于光纤消逝场的电场测量技术研究综述

刘轩东, 程章颖, 马乐晨, 陈 铭

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 电场测量对于电力设备绝缘设计优化、高压系统电磁环境分析、屏蔽装置防护效果评估等领域具有重要意义。消逝场式电场传感器是近年来新兴的一类光纤电场传感器, 测量上限高达 24 MV/m、封装尺寸低至 1.2 mm×0.2 mm×0.2 mm, 可同步测量多场点、多方向电场, 在电缆故障诊断、特快速暂态过电压监测、电磁武器改良等方面具有广阔应用前景。目前, 关于光学电场传感器原理和结构方面的研究综述较多, 但缺乏对新型消逝场式电场传感器的相关总结, 以及对各类光纤电场传感器技术参数的分析比较。为此, 首先总结了消逝场式电场传感器的测量机理、典型结构、研究进展、应用场景、温度补偿方法和关键技术问题。在此基础上, 重点分析、比较了各类光纤电场传感器的测量指标、封装尺寸和性能特点, 并结合相关标准对其实用化过程中存在的问题进行了讨论。最后, 指出消逝场式电场传感器在材料改性、加工工艺优化、微观尺度电场仿真和耦合影响因素分析等方面值得做进一步深入研究。对于消逝场式电场传感器的设计、研制与性能改进具有一定意义。

关键词: 消逝场; 电场测量; 光纤传感器; 电光效应; D 型光纤

Research Review of Electric Field Measurement Technology Based on the Evanescent Field of Optical Fiber

LIU Xuandong, CHENG Zhangying, MA Lechen, CHEN Ming

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Electric field measurement is of great significance in insulation design optimization of power equipment, electromagnetic environment analysis of high voltage system, evaluation of the protective effect of shielding devices, and so on. Evanescent field sensor for electric field measurement is an emerging optical fiber electric field sensor proposed in recent years. The upper limit of its measuring range is up to 24 MV/m, and the package size is as small as 1.2 mm×0.2 mm×0.2 mm. It is capable of measuring multi-point and multi-directional electric field synchronously. It has a broad application prospect in cable fault diagnosis, VFTO monitoring, electromagnetic weapon improvement, etc. At present, the researches on the principle and structure of optical electric field sensors are extensively available in some literature reviews. However, there is a lack of summary of the new evanescent field sensors, as well as the analysis and comparison of the technical parameters of optical fiber electric field sensors. For this reason, the paper first summarizes the measuring principle, typical structure, research progress, application scenarios, temperature compensation methods, and critical technical problems of the evanescent field sensor. On this basis, the measuring index, package size, and performance characteristics of various optical fiber electric field sensors are analyzed and compared. Then, problems existing in the practical process of the sensors above are discussed according to the relevant standards. Finally, it is pointed out that the evanescent field sensor is worthy of further research in the aspects of material modification, processing optimization, micro-scale electric field simulation, and analysis of coupling influencing factors. The research is of specific significance for the design, development, and performance improvement of the evanescent field sensor for electric field measurement.

Key words: evanescent field; electric field measurement; optical fiber sensor; electro-optic effect; D-fiber

0 引言

许多应用场景需要电场传感器在紧凑环境中精确测量极高场强的电场, 如在高功率微波或电磁

脉冲攻击下屏蔽装置的近场测量, 轨道炮轨道附近的电场测量, 以及高压设备内部的电场分布测量等等。这就要求器身使用的传感元件为全介质, 以避免发生电晕放电或介质击穿^[1]; 同时还要将传感器设计的尽可能小, 以充分提高其空间分辨率和场点测量能力^[2]。

基金资助项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900804)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2016YFB0900804).

近年来, 随着特种光纤和电光材料加工工艺的进步, 光学电场传感器凭借优异性能从众多电场传感器中脱颖而出。利用光学手段对电场进行测量, 本质上是基于电光效应、逆压电效应或电致发光效应等物理效应, 将被测电场转化为光强等物理量, 从而间接计算或测量电场信息。国内外学者针对不同类型的电场传感器开展了系列研究^[3-4], 在现场也实现了不少应用^[5-9]。文献[10]综述了基于锗酸铋晶体、硅酸铋晶体的块状光学电压传感器和马赫-增德尔型集成电压传感器的理论基础和研究进展, 分析了两类传感器在抗冲击与抗振方面存在的问题。文献[11]介绍了球形电场传感器、集成光波导式电场传感器、分离元件式电场传感器和克尔式电场传感器的工作原理, 研究了空间电荷和电荷漂移对电场传感的影响。文献[12]总结了光纤电压传感器的温度补偿方法, 指出传感器的温度稳定性问题是制约其实用化的关键因素。文献[13]综述了 D-dot 式、阻容分压式和基于电容泄漏电流的高电压测量方法, 并在此基础上比较了 3 类方法的优缺点。文献[14]根据结构差异对基于 Pockels 效应的传感器作了进一步细分, 研究了多段式结构、双晶体式结构和反射式结构对传感器性能的影响。文献[15]针对智能电网中的特定应用场景, 详细综述了基于电光、磁光、磁致伸缩和热电效应的电压及电流传感技术的测量机理和最新进展, 指出实现电网参数感知还需引入新的物理量耦合机制和有效的传感器拓扑协助, 并解决传感器取能困难、兼容性差等问题。

以上文献对光学电压测量技术的进展与不足进行了深入分析总结, 清晰地综述了在这一领域目前已经取得的研究成果以及未来的发展方向, 但是未对各类传感器的电场测量范围、带宽范围和封装尺寸等具体参数进行量化, 缺乏与现行国家及行业标准之间的对比分析。此外, 近年来杨百翰大学在美国陆军模拟、训练和仪器使用项目执行办公室的资助下研制出一种尺寸极小、定向精确、测量上限极高的新型消逝场式电场传感器, 并成功应用于三维离子阱的内部电场测量和军用电磁轨道炮的速度趋肤效应(velocity skin effect, VSE)分析^[16-17], 而国内尚缺少对该领域最新研究进展的总结。

针对目前的研究现状以及存在的问题, 本文对新型消逝场式电场传感器的测量机理、典型结构、研究进展、应用场景、温度补偿方法和关键技术问题做了全面综述。在此基础上, 比较了各类光纤电

场传感器的技术指标和性能特点, 并结合相关标准对其实用化过程中存在的问题进行了分析。最后, 对消逝场式电场传感器值得深入研究的方向进行了总结与展望。

1 消逝场式电场传感器

1.1 测量机理

消逝场, 又称倏逝场, 是一种在光波发生全反射时存在的趋向于快速衰减的电磁场。光纤中的消逝场如图 1 所示, n_1 、 n_2 分别为光纤纤芯和包层的折射率。当光波在纤芯与包层交界面发生全反射时, 由边界上场量的连续性可知包层中存在具有一定深度的透射场, 即消逝场。

消逝场在光纤径向的振幅呈指数趋势衰减, 其场强 E 可以表示为^[18]

$$E = E_0 \exp(-z / d_p) \quad (1)$$

式中: E_0 为消逝场在交界面的能量强度; z 为场点到界面的距离; d_p 为消逝场的穿透深度, 其计算式为^[18]

$$d_p = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}} \quad (2)$$

式中: λ_0 为入射光在真空传播时的波长; θ 为入射角。

尽管光纤包层为非吸收介质, 不会引起光纤中传输能量的减少, 但若把光纤抛磨成 D 型, 将大部分包层去除, 暴露出的消逝场会与外部物质发生模式耦合。国内已有学者研制出用于检测溶液浓度或气体浓度的消逝场式传感器, 文献[19-20]分别利用镀膜拉锥光纤、薄包层单模光纤暴露出的消逝场成功测量氢气浓度; 文献[21]将侧抛磨光纤放入亚甲基蓝溶液, 利用其消逝场在不同浓度溶液中穿透深度不同, 光纤输出的光功率会产生差异, 进而测得溶液浓度。若将铌酸锂(LN)、钽酸锂(TN)或磷酸钛

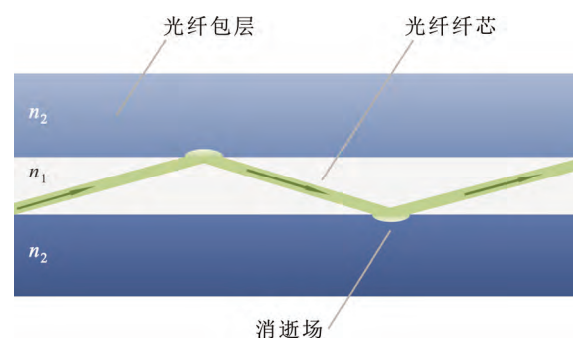


图 1 光纤中的消逝场示意图

Fig.1 Diagram of the evanescent field in optical fiber

氧钾(KTP)等具有 Pockels 效应的电光晶体通过光胶粘接于 D 型光纤平面处, 当晶体与纤芯距离达微米级时两者将发生模式耦合, 部分光将从光纤耦合入电光晶体, 导致输出光功率产生变化, 基于此可研制消逝场式电场传感器, 典型结构如图 2 所示。

光纤纤芯与电光晶体的耦合波长可通过式(3)进行计算^[22]。

$$\lambda_m = \frac{2t_c}{m} \sqrt{n_c^2 - N_f^2} \quad (3)$$

式中: λ_m 为对应于整数模 m 的耦合波长; t_c 为晶体厚度; n_c 为晶体基础折射率; N_f 为光纤对应模式的有效折射率。

输出光功率 P_o 与外部场强 E 、输入光功率 P_i 的关系服从式(4)^[22]。

$$P_o = P_i + \left(\frac{\partial P}{\partial \lambda}\right) \left(\frac{\partial \lambda}{\partial E}\right) E \quad (4)$$

式中: $\partial P/\partial \lambda$ 是通过改变激光波长绘得的功率光谱曲线的斜率, 设 $\partial P/\partial \lambda = a$; $\partial \lambda/\partial E$ 是光谱曲线在外部电场作用下的偏移率^[23], 其计算式为

$$\frac{\partial \lambda}{\partial E} = \frac{\lambda n_c^3 \gamma_c \eta_c}{2(n_c^2 - N_f^2)} = b \quad (5)$$

式中: η_c 是与晶体材料属性和几何形状有关的参数; γ_c 为晶体线性电光系数; b 为偏移率常数。一般在选择传感器工作点时会选取其光谱曲线上斜率最大的点, 即 $\partial P/\partial \lambda = a_{\max}$; 再施加一已知场强 E_0 , 得 $b = E_0/\Delta \lambda$, $\Delta \lambda$ 为 E_0 作用下的光谱偏移量。进而结合可知输出功率 $\Delta P = P_o - P_i$ 与外部场强 E 呈线性相关, 且满足式(6)。基于测得的输出光功率差值即可计算电场强度, 如图 3 所示。

$$E = \frac{\Delta P}{a_{\max} b} \quad (6)$$

1.2 研究进展

国外对消逝场式电场传感器的研究始于 2007 年, 文献[24]首次提出并实现了一种基于侧抛磨 SMF-28 型单模光纤和细环状 AJLS103 电光聚合物的高频电场传感器, 如图 4 所示。该研究通过将光纤与电光聚合物粘接固定于良好耦合位置, 使光纤的输出功率光谱呈图 5 所示的类正弦状振荡(纵轴 0 dB 对应的功率值为 1 mW), 再利用已知场强 E_0 标定出该光谱曲线的偏移率常数 b , 从而实现电场测量。制作出的传感器频带上限达 550 MHz, 最小可测场强为 100 mV/m, 但由于受到所使用转换器的低频截止特性限制, 传感器的输出信号在被测电场

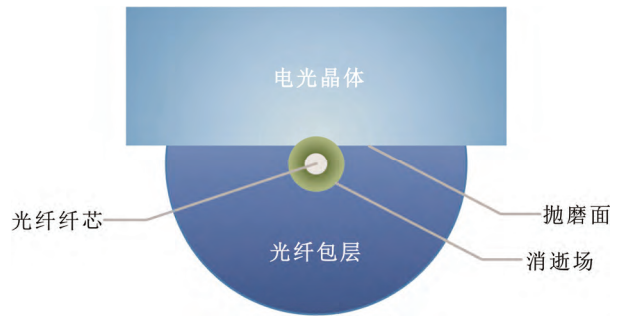


图 2 D 型光纤与电光晶体间的消逝场示意图

Fig.2 Diagram of the evanescent field between D-fiber and electro-optic crystal

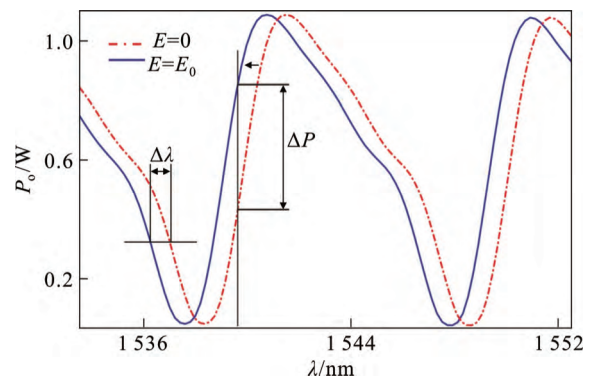


图 3 电场作用下产生偏移的功率光谱

Fig.3 Power spectrum with offset under electric field

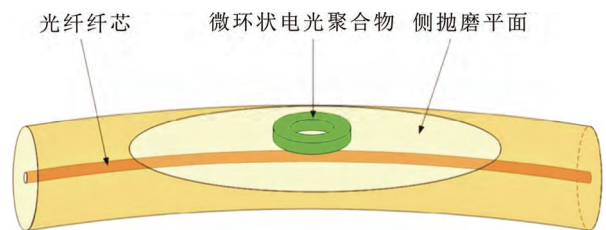


图 4 微环谐振型传感器示意图

Fig.4 Diagram of the micro-resonator sensor

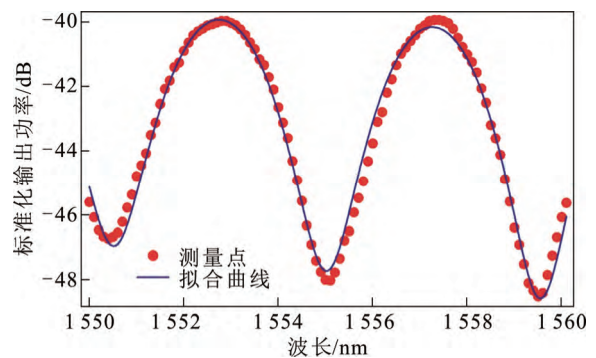


图 5 类正弦状功率光谱

Fig.5 Quasi-sinusoidal power spectrum

频率<50 MHz 时迅速衰减至 0, 无法用于直流和低频电场测量。

文献[25]在前者基础上优化了传感器的材料选型, 采用椭圆型保偏光纤解决了光的偏振态在长距离传输过程中无规律性变化的问题, 同时将电光聚合物替换为商业程度更高、加工难度较低的立方晶铌酸锂晶体, 进一步增强了传感器的稳定性与抗干扰能力。该传感器在测量 0.2~20 kV/m 场强时线性度高达 99.9%, 频带下限降低至 10 kHz, 但因保偏光纤在径向方向具有长轴与短轴之分, 在加工过程中不易对轴, 而对轴失准将导致表面不平, 使输出功率光谱图出现局部极值点, 如图 6 所示。此类点过多时将增加 $\partial P/\partial\lambda=a_{\max}$ 工作点的确定难度。

消逝场式电场传感器的稳定性和重复性主要受 D 型光纤的保偏性能影响, 而频带、测量范围和灵敏度等测量指标则取决于电光晶体的物理性质。文献[26-27]量化了 LN、SBN、KTP、DAST、KDP 和 TN 等常用电光晶体的电光系数、介电常数和折射率对传感器输出光谱偏移量的影响, 指出综合考虑光学性能和机械性能的情况下, LN 和 KTP 最适合制作消逝场式传感器。文献[28-29]研究了基于 X-LN、Z-LN、X-KTP 和 Z-KTP 晶体的消逝场式传感器在 1 kHz~1 MHz 电场下的频率特性, 实验表明 X 切晶体的表现普遍优于 Z 切晶体, 且 X-LN 传感器在 1~300 kHz 频带内灵敏度和稳定性最佳, 而 X-KTP 传感器在 0.3~1 MHz 内的线性度和灵敏度更高, 为不同频率电场测量的最优晶体选型提供了具体指导。文献[30]在此基础上进一步探究了 X-KTP 传感器的晶体光轴方向与光纤轴向所呈夹角对输出功率的影响, 结果显示当夹角在 0°~20°之间变化时, 输出光谱会产生少量偏移, 但不会对灵敏度等参数产生影响, 因此在制作设计时允许晶体光轴方向与光纤轴向存在小角度失准。

消逝场式电场传感器超越其他光纤电场传感器的一大优势在于其突出的多场点和多轴向测量能力。文献[31]创新性地将磷酸钛氧钾晶体和铌酸锂晶体分别粘接固化于单根保偏光纤的 2 块抛磨区域, 形成传感器阵列, 利用两者传输光谱及工作点的不同, 结合波分复用技术(wavelength division multiplexing, WDM)实现两点电场的同步测量。文献[32-33]基于 2 块 Z 切 KTP 晶体、1 块 X 切 KTP 晶体和 1×3 分光器设计出组合式微型三轴电场传感器, 见图 7, 其中 X 切晶体用于测量沿光纤轴向的

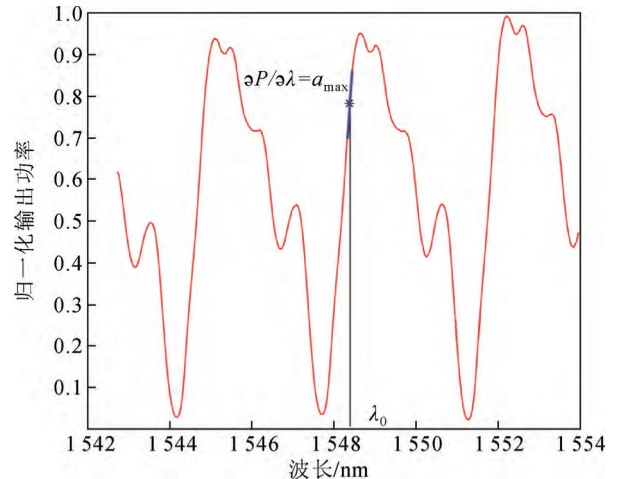


图 6 出现多个局部极值点的功率光谱

Fig.6 Power spectrum with multiple local extreme points

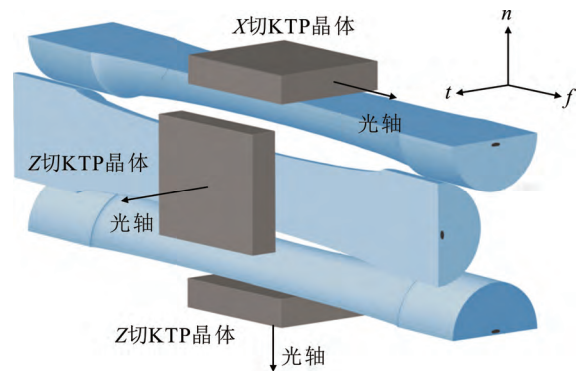


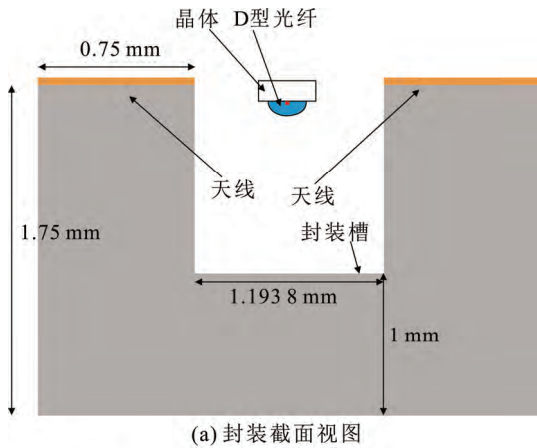
图 7 三轴全介质电场传感器

Fig.7 Three-axis all-dielectric electric field sensor

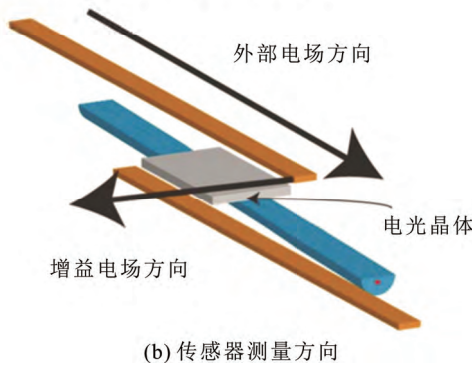
电场 E_r 。该三轴传感器本质是由 3 个单轴传感器组合而成, 但尺寸依然可以达到 10 mm×10 mm×10 mm。

通过进一步改造电极结构可改变消逝场式传感器的电场测量方向, 并提高其灵敏度。文献[34]采用图 8 所示方式, 将无源偶极子天线集成到传感器封装中, 使灵敏度提高了 1 个量级, 并使传感器能够同时检测与晶体光轴方向相垂直的最小场强为 1.25 kV/m。

基于椭圆型保偏光纤研制出的消逝场式电场传感器虽然能在传输距离较长时保持信号相对稳定, 但此类光纤纤芯非圆, 在与其他光学元件转接时会产生较大的光损耗, 导致传感器灵敏度降低。此外, 由于椭圆纤芯的生产工艺十分复杂, 该类光纤的制作成本较高。近年来, 领结型保偏光纤和熊猫型保偏光纤的生产技术逐渐成熟。文献[35]研究显示, 熊猫型保偏光纤在去除一段应力轴后依然能保持较好的保偏性能, 且能将光纤接头处损耗降低约 3 dB, 使传感器无需再连接跨阻放大器, 从而显



(a) 封装截面视图



(b) 传感器测量方向

图8 含无源偶极子天线的电场传感器

Fig.8 Electric field sensor with passive dipole antenna

著降低制作成本, 为进一步提升消逝场式传感器的测量灵敏度提供了可行思路。

本课题组于近年开始研究消逝场式电场传感器, 目前已取得阶段性成果, 基于 Z 切铌酸锂晶体和精抛磨表面 D 型光纤, 获得谐振深度约 50%、耦合特性优良的电光晶体-D 型光纤耦合结构, 实物如图 9 所示, C 波段下光谱见图 10, 可见类正弦状谐振峰。但在测量过程中依然存在一些困难, 如传感器的输出光谱时间稳定性不强, 还需针对相关问题做进一步深入研究。

1.3 应用场景

消逝场式电场传感器是一类全介质型传感器, 绝缘能力极强, 测量上限高达 24 MV/m^[36], 封装尺寸最小可做到 1.2 mm×0.2 mm×0.2 mm^[16], 空间分辨率很高, 多场点、多方向电场的同步测量能力也十分突出, 因此在核能领域、高功率脉冲领域以及高能物理领域具有极高的应用价值。

电磁轨道炮作为一种新型军事武器, 相比于传统化学导弹或火箭, 能以更低成本、更高效率和更快速度进行制导, 且可被改造用于向太空发射深空探测器和卫星。但其至今未被广泛使用, 主要是因

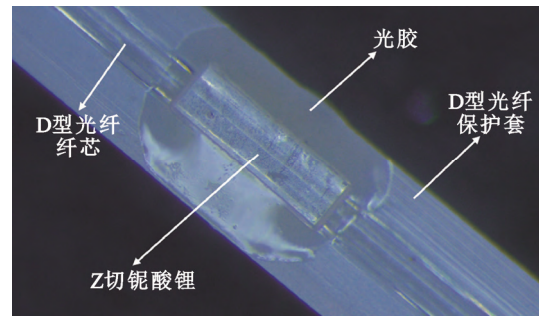


图9 本课题组研制的电场探头

Fig.9 Electric field probe developed by our group

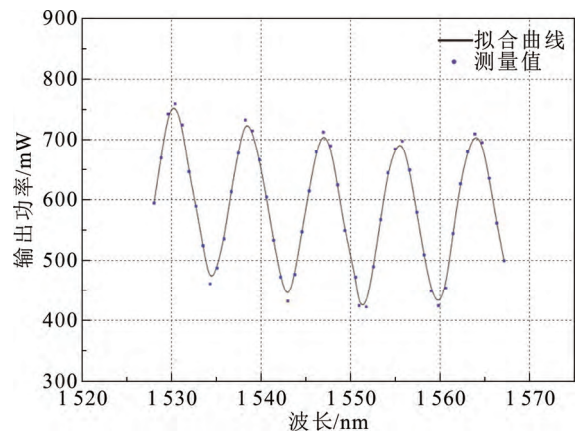


图10 C波段下传感器的功率光谱

Fig.10 Power spectrum of the sensor in C band

为在使用一定次数后电枢、轨道与绝缘体表面会严重变形, 可重用性较差。学界认为造成该问题的主要原因是 VSE。为研制出性能更为稳定的轨道炮, 必须精确测量导轨的近端电场以分析 VSE 对其影响, 但现有的绝大多数电场传感器尺寸都远大于 10 mm×10 mm×10 mm, 安装在轨道炮上投入运行会破坏其本身的机械结构, 而消逝场式电场传感器的百微米级尺寸恰能满足要求。文献[37]将电光聚合物制成的消逝场式传感器应用于 VSE 中的电场测量, 如图 11 所示, 将传感器及光纤固定在安全壳的下半部分, 基于此测得了 0.1~10 kHz 的电场数据。

在高能物理领域, 离子阱对于分析和研究离子运动具有重要意义, 而内壁和电极的表面粗糙度与几何缺陷会对其性能会产生十分显著的影响。这些缺陷难以通过常规方法进行检测, 但可以使用离子阱内部的电场分布进行表征。文献[38]在离子阱的外壁钻出直径约 1.2 mm 的圆孔, 如图 12 所示, 将消逝场式电场传感器对齐安装于其中, 精确测得了中轴方向的电场分布, 可见图 13 中测量值与仿真值

基本相符。

消逝场式电场传感器在工业检测及线路监测中也能发挥重要作用, 如文献[39]将之嵌入 RG-218 型同轴电缆, 实现了无扰动式电压测量, 可用于监测电缆的过电压情况; 文献[40]将之安装于旋转电极间, 实现了三轴向电场测量, 可用于检测设备运转时的电场变化情况。

1.4 温度补偿方法

国内外对于分离元件式传感器的温度补偿方法研究较多, 如文献[41]在 2 块尺寸完全一致而光轴反向平行的 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 晶体中增设 $1/2$ 波片, 使自然双折射引起的相位差抵消为 0, 设计出的传感器在温度波动 $<20\text{ }^\circ\text{C}$ 时输出波动 $<0.2\%$ 。文献[42-43]通过软件运算与双光路补偿方式, 对传感器输出的 2 束电场矢量相垂直线偏振光的 Γ 调制进行叠加运算, 消去温度影响因子, 使传感器在 $-40\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 温度区间内输出偏差 $<1\%$ 。文献[44-46]提出一种自愈式设计思路, 通过检测外置参考传感器的输出信号实时调整原传感器的部分参数进行补偿, 在 $25\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内测量精度可达 0.1 级。文献[12, 47]对提高光纤型电压传感器温度稳定性的各类方法进行了总结, 将之归纳为温控法、双晶体补偿法、双光路补偿法、硬件补偿法、软件补偿法等 5 类。

消逝场式电场传感器的工作原理与其他光纤电场传感器差异较大, 并非利用分解偏振光相位延迟导致干涉光强变化来标定电场, 因而无法使用双晶体法和双光路法进行补偿。目前采用较多的为软件补偿法, 即采用传感器的温度特性曲线对测量结果进行修正。文献[48]指出, 传感器的输出功率光谱曲线在温度作用下也会发生偏移, 并研究了基于聚甲基丙烯酸甲酯和 D 型单模光纤制成的消逝场式传感器的温度特性, 实验显示该偏移量与温度变化值具有线性关系, 从而为传感器的温度标定提供了依据。因此, 消逝场式传感器可通过事先标定某一标准温度差下输出功率光谱曲线的偏移量来进行温度校正。

1.5 关键技术问题

消逝场式电场传感器的技术难点主要集中于以下方面: 电光晶体与 D 型光纤对加工精密程度要求高。就电光晶体而言, 传感器所使用的晶体尺寸极小, 而传统加工方式易对晶体外表面造成毁伤, 还需探索先进激光加工方式在晶体切割中的应用。就 D 型光纤而言, 文献[23, 25-27, 34, 36]均是通过

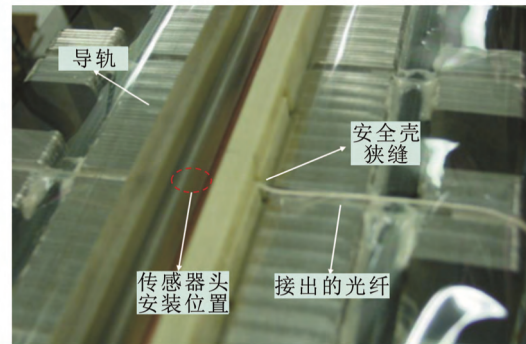


图 11 安装于轨道炮内部的消逝场式传感器

Fig.11 Evanescent field sensor installed inside a rail gun

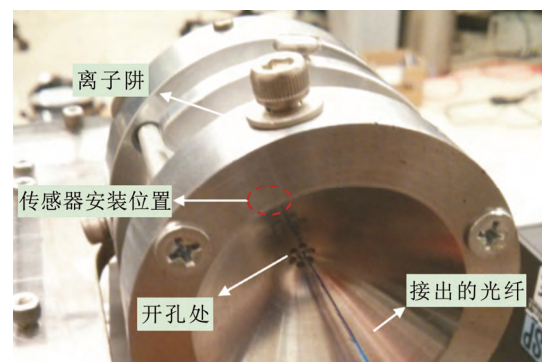


图 12 安装于离子阱内部的消逝场式传感器

Fig.12 Evanescent field sensor installed inside an iron trap

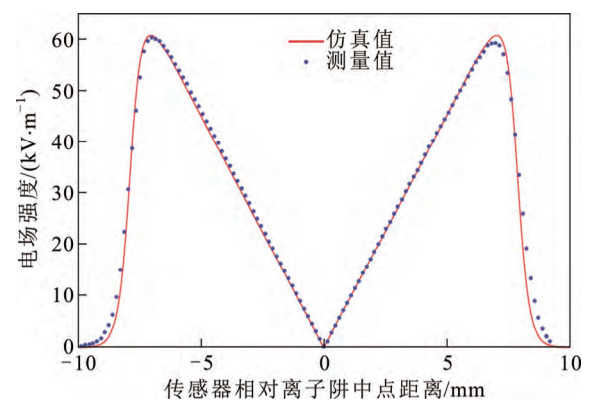


图 13 离子阱内部电场分布

Fig.13 Distribution of electric field in the ion trap

氢氟酸腐蚀法去除多余的 D 型光纤包层。该方法易于操作, 但效果一般, 无法精确控制包层余量, 处理后的光纤 D 平面不平整, 如图 14 所示, 纤芯附近包层明显薄于两端包层, 在制作传感器时极易出现图 15 所示的纤芯脱离包层或断裂情况。而侧抛磨方法的抛磨深度直接受机器控制, 获得的 D 平面质

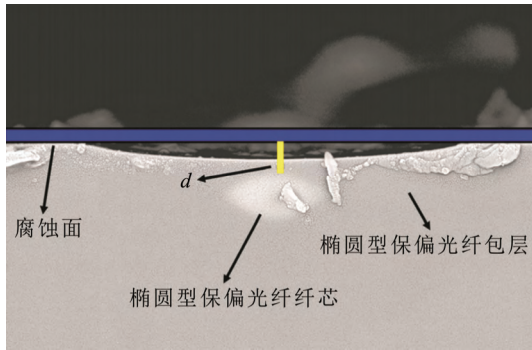


图 14 氢氟酸腐蚀后的 D 型光纤截面图

Fig.14 Cross-sectional image of D-fiber after hydrofluoric acid etching

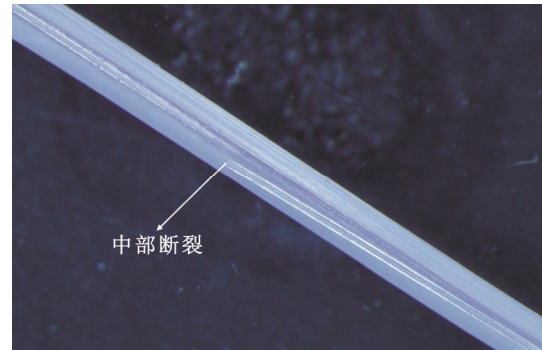


图 15 光纤脱离并断裂

Fig.15 Optical fiber detaches and breaks

量很高,是制备高品质 D 型光纤的优选方法。图 16 是经精细侧抛磨后的光纤在体视显微镜下的图像,可见表面光滑平整。但该类方法效率较低,且在加工保偏光纤时难以进行对轴。

D 型光纤纤芯与电光晶体的间距 d 不易控制。 d 太小,纤芯与电光晶体的消逝场未产生耦合,传感器的输出功率等于输入值且保持恒定,光谱图是一条水平直线; d 太大,两者耦合过强,导致光全部从光纤耦合入电光晶体,传感器输出功率衰减至零,光谱图消失。无耦合和强耦合情况都无法观测到光谱图的偏移,因此无法测量电场。而设计传感器时,间距 d 除与 D 型光纤平面层的表面粗糙度、剩余厚度有关外,还与光胶层的厚度有关。然而目前还没有精确控制胶层厚度的方法,只能在高倍显微镜下进行微操作移动晶体寻找合适胶层。

2 各类光纤电场传感器的性能比较

2.1 分离元件式电场传感器

分离元件式电场传感器在测量时主要采取横向调制方式,即被测电场方向与晶体通光方向互相垂直^[49],其组成结构见图 17。该类传感器的工作原理为:入射光经准直镜、起偏器和 1/4 波片后转化为圆偏振光,由于外部电场作用下的电光晶体在 2 个正交方向的折射率互不相同,圆偏振光的 2 束正交分解光在从晶体射出时已产生相位差,干涉时输出光强将产生变化,进而可根据光强标定电场^[50]。

国内关于该类传感器的研究起步较早,20 世纪 90 年代已有学者做出探索,文献[51]利用铌酸锂晶体研制出可测量纳秒级脉冲电压的传感器,并将测量误差控制在 5%以内;文献[52]使用硅酸铍晶体制作探头,实现对 220 kV 电容式变压器套管尾部油

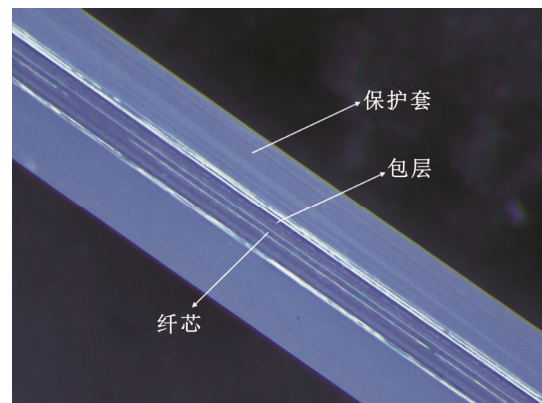


图 16 侧抛磨光纤的表面图像

Fig.16 Surface image of side-polishing optical fiber

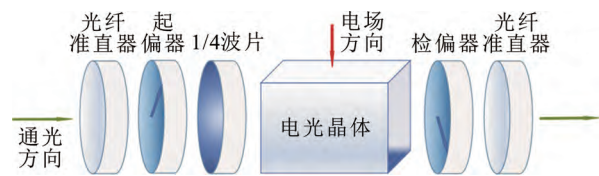


图 17 横向调制型传感器典型结构

Fig.17 Typical structure of transversely modulated sensor

中电场的分布式测量。近年来的相关研究主要是将目标放在缩减传感器封装尺寸和增强其温度稳定性上。文献[53]为克服温度对铌酸锂晶体自然双折射的影响,优化了双晶体温度补偿方法,制成的双晶体型传感器尺寸约 150 mm×40 mm×40 mm,在 0~50 °C 温度范围内测量偏差<3%。文献[54]采用图 18 所示的晶体偏置结构,将偏硼酸钡晶体的通光方向与主轴方向设置呈 0.6° 夹角,增加 $\lambda/4$ 光程差,从而取缔 1/4 波片,研制出封装尺寸更小的紧凑型电场传感器,测量范围可覆盖 1.4~703.2 kV/m。图 18 中 x_2 为晶体光轴方向,与电场传感方向 E_2 相平行; x_3 为晶体倾斜方向,与通光方向呈 θ 夹角; x_1 与 x_2 、

x_3 所在平面相垂直。

该类传感器的测量频带较宽, 通过选用具有不同频率特性的晶体^[53-56], 可覆盖 DC 至 30 MHz 电场; 测量上限也相对较高, 能达到 2 MV/m^[57]。但由于含有多个分离的光学元件和支撑结构, 晶体长度又受到实现所需显著相移的限制, 在一定程度上提高了传感器微型化的难度, 还导致其工作性能受温度影响较大, 如 1/4 波片的相位延迟随温度变化率可达 $0.17^\circ/\text{K}$ ^[58]。长期运行时各元件还可能因振动、重力等因素作用而发生偏移, 因此对光路调试、元件粘接和封装工艺的要求都很高。

2.2 集成光波导式电场传感器

集成光波导式传感器的组成结构如图 19 所示, 一般含有 Y 分叉波导、天线和电极板等。该类传感器的工作原理为: 入射光通过 Y 分叉波导被分解为强度相同的 2 束, 分别在增设了天线或电极的信号臂以及仅有衬底材料的参考臂中传播; 被测电场在天线或电极板上产生感应电压, 致使信号臂折射率发生改变, 光束相位发生延迟, 再经 Y 分叉波导与参考臂光束进行干涉时输出光强发生变化^[59]。

1980 年, 美国海军研究实验室首次提出一种基于铌酸锂光波导的马赫-增德尔干涉仪型集成光学电场传感器^[60]。近年来, 学界的相关研究则主要关注提高传感器的测量上限与优化信号调制方法。文献^[61]提出了一种单屏蔽式天线设计方案, 替代了传统的垂直偶极子和水平偶极子天线结构, 将最大可测场强从 89 kV/m 提高至 242 kV/m, 并能实现 1 MHz~1 GHz 频率范围的稳定测量, 但传感器的尺寸有所增大, 长度超过 80 mm。文献^[62]设计了一种基于波长调谐的偏置控制系统, 如图 20 所示, 将传感器的输出信号经 1:9 光电耦合器分为两路, 取原信号的 1/10 分量为补偿信号, 经光电探测器和补偿单元形成闭环, 解决了传感器工作点漂移问题, 该传感器可检测纳秒级瞬态电磁脉冲信号, 在测量 1~180 kV/m 场强时误差 $<1\%$, 输出波动 $<0.1\text{ dB}$ 。

该类传感器解决了在测量现场的供电问题^[63], 结构较为简单, 带宽可达 0.05~10 GHz^[61-64], 灵敏度很高, 最小可测场强约 20 mV/m^[65], 具有很强的高频弱场测量能力。但信号难以进行调制与解调, 测量范围比较有限, 且传感器的集成化与微型化进程受到 Y 结波导分支角 $>3^\circ$ 时辐射损耗显著增大问题的阻碍^[66]。

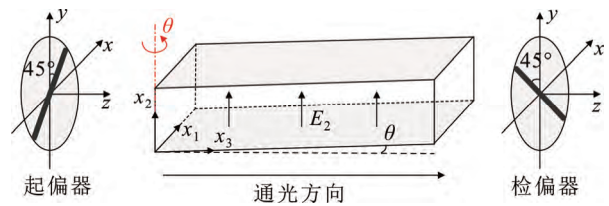


图 18 偏置型传感器原理图

Fig. 18 Schematic diagram of angular optical bias sensor

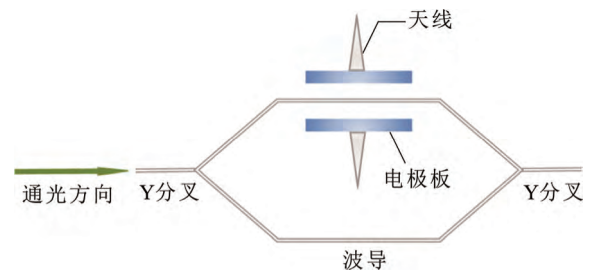


图 19 集成光波导式电场传感器示意图

Fig. 19 Diagram of integrated-optic waveguide-type sensor

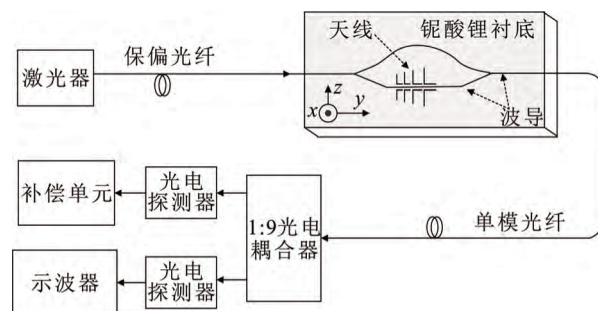


图 20 基于波长调谐的偏置控制系统示意图

Fig. 20 Diagram of bias control unit system based on wavelength resonating

2.3 逆压电 FBG 式电场传感器

逆压电光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 式电场传感器的组成结构如图 21 所示, 其利用了逆压电材料在电场作用下发生形变, 进而对 FBG 产生轴向作用力, 造成传输光谱中心波长发生偏移的特性测量外部电压或电场^[67]。近年来相关研究主要关注该类传感器的温度稳定性问题以及在测量高压设备内部局部放电中的应用, 文献^[68]利用该类传感器实现电力变压器局部放电的在线监测, 测量带宽达 30~240 kHz。文献^[69]对 2 个 FBG 进行了串接, 其中一个附着逆压电材料, 另一个则不附着, 利用两者中心波长温度漂移方向相反的特性进行温度补偿。文献^[70]将 2 对频谱部分重叠的 FBG 以全桥方式相组合, 研制出的传感器在 27~77 °C 温度范围内输出偏差 $<0.6\%$ 。该类传感器传输损耗较

低,受激光器输出波动和光纤微弯效应的影响较小,进行温度补偿相对容易。但模间干涉方案及信号检测算法的设计和实现较为困难,用于补偿相位差的相位调制器制作成本较高,同时测量范围十分有限,难以实现 250 kV/m 以上场强的测量^[71],从而限制了该类传感器在强场测量中的应用。

2.4 电致发光式电场传感器

电致发光式传感器利用了电致发光材料在一定强度电场作用下将电能转化为光能的特性测量电压或电场^[72],其组成结构见图 22。文献[73-74]结合碳化硅分级涂层法,使用光电倍增管探头测量高压电机定子端表面涂层的电致发光强度,实现了电场分布的非接触式测量,最大可测场强为 2.9 MV/m;但当场强降低至 2.1 MV/m 时输出信号会迅速衰减,因而无法用于弱场测量。文献[75]研制了一种基于 ZnS:Mn 粉末的电致发光传感探头,最小可测场强约为 500 kV/m,误差<1%。该类传感器无需使用价格高昂的激光器,不受光源有限工作寿命和功率波动的限制,具有质量轻、功耗小、成本低的优点。但由于电场传感器需要长期在复杂环境下运行,就要求电致发光材料具有物理、化学性能稳定,抗电磁干扰能力强,电阻率、发光效率高,热损耗、开启电压低,以及特性参数随温度变化规律具有可重复性等特点。而现有的无机电致发光材料或多或少存在一些缺陷,如易遭受空气中氧气和水气作用形成暗斑,使得工作寿命严重缩减^[76];某些荧光材料的发光性能不仅与电场有关,同时还会受到环境中的磁场作用,难以进行标定和定量测量^[77];部分铈系磷光材料的电化学性能较稳定,但发光效率低,发光时会产生大量焦耳热,导致材料加速老化,器件性能在运行一段时间后迅速下降^[78]。由于尚未发现能同时满足前述要求的电致发光材料,该类传感器的研究与应用从根源上受到了限制。

2.5 指标分析

目前,国内与电压互感器、电场传感器相关的执行标准主要有《GB/T 20840 互感器》《GB/T 18901 光纤传感器》《DL/T 1894—2018 电力光纤传感器通用规范》《GB/T 35086—2018 MEMS 电场传感器通用技术条件》等等,但尚未形成针对光学电压、电场传感器的统一技术规范。为此,将现行标准中关于电磁式、电容式电压互感器以及电场传感器的技术要求同光纤电场传感器的主要参数进行对比,发掘后者的指标优势与不足之处,将有助于后

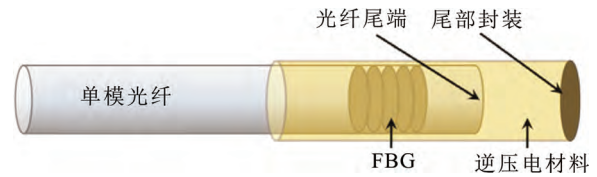


图 21 逆压电 FBG 式电场传感器示意图

Fig.21 Diagram of inverse piezoelectric FBG sensor for electric field measurement

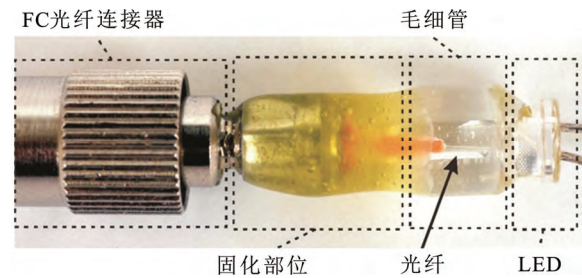


图 22 电致发光式电场传感器示意图

Fig.22 Diagram of electroluminescent sensor for electric field measurement

续制订更具针对性的标准,推动新型传感器朝标准化、实用化方向发展。

文献[79]对 MEMS 电场传感器的部分技术指标提出明确要求,包括测量范围为 1~200 kV/m,线性度 $\leq 10\%$,分辨率 ≤ 500 V/m,功耗 ≤ 1 W,可靠工作温度区间为 $-10\sim 40$ °C。文献[80]描述了电磁式与电容式电压互感器的暂态性能,指出电磁式电压互感器在 1~52 kV 电压范围内仅有约 60%频带可覆盖 0~2 500 Hz,若还要求相位准确度,则比例将降低至 50%;电容式电压互感器在频率达到数百赫兹时,误差将急剧增大,达到 80%~1 200%。此外,随着电压等级的提高,电压互感器的频带还会进一步变窄,额定一次电压在 275 kV 以上的电压互感器频带只有 0~250 Hz。各类光纤电场传感器的重要技术指标总结如表 1 所示。可见,光纤电场传感器在频带、测量范围、线性度和功耗等指标上都大幅超越了传统电磁式、电容式电压互感器及电场传感器的相关技术要求。

值得注意的是,消逝场式传感器的带宽较宽,可满足频率在 550 MHz 以下的电场测量需求;灵敏度很高,最小可测场强低至 100 mV/m;测量上限最高,达到 24 MV/m;封装尺寸极小,是唯一一类探头尺寸为百微米级的电场传感器;不含独立光学元件,消除了各部件在外力作用下偏移失准的可能;

同时可集成多个传感器于一体, 实时测量多场点、多轴向电场, 综合性能十分优异。但其制作工艺较为复杂, 对 D 型光纤与电光晶体的加工精密程度和配合程度要求较高, 必须精确控制粘接过程中胶层厚度、固化位置、紫外照射时间等各项参数。

分离元件式传感器性能较为平均, 带宽可覆盖直流到中高频, 测量范围较大, 但由于含有多个光学元件, 稳定性易受外界因素影响; 若采用双晶体结构或双光路结构增强其温度稳定性, 还会导致封装尺寸的进一步增大。集成光波导式传感器可用于检测超高频电场, 灵敏度极高, 但无法测量强场; 同时 Y 结波导的辐射损耗也对其微型化造成了一定阻碍。逆压电 FBG 式传感器的传输损耗较低, 输出信号相对稳定, 但受制于频带和测量上限, 无法用于强场测量。电致发光型传感器无需附加光源, 成本较低, 但只能用于工频强场测量; 此外, 其对工作环境和封装工艺的要求很高, 需避免水气、氧气渗入, 工作寿命易受内部发热引起的膨胀、裂纹等问题影响。综上, 各类光纤电场传感器的突出优势、适用场景及其存在问题总结如表 2 所示。

3 研究方向展望

国外关于消逝场式电场传感器已有初步研究成果, 国内的相关研究虽起步较晚, 但也取得了一些突破与进展。该类传感器的频带可满足绝大多数场景的电场测量需求, 测量范围远超其他类光纤电场传感器, 封装尺寸可达百微米级, 能在电磁屏蔽、高能物理设备、高功率脉冲设备近场或内部电场测量中发挥关键作用, 同时亦可用于电网中设备过电压检测或日常电压监测。但就传感机理和材料特性而言, 还存在一些问题需要进一步研究和解决, 今后可以从以下几个方面开展研究。

1) 电光晶体材料改性及 D 型光纤处理方法优化研究。消逝场式电场传感器的技术指标与电光晶体的电学和光学参数密切相关, 加快对高电光系数、低介电常数电光聚合物材料的研制, 将有助于进一步提高传感器灵敏度; D 型光纤平面的粗糙度越低, 输出功率光谱的谐振周期性越好, 局部极值点越少, 加快对精细化抛磨方法及定量腐蚀方法的研究, 将有助于进一步提高传感器稳定性。

表 1 各类光纤电场传感器的重要技术指标

Table 1 Critical technical indexes of diverse optical fiber electric field sensors

传感器类型	可测频率范围	最小可测场强	测量上限	封装尺寸	线性度	功耗	工作温区
消逝场式	DC~550 MHz	100 mV/m	24 MV/m	$\geq 1.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$			
分离元件式	DC~30 MHz	100 V/m	2 MV/m	$\geq 50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$			在进行温度补偿后可实现
集成光波导式	50 Hz~10 GHz	20 mV/m	0.2 MV/m	$\geq 30 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$	<1%	< 0.1 W	-40~80 °C 范围内稳定工作
逆压电 FBG 式	50 Hz~240 kHz	2 V/m	0.25 MV/m	$\geq 38 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$			
电致发光式	50 Hz~60 Hz	500 kV/m	2.9 MV/m	$\geq 30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$			

表 2 各类光纤电场传感器的突出优势、应用场景及其存在的问题

Table 2 Outstanding advantages, application scenarios and existing problems of diverse optical fiber electric field sensors

传感技术	物理效应	突出优势	应用场景	存在问题
消逝场式	Pockels 效应+消逝场	测量上限极高、封装尺寸极小、位置分辨率高, 可测量多场点、多方向电场	电磁轨道炮电枢近场测量、离子阱内部电场测量、线路及电缆过电压监测等	制作工艺较复杂, 对加工精密程度要求高, 必须严格控制粘接过程中的各项关键参数
分离元件式	Pockels 效应	频带较宽、测量范围较大	换流站内操作过电压测量、变电站内母线过电压电场测量等	含有多个光学元件, 稳定性易受振动、温度和应力等外界因素的影响, 最小尺寸受到实现明显相移所需晶体长度的限制
集成光波导式	Pockels 效应	频带上限极高、测量精度高	微秒或纳秒瞬态电磁脉冲测量、高频电场测量、PCB 板电磁干扰测量等	测量范围较小, 最小尺寸受到 Y 结波导辐射损耗的限制
逆压电 FBG 式	逆压电效应	传输损耗低、输出波动小	电力设备内部局部放电测量等	频带较窄, 测量上限较低, 信号调制与解调器的成本较高
电致发光式	电致发光效应	无需使用激光器、成本低	电机端子表面电场分布测量等	仅能用于工频强场测量, 受电致发光材料性能影响工作寿命较短

2) 材料参数对电光晶体与 D 型光纤耦合强度影响规律的量化研究。目前的研究主要集中于晶体种类、形状尺寸、光轴方向、光纤型号等因素对传感器输出光谱的影响, 为确定晶体与光纤间的最佳耦合位置, 必须建立两者之间的耦合强度同波导色散、吸收损耗、辐射损耗与散射损耗等物理量之间的联系。

3) 微观尺度下电光晶体电场仿真研究。现有研究主要集中于宏观尺度下传感器的电场响应特性, 而在微观层面的晶体内部电场分布均匀程度、边缘电场畸变程度等关键物理信息对测量灵敏度、准确度的影响规律尚不明确, 需进行电场分布有限元仿真和分子模拟, 结合宏观实验与微观仿真, 深入分析其电场分布特性和传感机理。

4) 普适性强的物理结构温度补偿方法研究。目前消逝场式电场传感器在宽温区下运行时主要采用温度特性曲线对测量结果进行修正, 虽能获得准确结果, 但各个传感器温度特性曲线不同, 不具有通用性。因而需要探索从物理结构角度对传感器进行温度补偿的方法, 消除或抵消温度参量。此外, 电光晶体吸收系数的温度效应、保偏光纤包层材料和应力区材料之间膨胀系数的温度效应对传感器输出的作用规律也还不明确。

5) 胶层参数可控、机械强度高、时间稳定性强的粘接与封装工艺研究。胶层厚度不可控及固化后收缩问题是导致消逝场式电场传感器制备成功率低的重要原因, 过薄与过厚都将影响波导的耦合强度, 导致无响应或零输出。强度与稳定性更高的封装工艺能帮助传感器克服恶劣环境影响, 大幅延长工作寿命, 解决该问题将显著加快传感器的实用化进程。

6) 光纤电场传感器的相关标准研究。现行互感器标准给出的多为电磁式、电容式电压互感器的技术要求, 电场传感器标准给出的多为测量弱场时的通用指标。但光学电场传感器的性能参数往往大幅超越了传统式互感器和传感器, 且型式试验与交接试验的项目亦不能直接套用, 因此, 亟需在现行的 IEC 61869、GB/T 20840 等标准基础上制订更具针对性的技术标准或规范。

4 结论

1) 相比较于其他类光纤电场传感器, 消逝场式电场传感器的测量范围更宽、封装尺寸更小, 具

备强大的多场点、多方向电场测量能力, 在紧凑环境下的宽频强场测量应用方面具有突出优势, 也可在电力设备的绝缘异常检测和线路监测中发挥重要作用。

2) 目前消逝场式电场传感器的关键技术问题主要集中在 3 个方面: 一是传统加工方法和处理工艺难以在不造成表面毁伤的情况下将电光晶体切割至百微米乃至更小量级。二是 D 型光纤制备方法有限, 化学腐蚀法耗时短、效率高, 但易因腐蚀速率不均导致表面粗糙度较高; 侧抛磨法所获得的 D 型平面质量更好, 但耗时长, 且对保偏光纤进行操作时对轴困难。三是 D 型光纤与电光晶体间的耦合强度不易控制, 缺乏精确的胶层厚度控制方法。

3) 为解决消逝场式电场传感器存在的问题, 未来可从电光晶体材料改性、光纤处理方法优化、耦合强度影响因素量化、微观尺度电场仿真、物理结构温度补偿和粘接与封装工艺改进等方面开展针对性研究。

4) 目前还未有标准对光纤电场传感器的性能指标和技术参数提出明确要求, 加快相关标准的研究制订, 将为各类传感器的研制与设计提供指导, 推动光纤电场传感器的标准化与实用化进程。

参考文献 References

- [1] KUO W K, CHEN W H, HUANG Y T, et al. Two-dimensional electric-field vector measurement by a LiTaO₃ electro-optic probe tip[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(27): 4985-4993.
- [2] ZHANG J H, CHEN F S, SUN B, et al. A three-axis optical electric field sensor for high-altitude nuclear electromagnetic pulse (HNEMP) measurement[C] // *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications*. Shenzhen, China: IEEE, 2015: 167-170.
- [3] BOHNERT K M, KOSTOVIC J, PEQUIGNOT P. Fiber optic voltage sensor for 420 kV electric power systems[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(11): 3060-3067.
- [4] DZIUDA L, NIEWCZAS P, FUSIEK G, et al. Hybrid fiber optic voltage sensor for remote monitoring of electrical submersible pump motors[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(6): 064401.
- [5] FERDINAND P, DENAYROLLES Y, MERSIER C, et al. The potential for distributed sensors and optical fibre sensor networks in the electric power industry[J]. *Measurement Science and Technology*, 1990, 1(9): 908-916.
- [6] BOHNERT K, GABUS P, KOSTOVIC J, et al. Optical fiber sensors for the electric power industry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43(3/5): 511-526.
- [7] 王继业, 蒲天骄, 全杰, 等. 能源互联网智能感知技术框架与应用布局[J]. *电力信息与通信技术*, 2020, 18(4): 1-14.
WANG Jiye, PU Tianjiao, TONG Jie, et al. Intelligent perception technology framework and application layout of energy internet[J].

- Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(4): 1-14.
- [8] 郭经红, 梁云, 陈川, 等. 电力智能传感技术挑战及应用展望[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(4): 15-24.
GUO Jinghong, LIANG Yun, CHEN Chuan, et al. Challenge and application prospect of power intelligent sensor technology[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(4): 15-24.
- [9] 王永千, 侯继勇, 孟凡勇, 等. 基于光纤光栅传感的低功耗小型化电网智能感知系统[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(4): 51-57.
WANG Yongqian, HOU Jiyong, MENG Fanyong, et al. Low power consumption miniaturized power grid intelligent sensing system based on fiber Bragg grating sensing[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(4): 51-57.
- [10] 郑勤红, 曾华, 金争, 等. 光学电压传感器的进展与分析[J]. 激光与光电子学进展, 2000(4): 1-5.
ZHENG Qinrong, ZENG Hua, JIN Zheng, et al. Development and analysis of optical voltage sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2000(4): 1-5.
- [11] 李长胜, 崔翔. 光学电场传感器研究综述[J]. 电气应用, 2008, 27(16): 8-13.
LI Changsheng, CUI Xiang. Research review of optical electric-field sensors[J]. Electrotechnical Application, 2008, 27(16): 8-13.
- [12] 马天兵, 赵耀军. 光纤电压传感器的温度补偿方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 96-98.
MA Tianbing, ZHAO Yaojun. Temperature compensating method for fiber optic voltage sensor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 96-98.
- [13] 李振华, 赵爽, 胡蔚中, 等. 高电压测量技术研究综述[J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 3910-3919.
LI Zhenhua, ZHAO Shuang, HU Weizhong, et al. Review of the study of high voltage measurement technology[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 3910-3919.
- [14] LI L J, ZHANG W H, LI H, et al. An overview of optical voltage sensor based on pockels effect[J]. Advanced Materials Research, 2013(694-697): 987-991.
- [15] 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 Qing, SUN Shangpeng, SIMA Wenxia, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 349-367.
- [16] CHADDERDON S, SHUMWAY L, POWELL A, et al. Ion trap electric field characterization using slab coupled optical fiber sensors[J]. Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 2014, 25(9): 1622-1627.
- [17] HARAN T L, HOFFMAN R B, LANE S E. Diagnostic capabilities for electromagnetic railguns[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1526-1532.
- [18] DENG X H, WU Y H, LI F, et al. Parameters analysis of few-modes optical fiber evanescent absorption sensor[C]//Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. Bellingham, USA: SPIE, 2006: 3208-3208.
- [19] 李慧. 具有消逝场结构的光纤氢气传感器的制备与研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
LI Hui. The research of the fiber-optic evanescent-field hydrogen sensor[D]. Wuhan, China: Wuhan University of Technology, 2009.
- [20] 张杰. 消逝场型光纤氢敏传感器工艺及检测方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
ZHANG Jie. Study on making process and detection method optimization of optical fiber evanescent wave hydrogen gas sensor[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2012.
- [21] 庄须叶, 吴一辉, 王淑荣, 等. 新结构 D 形光纤消逝场传感器[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1936-1941.
ZHUANG Xuye, WU Yihui, WANG Shurong, et al. Optical fiber evanescent field sensor based on new type D-shaped fiber[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(10): 1936-1941.
- [22] GIBSON R S. Slab coupled optical fiber sensors for electric field sensing applications[D]. Provo, USA: Brigham Young University, 2009.
- [23] WHITAKER B, NOREN J, CHADDERDON S, et al. Slab coupled optical fiber sensor calibration[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(2): 023108.
- [24] SUN H S, PYAJT A, LUO J D, et al. All-dielectric electrooptic sensor based on a polymer microresonator coupled side-polished optical fiber[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(4): 515-524.
- [25] GIBSON R, SELFRIDGE R, SCHULTZ S, et al. Electro-optic sensor from high Q resonance between optical D-fiber and slab waveguide[J]. Applied Optics, 2008, 47(13): 2234-2240.
- [26] CHADDERDON S, GIBSON R, SELFRIDGE R H, et al. Electric-field sensors utilizing coupling between a D-fiber and an electro-optic polymer slab[J]. Applied Optics, 2011, 50(20): 3505-3512.
- [27] PERRY D, CHADDERDON S, GIBSON R, et al. Electro-optic polymer electric field sensor[J]. Proceedings of the SPIE, 2011, 7982: 79820Q.
- [28] CHADDERDON S, WHITAKER B M, WHITING E, et al. Frequency dependence of slab coupled optical sensor sensitivity[J]. Applied Optics, 2013, 52(27): 6771-6775.
- [29] CHADDERDON S, WOODARD L, PERRY D, et al. Improvements in electric-field sensor sensitivity by exploiting a tangential field condition[J]. Applied Optics, 2013, 52(23): 5742-5747.
- [30] CHADDERDON S, WOODARD L, PERRY D, et al. Single tunable laser interrogation of slab-coupled optical sensors through resonance tuning[J]. Applied Optics, 2013, 52(12): 2682-2687.
- [31] GIBSON R, SELFRIDGE R, SCHULTZ S. Electric field sensor array from cavity resonance between optical D-fiber and multiple slab waveguides[J]. Applied Optics, 2009, 48(19): 3695-3701.
- [32] CHADDERDON S, PERRY D, VAN WAGONER J, et al. Multi-axis, all-dielectric electric field sensors[J]. Proceedings of the SPIE, 2012, 8376: 837608.
- [33] PERRY D, CHADDERDON S, FORBER R, et al. Multiaxis electric field sensing using slab coupled optical sensors[J]. Applied Optics, 2013, 52(9): 1968-1977.
- [34] SENG F, YANG Z C, KING R, et al. Optical electric field sensor sensitivity direction rerouting and enhancement using a passive integrated dipole antenna[J]. Applied Optics, 2017, 56(17): 4911-4916.
- [35] KING R, SENG F, STAN N, et al. Slab-coupled optical sensor fabrication using side-polished Panda fibers[J]. Applied Optics, 2016, 55(31): 8848-8854.
- [36] STAN N, SENG F, SHUMWAY L, et al. High electric field measurement using slab-coupled optical sensors[J]. Applied Optics, 2016, 55(3): 603-610.
- [37] NOREN J R. Electric field sensing in a railgun using slab coupled optical fiber sensors[D]. Provo, USA: Brigham Young University, 2012.
- [38] CHADDERDON S L. Application improvements of slab-coupled optical fiber sensors[D]. Provo, USA: Brigham Young University,

- 2014.
- [39] STAN N, SENG F, SHUMWAY L, et al. Non-perturbing voltage measurement in a coaxial cable with slab-coupled optical sensors[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(24): 6814-6821.
- [40] PERRY D T. Directional electric field sensing using slab coupled optical fiber sensors[D]. Provo, USA: Brigham Young University, 2013.
- [41] PAN F, XIAO X, XU Y, et al. Optical AC voltage sensor based on two Bi₄Ge₃O₁₂ crystals[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(4): 1125-1129.
- [42] MARCHESE S V, BOHNERT K, WILDERMUTH S, et al. Electro-optic voltage sensor based on BGO for air-insulated high voltage substations[C]// *Proceedings of the 2013 IEEE Photonics Conference*. Bellevue, USA: IEEE, 2013: 608-609.
- [43] STEIGER O, MARCHESE S V, PASCAL J, et al. Signal processing for electro-optic voltage sensor[C] // *SENSORS*, 2013 IEEE. Baltimore, USA: IEEE, 2013: 1932-1935.
- [44] WANG H X, FENG S Q, LIANG X B, et al. Design and test of self-healing optical voltage sensor[M]. 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Weihai, China: IEEE, 2011: 1575-1579.
- [45] 王红星, 张国庆, 于文斌, 等. 自愈光学电压传感器[J]. *电力自动化设备*, 2012, 32(1): 135-138.
WANG Hongxing, ZHANG Guoqing, YU Wenbin, et al. Self-healing optical voltage sensor[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(1): 135-138.
- [46] WANG H X, LI K X, DING H J, et al. Research on improvement of temperature stability of optical voltage transducer[C]// *Proceedings of the 2014 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (Icicta)*. Changsha, China: IEEE, 2014: 534-538.
- [47] 李开成, 叶妙元, 詹琼华, 等. 提高光纤电压传感器温度稳定性的方法[J]. *压电与声光*, 2000, 22(2): 72-74.
LI Kaicheng, YE Miaoyuan, ZHAN Qionghua, et al. Some methods to improve temperature stability of optical fiber voltage sensors[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2000, 22(2): 72-74.
- [48] GIBSON R, KVAVLE J, SELFRIDGE R, et al. Improved sensing performance of D-fiber/planar waveguide couplers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 2139-2144.
- [49] MITSUI T, HOSOE K, USAMI H, et al. Development of fiber-optic voltage sensors and magnetic-field sensors[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1987, 2(1): 87-93.
- [50] 韩睿. 基于 Pockels 效应的无源非接触式光学过电压传感器及测量系统的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
HAN Rui. Research on a battery-less and contact-less optic overvoltage sensor and measurement system based on Pockels effect[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2017.
- [51] 郭小明, 苏进喜, 罗承沐, 等. 纳秒级脉冲电压的电光测量[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 1997, 37(4): 65-67.
GUO Xiaoming, SU Jinxi, LUO Chengmu, et al. Electro optical measurement of pulsed voltage with nanosecond risetime[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 1997, 37(4): 65-67.
- [52] 赵子玉, 彭宗仁, 刘晓亮, 等. 用 Pockels 探头进行套管尾部油中电场测试技术的研究[J]. *西安交通大学学报*, 1997(11): 68-73.
ZHAO Ziyu, PENG Zongren, LIU Xiaoliang, et al. Study on measuring technology of electric field at lower part of transformer bushing in oil using Pockels sensor[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1997(11): 68-73.
- [53] SIMA W X, LIU T, YANG Q, et al. Temperature characteristics of Pockels electro-optic voltage sensor with double crystal compensation[J]. *AIP Advances*, 2016, 6(5): 055109.
- [54] LI C S, SHEN X L, ZENG R. Optical electric-field sensor based on angular optical bias using single β -BaB₂O₄ crystal[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(31): 7580-7585.
- [55] 张敏. 旋转式光学电场传感器的设计实现及性能研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
ZHANG Min. Design, implementation and property of rotary optical electric field sensor[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2019.
- [56] LONG F, ZHANG J H, XIE C R, et al. Application of the Pockels effect to high voltage measurement[C]// *Proceedings of the 2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments*. Xi'an, China: IEEE, 2007.
- [57] TULLI D, JANNER D, PRUNERI V. Room temperature direct bonding of LiNbO₃ crystal layers and its application to high-voltage optical sensing[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, 21(8): 085025.
- [58] 许灿华, 徐启峰, 谢楠. 用晶体斜劈法测量石英波片相位延迟的温度特性[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0212004.
XU Canhua, XU Qifeng, XIE Nan. Using crystal wedge to measure temperature dependence of quartz wave plates' phase retardation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0212004.
- [59] 杨拥军. 新型集成光波导全向电场传感系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
YANG Yongjun. A novel isotropic electric field sensing system using integrated optical waveguides[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2007.
- [60] BULMER C H, BURNS W K, MOELLER R P. Linear interferometric waveguide modulator for electromagnetic-field detection[J]. *Optics Letters*, 1980, 5(5): 176-178.
- [61] ZENG R, WANG B, YU Z Q, 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.
- [62] ZHANG J H, CHEN F S, SUN B, et al. Nanosecond transient electric field measurement system using an integrated electro-optic sensor[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(11): 117101.
- [63] ZHANG J H, LUO C, ZHAO Z G. Design and application of integrated optics sensor for measurement of intense pulsed electric field[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(4): 1440-1448.
- [64] 曾嵘, 陈未远, 何金良, 等. 光电集成强电场测量系统及其应用研究[J]. *高电压技术*, 2006, 37(7): 1-5.
ZENG Rong, CHEN Weiyan, HE Jinliang, et al. Study on optical electric integrated electric field measurement system and application in high voltage measurement[J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(7): 1-5.
- [65] TAJIMA K, KOBAYASHI R, KUWABARA N, et al. Development of optical isotropic E-field sensor operating more than 10 GHz using Mach-Zehnder interferometers[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2002, E85-C(4): 961-968.
- [66] YANG Y J, CHEN F S. Novel low-loss wide-angle Y-junctions of optical waveguides with graded-index profiles[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2004, 41(2): 156-159.
- [67] MELTZ G, MOREY W W, GLENN W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. *Optics Letters*, 1989, 14(15): 823-825.
- [68] SARKAR B, KOLEY C, ROY N K, et al. Condition monitoring of high voltage transformers using fiber Bragg grating sensor[J].

Measurement, 2015, 74: 255-267.

- [69] FLORIDIA C, BORIN F, ROSOLEM J B, et al. Temperature independent electrical field optical grating based sensor for high voltage applications[C]//Proceedings of the 2007 Sbmo/IEEE Mtt-S International Microwave and Optoelectronics Conference. Salvador, Brazil: IEEE, 2007: 384.
- [70] SARKAR B, MISHRA D K, KOLEY C, et al. Intensity-modulated fiber bragg grating sensor for detection of partial discharges inside high-voltage apparatus[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(22): 7950-7957.
- [71] BOHNERT K, PEYUIGNOT P. Inherent temperature compensation of a dual-mode fiber voltage sensor with coherence-tuned interrogation[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(4): 598-604.
- [72] 李长胜, 王伟岐. 基于电致发光效应的光学电压传感器[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 30-40.
LI Changsheng, WANG Weiqi. Review of optical voltage sensor based on electroluminescent effect[J]. Chinese Journal of Optics, 2016, 9(1): 30-40.
- [73] LIU P, LIU X Z, LIU S, et al. Method of non-contacted electric field measurement on HV generator stator bar based SiC grading coating electroluminescence[C] // Proceedings of the 2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (Icd). Budapest, Hungary: IEEE, 2018: 1-4.
- [74] LIU S, LIU X Z, TIAN S J, et al. Measurements of electroluminescent performances of silicon carbide coatings for stress grading of HV electric machines[C]//Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (Ceidp). Fort Worth, USA: IEEE, 2017: 295-298.
- [75] PUSTELNY T, PUSTELNY B M. Optic fiber electric field intensity sensor[C]//Proceedings of the Optoelectronic and Electronic Sensors. Gliwice, Poland: SPIE, 2001: 208-213.
- [76] KAWAHARADA M, OISHI M, SAITO T, et al. Nuclei of dark spots in organic EL devices: detection by DFM and observation of the microstructure by TEM[J]. Synthetic Metals, 1997, 91(1/3): 113-116.
- [77] 汪津, 华杰, 丁桂英, 等. 磁场作用下的有机电致发光[J]. 物理学报, 2009, 58(10): 7272-7277.
WANG Jin, HUA Jie, DING Guiying, et al. Effects of magnetic field on organic electroluminescence[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(10): 7272-7277.
- [78] 李峰. 改善有机电致发光器件的效率和稳定性的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2003.
LI Feng. Study on improving the efficiency and stability of organic light-emitting devices[D]. Changchun, China: Jilin University, 2003.
- [79] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. MEMS 电场传感器通用技术条件: GB/T 35086—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. General specification for MEMS electric field sensor:

GB/T 35086—2018[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2018.

- [80] 国家能源局. 电力光纤传感器通用规范: DL/T 1894—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.

National Energy Administration. General specification of fiber optic sensor in power industry: DL/T 1894—2018[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2018.



LIU Xuandong
Ph.D.

Associate professor
Corresponding author

刘轩东(通信作者)

1981—, 男, 博士, 副教授, 博导
主要从事直流电力设备设计、气体绝缘与放电等
离子体、高功率脉冲源、气体开关及应用研究
E-mail: liuxuand@xjtu.edu.cn



CHENG Zhiying

程章颖

1997—, 男, 硕士生
主要从事光学电场测量方面的研究工作
E-mail: xjtu_czy@stu.xjtu.edu.cn



MA Lechen

马乐晨

1998—, 女, 硕士生
主要从事脉冲功率技术方面的研究工作
E-mail: m2049746160@stu.xjtu.edu.cn



CHEN Ming
Ph.D. candidate

陈铭

1994—, 男, 博士生
主要从事高压直流套管绝缘结构设计与绝缘诊断
的研究工作
E-mail: chenmingc@stu.xjtu.edu.cn

收稿日期 2020-07-17 修回日期 2020-11-18 编辑 曾文君