第 50 卷 第 11 期：4961-4970 高电压技术 Vol.50, No.11: 4961-4970
2024 年 11 月 30 日 High Voltage Engineering November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20232031

基于电光调制的小型化三维雷击脉冲电场测量装置

龙兆芝[1,2]，李文婷[1]，姚高龙[3]，习永臻[3]，李仙丽[3]，林福昌[2]
（1. 中国电力科学研究院有限公司，武汉 430074；2. 华中科技大学电气与电子工程学院，武汉 430074；
3. 西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室，西安 710071）

摘　要：非接触式的电场传感技术是目前电力系统关键节点电压测量的一种解决方案，为此以实现体积小、空间分辨力高的三维雷击脉冲电场准确测量为目标，提出了一种基于电光调制的小型化三维脉冲电场测量技术，自主研发了基于非对称直波导的三维电场测量探头，并对探头的测量范围、方向性和时域波形测量功能进行了仿真研究及试验验证。该三维探头的体积约为 3 cm×3 cm×10 cm，与常规三维探头相比，缩小了约 10 倍，进一步提高了电场测量的空间分辨率。搭建雷电脉冲试验平台评价传感器的测量性能，结果表明，该探头不仅可真实反映了待测雷击脉冲电场的时域波形，而且具有良好的方向性，在额定值 20%~120%范围内传感器综合测量误差绝对值<3%，可实现雷击脉冲电压的准确测量。

关键词：光电效应；脉冲电场；三维测量；集成光波导电场传感器；幅频响应特性；测量误差

Compact Three-dimensional Lightning Impulse Electric Field Measuring Device Based on Electro-optic Modulation

LONG Zhaozhi[1,2], LI Wenting[1], YAO Gaolong[3], XI Yongzheng[3], LI Xianli[3], LIN Fuchang[2]
(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Non-contact electric field sensing technology serves as a solution for voltage measurement at critical nodes in the current power system. This paper aims to achieve high spatial resolution and miniaturization in three-dimensional (3D) pulsed electric field measurement. A novel miniaturized 3D impulse electric field measurement technique based on electro-optic modulation is proposed. A 3D electric field measurement probe utilizing asymmetric straight waveguides has developed. Simulation studies and experimental validation have been conducted to investigate the measurement range, electric field sensing directionality, and temporal waveform reproducibility of the probe. The volume of this 3D probe is approximately 3 cm×3 cm×10 cm, which is approximately ten times smaller than conventional 3D probes, thereby further enhancing the spatial resolution of electric field measurement. From the evaluation of sensor measurement performance on lightning impulse test platform, the results indicate that the probe not only accurately reflects the temporal waveform of the measured lightning impulse electric field but also exhibits good directional characteristics. Within the rated range of 20% to 120%, the comprehensive measurement error of the sensor is better than 3%, enabling accurate measurement of lightning impulse voltage.

Key words: electro-optic modulation; pulsed electric field; three-dimensional sensing; integrated optical electric field sensor; amplitude frequency response characteristics; measurement error

0　引言

随着新型电力系统的不断发展，电网对信息感知的深度、广度和密度提出了更高要求[1-3]，对传感器需求呈现爆发式增长。构建新型智能电网，需要收集的 1 个重要特征状态表征量是关键节点与设备的电压/电场的实时信息，其频率覆盖范围十分广泛，对其准确测量可有效反映电网实时状态。常规的电磁式、电容式电压互感器等无法实现电压的非接触式测量[4-8]，只能实现 50 Hz 工频电压的准确计

基金资助项目：国家电网公司科技项目(5400-202255292A-2-0-QZ)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5400-202255292A-2-0-QZ).

量，无法测量高频或者脉冲电压/电场[9]。电网故障过程中的暂态电压是揭示故障真实原因的关键证据，也是合理设计绝缘配置的主要依据。电网中的暂态电压种类多样，在电力系统输变电设备或附近物体遭受雷击时雷电过电压会直接或通过感应侵入电力系统；在断路器和隔离开关操作，或出现故障时，在电力系统中出现各种操作过电压[10-11]；在电力系统参数配置不当或符合某些条件时，系统可能出现谐振过电压。如何准确、快速、安全地测量暂态电压对了解和抑制暂态电压的危害、电网状态监测、电力设备的制造与设计、故障检测与诊断以及电磁兼容等有着至关重要的作用[12-13]。目前传感技术朝小型化、集成化、非接触及智能化发展。基于电场测量的传感器具有体积小、非接触式安装方式等完全不会对电网和运行设备造成额外影响的优势。

目前现有的脉冲电场传感器主要有 D-dot 电场传感器[14-17]、集成光波导式电场传感器[18-22]、光纤-波导耦合器式电场传感器[23-26]等。其中，集成光波导式电场传感器因其体积小、频带宽、动态测量范围大、抗电磁干扰能力强、、电气安全性高、适用于远距离测量与信号传输等优势，受到了国内外研究学者和工业应用领域的广泛关注。但是，限于常规天线的方向性，大多数电场传感器只能进行 1 维方向电场测量，仅适用于测量方向已知的电场。考虑到电场强度为矢量，同时实际应用中被测电场的方向往往是未知的，因此需要研制 1 种三维电场传感器，实现空间任意方向的电场强度测量。现有三维电场测量探头一般是由 3 个互相垂直正交的电场传感器构成，不仅体积大、电场测量空间分辨率低，而且 3 个传感器之间较大的安装距离会对电场分布产生较大的影响，进而带来较大的测量误差[27-28]。

本文以实现体积微小、空间分辨力高的三维雷击脉冲电场测量技术为目标，提出了一种基于电光调制的小型化三维脉冲电场测量技术。该三维探头由 2 个锥形偶极子和 1 个分段电极集成光波导电场传感器组成。由于分段电极集成光波导电场传感器可以将沿 y 轴方向的电场分量转换为电光晶体的电场敏感方向 z 向，因此，3 个传感器可以平行安装于 1 个直角三棱柱背架上，而非正交垂直放置，因此大幅度减小了探头的整体体积。该三维探头的体积约为 3 cm×3 cm×10 cm，其体积仅是常规三维探头体积的 1/10。此外，本文的理论分析和试验结果表明，该三维探头可以获取雷击脉冲电场，真实复现脉冲信号的时域波形，具有良好的方向性，可实现空间任意方向电场强度的准确测量。

1 三维电场传感器结构及其测试原理

1.1 工作原理

集成光波导电场传感器的基本结构如图 1 所示，包括铌酸锂($LiNbO_3$)晶体衬底、宽度不同的光波导臂组成的非对称马赫-泽德干涉仪以及制作在光波导两侧的金属电极和天线构成。空间中的电场信号经天线馈送到光波导两侧的电极上，形成感应电场。由于 $LiNbO_3$ 晶体的电光效应，晶体的折射率会改变从而引起波导中传播光的相位变化，通过非对称干涉效应将光相位转换为光强度变化。使用光电探测器测量该光强变化，即可获得被测电场强度信息。

由马赫-泽德干涉仪的电光调制理论可知，基于非对称干涉效应的电场传感器输出的光强[21]为：

$$P_{\text{out}} = \eta P_{\text{in}} \left(1 + k\cos(\varphi_0 + \varphi(E_z))\right) \tag{1}$$

式中：P_{in} 和 P_{out} 分别为输入和输出光强；η 和 k 分别是传感器的传输损耗和传输光谱的消光比；E_z 为施加到晶体 z 方向的外界电场强度；φ_0 为干涉仪的固有相位差；$\varphi(E_z)$为场强 E_z 引起光波相位变化。

在外加电场作用下，某些光学晶体的折射率会改变进而引起晶体中传播光的相位变化，这就是晶体的电光效应[25]。如果折射率的变化与电场呈线性关系，即为 Pockels 效应。铌酸锂晶体具有良好的 Pockels 电光性能，同时具有物理性能稳定、化学性能不活泼、耐腐蚀、耐高温、易于生长等优点，本文选择 $LiNbO_3$ 晶体作为光电功能材料。根据晶体物理学理论，当外界电场 $E(E_x、E_y、E_z)$作用在 $LiNbO_3$ 晶体上时，其折射率椭球方程会发生变化，见式(2)。

$$\begin{aligned}&(1/n_0^2 - \gamma_{22}E_y + \gamma_{13}E_z)x^2 + (1/n_0^2 + \gamma_{22}E_y + \gamma_{13}E_z)y^2 + \\ &(1/n_e^2 + \gamma_{33}E_z)z^2 + 2\gamma_{51}E_y yz + 2\gamma_{51}E_x xz - 2\gamma_{22}E_x xy = 1\end{aligned} \tag{2}$$

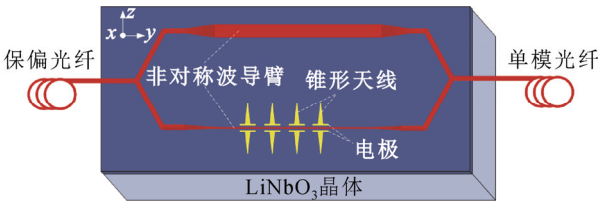


图 1 集成光波导电场传感器的基本结构

Fig.1 Basic structure of integrated optical waveguide electric field sensor

$$\Delta\left(\frac{1}{n_i^2}\right)\approx\sum_{j=1}^{3}\gamma_{ij}E_j=\begin{bmatrix}0&-\gamma_{22}&\gamma_{13}\\0&\gamma_{22}&\gamma_{13}\\0&0&\gamma_{33}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}E_x\\E_y\\E_z\end{bmatrix}\tag{3}$$

式中：n_0 为寻常折射率；n_e 为非寻常光折射率；n_i 为不同方向上的折射率；E_j 为不同方向的电场强度；γ_{ij} 为电光晶体的电光系数，γ_{13}=8.6 pm/V，γ_{33}=31 pm/V，γ_{22}= 3.4 pm/V；x、y、z 为三维坐标。从式(2)和式(3)可以看出，当 $LiNbO_3$ 晶体内传播的线偏振光的偏振方向、传播方向以及外加电场方向不同时，$LiNbO_3$ 晶体的折射率变化不同。对于传输光模式为横电波模式(transverse electric mode，TE模)、光传输方向为 y 向、晶体切向为 x 向的 $LiNbO_3$ 晶体而言，其电光系数为 γ_{33}，电场敏感度最大，同时 $LiNbO_3$ 晶体的折射率 n_e 仅受 z 方向电场 E_z 的影响，与 y 方向电场 E_y 和 x 方向电场 E_x 无关。因此，对于 x 切 y 向传光的 $LiNbO_3$ 晶体电场传感器的电场敏感方向为晶体的 z 向。在 E_z 作用下，$LiNbO_3$ 光波导内传输的光波相位变化为：

$$\varphi(E_z)=\frac{2\pi\Gamma n_e^3\gamma_{33}L_{el}}{\lambda_0}E_z\tag{4}$$

式中：L_{el} 为波导两侧电极的长度；λ_0 为输入光源的工作波长；Γ 为波导两侧天线的场增强因子，其值与天线的结构设计有关，即：

$$\Gamma=\frac{\lambda\sqrt{GZ}}{W_s\sqrt{4\pi Z_0}}\tag{5}$$

式中：Z 为空间波阻抗；W_s 为波导两侧电极之间的间距；G 为天线增益；Z_0 为天线阻抗；λ 为被测脉冲电场的波长。若控制 $\varphi_0=\pi/2\pm n\pi$，同时令 $\pi E_z/E_\pi<<1$，并代入式(4)，那么式(1)就可以变换[21]为：

$$U_{out}=\eta\xi P_{in}\left(1-k\frac{2\pi}{\lambda_0}\Gamma n_e^3\gamma_{33}L_{el}E_z\right)\tag{6}$$

式中：U_{out} 为光电探测器的输出电压；ξ 为光电探测器的光电转换系数。根据式(6)可以看出，输出电压的变化量 ΔU_{out} 与施加到晶体 z 方向的电场强度变化量 ΔE_z 呈线性关系，测量输出电压的变化可以获得被测电场信息，即：

$$\Delta U_{out}=\eta\xi P_{in}k\frac{2\pi}{\lambda_0}\Gamma n_e^3\gamma_{33}L_{el}\Delta E_z\tag{7}$$

1.2 传感元件结构

空间任意方向的场强 $\boldsymbol{E}$ 都可以分解成 x、y、z 这 3 个正交垂直方向上的电场矢量和，即：

$$|\boldsymbol{E}|=\sqrt{|\boldsymbol{E}_x|^2+|\boldsymbol{E}_y|^2+|\boldsymbol{E}_z|^2}\tag{8}$$

从式(8)可以看出，分别测量场强 $\boldsymbol{E}$ 在 x、y、z 这 3 个方向上的场强分量 $\boldsymbol{E}_x$、$\boldsymbol{E}_y$ 和 $\boldsymbol{E}_z$，经矢量合成，可准确获得被测电场的方向和强度。因此，如图 2 所示，已有的三维电场测量探头一般是由 3 个互相垂直正交的电场传感器构成，其体积直接由单个电场传感器的体积决定，常规三维电场测量探头尺寸达 10 cm×10 cm×10 cm[27]。

为了减小三维电场探头体积，提高电场测量的空间分辨率，本文设计了如图 3 所示的小型化三维电场测量探头。该三维探头由 2 个锥形偶极子集成光波导电场传感器、1 个分段电极集成光波导电场传感器、1 个直角三棱柱背架组成。如图 4 所示，锥形偶极子电场传感器内部天线结构为锥形偶极子天线，天线极化方向为 z 向，当存在沿 z 轴方向的电场分量时，偶极子产生感应电势作用到电极上，在波导两侧形成 z 向局部均匀电场，由于电光效应，$LiNbO_3$ 光波导折射率变化，因此锥形偶极子电场传

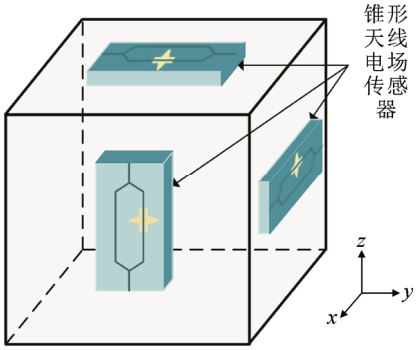


图 2 正方体形式排布示意图

Fig.2 Schematic diagram of cube arrangement patterns

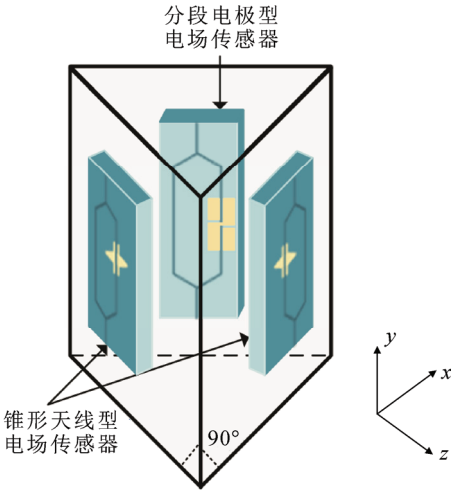


图 3 小型化三维电场传感结构

Fig.3 Miniaturized 3D electric field sensing structure

感器的电场敏感方向为 $LiNbO_3$ 晶体的 z 向。分段电极电场传感器内部天线的极化方向则为 y 向，当存在沿 y 轴方向的电场分量时，天线产生感应电势作用到电极上。因此，分段电极电场传感器的电场敏感方向为 $LiNbO_3$ 晶体的 y 向。

如图 3 所示，2 个锥形偶极子电场传感器分别固定在直角三棱柱互相垂直的 2 个侧面上，并使传感器的电场敏感方向($LiNbO_3$ 晶体的 z 向)分别与三棱柱的 x、y 方向保持平行。1 个分段电极集成光波导电场传感器固定在直角三棱柱底面斜边所在的侧面上，并使传感器的电场敏感方向(即 $LiNbO_3$ 晶体的 y 向)与三棱柱的 z 方向保持平行。此时，3 个传感器的电场敏感方向为三棱柱的 x、y、z 向，即构成 1 个三维天线。该三维探头的体积由单个传感器的宽度和长度方向共同决定，约为 3 cm×3 cm×10 cm，与常规三维探头相比，体积缩小了约 10 倍。

2 仿真分析

本文实现小型化三维电场测量的关键是采用分段电极集成光波导电场传感器将沿 y 轴方向的电场分量转换为 $LiNbO_3$ 晶体的电场敏感方向 z 向。因此本章以分段电极集成光波导电场传感器为代表，仿真分析了其方向敏感特性。仿真软件为 CST MICROWAVE STUDIO。首先，在 CST MICROWAVE STUDIO 中建立传感器模型，模型结构参数如图 5 所示，分段电极长度 L_{el} 为 1 260 μm、电极宽度 W_{el} 为 100 μm，纵向电极间距 G_{elv} 和横向电极间距 G_{elh} 分别为 10 μm 和 20 μm，电极对数为 4 对。其次，设置电场强度为 1 V/m 的平面波作为激励源，激励源信号为高斯脉冲和雷击脉冲，高斯脉冲上升时间为 0.56 ns，脉冲宽度为 0.76 ns，雷击脉冲上升时间为 1.2 μs，脉冲宽度为 50 μs。

定义输入脉冲电场的极化方向与 $LiNbO_3$ 晶体的 y 向之间的夹角为分段电极型电场传感器的电光夹角。改变输入脉冲场的极化方向，可以调整传感器的电光夹角，使电光夹角从 0°变化至 360°，记录不同夹角时波导中心处时域波形的变化，仿真结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出，首先，传感器的响应时域波形分别为高斯脉冲和雷击脉冲波形，脉冲上升时间和脉冲宽度与激励源一致，这表明所设计的天线结构可以捕获脉冲电场信号的时域波形，实现瞬态脉冲电场测量。其次，激励源电场强度不

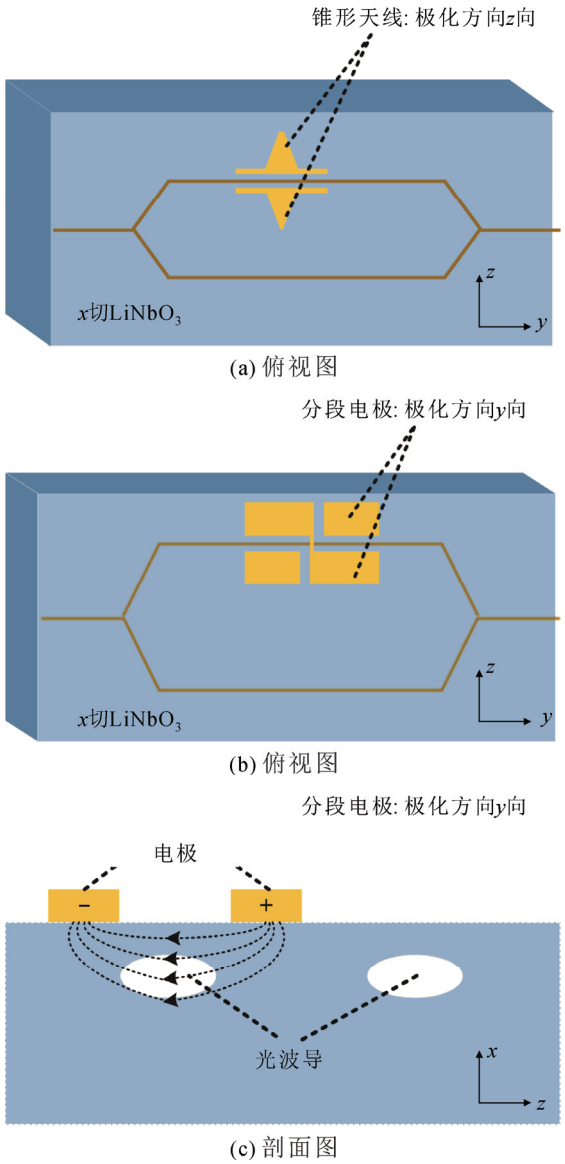


图 4 锥形偶极子和分段电极型集成光波导示意图

Fig.4 Schematic diagram of conical antenna type and segmented electrode type integrated optical waveguide

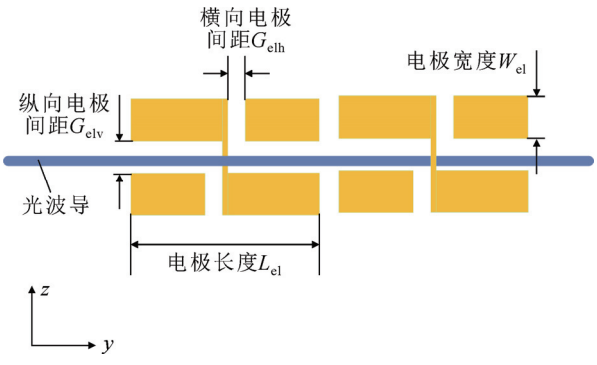
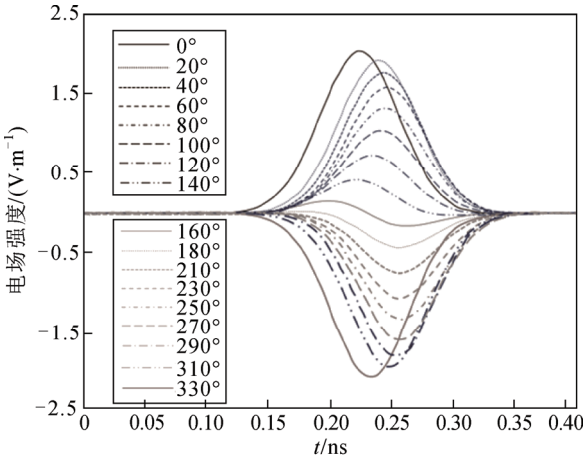
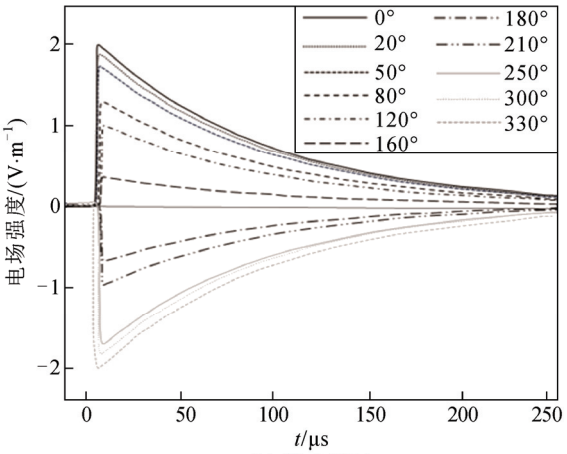


图 5 分段电极结构参数示意图

Fig.5 Schematic diagram of segmented electrode structure parameters



(a) 高斯脉冲



(b) 雷击脉冲

图 6 不同夹角时波导中心处时域波形的变化

Fig.6 Changes in time-domain waveform at the center of the waveguide at different angles

变，电光夹角变化时，传感器输出脉冲信号的幅度跟着变化。表 1 仿真为不同夹角时高斯响应波形的上升时间和脉冲宽度，图 7 进一步表征了电光夹角与传感器输出脉冲信号的峰值幅度之间的关系。从图 7 中可以看出，传感器输出脉冲信号的峰值幅度与电光夹角呈余弦关系。电光夹角为 0°时，响应信号幅度最大，在 0°~90°范围内，随着电光夹角的增大，响应信号幅度下降。电光夹角在 90°~270°范围时，响应信号与激励信号反向。这说明本文提出的传感器对外界电场方向敏感，采用该传感器不仅可以测量电场的强度，还可以实现电场方向的测量。此外，电光夹角为 0°时，传感器的电场敏感系数最大，该方向是 $LiNbO_3$ 晶体的 y 向。

模型结构参数不变，在 CST MICROWAVE STUDIO 中将脉冲激励源更换为频率范围为 0~20 GHz 的平面电磁波激励，设置入射电场强度为

表 1 不同夹角时高斯响应波形的上升时间和脉冲宽度

Table 1 Rise time and impulse width of Gaussian response waveform at different angles

角度/(°)	上升时间/ns	脉冲宽度/ns
0	0.550 00	0.756 1
20	0.551 69	0.755 4
40	0.549 48	0.752 7
60	0.540 64	0.741 6
80	0.520 00	0.664 9
120	0.529 04	0.733 9
160	0.518 38	0.750 5
180	0.548 93	0.751 1

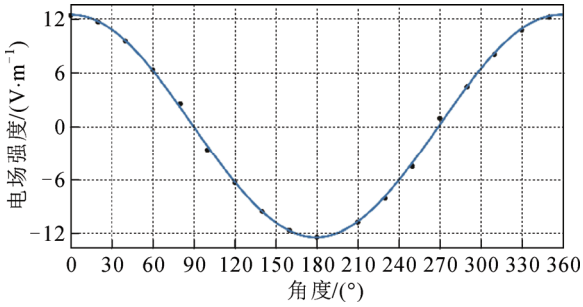


图 7 电光夹角与传感器输出脉冲电场峰值之间的关系

Fig.7 Relationship between the electro-optic angle and the peak value of output voltage of the sensor

1 V/m，并在波导的电极之间设置全向探针监测波导内的电场强度，可以求解得到传感器的幅频响应特性，结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出，首先，入射电场强度为 1 V/m，而电极之间波导内电场强度为 5 V/m 至 64 V/m，这说明所设计的分段电极结构有效增强了光波导内部的电场强度。其次，受限于天线结构固有谐振特性等因素影响，传感器的幅频特性是有波动的，0~7 GHz 范围内频响波动绝对值在 3 dB 以内，这从理论上表明所设计的传感器的 3 dB 带宽最高可达 7 GHz，时域上可以满足纳秒量级的电磁脉冲系统的测量需求。

3 试验验证

根据三维电场传感元件的基础上，建立电场测量系统。图 9 为电场测量系统组成，包括可调谐激光器、保偏光纤、传感元件、单模光纤、光电探测器、同轴电缆和测量仪器，其中可调谐激光器的输出激光波长为 1 650 nm，功率为 3 mW，光电探测器的带宽为 10 Hz~10 MHz。在光电探测器的末端增加噪声抑制单元和信号调理电路，测量仪器为高精度数字示波器。

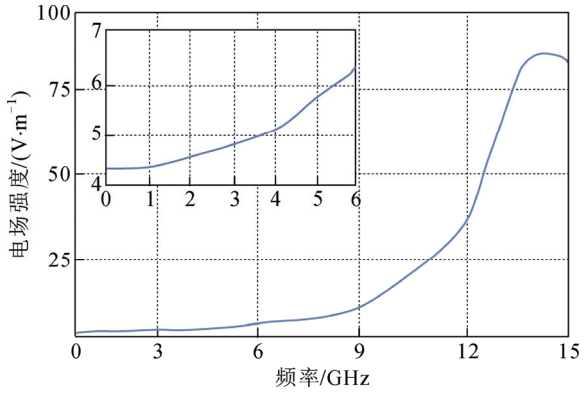


图 8 传感器幅频响应特性的仿真结果

Fig.8 Simulation results of amplitude frequency response characteristics

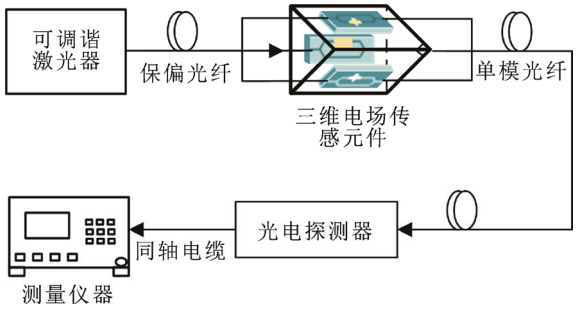


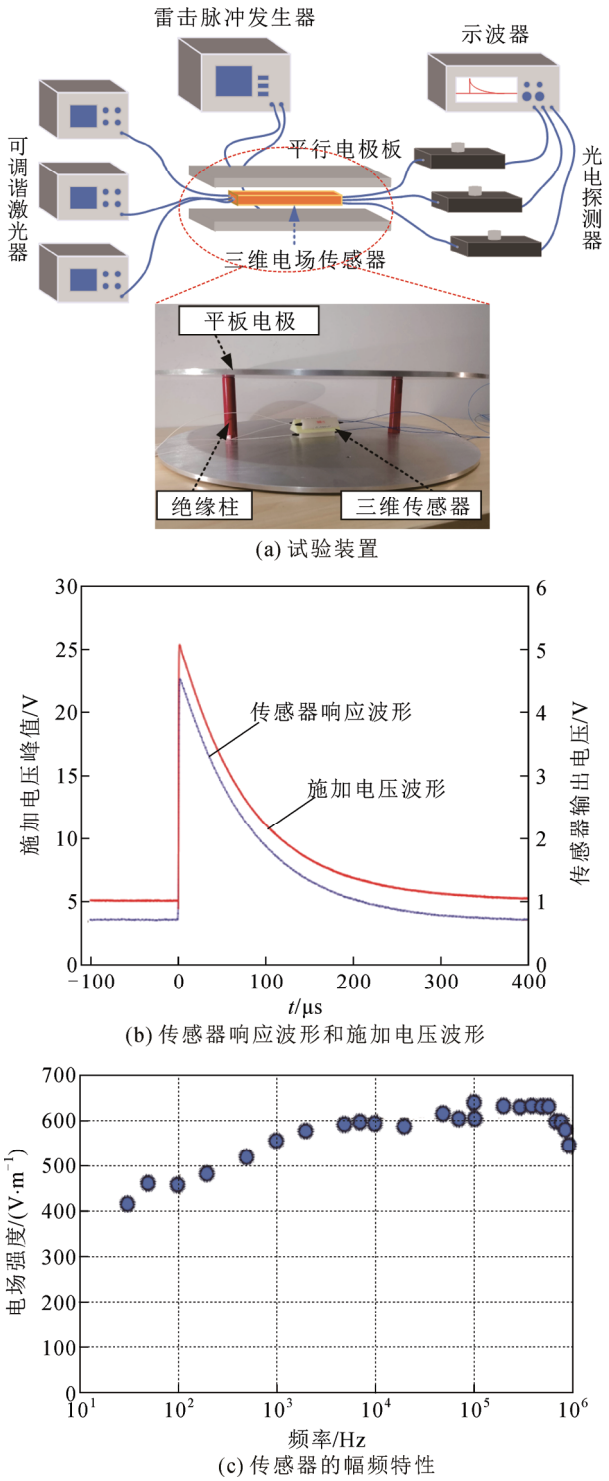
图 9 三维电场测量系统组成

Fig.9 Composition of a 3D electric field measurement system

3.1 试验装置

对于小型化三维电场测量探头，单个传感器封装后的长、宽、高分别约为 6.5、1.5、1.0 cm，三棱柱背架的尺寸为 3 cm×3 cm×10 cm。为了减小对被测电场分布的影响，传感器的封装和三棱柱背架均采用介电常数较低的聚丙烯材料加工而成。如图 10(a)所示，使用保偏光纤、单模光纤和电缆，将 3 台可调谐激光器、三维电场探头、3 台光电探测器连接在一起，即可形成集成光波导三维电场测量系统。此系统可同时测量空间沿任意方向极化的电场的 3 个分量 E_x、E_y、E_z，经过简单计算便可得出空间任意电场的大小和方向。

使用直径 50 cm 的圆形平板电极形成平板电极系统，间距为 12.5 cm，在平板上施加不同电压，即可在平板电极的中心处形成均匀电场。将三维电场传感器置于下极板中心处，在两极板间施加雷击脉冲电压，放置在平行电极板中三维探头经电场调制后，将光信号通过光纤传输至光电探测器，光电探测器将光信号转换为电信号传输至示波器。雷击脉冲发生器可产生峰值电压为 1~10 kV、脉冲上升时间为 1.2 μs、脉冲宽度为 50 μs 的雷击脉冲。平行电极板依据标准 GB/12 720-91 制作，极板间距 d 为 2~12.5 cm。图 10(a)为试验装置，图 10(b)为雷电冲击发生器输出波形和传感器电场敏感方向响应波形的比较，从图中可以看出，传感器具有良好的响应特性和波形复现性。



(a) 试验装置

(b) 传感器响应波形和施加电压波形

(c) 传感器的幅频特性

图 10 试验装置及测量波形

Fig.10 Test setting and measurement waveforms

图 10(c)为传感器频率特性试验结果，被测电场强度为 2 kV/m，交流电流的频率范围为 50 Hz~1 MHz，可见 50 Hz~1 MHz 频率范围内，传感器的输出幅度从 412 mV 增加至约 630 mV，这与偶极子天线的感应电压随频率升高而增加的规律基本一致。传感器的输出幅度在 1 MHz 附近略有下降(输出幅度从 630 mV 下降至 550 mV)，传感器幅频特性除了天线的幅频特性影响以外，还与铌酸锂材料固有的幅频特性相关。铌酸锂的介电常数在不同频率下会有小幅度波动[29]。此外，铌酸锂除了具有电光效应以外，还具有压电效应、弹光效应、热释电效应[30]，均会对传感器的幅频特性产生一定影响。但是，因波动幅度仅约为 1.2 dB，并不会影响传感器对雷击脉冲电场信号时域波形的测试。

3.2 三维电场探头标定

使用试验方法研究三维探头每个敏感方向的电场测量比例系数，将三维电场探头固定在平行电极板中间，并使其 x、y、z 方向分别与极板内的电场极化方向平行。使用雷电脉冲标准源输出电压作为被测电压，输出电压范围为 30 V~1.6 kV，平板电极距离为 20 mm，峰值不确定度为 0.5%，测量仪器为高精度数字示波器 MSO44，测量带宽为 350 MHz，采样频率为 6.25 GHz，垂直分辨率为 12 Bit。改变雷电脉冲标准源输出电压，给传感器施加不同强度的雷击脉冲电场。同时使用数字示波器记录不同电场强度下传感器的响应输出，结果如图 11 和图 12 所示。可见某一维测量方向与电场极化方向平行时，该维度的探头输出的脉冲信号响应幅度最大，其他两维测量方向与电场极化方向垂直，基本无输出信号，表明 3 个传感元件之间基本无极间耦合，具有良好的方向性。

图 12 为三维探头的响应与施加电场强度的标定曲线，可见传感器的响应幅值与被测电场强度的幅值之间近似线性关系。采用最小二乘法对图 12 中的试验数据进行线性拟合，得到的 x、y、z 向三维探头的响应输出与外加电场强度的线性拟合方程为：

$$\begin{cases} U_x = 133.5E_x + 43.98 \\ U_y = 273.4E_y + 109.0 \\ U_z = 210E_z + 213.8 \end{cases} \tag{9}$$

式中：E_x、E_y 和 E_z 单位为 kV/m；U_x、U_y 和 U_z 为三维传感系统对应各分量输出，mV。从式(9)还可以看出，x、y、z 向 3 个探头的电场测量灵敏度系数不同，分别为 133.5、273.4、210 μm。从式(5)和式(6)可以看出，集成光波导电场传感器的灵敏度与铌酸锂晶体的电光系数 γ_{33}、铌酸锂晶体上所刻蚀光波导两侧的电极的长度 L_{el}、电极间距 W_s 和天线的场增强因子 Γ 直接相关。改变这些参数可以调整

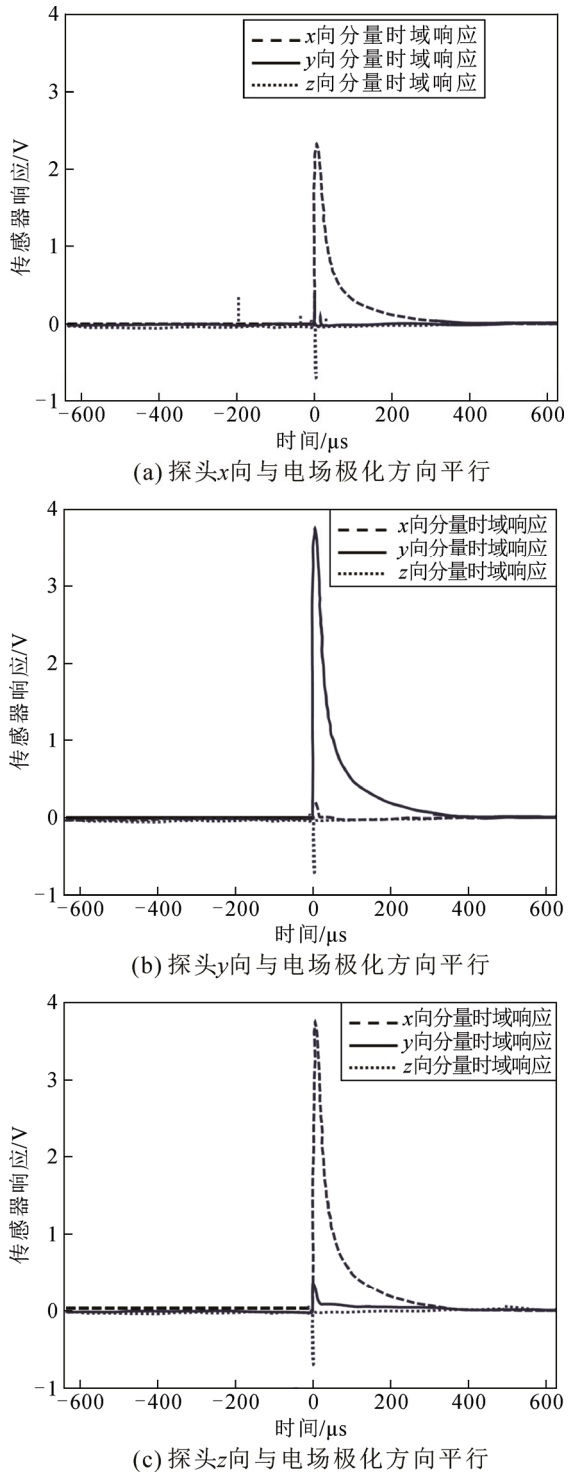


图 11 三维探头某一维测量方向与电场平行时的响应波形

Fig.11 Response waveform in a one-dimensional measurement direction parallel to the electric field

传感器的电场测量灵敏度。但是，由于波导和天线制备工艺的误差、铌酸锂晶圆的个体性能差异等因素影响，每个传感器的电场测量灵敏度均有不同，需要分别进行比例系数校准。

对灵敏度系数标定结果开展测量不确定度评定，式(10)为某一方向灵敏度系数计算式。

$$K=\frac{(V-A)d}{U} \tag{10}$$

式中：K 为灵敏度系数；V 为数字示波器测量的输出电压；A 为常数；d 为平板之间的距离；U 为雷电脉冲电压峰值。由于 V、d 和 U 不相关，灵敏度系数 K 的测量不确定度评定模型为：

$$u_{\mathrm{rel}}(K)=\sqrt{(\frac{d}{U})^2u_{\mathrm{rel}}^2(V)+(\frac{V-A}{U})^2u_{\mathrm{rel}}^2(d)+(\frac{V-A}{U^2})^2u_{\mathrm{rel}}^2(U)} \tag{11}$$

式中：$u_{\mathrm{rel}}(K)$为灵敏度系数的相对标准测量不确定度，$u_{\mathrm{rel}}(V)$=0.3%为输出电压的相对标准测量不确定度；$u_{\mathrm{rel}}(d)$=0.1%为平板电极距离的相对标准测量不确定度；$u_{\mathrm{rel}}(U)$=0.5%为雷电脉冲电压相对峰值测量不确定度。使用该方法评定 x 方向，6 kV/m 场强下灵敏度系数扩展不确定度为 0.29%，包含因子 k=2。因此测量不确定度主要来源包括数字示波器、雷电脉冲电压以及电极距离的测量准确度。同时，加工中应保证直角三棱柱背架的 3 个侧面互相垂直，3 个传感元件的电场敏感方向分别与三棱柱的 x、y、z 方向保持平行。

3.3 三维电场的合成

如图 13 所示，将三维探头任意放置在平行电极板中间，改变施加场强值，同时记录 3 个探头的输出，获得 U_x、U_y 和 U_z。然后，根据式(8)的标定结果反算出施加电场在 x、y、z 这 3 个方向上的场强分量 E_x、E_y 和 E_z。最后，根据式(7)合成电场强度 E，测量结果如表 2 所示。传感器的额定电场值为 50 kV/m，可见测量电场范围在额定值的 20%~120%范围内变化时，相对测量误差<3%。这些数据表明本文所设计的小型化三维电场测量探头可以实现空间任意方向电场强度的准确测量。

最后，值得一提的是，光学传感器会受到环境温度等因素影响，本文研制的集成光波导电场传感器也不例外。由于除了具有电光效应外，铌酸锂还具有热光效应和热膨胀效应，这会导致光电探头的输出的干涉光谱不仅与被测电场有关，还将随着环境温度的变化而改变，从而产生交叉敏感。针对该问题，论文作者设计了 1 套工作点反馈追踪系统，采用可调谐激光器扫描传感器输出的透射光谱，实时追踪传感器的工作点在不同环境温度下的变化，同时反馈控制激光器的输出波长，从而减小了温度漂移引起的测量误差。具体工作方式和实现效果可以参见作者前期发表的其他论文[22]。

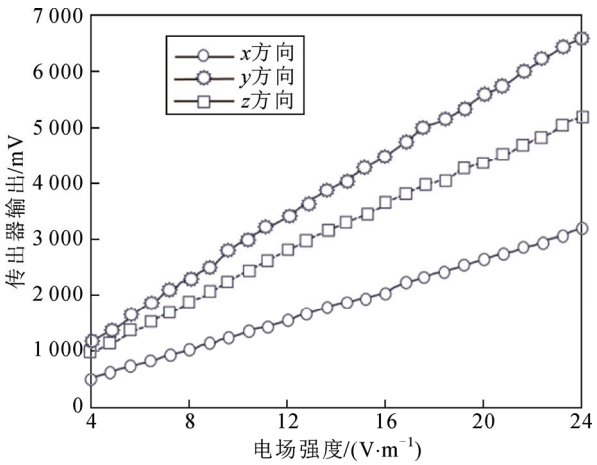


图 12 三维电场探头的标定曲线

Fig.12 Calibration curve of the 3D electric field probe

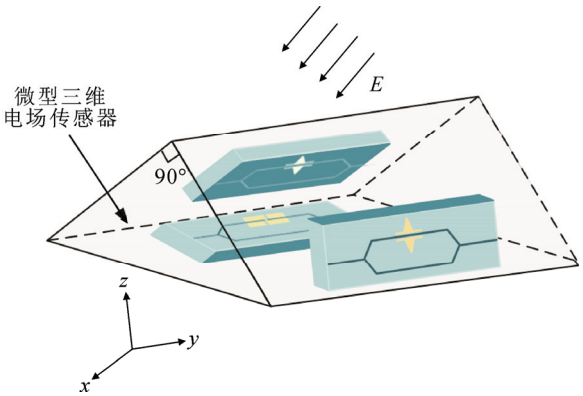


图 13 三维探头任意角度放置示意图

Fig.13 Schematic diagram of 3D probe tilting placement

表 2 三维电场的合成数据

Table 1 Composite data of the 3D electric field

序号	E_x/(kV·m⁻¹)	E_y/(kV·m⁻¹)	E_z/(kV·m⁻¹)	E/(kV·m⁻¹)	E_N/(kV·m⁻¹)	误差/%
1	3.83	6.92	3.08	8.48	8.8	–3.6
2	4.75	8.86	4.31	10.93	11.2	–2.3
3	5.59	10.61	5.36	13.14	13.6	–3.4
4	6.50	12.59	6.31	15.51	16.0	–3.0
5	7.52	14.49	7.27	17.87	18.4	–2.9
6	7.97	15.77	8.03	19.40	20.0	–2.9
7	12.07	23.89	12.16	29.40	30.0	–2.0
8	16.13	31.91	16.25	39.27	40.0	–1.8
9	20.17	39.92	20.32	49.13	50.0	–1.7
10	24.31	47.99	24.46	59.10	60.0	–1.5

4 结论

1）研制小型化三维电场测量探头，建立了 1 套集成光波导三维电场测量系统。通过雷击脉冲试验，验证了探头的综合性能。试验结果表明，当平板电极间施加某一特性时间参数的雷击脉冲信号，传感装置输出电压波形表现出良好的雷电脉冲电压的波形复现性。且三维探头之间基本无极间耦合，具有良好的方向性，搭建校准平台对传感器不同方向上的灵敏度系数进行标定，测量不确定为 0.29%。

2）当被测脉冲电场强度在额定值的 20%~120%范围内，三维合成电场测量相对误差在 3%以内，这表明所研制的三维电场探头可以实现空间任意方向电场强度的准确测量。

参考文献 References

[1] 王兰若，李 荡，张树华，等. 基于隧穿磁阻效应的随器量测电流传感器研究[J]. 电力信息与通信技术，2022，20(1)：100-106.
WANG Lanruo, LI Dang, ZHANG Shuhua, et al. Research on current sensor for in-device measurement based on tunnelling magnetoresistance effect[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(1): 100-106.

[2] 龙兆芝，李文婷，周 峰，等. 基于高压标准电容器的 1 200 kV 宽频电容分压装置[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1826-1835.
LONG Zhaozhi, LI Wenting, ZHOU Feng, et al. Device of 1 200 kV wideband capacitive divider based on high-voltage standard capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1826-1835.

[3] 苏少春，谢施君，丁卫东，等. VFTO 传感器校准用 2 kV 亚纳秒级上升沿方波发生装置研制[J]. 高电压技术，2020，46(8)：2976-2983.
SU Shaochun, XIE Shijun, DING Weidong, et al. Development of 2 kV square wave source with sub-nanosecond rise time using for the calibration of VFTO sensors[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2976-2983.

[4] 刘开培，李登云，朱 凯，等. 基于 2/1 自校准法的 1 kV 直流电压比例标准量值溯源[J]. 高电压技术，2022，48(6)：2226-2233.
LIU Kaipei, LI Dengyun, ZHU Kai, et al. Traceability of 1 kV DC voltage ratio based on 2/1 self-calibration method[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2226-2233.

[5] 谢施君，穆 舟，丁卫东，等. 纳秒级上升沿 100 kV 方波发生装置研制[J]. 高电压技术，2021，47(6)：2169-2176.
XIE Shijun, MU Zhou, DING Weidong, et al. Development of the 100 kV square wave generator with nanosecond rise time[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2169-2176.

[6] 龙兆芝，李文婷，刘少波，等. 特高压冲击电压分压器线性度测量方法比较[J]. 电测与仪表，2019，56(15)：119-126.
LONG Zhaozhi, LI Wenting, LIU Shaobo, et al. Comparison of linearity measurement methods of UHV impulse voltage divider[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(15): 119-126.

[7] 王绍飞，谢彦召，葛晓宇. 基于冲击脉冲辐射天线的高功率超宽带电磁脉冲辐射系统[J]. 高电压技术，2023，49(1)：411-417.
WANG Shaofei, XIE Yanzhao, GE Xiaoyu. High-power ultra-wideband electromagnetic pulse radiation system based on the impulse radiating antenna[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 411-417.

[8] 王 霞，樊卓杨，吴 超，等. 外置光纤光栅传感器测量电缆附件界面压力的方法研究[J]. 高电压技术，2022，48(1)：38-46.
WANG Xia, FAN Zhuoyang, WU Chao, et al. External fiber grating sensor used for measurement of interface pressure between cable and accessory[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 38-46.

[9] 熊 博，刘 俭，殷小东，等. 10~110 kV 高电压比例标准装置的 0.5×10^{-6} 误差自动精密测量方法[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3232-3239.
XIONG Bo, LIU Jian, YIN Xiaodong, et al. Automatic precision measurement method of 0.5×10^{-6} error for 10~110 kV high voltage ratio standard device[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3232-3239.

[10] 欧阳宏志，姚学玲，陈景亮. 同时测量脉冲电场和磁场的微型探头[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4383-4390.
OUYANG Hongzhi, YAO Xueling, CHEN Jingliang. Miniature probe for simultaneously measuring pulsed electromagnetic fields[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4383-4390.

[11] 熊久良，李跃波，刘 锋，等. 低频宽脉冲电场模拟器研制与性能测试[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4410-4419.
XIONG Jiuliang, LI Yuebo, LIU Feng, et al. Development and performance measurement of low-frequency wide-pulse electric field simulator[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4410-4419.

[12] 谢施君，张晨萌，丁卫东，等. 亚纳秒级同轴电阻分压器研制及其不确定度评定[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4391-4399.
XIE Shijun, ZHANG Chenmeng, DING Weidong, et al. Development and uncertainty evaluation of sub-nanosecond coaxial resistive divider[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4391-4399.

[13] 崔帅威，彭文鑫，李松浓，等. 基于里德堡原子的工频电场测量[J]. 高电压技术，2023，49(2)：644-650.
CUI Shuaiwei, PENG Wenxin, LI Songnong, et al. Power frequency electric field measurement based on Rydberg atoms[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 644-650.

[14] LONG Z Z, LIU S B, LI W T, et al. Design and performance of a wideband precision capacitive divider for AC and impulse voltage measurement[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(11): 115007.

[15] 龙兆芝，李文婷，刘少波，等. 基于标准电容器的工频、冲击两用型分压器的研制[J]. 高电压技术，2018，44(6)：1836-1843.
LONG Zhaozhi, LI Wenting, LIU Shaobo, et al. Development of power-frequency and impulse-voltage Voltage divider based on standard capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1836-1843.

[16] 李文婷，龙兆芝，刘少波，等. 基于无线传输的球形空间瞬态电场测量仪研制[J]. 中国测试，2019，45(4)：85-91.
LI Wenting, LONG Zhaozhi, LIU Shaobo, et al. Development of a spherical space transient electric field measuring instrument based on wireless transmission[J]. China Measurement & Test, 2019, 45(4): 85-91.

[17] 齐 路，张国钢，刘竞存，等. 电磁脉冲 D-dot 电场传感器的设计与优化[J]. 高压电器，2018，54(7)：237-241，247.
QI Lu, ZHANG Guogang, LIU Jingcun, et al. Design and optimization of D-dot E-field sensor for electromagnetic pulse detection[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 237-241, 247.

[18] 耿嘉一，辛 振，石亚飞，等. 用于 SiC MOSFET 开关电压测量的非接触式电场耦合电压传感器[J]. 中国电机工程学报，2022，

43(8)：3154-3164.
GENG Jiayi, XIN Zhen, SHI Yafei, et al. Non-contact electric field coupled voltage sensor for switching voltage measurement of SiC MOSFET[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 43(8): 3154-3164.

[19] LONG Z Z, ZHOU F, LIN F C, et al. Development of a wideband precision electric field measuring sensor[J]. Sensors, 2023, 23(23): 9409.

[20] 欧阳希，陈明浩，周 淙，等. 一种新型全绝缘光纤温度–磁场双参数传感器[J]. 中国电机工程学报，2022，43(20)：8114-8123.
OUYANG Xi, CHEN Minghao, ZHOU Quan, et al. A novel all-dielectric optical fiber temperature-magnetic field dual-parameter sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 43(20): 8114-8123.

[21] LI X L, ZHAO X Q, WANG D 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.

[22] LI X L, HAI X R, YAO G L, et al. Temperature-insensitive integrated optical electric field sensor based on asymmetric Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(7): 6963-6968.

[23] 谢施君，汪 海，曾 嵘，等. 基于集成光学电场传感器的过电压测量技术[J]. 高电压技术，2016，42(9)：2929-2935.
XIE Shijun, WANG Hai, ZENG Rong, et al. Overvoltage measurement technique Based on integrated optical electric field sensor[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2929-2935.

[24] 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，2006，32(7)：1-5.
ZENG Rong, CHEN Weiyuan, 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.

[25] 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.

[26] 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.

[27] 严雪飞，朱长青. 三维脉冲电场传感器的建模仿真与设计[J]. 高电压技术，2018，44(1)：275-281.
YAN Xuefei, ZHU Changqing. Simulation and design of three-dimensional pulsed electric field sensor[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 275-281.

[28] 徐远哲，高 成，李炎新，等. 平行板型三维脉冲电场传感器的研制[J]. 高电压技术，2008，34(3)：471-475.
XU Yuanzhe, GAO Cheng, LI Yanxin, et al. Development of three-dimensional wideband sensor for pulsed electric field measurement[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 471-475.

[29] WEIS R S, GAYLORD T K. Lithium niobate: summary of physical properties and crystal structure[J]. Applied Physics A, 1985, 37(4): 191-203.

[30] ZHOU T Y, FANG W X, LU G G, et al. Temperature response of a fiber end-face integrated lithium niobate crystal probe based on pyroelectric and thermo-optic effects via polarization state modulation[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 161: 109206.



LONG Zhaozhi
Professor
Corresponding author

龙兆芝(通信作者)
1984—，女，硕士，教授级高工
主要从事冲击电压、冲击电流溯源技术、高电压大电流计量技术，宽频电信号传感技术方面的研究
E-mail: longzhaozhi@qq.com



LI Wenting
Senior engineer

李文婷
1987—，女，硕士，高工
主要从事冲击电压/电流测量技术研究、宽频电信号传感技术方面的研究
E-mail: liwenting@epri.sgcc.com.cn



YAO Gaolong

姚高龙
1999—，男，硕士生
主要从事电场测量等方面的研究
E-mail: 1748749791@qq.com



XI Yongzhen

习永臻
2000—，男，硕士生
主要从事电场测量等方面的研究
E-mail: xiyongzhen0804@163.com



LI Xianli
Ph.D.
Associate professor

李仙丽
1985—，女，博士，副教授
主要从事光学检测、电磁测量等方面的研究
E-mail: lxlli@xidian.edu.cn



LIN Fuchang
Ph.D., Professor

林福昌
1969—，男，博士，教授
主要从事高电压测量技术、脉冲功率技术研究
E-mail: fclin@hust.edu.cn

收稿日期 2023-11-15 修回日期 2024-06-24 编辑 曾文君