



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Smart Grid and Energy Internet—Article

静电力驱动的悬臂梁微型电场传感器器件

韩志飞^a, 胡军^a, 李立涅^b, 何金良^{a,*}

^a State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^b China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 October 2021

Revised 22 May 2022

Accepted 20 June 2022

Available online 6 August 2022

关键词

微型传感器
电气传感器器件
微加工工艺
压阻器件

摘要

随着智能电网和能源互联网的发展,大规模实时电压/电场监测成为电力系统的迫切需求,这依赖于先进传感器的大规模布置。电场测量在电力系统中具有重要意义。一方面,基于电场测量的电压反演可以实现高电压的非接触式测量,替代传统高压互感器,从而减少测量设备绝缘成本和安装难度;另一方面,电场测量还可以被应用于设备故障诊断、雷电预警、电磁环境测量等应用场景。传统的电场测量设备,如场磨等,往往体积大、成本高,无法大规模灵活布置。本文提出了一种静电力驱动的压阻式微型电场传感器。传感器被设计为四悬臂结构,悬臂在静电力的驱动下产生位移和应变,通过压阻材料转化为可测信号。所提出的传感器具有尺寸小、成本低、功耗低、易于批量生产的优点。同时,该传感器还具有高信噪比、高分辨率及宽电场测量范围的特点。实验结果表明,所提出的传感器具有 $1.1\sim 1100.0\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 的线性测量范围、 $112\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 的交流电场分辨率以及 496 Hz 的截止频率。这一微型电场传感器将在智能电网及能源互联网中具有广泛的应用价值。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

数字化是实现智能电网及能源互联网的关键技术,基于先进传感技术的电网及设备全景实时运行状态感知与分析是电网数字化的核心[1–3]。通过电力系统电压和电流数据的广域实时采集,可以优化电力系统控制策略,实现电力系统及电气设备的状态监测与故障诊断[4]。高电压传统上通过电压互感器进行测量,但这类测定设备体积大、测量范围窄。同时,接触式测量的特点使得电压互感器绝缘成本高,维护困难。随着传感节点数量需求的增加,这类大体积、高成本的测量设备已无法满足电网数字化的需求。

根据积分算法,通过对高电压周围电场进行测量,可以对待测电压进行反演[5–6]。因此,利用电场传感器可以实现高电压非接触式测量,从而降低测量成本,增加测量灵活性[7–8]。除了用于电压测量外,电场传感器还可以用于电气设备故障监测[9–11]。变压器、绝缘子等电气设备发生绝缘失效、局部放电等故障时,设备内部电场分布会发生变化。通过在设备内部布置微型电场传感器,提取电场信号特征,可以对此类故障进行在线监测和诊断。

除了上述应用场景,电场传感器在电力系统的其他领域也有广泛应用,如图1[12]所示。例如,可穿戴式的电场传感器可以用于电力工人的近电预警[13]。电场传感器

* Corresponding author.

E-mail address: hejl@tsinghua.edu.cn (J. He).

可以应用于大气电场监测,从而进行雷电预警、气象监测和航天发射窗口监测[14–17]。静电场的测量还可以用于石油化工等领域,作为安全监测手段。此外,近些年电场传感器也被用于电动汽车和全电飞机的座舱监测[18]。随着应用场景的扩展,电场传感器需要具备高分辨率和宽电场测量范围,同时需要具有低功耗、小尺寸、低成本等特点。

目前,空间电场测量存在诸多挑战。一方面,传感器中的高介电常数部分会导致空间电场畸变,影响测量精度;另一方面,复杂的电磁测量环境往往会带来高耦合干扰。在电力系统中,电场的测量幅值可达 $MV \cdot m^{-1}$ 量级,测量频率范围从直流到kHz量级。同时,为了满足电网中大部分应用场景的需求,电场测量分辨率需要在 $200 V \cdot m^{-1}$ 以内。场磨是传统的电场测量设备,但由于体积大、精度低,这种设备已无法满足需求。微型传感器是一种低成本、高性能的小尺寸传感器,可以通过微加工技术实现批量生产。现有微型电场传感器的主要原理包括光电效应、电荷感应、逆压电效应等。光学电场传感器基于电场下电光晶体折射率的变化实现电场测量[19–23]。光学电场传感器具有较高的电场分辨率以及极宽的测量带宽。这类传感器目前已被应用于变电站母线等关键节点的电场测量中。尽管这类传感器测量部分尺寸较小,但由于传感器需要通过光纤连接到光源和接收器,因此整体传感系统成本高、尺寸大、结构复杂,无法进行灵活和大规模布置。

利用电场中导体产生的变化的感应电荷也可以实现电场测量[24–27]。基于电荷感应的微机电系统(MEMS)电场传感器由振动的屏蔽电极、用于感应电荷的固定电极和后端电路组成。这类传感器具有尺寸小、成本低的优

点。然而,这种传感器往往会引入高噪声干扰。而且,由于感应区域面积的限制,这种传感器的分辨率很难得到提升。基于逆压电效应的微型电场传感器通过测量电场下压电材料的形变来测量电场[28–31]。这种电场传感器体积小、易于集成。但压电材料的微加工技术和传感器的性能限制了此类传感器的应用。

本文提出了一种静电力驱动的压阻式微型电场传感器。传感器采用四悬臂结构,在悬臂末端布置金属薄膜。在静电力的驱动下,悬臂发生弯折,从而导致悬臂根部的压阻材料电阻发生变化。通过测量由压阻材料构成的惠斯通电桥电路的输出信号即可实现电场的测量。与光学电场传感器相比,本文提出的电场传感器具有 $8 mm \times 8 mm$ 的小尺寸,并且可以基于硅基微加工工艺实现低成本大批量生产。与基于电荷感应的MEMS电场传感器相比,所提出的电场传感器不需要额外的屏蔽电极驱动源。同时,由于该传感器的响应频率是电场频率的两倍,因此可以有效降低电场传感器的耦合干扰。此外,由于电网中的谐波主要为奇次谐波,二倍频输出特性使传感器在电力系统中有广泛应用。根据实验结果,本文提出的电场传感器截止频率可以达到496 Hz,可测电场范围为 $1.1 \sim 1100.0 kV \cdot m^{-1}$,交流电场分辨率为 $112 V \cdot m^{-1} \cdot Hz^{-1/2}$ 。该电场传感器能够满足智能电网和能源互联网的大多数电场测量应用需求。

2. 原理与结构设计

金属薄膜置于电场中时,薄膜内部自由电荷在电场力的作用下重新分布,在金属薄膜两表面产生等量的异性电

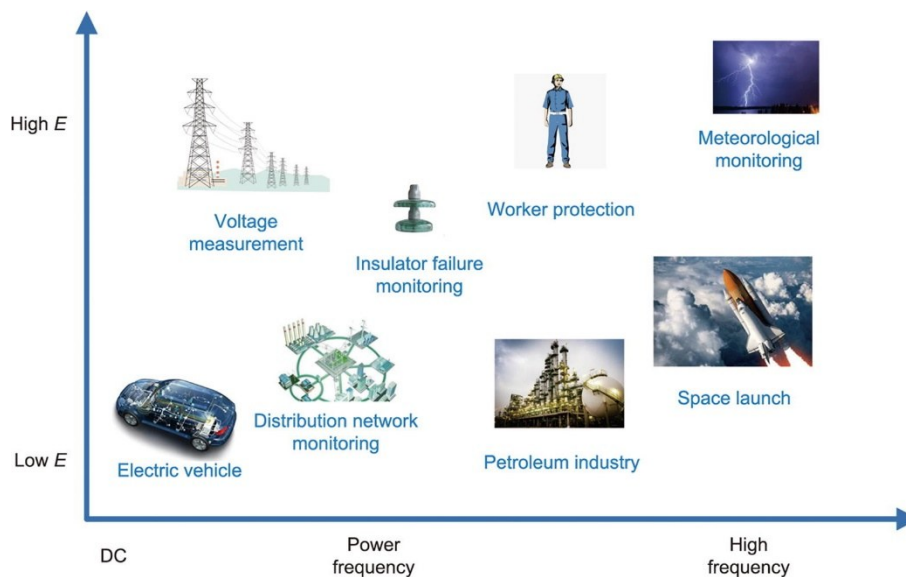


图1. 微型电场传感器应用场景。

荷，如图2（a）所示。在外电场中，薄膜所受合外力为零。若将金属薄膜一端电荷导至远端，则金属薄膜由于电荷不平衡，在电场中受到不为零的静电力作用。当在硅悬臂的自由端布置金属薄膜时，悬臂在金属薄膜静电力的驱动下发生弯折，如图2（b）所示。金属薄膜所受静电力 F_{es} 为：

$$F_{es} = \frac{1}{2} \varepsilon A E^2 \quad (1)$$

式中， A 为金属薄膜面积； E 为薄膜法向电场强度； ε 为空气介电常数。

传感器结构如图3所示。传感器设计为四悬臂结构，4条悬臂对称分布。悬臂的一端固定在衬底硅柱上，另一端能够自由振动。在悬臂自由端制备金属薄膜。在电场驱动下，4条悬臂以相同幅值振动，如图3（a）所示。振动的悬臂在内部产生应力。在悬臂固定端，通过离子掺杂制备4个弯折的压阻区域。压阻区域通过金属连接构成惠斯通电桥电路，如图3（b）所示。

当悬臂应变变化时，掺杂区域能带发生变化，能谷能量移动。掺杂硅的应力满足：

$$\sigma_1 = \sigma_l / \nu \quad (2)$$

式中， σ_1 是悬臂沿长度方向的轴向应变； σ_l 是悬臂垂直于长度方向的横向应变； ν 是掺杂硅的泊松比。

在硅应力作用下，4个压阻区域的电阻发生变化。其

中，压阻区域 R_1 和 R_3 设计为弯折状，主要耦合轴向应变。 R_2 和 R_4 设计为长条状，主要耦合横向应变。这种设计使得相邻压阻区域的电阻变化是相反的。同时，压阻区域的初始电阻设计为相同，以减少零点漂移。设置压阻区域初始电阻为 R_0 ，压阻区域 R_1 和 R_3 的电阻变化为 ΔR_a ，压阻区域 R_2 和 R_4 的电阻变化为 ΔR_b ，则

$$\begin{cases} \frac{\Delta R_a}{R_0} = P(N, T) \sigma_l (\pi_l + \nu \pi_t) \\ \frac{\Delta R_b}{R_0} = P(N, T) \sigma_l (\nu \pi_t + \pi_l) \end{cases} \quad (3)$$

式中， π_t 和 π_l 为掺杂硅的轴向和横向压阻系数。在本文设计的传感器中，轴向和横向压阻系数分别为+71.3和-66.7。 $P(N, T)$ 是与掺杂密度 N 和温度 T 有关的系数。

当在惠斯通电桥 $U_s(+)$ 和 $U_s(-)$ 端口施加恒压源 U_s 时，根据基尔霍夫定律，惠斯通电桥的输出电压 U_o 为：

$$U_o = \frac{P(N, T) \sigma_l (\pi_l - \pi_t) (1 - \nu)}{2 + P(N, T) \sigma_l (\pi_l + \pi_t) (1 + \nu)} U_s \quad (4)$$

根据公式（4），在相同掺杂条件下，应当选择应变最大的位置作为掺杂区域，以提升传感器响应。

为了验证所提出的电场传感器的工作原理，文章基于Comsol Multiphysics使用有限元方法仿真传感器在不同电场和参数下的响应情况。为简化模型，忽略传感器四周固定区域，只保留传感器中央固定硅柱和4个悬臂。仿真使

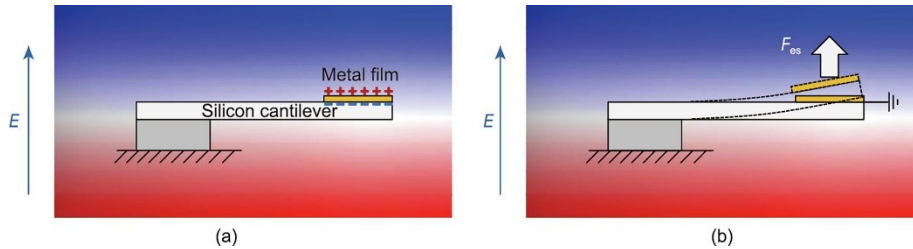


图2. 带金属薄膜的硅悬臂在电场中的响应。(a) 金属薄膜的感应电荷；(b) 接地金属薄膜受力情况和硅悬臂位移。

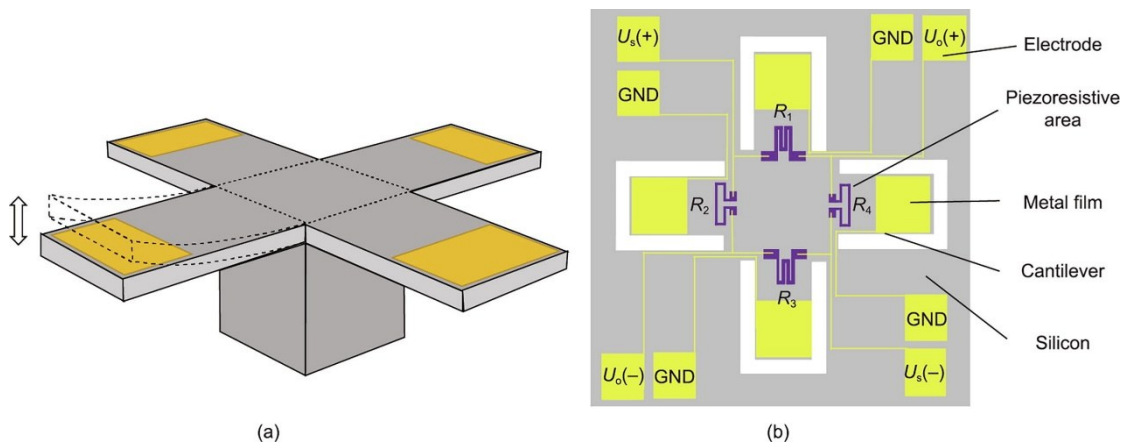


图3. 电场传感器结构。(a) 电场传感器结构示意图；(b) 电场传感器结构及电路俯视图。GND: 接地； $R_1 \sim R_4$: 压阻区域； U_s : 恒压源； U_o : 输出电压。

用了静电力和固体力学物理场以及机电力多物理场。悬臂边界条件设置为自由，其余部分设置为固定。图4为沿 z 轴方向施加 $1\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$ 电场时传感器的响应情况。

图4 (a) 和 (b) 为悬臂位移的分布情况。在静电力作用下，悬臂末端金属薄膜带动悬臂向上弯折。4个悬臂位移相等。需要注意的是，无论电场方向是沿 z 轴正向还是反向施加，作用于断臂的静电力总是向上。图4 (c) 和 (d) 是悬臂应变张量XX分量分布情况。应变张量YY分量与XX分量对称。悬臂最大应变位置位于悬臂根部。

因此，为增加传感器响应，离子掺杂区域应当选择在悬臂靠近固定区域的位置。

根据仿真结果，电场传感器最大应变随电场强度线性增加。当沿 z 轴反向施加电场，传感器响应与沿 z 轴正向施加电场一致。此外，传感器响应与悬臂长度和厚度有关。仿真结果能为传感器参数优化和布局提供理论参考。增加相同电场强度下的最大应变可以增加惠斯通电桥的输出，进而增加传感器的分辨率。悬臂最大应变张量XX分量与悬臂长度和厚度之间的关系如图5所示。

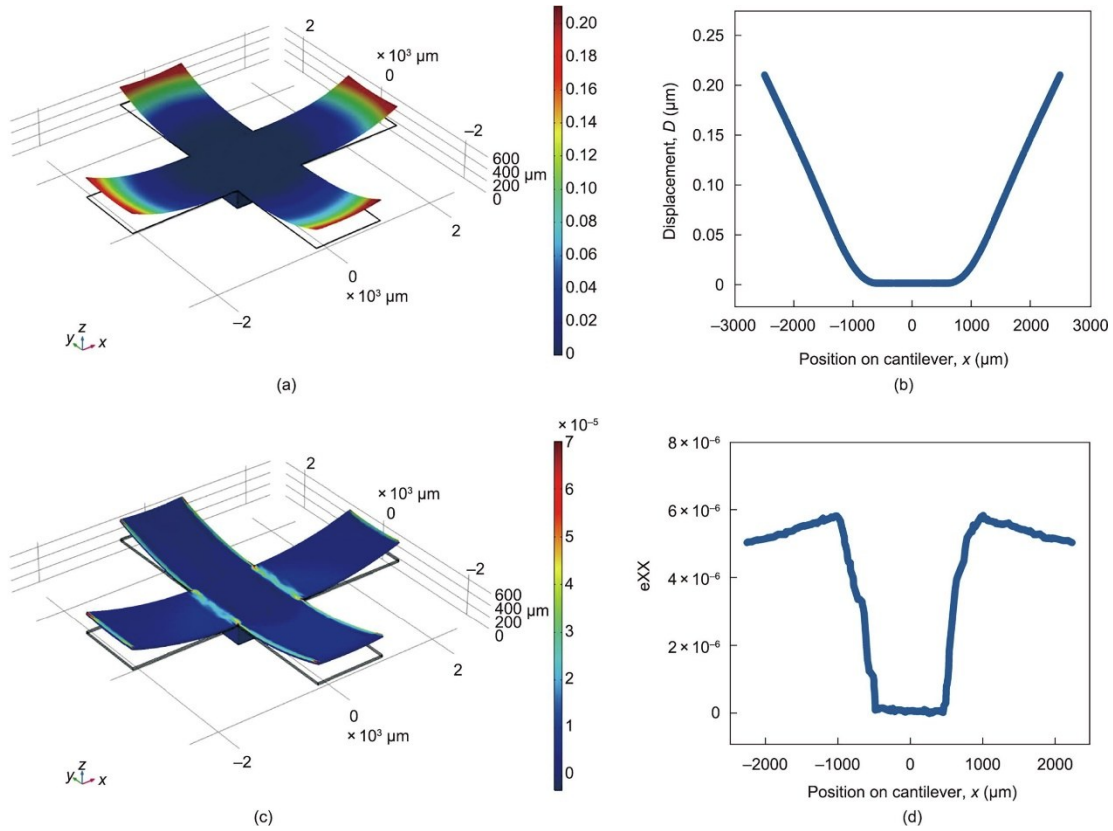


图4. 电场传感器响应仿真。(a) 位移分布情况；(b) 悬臂位移曲线；(c) 应变张量XX分量分布；(d) 悬臂应变张量XX分量曲线。

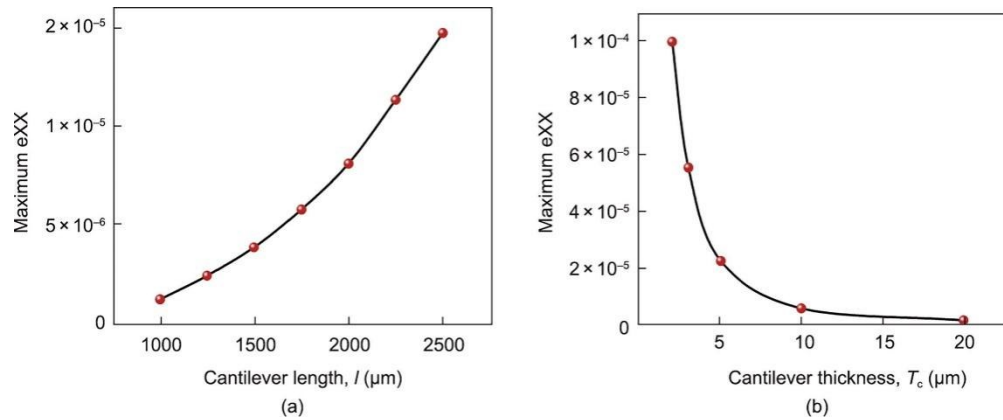


图5. 悬臂最大应变张量XX分量与悬臂长度及厚度关系曲线。(a) 不同悬臂长度 l 下最大应变张量XX分量；(b) 不同悬臂厚度 T_c 下最大应变张量XX分量。

根据杠杆原理，在相同静电力作用下，增加悬臂长度可以增加力矩。因此，在相同电场下，悬臂越长，最大应变越大，如图5(a)所示。在合理范围内，增加悬臂长度可以有效增加传感器响应。然而，如果悬臂过长，将会使得悬臂机械强度降低，同时增加器件制备难度。此外，当悬臂长度增加时，悬臂特征频率降低，使得传感器截止频率降低。综合考量器件制备、器件寿命和器件性能，传感器悬臂长度选择在1250~2250 μm 范围内。

相似地，减小悬臂厚度也可以增加悬臂最大应变，从而增加电场传感器响应，如图5(b)所示。但悬臂厚度过小也会影响器件加工难度及机械强度。悬臂厚度选择5 μm 和10 μm 。

改变金属薄膜面积同样可以影响传感器响应。根据公式(1)，增加金属薄膜面积 A 会增加静电力大小，从而增加传感器响应。因此，金属薄膜面积应当尽可能大。但当金属薄膜长度增加至一定值后，传感器响应的增加将变得不再显著。此外，当金属薄膜接近悬臂根部时，将可能影响压阻材料的制备。因此，在悬臂末端制备金属薄膜，其长度选择800 μm 。第4节将展示不同参数电场传感器的性能对比。

3. 器件制备

基于对所提出的电场传感结构的理论分析与仿真结果，采用硅基微加工工艺对传感器进行制备。传感器微加工工艺基于直径为10 cm的SOI晶圆进行制备，SOI晶圆器件层厚度为5 μm 和10 μm ，埋氧层厚度为1 μm 。器件层硅晶向选择为<100>方向，电阻率为6~8 $\Omega\cdot\text{cm}$ 。在一片10 cm直径晶圆上可以制备约90个传感器。

传感器加工流程示意图如图6所示。晶圆加工过程结合了光刻工艺和其他微加工技术。加工过程中使用的6块掩膜版如图7(a)所示。首先使用浓硫酸双氧水溶液加热清洗SOI晶圆。利用光刻工艺将压阻区域图形化在器件层表面。在晶圆表面制备一层20 nm的氧化层，作为离子注入的掩蔽层。向掺杂区域注入硼离子，离子注入浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，PN结深1.5 μm 。离子注入区域通过光刻制备为指定形状，在压阻区域和金属电极之间制备欧姆接触区。压阻区域制备完成后，在晶圆表面制备厚度为400 nm的氧化硅绝缘层，并通过电感耦合等离子体(ICP)刻蚀技术释放出欧姆接触区和悬臂区域。最后，通过磁控溅射的方法在器件层表面制备由铬和金组成的金属层。通过湿法腐蚀将金属层制备成惠斯通电桥结构。以上为器件层的工艺流程。

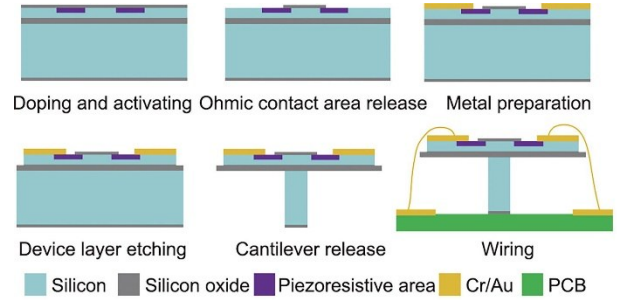


图6. 电场传感器加工示意图。

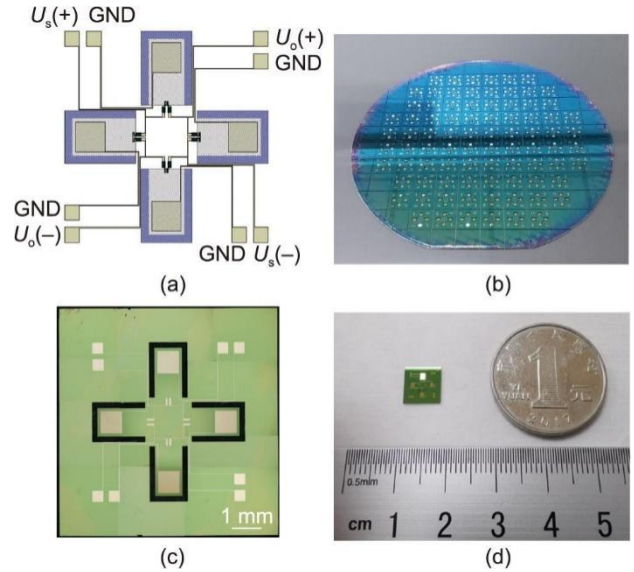


图7. 电场传感器制备结果。(a) 光刻掩膜版设计；(b) 10 cm直径晶圆切片前图片；(c) 电场传感器结构显微照片；(d) 电场传感器尺寸示意图。

接下来进行器件体加工。首先，通过ICP刻蚀将器件硅刻成悬臂形状。然后，悬臂下方的硅体也被刻蚀掉。最后，将埋氧层进行刻蚀，以释放4个悬臂。在释放悬臂时，工艺温度和时间需要被精确控制，以保证悬臂初始状态相同。划片前的晶圆制备结果如图7(b)所示。传感器微结构如图7(c)所示。

最后，晶圆通过激光切割形成8 mm × 8 mm的芯片，如图7(d)所示。传感器上的电极通过金线打线至印刷电路板(PCB)。在第4节中，该PCB板将用于电场测量平台中传感器性能的测试。

4. 器件性能

如图8(a)所示，搭建电场测试平台用于电场传感器的性能测试。测试平台可以产生不同幅值、频率、波形的电场。在测试平台中，电场通过在平行极板两端施加电压获得。电极的直径与间距比应当足够高，以保证电极间电场近似为匀强电场。电极旁设置用于固定PCB板的长

柱。PCB板设计为T字形，如图8(b)所示。PCB板一端放置电场传感器，另一端通过螺丝固定。通过信号发生器产生电压信号，并通过高压放大器对电压进行放大，产生施加在平行极板两端的高电压。传感器的输出电压通过后端电路进行差分放大，如图8(c)所示。后端电路制备在PCB板上。放大后的信号通过锁相放大器进行选频，参考信号频率为电场频率的两倍。此外，使用高精度电压源产生6 V电压作为惠斯通电桥的输出电压。基于LabVIEW程序，通过个人计算机(PC)端控制信号发生器的输出信号并采集锁相放大器的输出信号。

基于电场测试平台，在不同幅值和频率电场条件下测

试了制备得到的不同参数的电场传感器。测试环境设置在大气压101 kPa、温度(25 ± 1) °C、湿度(50 ± 10)%条件下。对于电场测量，较为重要的参数包括动态范围、线性度、截止频率和分辨率。制备得到的电场传感器分为S1、S2、S3、S4 4组。每组传感器包括10个传感芯片。悬臂长度分别为1250 μm、1750 μm、2250 μm。悬臂厚度设置为5 μm和10 μm。表1列举了不同参数电场传感器性能。

首先在50 Hz工频电场下对4组电场传感器进行了测试。电场传感器输出电压曲线如图9(a)所示。在固定频率下，电场传感器幅值响应呈线性关系。对输出电压曲线进行线性拟合，传感器S1~S4的 R^2 值分别为0.998、

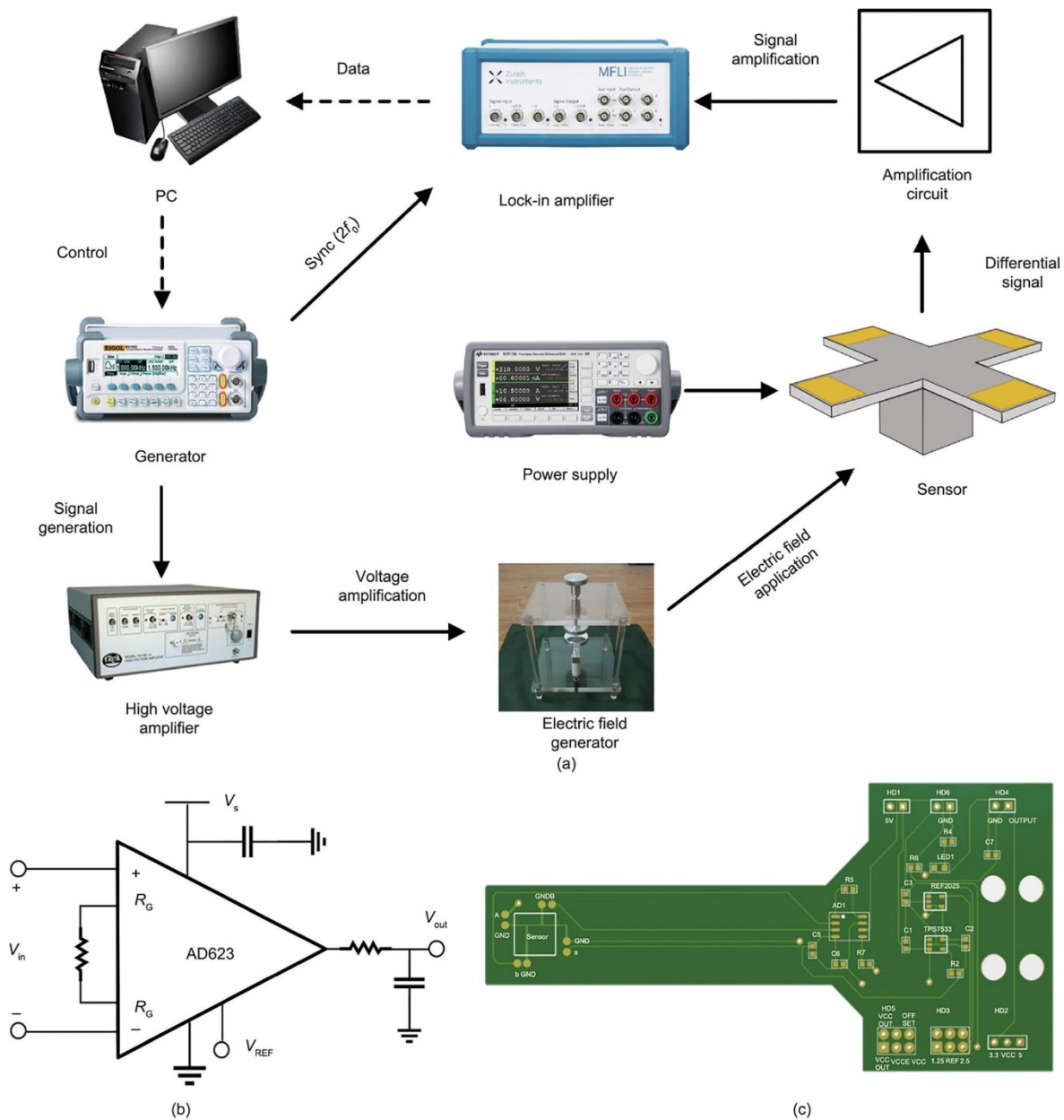


图8. 电场传感测试装置。(a) 电场测试平台结构图；(b) PCB板结构图；(c) 后端差分放大电路。 R_G : 增益调节电阻； V_{in} : 输入信号； V_{out} : 输出信号； V_{REF} : 输出参考信号； V_s : 电压源。

表1 不同参数电场传感器电场测量结果

Sensor group	Cantilever length (μm)	Cantilever thickness (μm)	AC resolution ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$)	Dynamic range ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$)	Cut-off frequency (Hz)
S1	1250	10	301	$2.10 \times 10^3 - 1.10 \times 10^6$	496
S2	1750	10	253	$1.90 \times 10^3 - 8.13 \times 10^5$	474
S3	2250	10	236	$1.60 \times 10^3 - 7.49 \times 10^5$	441
S4	1750	5	112	$1.10 \times 10^3 - 2.79 \times 10^5$	296

0.998、0.998 和 0.996。当增加悬臂长度或减小悬臂厚度时，电场传感器响应增加，这与理论分析和仿真结果一致。根据传感器响应曲线及噪声特性，可以计算得到传感器的交流响应，如表1所示。当施加电场强度过大或过小时，电场传感器响应非线性度降低。当电场强度较高时，传感器响应曲线向下弯折，这是由于传感器在大响应下工作模式发生了改变。当电场强度较低时，噪声的影响显著增加。此外，环境干扰导致传感器出现零漂，表现为输出响应曲线的截距。以响应曲线线性度 $R^2 > 0.99$ 作为界限，可以得到传感器的线性可测电场范围（动态范围），如表1所示。

图9（b）为不同参数电场传感器频率响应特性曲线。在器件特征频率以下，电场传感器响应曲线相对平缓。以 3 dB 变化为界限值，传感器 S1~S4 的截止频率分别为 496 Hz、474 Hz、441 Hz、296 Hz。特征频率的不同是由传感器结构尺寸参数的不同导致的。与理论分析一致，减小悬臂长度或增加悬臂厚度将增大传感结构谐振频率，从而提升传感器截止频率。然而，传感器截止频率的提升往往也会带来相应的下降。因此，电场传感器尺寸参数需要根据实际应用需求进行设计。在谐振频率以上，传感器响应会快速衰减。当电场频率过低时，电场传感器响应同样会有所降低。

图9（c）为传感器 S2 在不同电场强度下的频率响应曲线。当电场强度增加时，传感器的截止频率基本保持不变。当电场强度较小时，传感器的信噪比受到噪声的影响

较大。当电场强度较高时，传感器信噪比高，但图中传感器响应受到了锁相放大器最大输出的限制。

实验结果表明，电场传感器在不同电场条件下具备高性能和高一致性。电场传感器的交流分辨率可以达到 $112 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ，线性动态范围可以达到 $1.1 \sim 1100.0 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ ，截止频率最高达 496 Hz。在正常工作条件下，传感器的功耗在微瓦量级。此外，传感器的二倍频响应特性使得传感器输出信号能够与耦合噪声分离，从而极大提升传感器信噪比。表2对比了本文中的电场传感器与其他原理电场传感器的性能和特点。本文提出的电场传感器在测量范围、分辨率、信噪比、功耗等方面具有良好性能，能够满足大多数电场测量场景。该电场传感器的截止频率仍有待进一步提升。

5. 结论

本文提出了一种静电力驱动的具有压阻悬臂结构的电场传感器。所提出的电场传感器能够用于电力系统和电气设备中电场的高分辨率测量。通过理论计算和有限元仿真分析，文章对电场传感器的工作原理进行了验证，并对电场传感器参数进行了优化。基于微加工工艺，文章对传感器加工流程进行了设计，并基于直径为 10 cm 的 SOI 晶圆进行了传感器制备。实验结果表面，本文提出的电场传感器具有高线性度和分辨率。电场传感器的交流分辨率可以达到 $112 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ，线性动态范围可以达到 $1.1 \sim$

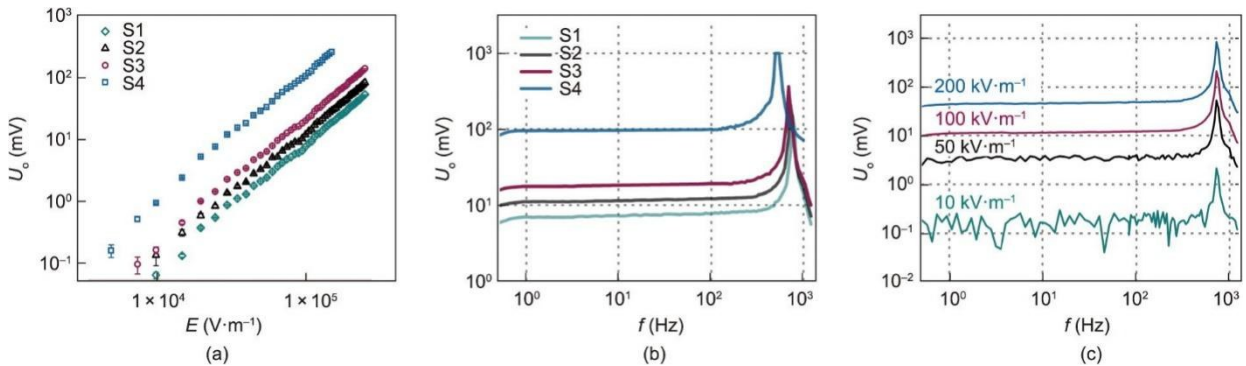


图9. 电场传感器响应曲线。(a) 不同参数电场传感器输出电压 U_o 与电场强度 E 曲线；(b) 不同参数电场传感器频率响应曲线；(c) 传感器 S2 在不同电场强度下的频率响应曲线。

表2 不同原理电场传感器特点对比

Principle	Amplitude range	Cut-off frequency	Resolution	Power consumption	Size	Cost	Signal-to-noise ratio	Temperature stability	Fabrication difficulty
Electro-optical effect	$< 1.00 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$	100 MHz	$500.0 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$	Medium	Large	High	Low	Low	High
Piezoelectric effect	$< 1.57 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$	100 kHz	$12.7 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$	Low	Small	Low	High	High	High
Charge induction	$< 100.00 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$	1 kHz	$20.0 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$	Medium	Small	Low	High	High	Low
Electrostatic force (in this paper)	$1.10 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1} - 1.10 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$	496 Hz	$112.0 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$	Low	Small	Low	Low	High	Low

$1100.0 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ，截止频率为496 Hz。传感器能够满足电网中大多数应用场景。本文提出的电场传感器还具备小尺寸、低成本、易于批量生产、低功耗等优点。此外，电场传感器的输出信号能够通过锁相放大器与耦合噪声进行分离，从而提升传感器信噪比。在未来，需要进一步提升传感器的截止频率。通过将微型电场传感器与供能模块、通信模块、数据处理模块等进行集成，可以实现高性能电场传感节点。高性能电场测量系统将在智能电网和能源互联网中发挥重要作用。

致谢

本研究由国家自然科学基金项目(51720105004、51921005、52125703)资助。

Compliance with ethics guidelines

Zhifei Han, Jun Hu, Licheng Li, and Jinliang He declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Huang Q, Crow ML, Heydt GT, Zheng JP, Dale SJ. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet. *Proc IEEE* 2011;99(1):133–48.
- [2] Gubbi J, Buyya R, Marusic S, Palaniswami M. Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions. *Future Gener Comput Syst* 2013;29(7):1645–60.
- [3] Wu D, Zhou C. Fault-tolerant and scalable key management for smart grid. *IEEE Trans Smart Grid* 2011;2(2):375–81.
- [4] Chen K, Huang C, He J. Fault detection, classification and location for transmission lines and distribution systems: a review on the methods. *High Voltage* 2016;1(1):25–33.
- [5] Si D, Wang J, Wei G, Yan X. Method and experimental study of voltage measurement based on electric field integral with Gauss–Legendre algorithm. *IEEE Trans Instrum Meas* 2020;69(6):2771–8.
- [6] Zhang B, Hao Z, Bo Z. Development of relay protection for smart grid (1): new principle of fault distinction. *Electr Power Autom Equip* 2010; 30(1): 1–6. Chinese.
- [7] Yang P, Wen X, Chu Z, Ni X, Peng C. Non-intrusive DC voltage measurement based on resonant electric field microsensors. *J Micromech Microeng* 2021; 31(6):064001.
- [8] Zhu J, Lei X, Su Z, Liu T, Liu K, Yu G, et al. Study of non-contact voltage detector of 1000kV UHV AC based on MEMS electric field sensor. *MATEC Web Conf* 2018;160:02001.
- [9] Duan L, Hu J, Zhao G, Chen K, Wang SX, He J. Method of inter-turn fault detection for next-generation smart transformers based on deep learning algorithm. *High Voltage* 2019;4(4):282–91.
- [10] Chen W, Wang J, Wan F, Wang P. Review of optical fibre sensors for electrical equipment characteristic state parameters detection. *High Voltage* 2019; 4(4): 271–81.
- [11] Nitsch M, Camp M, Sabath F, terHaseborg JL, Garbe H. Susceptibility of some electronic equipment to HPEM threats. *IEEE Trans Electromagn Compat* 2004; 46(3):380–9.
- [12] Han Z, Xue F, Hu J, He J. Micro electric-field sensors: principles and applications. *IEEE Ind Electron Mag* 2021;15(4):35–42.
- [13] Zeng S, Powers JR, Newbraugh BH. Effectiveness of a worker-worn electric-field sensor to detect power-line proximity and electrical-contact. *J Safety Res* 2010;41(3):229–39.
- [14] Yang P, Chen B, Wen X, Peng C, Xia S, Hao Y. A novel MEMS chip-based ground atmospheric electric field sensor. *J Electron Inf Technol* 2016; 38(6): 1536–40. Chinese.
- [15] Yang P, Chen B, Wen X, et al. A novel MEMS chip-based atmospheric electric field sensor for lightning hazard warning applications. In: 2015 IEEE SENSORS; 2015 Nov 1–4; Busan, Korea. Berlin: IEEE Xplore; 2015.
- [16] Mohammed R, Sabu S, Joby NE, et al. Electric field sensor for lightning early warning system. In: AGU 2017 Fall Meeting; 2017 Dec 11–15; New Orleans, LA, USA; 2017.
- [17] Xu B, He H, Yang X, Bie Y, Lv Q. The study of meteorological effects and time variations of the fair weather atmospheric electric field near ground in YBJ, Tibet. *Acta Physica Sinica* 2012;61(17):175203. Chinese.
- [18] Kasaba Y, Hayakawa H, Ishisaka K, Okada T, Matsuoka A, Mukai T, et al. Evaluation of DC electric field measurement by the double probe system aboard the Geotail spacecraft. *Adv Space Res* 2006;37(3):604–9.
- [19] Tajima K, Kobayashi R, Kuwabara N, Tokuda M. Development of optical isotropic E-field sensor operating more than 10 GHz using Mach-Zehnder interferometers. *IEICE Trans Electron* 2002;85(4):961–8.
- [20] Zeng R, Chen W, He J, Zhu P. The development of integrated electro-optic sensor for intensive electric field measurement. In: 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility; 2007 Jul 9–13; Honolulu, HI, USA. Berlin: IEEE Xplore; 2007.
- [21] Zeng R, Wang B, Yu Z, Niu B, Hua Y, et al. Integrated optical E-field sensor based on balanced Mach-Zehnder interferometer. *Opt Eng* 2011;50(11):114404.
- [22] Zeng R, Yu J, Wang B, Niu B, Hua Y. Study of an integrated optical sensor with mono-shielding electrode for intense transient E-field measurement. *Measurement* 2014;50:356–62.
- [23] Wu Z, Lin Y, Han S, Yin X, Ding M, Guo L, et al. Simulation and analysis of micro-ring electric field sensor based on a lithium niobate-on-insulator. *Crystals (Basel)* 2021;11(4):359.
- [24] Riehl PS, Scott KL, Muller RS, Howe RT, Yasaitis JA. Electrostatic charge and field sensors based on micromechanical resonators. *J Microelectromech Syst* 2003;12(5):577–89.
- [25] Peng C, Chen X, Ye C, Tao H, Cui G, Bai Q, et al. Design and testing of a micromechanical resonant electrostatic field sensor. *J Micromech Microeng* 2006;16(5):914–9.
- [26] Bahreyni B, Wijeweera G, Shafai C, Rajapakse A. Analysis and design of a micromachined electric-field sensor. *J Microelectromech Syst* 2008;17(1):31–6.
- [27] Ma Q, Huang K, Yu Z, Wang Z. A MEMS-based electric field sensor for measurement of high-voltage DC synthetic fields in air. *IEEE Sens J* 2017; 17(23):7866–76.
- [28] Han Z, Xue F, Yang J, Hu J, He J. Micro piezoelectric-capacitive sensors for high-sensitivity measurement of space electric fields. In: 2019 IEEE SENSORS;

- 2019 Oct 27–30; Montreal, Canada. Berlin: IEEE Xplore; 2019.
- [29] Han Z, Xue F, Yang G, Yu Z, Hu J, He J. Micro-cantilever capacitive sensor for high-resolution measurement of electric fields. *IEEE Sens J* 2021;21(4):4317–24.
- [30] Xue F, Hu J, Guo Y, Han G, Ouyang Y, Wang SX, et al. Piezoelectric – piezoresistive coupling MEMS Sensors for measurement of electric fields of broad bandwidth and large dynamic range. *IEEE Trans Ind Electron* 2020;67(1): 551–9.
- [31] Xue F, Hu J, Wang SX, He J. Electric field sensor based on piezoelectric bending effect for wide range measurement. *IEEE Trans Ind Electron* 2015; 62(9):5730–7.