

Design of Miniature Integrated Optical Waveguide Electric Field Sensor*

WANG Xin^{1,2}, ZHANG Jiahong^{1,2*}, CHEN Fushen³, LIU Bin³

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650500, China;
2. Yunnan Key Laboratory of Computer Technology Application, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650500, China;
3. Beijing Safety Test Technology Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: To solve the problem that the current existing measurement method cannot detect the time domain waveform of pulsed electric field correctly, based on the electro-optic effect of Lithium Niobate crystal, an integrated optical waveguide electric field sensor incorporated with a tapered antenna has been designed. By using the annealing proton exchange technology and the sputtering technology, the size of this sensor is only 70 mm×15 mm×15 mm. The frequency response and time domain dynamic characteristics of the sensor are tested. The experimental results show that the sensor bandwidth ranges from 100 kHz to 10 GHz, and the measurable electric field ranges from 6.67 kV/m to 133.33 kV/m. A linear fitting have been done, and the linear fitting correlation coefficient is 0.985 35. Comparing with the metallic direct induction electric field sensor and the electro-optic direct-modulation electric field sensor, the developed integrated optical waveguide electric field sensor has smaller dimension, no power supply, no metal interference, and wide bandwidth. It is more suitable for measuring the pulsed electric field in the time domain.

Key words: electric field sensor; crystal electro-optic effect; frequency response measurement; pulsed electric field measurement; frequency response; time domain characteristics

EEACC: 7230; 5100

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2021.11.005

微型集成光波导电场传感器的设计*

王欣^{1,2}, 张家洪^{1,2*}, 陈福深³, 刘斌³

(1. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南昆明 650500; 2. 昆明理工大学云南省计算机应用技术重点实验室, 云南昆明 650500; 3. 北京森馥科技股份有限公司, 北京 102209)

摘要: 针对现有测量手段对时域脉冲电场测量的不足, 利用铌酸锂晶体的电光效应, 设计了一种集成了光波导与锥形天线的新型电场传感器。采用退火质子交换技术与溅射法制备的集成光波导电场传感器体积为仅为 70 mm×15 mm×15 mm。对该传感器的频响特性与时域动态范围进行测试, 实验结果表明: 传感器带宽为 100 kHz 至 10 GHz, 可测量电场范围为 6.67 kV/m~133.33 kV/m, 线性拟合相关系数为 0.985 35。与直接感应式电场传感器与电光直调电场传感器相比, 集成光波导电场传感器体积更小, 无需供电, 无金属干扰, 带宽宽, 更适用于瞬态电场的测量。

关键词: 电场传感器; 晶体电光效应; 频响测试; 时域测试; 频率响应; 时域特性

中图分类号: TM935

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2021)11-1445-06

瞬态脉冲电磁场主要包括静电放电脉冲、高功率微波、核电磁脉冲、雷电以及大功率开关动作等产生的瞬态电磁场^[1]。在信息社会中, 瞬态脉冲电磁场在军事国防、电力输送、通信传输及航空航天等领域产生的影响不容忽视, 比如脉冲强电磁信号产生的瞬态脉冲电压可达数千伏甚至数万伏, 轻则导致电脑等精密电子仪器短暂失灵, 重则成为点火源、爆炸源造成重大事故, 仅在微电子领域, 由瞬态脉冲电磁场造成的损失每年多达上百亿美元^[2-4]。因此, 瞬态脉冲电磁场的测量

技术一直是国内外学者的研究重点。但脉冲电磁信号持续时间短、上升时间快、幅值变化极大、频谱范围极宽等时、频特征使测量极其困难, 而通过传感器将空间传播的脉冲电磁信号不失真地转换为便于后端处理的电压或电流信号是最简单有效的方法^[5]。

早在 1978 年, Baum C E 等人利用电小天线等效为一个与频率无关的电容, 并连接同轴线实现了对核电磁脉冲电场的无失真测量^[6]。这类直接感应式传感器中应用最广的就是渐进锥形偶极子 (Asymptotic

项目来源: 国家自然科学基金项目 (61765009); 云南省应用基础研究项目 (2018FB106)

收稿日期: 2021-06-21 修改日期: 2021-07-22

Conical Dipole, ACD) D-dot 电场传感器,但其输出与源信号呈微分关系,需要在后端串联积分器才可获得时域波形,且探头的金属结构与同轴电缆常会对空间电场产生较大的影响。为了进一步增强信号传输过程中的抗电磁干扰能力,Thomson 等人研制了一款基于电光集成技术的雷击瞬态电场传感器,将电信号转换为光信号再通过光纤传输^[7]。这类有源直接电光调制传感器集成度高、体积小、性价比高,但探头端需内置复杂的处理电路、电光转换电路与供电模块,极易在强脉冲电场下损毁。

区别于以上两种电场传感器,本文利用电光材料铌酸锂(LiNbO₃)晶体具有显著的电光效应与较大的电光系数等特性,设计了一种微型集成光波导电场传感器。该电场传感器的基本原理为,当偏振光进入铌酸锂晶体时,在外加电场的作用下,偏振光的相位会随着外加电场的大小而改变,这样就实现了电场信息对光波的调制。这种集成光波导电场传感器不仅避免了金属结构与有源测量的缺点,也具备体积小、带宽宽等优点。

1 电场传感器的设计

1.1 传感器工作原理及波导结构设计

LiNbO₃ 晶体的电光系数 γ_{33} 最大,因此采用 x 切 y 传的铌酸锂晶体作为传感器的衬底调制效果最好^[8-9]。当施加沿 z 轴方向的空间电场 E_z 时,铌酸锂晶体折射率的变化可以表示为:

$$\Delta n = \frac{1}{2} n_{\text{eff}}^3 \gamma_{33} \Gamma E_z \quad (1)$$

式中: n_{eff} 表示晶体的有效折射率; γ_{33} 表示晶体电光系数; $\Gamma(<1)$ 表示电场和光场中的重叠因子。公式(1)表明,铌酸锂晶体折射率的改变量与空间电场的大小线性相关,这是集成光波导电场传感器工作的基础。

如图 1 所示,集成光波导电场传感器本质上是一个非对称马赫曾德尔干涉仪(Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer, AMZI)。当光从 AMZI 入射端入射时,被 Y 型分支分为等强度的两束光,接收天线会在空间电场 $E(t)$ 的作用下产生感应电压从而对下波导臂中的光进行相位调制,使其在出射端与通过上

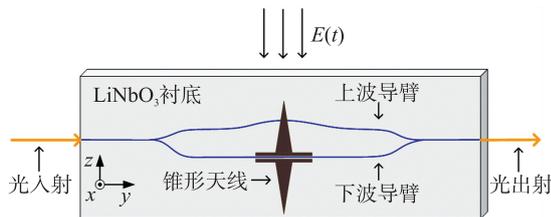


图 1 集成光波导电场传感器结构图

波导臂中的光形成一定的相位差 $\Delta\varphi$ ^[8]为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L_{el} = \frac{\pi n_{\text{eff}}^3 \gamma_{33} \Gamma L_{el} H_{an} E(t)}{\lambda G_{el}} \quad (2)$$

式中: λ 为入射光的波长, L_{el} 为屏蔽电极的长度, H_{an} 是天线高度, G_{el} 是电极间距, $E(t)$ 是沿电极方向的入射电场。当 $\Delta\varphi = \pi$ 时,可以得到半波电场 E_π 为:

$$E_\pi = \frac{\lambda G_{el}}{n_{\text{eff}}^3 \gamma_{33} \Gamma L_{el} H_{an}} \quad (3)$$

由集成光波导电场传感器的工作原理可知,出射光功率 P_{out} 与入射光功率 P_{in} 的关系^[10]为:

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{2} \alpha P_{\text{in}} \left\{ 1 + \beta \cos \left[\frac{\pi E(t)}{E_\pi} + \varphi_0 \right] \right\} \quad (4)$$

式中: α 是传感器的衰减系数, β 是消光系数, φ_0 是传感器的相位偏置,取决于光波导结构($\varphi_0 = 2\pi n_{\text{eff}} \times \Delta L / \lambda$, ΔL 是 AMZI 两臂的长度差)。分析式(4),可知当两波导臂相位偏置 $\varphi_0 = \pi/2$,且半波电场 E_π 足够大使 $\pi E(t)/E_\pi \ll 1$ 时,可将其简化为:

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{2} \alpha P_{\text{in}} \left\{ 1 - \beta \sin \left[\frac{\pi E(t)}{E_\pi} \right] \right\} \quad (5)$$

再利用泰勒展开式($\sin x \approx x$)一阶展开得:

$$P_{\text{out}} \approx \frac{1}{2} \alpha P_{\text{in}} \left[1 - \beta \frac{\pi E(t)}{E_\pi} \right] \propto E(t) \quad (6)$$

此时,传感器的输出光功率与空间电场成正比,使用光电探测器(Photodetector, PD)将传感器输出的光信号还原成电信号便可获得空间电场的信息。相对偏置 $\varphi_0 = \pi/2$ 为传感器的最佳工作点。因此,通过光波导结构与电极结构的合理设计来控制相对偏置 φ_0 与半波电场 E_π 的大小,是使电场传感器工作在线性区的关键^[10]。

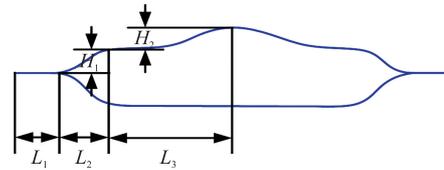


图 2 AMZI 型传感器光波导结构

将输入直波导 L_1 设置为 5 mm 可以确保光波处在稳定的工作模式。上下波导臂夹角 θ 过大将导致光耦合的低效与光功率的高损耗,因此要确保 $L_2/H_1 > 10\,000$,将 L_2 设置为 14 mm, H_1 设置为 12.5 μm 。若想实现在 C 波段通过控制光波长 λ 的值找到最佳工作点,需设置波导两臂长度差 ΔL 为 33 μm ^[11]。由于 S 型弯曲波导长度 S_{Length} 可表示为:

$$S_{\text{Length}} = \int_0^{L_3} \sqrt{1 + \frac{\pi^2 H_2^2}{4L_3^2} \sin^2 \left(\frac{\pi x}{L_3} \right)} dx \quad (7)$$

并且 $\Delta L = 2(S_{\text{Length}} - L_3)$,得到 AMZI 光波导的结

构参数如表 1 所示, 此时波导弯曲长度为 15 mm, C 波段的光波在弯曲波导中产生的损耗接近 0 dB, 可以忽略。

表 1 AMZI 光波导结构参数设置

L_1/mm	L_2/mm	L_3/mm	$H_1/\mu\text{m}$	$H_2/\mu\text{m}$
5	14	15	12.5	635

1.2 天线结构设计

集成光波导电场传感器利用波导臂两侧的天线来接收空间电场并对通过波导臂中的光进行相位调制。现有研究结果证明接收天线不但影响电光传感器的带宽, 更决定其灵敏度, 因此天线的结构设计是传感器设计的核心^[12]。本文采用的天线结构为图 3 所示的锥形天线, 这种锥形天线的阻抗从底端到尖端逐渐增大, 导致尖端的反射电流大大减小甚至消除, 避免了形成驻波, 有效提升了传感器的带宽与灵敏度。

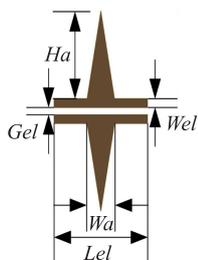


图 3 锥形天线结构图

为满足 $\pi E(t)/E_\pi \ll 1$, 需确保半波电场 E_π 足够大, 将锥形天线的高度 H_{an} 设置为 2 200 μm , 电极长度 L_{el} 设置为 5 000 μm , 电极间距 G_{el} 设置为 60 μm , 锥形天线底端宽度 W_{an} 设置为 100 μm , 电极的宽度 W_{el} 设置为 20 μm , 厚度 D_{el} 设置为 1 μm , 如表 2。电极会吸收部分光波损耗而对上下波导臂产生影响, 因此在制作传感器时在波导平面与天线平面间涂覆一层 500 nm 厚度的 SiO_2 缓冲层减少影响。将 $n_{\text{eff}} = 2.138$, $\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}$, $\Gamma = 0.07$, C 波段中心波长 $\lambda = 1 550 \text{ nm}$ 代入式(3), 得到半波电场 $E_\pi \approx 401 \text{ kV/m}$ 。这时, 传感器最大可测电场为 $E_{\text{max}} \approx 0.32E_\pi \approx 128 \text{ kV/m}$, 理论上满足瞬态脉冲电磁场的测量需求。

表 2 锥形天线结构参数设置 单位: μm

H_{an}	W_{an}	G_{el}	L_{el}	W_{el}	D_{el}
2 200	100	60	5 000	20	1

2 电场传感器的制备

首先, 使用甩胶机将光刻胶均匀涂抹在厚度为 1 mm 的 x 切 y 传 LiNbO_3 衬底上, 通过紫外曝光显影获得波导图案, 再通过退火质子交换技术形成宽

6 μm 深 3 μm 的非对称光波导^[13-14]。随后, 通过反应溅射法在 AMZI 下波导臂上涂覆一层 500 nm 厚度的 SiO_2 缓冲层, 最后在缓冲层上电镀 1 对厚度为 1 μm 的锥形金属电极, 电极上层电镀金属铬 (Cr), 下层电镀金属金 (Au), 其横截面如图 4 所示。

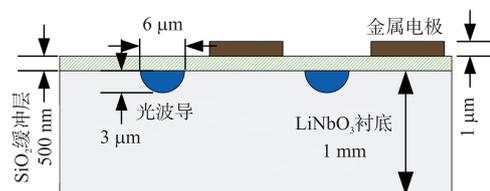


图 4 电场传感器横截面示意图

集成光波导电场传感器从实验室走向工程实用化的关键在于波导两端分别与保偏光纤 (Polarization Maintaining Fiber, PMF)、单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF) 高效耦合, 使用的保偏光纤为 1 550 nm 的熊猫型光纤, 其裸纤直径为 125 μm , 塑料外包层直径为 2.5 mm。现有研究表明^[15], 光纤与光波导模场失配、横向偏移、端面间隙、端面菲涅耳反射是影响光纤与光波导之间耦合的主要因素。其中, 可以利用光纤 V 型槽来控制横向偏移和端面间隙, 而对于菲涅耳反射来说, 可以使用折射率匹配液来减小。首先, 要保证光纤和波导间的模匹配, 调节好匹配液的浓度, 严格控制质子交换的时间、温度; 其次, 采用高精度的耦合设备、正确的耦合结构并使用刻有 V 型槽的硅片固化光纤^[16]。

如图 5 所示, 传感器两端均采用正装耦合。将刻有 V 型槽的硅片置于光纤底部支撑, 避免光纤的横向位移, 也消除 LiNbO_3 晶片和硅片由于热膨胀差异造成的位移。光波导与光纤耦合完成后, 为保证工程使用时的便利与避免环境中灰尘等微粒的干扰, 将其封装至大小为 70 mm \times 15 mm \times 15 mm 的陶瓷外封装盒中, 如图 6。使用光功率计对封装完成后的传感器输入、输出光功率进行测量, 得到其插入损耗为 13.7 dB。

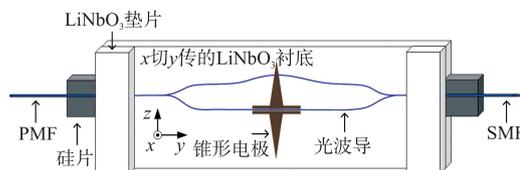


图 5 光波导与光纤的正装耦合



图 6 封装后的电场传感器

3 传感器的性能测试实验

3.1 频响特性测试

如图 7 所示,为了保证测试实验的准确性,在 $9\text{ m}\times 6\text{ m}\times 5\text{ m}$ 大小的微波暗室中进行集成光波导电场传感器的频响特性测试。实验前,将传感器置于微波暗室内,并分别使用 20 m 长度的 PMF/SMF 将传感器的输入端/输出端与屏蔽室中的可调谐激光源、 20 GHz 带宽光电探测器相连接。同时,光电探测器的输出端通过射频线连接至频谱仪中。实验所用的可调谐激光源内部通过起偏器输出慢轴对准的线偏振光,光源调谐范围覆盖 C 波段 ($1\ 525\text{ nm}\sim 1\ 565\text{ nm}$),使用偏偏光纤对光源输出的偏振光保持。

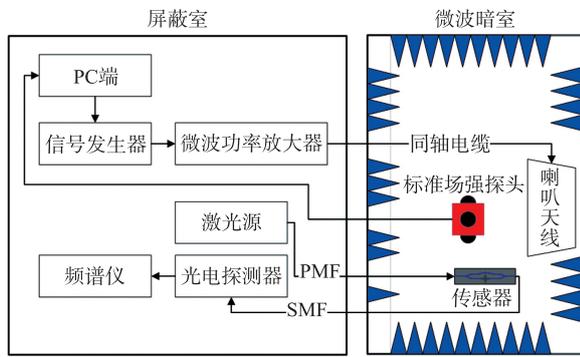


图 7 频响测试实验框图

实验时,通过调节激光器的输出波长并记录对应的传感器输出光功率,将波长 λ 设置为最大输出功率与最小输出功率的中点光功率对应的波长,便可使 φ_0 处在最佳工作点,输出光功率强度保持在 13 mW 。在屏蔽室内通过 PC 端控制信号发生器 (ROHDE&SCHWARZ ® SMA100B) 输出不同频率 ($100\text{ kHz}\sim 10\text{ GHz}$) 的源信号,该信号经过功率放大器 (RFLIGHT $10\text{ kHz}\sim 6\text{ GHz}$, RFLIGHT $6\text{ GHz}\sim 18\text{ GHz}$) 放大后再通过喇叭天线输出,注意根据源信号的频率及时更换对应带宽的喇叭天线。

不同频率的信号在微波暗室中的产生的电场强度应保持一致,在暗室内放置如图 8 所示的标准场强探头,该探头会将暗室内空间场强值传回 PC 端。根据标准场强探头的测量值及时调整源信号的输出幅值,直至空间电场强度维持在固定值 10 V/m 。

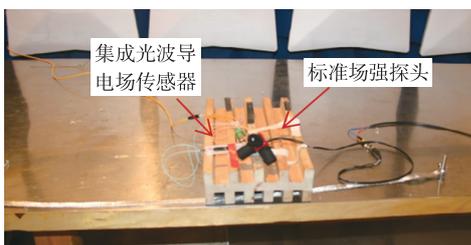


图 8 暗室内传感器与标准场强探头布置图

选择 20 GHz 光电探测器对传感器的输出进行光电转换,该 PD 的光谱范围为 $850\text{ nm}\sim 1650\text{ nm}$, 20 GHz 内带宽波动 $\pm 3\text{ dB}$,响应时间为 18 ps ,满足实验需求。PD 将调制后的光信号转换成电信号后输出至频谱仪 (ROHDE& SCHWARZ ® FSW43) 显示端,依次记录不同频率下源信号与传感器输出的对应值并绘制成频响特性曲线,如图 9。

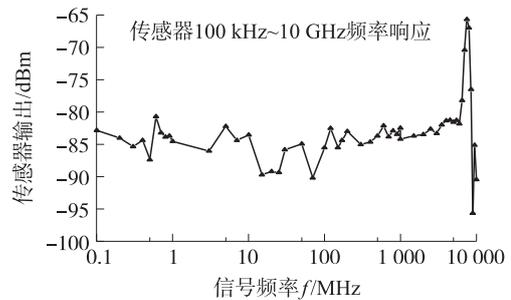


图 9 频响特性输出曲线

由图 9 可知,传感器在 100 kHz 至 8.5 GHz 频率范围内,波动小于 $\pm 5\text{ dB}$;在 8.5 至 10 GHz 范围内,波动小于 $\pm 15\text{ dB}$ 。由此证明,基于 LiNbO_3 制成的集成光波导电场传感器在 $100\text{ kHz}\sim 10\text{ GHz}$ 的超大带宽范围内频响特性良好,基本满足测量瞬态时域脉冲电场的大带宽需求。

3.2 时域动态范围测试

如图 10 所示,将集成光波导电场传感器竖直放置于横电磁波 (TEM Cell) 小室内进行时域动态范围测试实验。TEM 小室本质上是将同轴线外导体扩展为矩形箱体,内导体渐变为扁平芯板;当其终端接上匹配负载,始端经同轴电缆馈入激励功率时,TEM 小室内就建立起了横电磁波,可提供一个与外界相对隔离的电场测试环境^[17]。TEM 小室具有较好的场均匀性,且由于其内部空间小,可产生较高幅值的电场,适用于大场强的脉冲电场测试实验。



图 10 传感器在 TEM 小室布置图

实验系统搭建如图 11。使用同轴电缆将纳秒脉冲发生器的输出端与 TEM 小室的输入端相连,小室输出端先通过衰减器衰减后再接入示波器 (TEKTRONIX MSO54) 的一个通道,方便与测试信号对比。将传感器竖直放置在 TEM 小室中,输入端与输出端分别与可调谐激光源、光电探测器相连,PD 的

输出接入示波器的另一个通道。

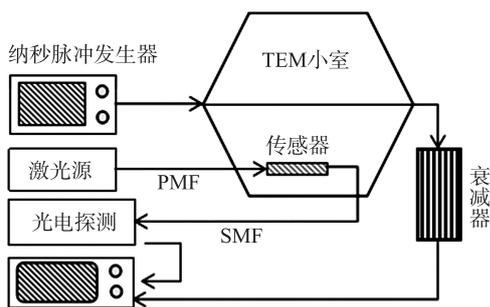


图 11 时域动态测量实验框图

实验使用的纳秒脉冲发生器可以产生上升沿 3 ns~5 ns, 持续时间 150 ns~200 ns, 峰值电压 200 V~4 000 V 的纳秒脉冲信号。由于使用的 TEM 小室 (ROHDE&SCHWARZ TEMZ5233) 内部两平行板的垂直距离仅为 3 cm, 利用 $E = V/d$ 计算出 TEM 小室内空间电场 E 范围为 6.67 kV/m~133.33 kV/m。示波器中将源信号所在的通道设置为上升沿触发信号, 便得到图 12 所示的两个时域波形。

图 12 中, 源信号与传感器输出信号在上升沿、下降沿、脉宽、平坦度等脉冲信号特征上具有极高的还原度, 仅存在 120 ns 左右的时间延迟, 这是测试信号在光纤中传输时产生的时延, 对测试结果无影响。选

取纳秒脉冲发生器输出峰值电压为 1 000 V 与 3 000 V 时, 即在 TEM 小室内空间电场 E 为 33.33 kV/m 与 100 kV/m 时源信号与输出信号进行比较。

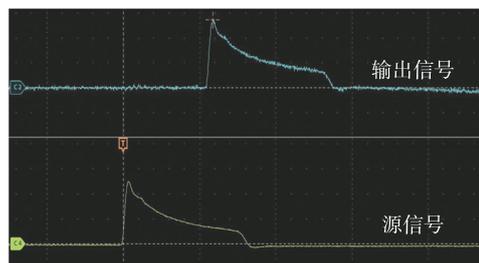


图 12 输出信号与源信号波形图

表 3 中的每个数据均是重复 5 次实验后再将检测数据平均计算后获得, 避免偶然误差。在 33 kV/m 的空间电场强度下, 源信号的上升沿, 下降沿与脉宽分别为 3.67 ns, 180.27 ns 与 73.36 ns, 传感器输出信号的上升沿, 下降沿与脉宽分别为 3.95 ns, 176.09 ns 与 71.94 ns, 两个信号间的相对误差分别为 7.63%, 2.31% 与 1.94%。在 100 kV/m 的空间电场强度下, 源信号的上升沿, 下降沿与脉宽分别为 3.73 ns, 194.54 ns 与 74.98 ns, 传感器输出信号的上升沿, 下降沿与脉宽分别为 3.50 ns, 187.35 ns 与 65.95 ns, 两个信号间的相对误差分别为 6.17%, 3.70% 与 12.04%。

表 3 33.33 kV/m 与 100 kV/m 电场下源信号与输出信号数据比较

空间电场 / (kV/m)	上升沿			下降沿			脉宽		
	源信号/ns	输出信号/ns	相对误差/%	源信号/ns	输出信号/ns	相对误差/%	源信号/ns	输出信号/ns	相对误差/%
33.33	3.67	3.95	7.63	180.27	176.09	2.31	73.36	71.94	1.94
100	3.73	3.50	6.17	194.54	187.35	3.70	74.98	65.95	12.04

依次记录纳秒脉冲发生器输出不同峰值电压时传感器输出信号的电压峰值, 将其绘制成图 13 所示的时域动态范围测试曲线。

图 13 表明, 本文设计的传感器在 6.67 kV/m~133.33 kV/m 的范围内有较好的线性相关度 0.985 35。虽然在空间电场强度大于 100 kV/m 时, 传感器输出有饱和的趋势, 但总体来看仍保持较好的线性度。在该空间电场强度范围内, 得到传感器的时域动态拟合曲线 $y = 0.788 51 x + 11.254$, 这对测量未知电场提供了新的测量方法。

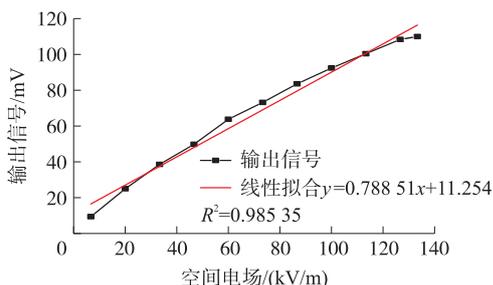


图 13 时域动态范围测试曲线

4 总结

鉴于测量超带宽时域脉冲电场的困难与 ACD D-dot 电场传感器, 电光直调电场传感器对空间电场影响较大的不足之处, 使用铌酸锂晶体设计了一种微型集成光波导电场传感器。该电场传感器具备体积小、带宽大、时域动态范围大、无源测量、超远距离测量等优势。通过频响特性测试与时域动态范围测试, 证明其满足测量超带宽脉冲电场所需要的超带宽、大动态范围等性能。集成光波导电场传感器在 100 kHz 至 8.5 GHz 频率范围内波动小于 ± 5 dB, 在 8.5 至 10 GHz 范围内波动不超过 ± 15 dB, 且在 6.67 kV/m~133.33 kV/m 的空间电场内, 传感器的输入与输出的线性拟合相关系数为 0.985 35。

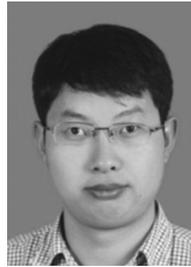
参考文献:

[1] 严雪飞, 朱长青, 王佳. 瞬态脉冲电场传感器研发现状与展望 [J]. 核电子学与探测技术, 2019, 39(3): 356-362.
 [2] Xiao D P, Ma Q C, Xie Y T, et al. A Power-Frequency Electric

- Field Sensor for Portable Measurement[J]. Sensors Journal, 2018, 18(4):1053-1066.
- [3] 徐晓英,管琼,刘尚合,等. 静电放电与电子设备电磁耦合关系的实验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2005(4):534-537.
- [4] Celio F B, Flávio E N. Lightning Protection of a Smart Grid Sensor [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 118:83-88.
- [5] 刘卫东,胡小锋. 瞬态电场时域测试技术的研究现状与展望 [J]. 高压电器, 2014, 50(7):132-138.
- [6] Carl E B, Edward L B, Joseph C G, et al. Sensors for Electromagnetic Pulse Measurements Both Inside and Away from Nuclear Source Regions[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1978, AP-41(1):22-35.
- [7] Ewen M T, Pedro J M, Martin A U. A Remote Sensor for the Three Components of Transient Electric Fields[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1988, 35(3):426-433.
- [8] 李佳文,张家洪,许晓平,等. 集成马赫曾德型光波导工频强电场传感器[J]. 光子学报, 2019, 48(9):48-55.
- [9] 张建鑫,张家洪,陈福深. 集成光波导直流电场传感器设计与实现[J]. 光子学报, 2021, 50(5):67-75.
- [10] 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.
- [11] 李佳文,张家洪,许晓平,等. 基于波长控制的 LiNbO₃ 晶体强电场传感器[J]. 光学技术, 2019, 45(4):447-452.
- [12] 徐福华,丁凤建,陈玲,等. 高精度纳秒强电磁脉冲集成光学电场传感器性能分析[J]. 半导体光电, 2019, 40(6):793-795.
- [13] 牛犇,曾嵘,李欢,等. 无电极型工频电场传感器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2008(31):101-107.
- [14] 高琴,乔石珺,帅垚,等. 单晶铌酸锂薄膜光波导的制备研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(1):44-49.
- [15] 冯洁. 平面光波导与光纤的低损耗耦合[J]. 信息通信, 2016(8):37-38.
- [16] 于秋驰,刘志巍,段凯,等. 高稳定度光纤耦合半导体激光器恒流源电路设计[J]. 激光与红外, 2021, 51(3):321-327.
- [17] 曾嵘,沈晓丽,陈未远. 横电磁波小室校准系统产生标准电场的不确定度评定[J]. 高电压技术, 2012, 38(11):2781-2788.



王 欣(1994—),男,江苏徐州人,硕士,昆明理工大学研究生,研究方向为光学电场传感器和测量技术,xiangyuanzai@163.com;



张家洪(1986—),男,云南曲靖人,博士,副教授,硕士生导师。主要从事集成光波导电磁场传感器及应用;微波光子技术及应用;光纤传感检测技术;嵌入式系统开发与应用等方面的研究工作,zjh_mit@163.com。