

低轴间耦合的MEMS三维电场传感器

凌必赞^{①②} 彭春荣^① 任仁^① 储昭志^{①②} 张洲威^{①②} 雷虎成^{①②} 夏善红^{*①}

^①(中国科学院电子学研究所传感器技术国家重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 轴间耦合干扰是影响3维电场传感器测量准确性的重要因素。该文提出了一种低耦合干扰的MEMS 1维电场敏感芯片,并将3个上述的芯片正交组合研制出一款低轴间耦合的MEMS 3维电场传感器。不同于已见报道的测量垂直方向电场分量的MEMS 1维电场敏感芯片,该文提出的芯片采用轴对称设计,在差分电路的配合下能够测量垂直于对称轴方向的面内电场分量,并能够消除正交于测量轴方向的电场分量的耦合干扰。该MEMS 3维电场传感器具尺寸小和集成度高等优点。实验结果表明在0~120 kV/m电场强度范围内,该MEMS 3维电场传感器的轴间耦合灵敏度小于3.48%,3维电场测量误差小于7.13%。

关键词: MEMS; 3维; 电场传感器; 轴间耦合干扰

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)08-1934-07

DOI: 10.11999/JEIT171188

MEMS-based Three-dimensional Electric Field Sensor with Low Cross-axis Coupling Interference

LING Biyun^{①②} PENG Chunrong^① REN Ren^① CHU Zhaozhi^{①②}
ZHANG Zhouwei^{①②} LEI Hucheng^{①②} XIA Shanhong^①

^①(State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Cross-axis coupling interference influences greatly the measurement accuracy of Three-Dimensional (3D) Electric Field Sensor (EFS). A MEMS-based One-Dimensional (1D) Electric Field Microsensor (EFM) chip with low coupling interference is presented, and a MEMS-based 3D EFS with low cross-axis coupling interference is developed by arranging three 1D EFM chips orthogonally. Different from previously reported 1D EFM chips sensitive to perpendicular electric field component, the proposed 1D EFM chip is designed to be symmetrical and connected to difference circuit, so that it is capable of sensing parallel electric field component perpendicular to axis of symmetry and eliminating coupling interference. The proposed 3D EFS has the advantages of small size and high integration. Experimental results reveal that in the range of 0~120 kV/m, the cross-axis sensitivities are within 3.48%, and the total measurement errors of this 3D EFS are within 7.13%.

Key words: Micro-Electro-Mechanical System (MEMS); Three-dimensional; Electric field sensor; Cross-axis coupling interference

1 引言

电场传感器广泛应用于航空航天、气象、电

力、工业生产等诸多方面,对安全保障和科学研究都具有重要的作用^[1-4]。近20年来,随着微机电系统技术(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)的快速发展,基于MEMS的微型电场传感器凭借其体积小、成本低、功耗低、可批量制造等优点,成为电场传感器的研究热点。MEMS电场传感器可用于静电场和交流电场测量,按照工作原理可分为:感应电荷式^[5-9]、静电力式^[10,11]和引导电荷式^[12]。目前,大部分MEMS电场传感器只能测量垂直于其芯片上表面的1维电场分量,但是在很多

收稿日期: 2017-12-18; 改回日期: 2018-05-07; 网络出版: 2018-06-12

*通信作者: 夏善红 shxia@mail.ie.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61327810), 国家863计划项目(2015AA042602), 中国科学院创新面上基金(CXJJ-17-M151)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61327810), The National 863 Program of China (2015AA042602), Chinese Academy of Sciences Project (CXJJ-17-M151)

应用场合中电场的方向未知(例如空间大气电场的研究等^[2]), 因此研究3维电场传感器具有重要的意义。

典型的3维电场传感器包含分别测量直角坐标系中 X 、 Y 和 Z 3个方向电场分量的敏感单元。然而在实际测量中, 敏感单元的电场响应信号不仅由该敏感单元所对应的测量轴方向的电场分量决定, 而且会受到来自另外2个测量轴方向的电场分量的影响。例如, 测量 X 方向电场分量的敏感单元, 其响应信号不仅取决于 X 方向的电场分量, 还会受到 Y 方向和 Z 方向的电场分量的影响, 这种轴间耦合干扰严重影响了3维电场测量的准确性, 因此一般需要通过3维电场传感器进行标定和解耦计算来消除轴间耦合的干扰。轴间耦合灵敏度为衡量3维测量中轴间耦合干扰的指标^[13], 其表示为垂直于测量轴方向的灵敏度与沿着测量轴方向的灵敏度两者之比, 该比值越小代表轴间耦合干扰的影响越小。方奕庚等人^[14]曾将Yang等人^[9]研发的3个1维电场敏感芯片正交分布, 实验研究表明其3维电场测量的轴间耦合灵敏度大于20%。目前, 已报道的消除3维电场测量中轴间耦合干扰的方法主要有解耦矩阵和对称结构配合差分电路两种方法, 两者分别从算法和传感器输出端进行去耦合处理。闻小龙等人^[15]和方奕庚等人^[14]针对各自设计的MEMS 3维电场传感器, 建立了传感器输出信号与实际电场分量的耦合灵敏度矩阵, 并通过求解该矩阵的逆矩阵或伪逆矩阵得到解耦矩阵, 实现3维电场传感器的解耦。此外, 李冰等人^[16]将遗传算法引入了耦合灵敏度矩阵的求解中。但是解耦矩阵只是根据测试标定数据进行计算解耦, 并不能从源头消除轴间耦合干扰。Ling等人^[17]报道了一种单芯片MEMS 3维电场传感器, 其中 X 轴和 Y 轴的敏感单元均采用轴对称结构, 且工作时配合差分电路, 该设计能够消除 X 轴和 Y 轴方向轴间耦合干扰的影响。但是缺点在于: 由于将3个测量轴方向的敏感单元集成于同一个芯片, 该芯片结构复杂且驱动电压过大; 受限于芯片结构, 其 Z 轴方向电场敏感单元并不能实现轴对称结构, 因此仍然存在耦合干扰的影响。

为了消除3维电场传感器轴间耦合干扰的影响, 本文提出了一种低耦合干扰的MEMS 1维电场敏感芯片, 并将3个上述的芯片正交组合研制出一款低轴间耦合的MEMS 3维电场传感器。不同于已见报道的测量垂直方向电场分量的MEMS 1维电场敏感芯片, 本文提出的芯片采用轴对称设计, 在差分电路的配合下能够测量垂直于对称轴方向的面内电场分量, 并能够消除正交于测量轴方向的电场分

量的耦合干扰。该3维电场传感器配合相应的处理电路便构成了3维电场测量系统。

2 1维电场敏感芯片

该1维电场敏感芯片采用了轴对称设计, 且采用了基于SOI的微加工工艺, 其结构示意图如图1所示。该传感器芯片主要由一个静电驱动的谐振结构构成, 谐振结构包含了双折梁和屏蔽电极; 该传感器芯片采用条状电极作为感应电极和屏蔽电极; 两组感应电极阵列轴对称布置在芯片的两侧; 屏蔽电极与感应电极共面, 且屏蔽电极以叉指的形式相对于感应电极布置; 推挽驱动电极分布在感应电极阵列的左右两侧, 用于为谐振结构提供静电驱动。该1维电场敏感芯片基于感应电荷的原理进行电场测量, Yang等人^[9]曾详细介绍过此类共面电极的MEMS电场传感器的工作原理。当屏蔽电极与感应电极的相对位置发生周期改变时, 感应电极表面的电场分布也会发生周期变化, 从而感应电极表面的感应电荷总量变化形成了电流。该电流 i_s 可以表示为

$$i_s = \frac{dQ_s}{dt} = \varepsilon_0 E_n \frac{dA}{dt} \quad (1)$$

其中, ε_0 为真空介电常数, E_n 为感应电极周围的电场强度, A 为感应电极的有效感应面积, Q_s 为感应电极上的总电荷量。由式(1)可知, 该电流信号的幅值与待测电场强度大小呈正比。将输出电流进行I/V转换和放大得到更加便于测量的电压信号。

不同于传统的MEMS电场传感器芯片, 该传感器芯片采用轴对称设计, 用于测量垂直于对称轴方向的面内电场分量。假定该传感器芯片置于匀强电场中, 放置在 X - Y 平面上, 且对称轴与 Y 轴平行, 如图1所示。其中, Y 轴电场分量和 Z 轴电场分量在

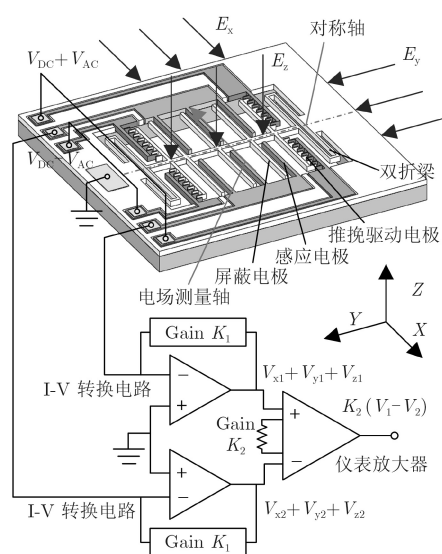


图1 1维电场敏感芯片示意图

两组感应电极阵列上均感应出等符号且等量的电荷，而X轴电场分量在两组感应电极阵列上感应出等量但符号相反的电荷。通过差分电路，Y轴电场分量和Z轴电场分量产生的电荷均被消除，而X轴的电场分量产生的电荷得以保留。由此可知，该1维电场敏感芯片仅对垂直于对称轴方向的面内电场分量敏感。该1维电场敏感芯片的关键参数如表1所示。

3 1 维电场敏感芯片的建模和仿真分析

为了证明该1维电场敏感芯片仅对垂直于对称轴方向的面内电场分量敏感，本文使用有限元方法对该传感器芯片进行仿真分析，图2为1维电场敏感芯片的仿真模型。其中，两组感应电极阵列被简化为了两个矩形感应面，且省略了推挽驱动电极和双折梁等结构。该传感器芯片置于匀强电场中，放置在X-Y平面上，且对称轴与Y轴平行。电场的强度为 E_0 ，电场矢量与Z轴夹角为 θ ，电场矢量在X-Y平面上的投影与X轴的夹角为 φ ，因此，

$$E_x = -E_0 \sin \theta \cos \varphi \quad (2)$$

$$E_y = E_0 \sin \theta \sin \varphi \quad (3)$$

$$E_z = -E_0 \cos \theta \quad (4)$$

E_x 、 E_y 和 E_z 分别为X轴、Y轴和Z轴的电场分量。假定 Q_{A1} 和 Q_{A2} 分别是感应面1和感应面2上感应产生的电荷量，则

$$Q_x = Q_{A1} - Q_{A2} \quad (5)$$

其中， Q_x 为感应面1和感应面2的差分输出。从理论上说， Q_x 相对于 θ 和 φ 的关系应该与 E_x 相对于 θ 和 φ 的关系一致，且 Q_x 与 E_y 和 E_z 无关。

建立足够大的立方体空气包，空气包的两个相对面上施加大小相等符号相反的电势，用于产生匀强电场，电场强度设为1 kV/m。将该1维电场敏感芯片模型置于立方体空气包的中心。考虑到该传感器芯片的屏蔽电极接地，且感应电极等效接地，因此将该1维电场敏感芯片电势设为零。绕空气包的体中心旋转该空气包，用于不断改变电场的施加方向。图3为仿真实验的结果。如图3(b)所示，当 φ 为 180° 时， Q_x 与 θ 呈三角函数关系，而当 φ 为 90° 和 270° 时， Q_x 为零，这说明 Q_x 与 E_y 和 E_z 无关。如图3(c)所示，当 θ 为定值时， Q_x 与 φ 呈三角函数关系。综上所述，通过仿真证明了该1维电场敏感芯片仅对垂直于对称轴方向的面内电场分量敏感，能够消除耦合干扰的影响。

表 1 1 维电场敏感芯片的关键参数

结构参数	参数值
感应电极宽度 w_{sh}	8 μm
屏蔽电极宽度 w_{sh}	10 μm
感应电极与屏蔽电极的间距(平衡位置) g	15 μm
相邻的两个感应电极的间距 W	95 μm
感应电极长度 L_{sh}	1030 μm
屏蔽电极长度 L_{sh}	1045 μm
结构厚度 r	25 μm
衬底厚度 h	300 μm
感应电极数量 N_e	14×2
梳齿数量 N_d	84×20
谐振结构质量 m_{off}	4.4×10 ⁻⁵ g
等效弹性系数 k_q	11.3 N/m

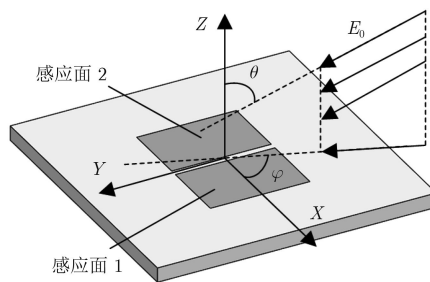


图 2 1 维电场敏感芯片的仿真模型

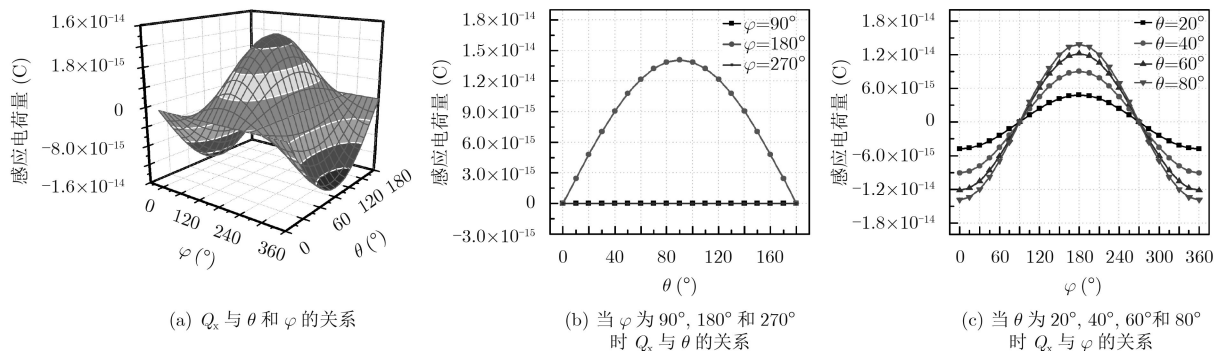


图 3 1 维电场敏感芯片对不同方向电场的仿真结果

4 1 维电场敏感芯片的制备

该1维电场敏感芯片的制备工艺采用了基于SOI的微加工工艺，其所有结构均加工于SOI的结构体硅层。SOI的优点在于其埋氧层可以在结构体硅刻蚀和衬底硅刻蚀时起到截止作用，保证了芯片结构的厚度和表面平整度。SOI的结构体硅厚度为25 μm，误差为±1 μm，因此加工得到的芯片结构厚度基本不变。此外，结构体硅为N掺杂，埋氧层厚度为2 μm，衬底硅厚度为300 μm。工艺流程如图4所示。其中，使用聚酰亚胺作为正面结构的保护层的原因在于其耐高温、耐酸性腐蚀和有足够的强度，能够在步骤(d)中保护和固定正面结构，且自身不会高温碳化。SOI中的埋氧层通常采用HF蒸汽去除，但是实验表明HF蒸汽会导致步骤(a)中溅射的金属电极脱落，因此本文采用CF₃气体去除埋氧层。

该1维电场敏感芯片的尺寸为6.4 mm×6.4 mm，制备出的传感器芯片扫描电镜照片如图5所示。

5 MEMS 3维电场传感器及标定系统

图6为3个1维电场敏感芯片组装而成的MEMS

3维电场传感器。其中，3个1维电场敏感芯片均置于立方体金属外壳的3个相互正交面的中心处，构成了3个相互正交的测量轴。立方体金属外壳的边长为44 mm，该立方体金属外壳内包含了每个1维电场敏感芯片的前端处理电路，包括I-V转化电路和仪表放大器，其原理图如图1所示。

为了标定该MEMS 3维电场传感器，且验证该传感器的3维电场测量准确性，本文设计了一款3维电场标定测试装置。如图7所示，该测试标定装置由平行金属极板、旋转杆、铁丝和直流高压电源组成。通过在两块相互平行的金属极板上加载大小相等符号相反的直流电压，从而在极板之间形成了均匀电场空间，该空间为60 cm×60 cm×30 cm的长方体。两个平行金属极板之间等间距地布置着若干圈铁丝，相邻两圈铁丝间或是金属极板与其相邻的铁丝间均由等值电阻连接，用于减小平行金属极板之间的边缘效应。该MEMS 3维电场传感器固定于旋转杆，置于均匀电场空间的中心处。该旋转杆采用Teflon材料，另一端固定于旋转电机，且该旋转杆平行于金属极板放置。需要注意的是该旋转杆有

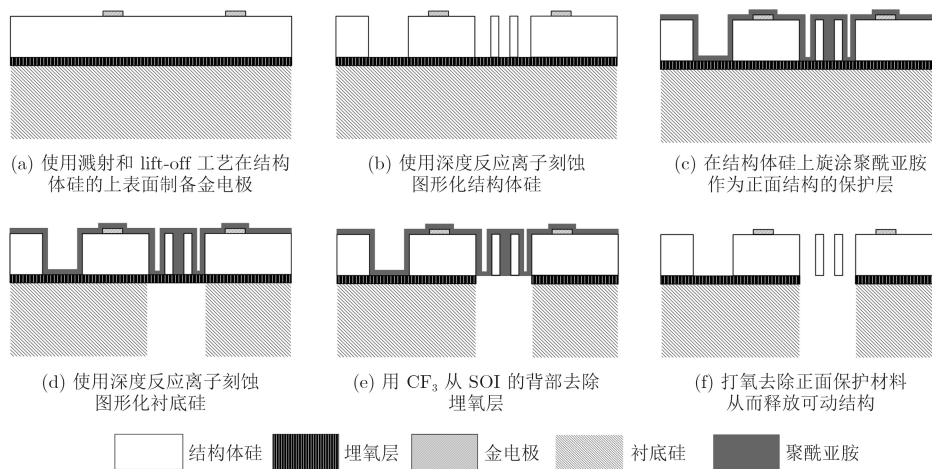
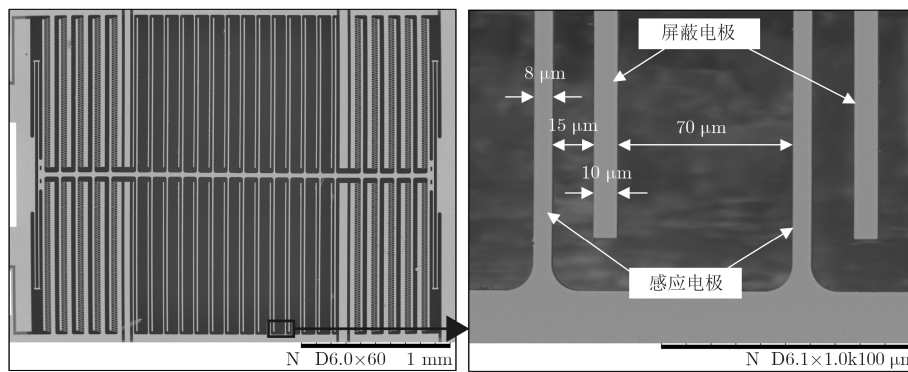


图 4 1 维电场敏感芯片的微加工工艺流程



(a) 1 维电场敏感芯片照片 (b) 感应电极和屏蔽电极照片

图 5 1 维电场敏感芯片扫描电镜照片

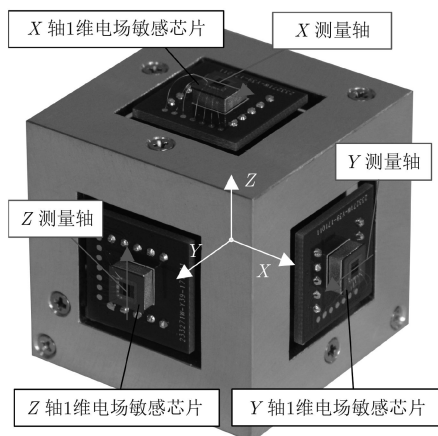


图6 MEMS 3维电场传感器的实物图

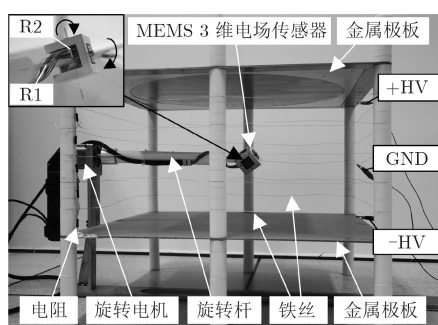


图7 MEMS 3维电场传感器测试标定装置

两个相互垂直的旋转轴R1和R2，旋转电机控制着该MEMS 3维电场传感器绕着R1轴旋转，而传感器绕着R2轴旋转需要手动控制。R1和R2的交点与该MEMS 3维传感器的中心重合，因此保证了传感器在旋转时中心位置保持不变。标定过程中，施加电场方向不变，通过旋转传感器实现传感器与电场矢量的夹角变化。

该MEMS 3维电场传感器通过导线与后端处理系统连接。后端处理系统用于：(1)为每一个1维电场敏感芯片提供独立的静电激励信号；(2)为每一个1维电场敏感芯片的输出提供锁相放大；(3)与

PC上位机通讯。为了以较小的激励电压获得较大的屏蔽电极的振幅，以提高1维电场敏感芯片的灵敏度和信噪比，该传感器芯片需工作在谐振态。通过扫频，3个1维电场敏感芯片的谐振频率分别为2220 Hz, 2240 Hz和2250 Hz。采用有限元仿真软件获取该传感器芯片中谐振结构的谐振频率为2552 Hz。仿真计算值和实际测量值之间存在差异的原因在于(1)空气阻尼的影响和(2)仿真计算时对谐振结构的简化。

6 实验验证

6.1 传感器标定

首先对该MEMS 3维电场传感器的X, Y和Z 3个测量轴进行单轴标定。其中，传感器标定和测试的环境为室温且标准大气压。旋转传感器使匀强电场分别平行于MEMS 3维电场传感器的X轴, Y轴和Z轴3个方向，每次施加0~120 kV/m的电场，且同时记录3个1维电场敏感芯片的输出。通过线性拟合得到了每个1维电场敏感芯片对平行于传感器X轴, Y轴和Z轴3个方向电场的灵敏度。

测试结果如图8和表2所示，该MEMS 3维电场传感器的轴间耦合灵敏度小于3.48%，这说明该MEMS 3维电场传感器能够有效地减小轴间耦合干扰；X轴, Y轴和Z轴1维电场敏感芯片的线性度误差均小于2.1%，这说明每个1维电场敏感芯片均具有良好的线性度。

因此，该MEMS 3维电场传感器的耦合灵敏度矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} V_x - V_{x0} \\ V_y - V_{y0} \\ V_z - V_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中， V_q 是 q 轴1维电场敏感芯片的输出， V_{q0} 是 q 轴1维电场敏感芯片的零点输出， k_{qi} 是 q 轴1维电场敏感芯片相对于沿着 i 轴方向电场的灵敏度($i=x, y, z$,

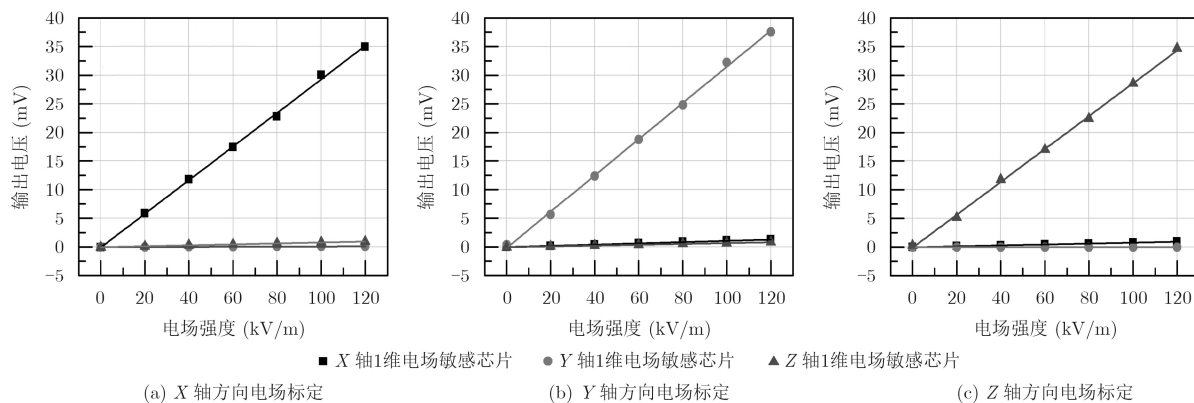


图8 MEMS 3维电场传感器的标定曲线

q=x, y, z)。因此, 该3维电场可表示为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_x - V_{x0} \\ V_y - V_{y0} \\ V_z - V_{z0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

本文中, 该解耦矩阵计算为

$$\begin{aligned} S &= \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} 3.416 & -0.117 & -0.095 \\ -0.011 & 3.165 & 0 \\ -0.094 & -0.074 & 3.487 \end{bmatrix} \quad (8) \end{aligned}$$

6.2 3维电场测量

在本文研制的测试标定装置内旋转该MEMS 3维电场传感器至任意角, 对比MEMS 3维电场传感器测量到的电场与实际施加的电场, 用于验证该传感器的3维电场测量的准确性。旋转传感器至几组不同的角度, 分别施加50 kV/m和100 kV/m的电场, 记录3个1维电场敏感芯片的输出值。通过式(7)计算合成电场, 并与施加电场进行对比, 结果如表3所示。

对比表3中的施加电场与合成电场可知误差小于7.13%, 这说明合成电场与施加电场保持良好的 consistency。误差的主要来源是系统误差, 包含金属极

表2 X轴, Y轴和Z轴1维电场敏感芯片的灵敏度

电场方向	X轴1维电场敏感芯片的灵敏度 (mV·m/kV)	Y轴1维电场敏感芯片的灵敏度 (mV·m/kV)	Z轴1维电场敏感芯片的灵敏度 (mV·m/kV)
沿X轴	0.293	0.001	0.008
沿Y轴	0.011	0.316	0.007
沿Z轴	0.008	0	0.287

表3 3维电场传感器在空间作不同角旋转的输出与计算电场

旋转角度	施加电场 (kV/m)	X轴1维电场敏感芯片 的输出(mV)	Y轴1维电场敏感芯片 的输出(mV)	Z轴1维电场敏感芯片 的输出(mV)	合成电场 (kV/m)	误差 (%)
θ_1	50	0.01	8.67	12.08	49.77	0.46
	100	0.01	17.51	24.35	100.40	0.40
θ_2	50	0.01	13.97	6.86	49.84	0.32
	100	0.04	27.74	13.99	99.56	0.44
θ_3	50	0.03	-10.08	-11.63	51.08	2.16
	100	0.05	-20.50	-22.84	101.67	1.67
θ_4	50	2.56	-13.02	8.57	52.21	4.42
	100	5.22	-26.73	15.99	104.02	4.02
θ_5	50	-8.67	9.77	8.49	53.30	6.60
	100	-16.94	19.32	17.84	107.13	7.13

板尺寸误差、旋转杆对标定测试装置中电场的干扰等, 传感器芯片表面温度、湿度、静电荷积累等因素也会造成测量存在误差。

7 结论

本文提出了一种低轴间耦合的MEMS 3维电场传感器。该传感器由3个正交布置的1维电场敏感芯片组成, 每个1维电场敏感芯片均采用轴对称设计。仿真实验证明该1维电场敏感芯片的设计能够测量垂直于对称轴方向的面内电场分量, 并且消除耦合干扰。该1维电场敏感芯片采用基于SOI的微加工工艺。本文研制了该MEMS 3维电场传感器的标定测试装置。实验结果表明在0~120 kV/m电场

强度范围内, 该MEMS 3维电场传感器能够有效地减小轴间耦合干扰, 每个1维电场敏感芯片均具有良好的线性度, 且3维电场测量误差小于7.13%。

参考文献

- [1] 罗福山. 雷击飞行器事件与美国航天活动的发射规范[J]. 中国航天, 1993, 1: 27-29.
LUO Fushan. The events of lightning strikes spacecraft and the criteria of the spacecraft launches of aerospace maneuver of USA[J]. *Aerospace China*, 1993, 1: 27-29.
- [2] ZENG Qingfeng, WANG Zhenhui, GUO Fengxia, et al. The application of lightning forecasting based on surface electrostatic field observations and radar data[J]. *Journal of Electrostatics*, 2013, 71(1): 6-13. doi: 10.1016/j.elstat.2012.10.007.

- [3] MARUVADA P S, DALLARIE R D, and PEDNEAULT R. Development of field-mill instruments for ground-level and above-ground electric field measurement under HVDC transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1983, 102(3): 738–744. doi: [10.1109/TPAS.1983.318035](https://doi.org/10.1109/TPAS.1983.318035).
- [4] VAILLANCOURT G H, CARIGNAN S, and JEAN C. Experience with the detection of faulty composite insulators on high-voltage power lines by the electric field measurement method[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, 13(2): 661–666. doi: [10.1109/61.660958](https://doi.org/10.1109/61.660958).
- [5] RIEHL P S, SCOTT K L, MULLER R S, *et al.* Electrostatic charge and field sensors based on micromechanical resonators[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003, 12(5): 577–589. doi: [10.1109/JMEMS.2003.818066](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2003.818066).
- [6] PENG Chunrong, CHEN Xianxiang, YE Cao, *et al.* Design and testing of a micromechanical resonant electrostatic field sensor[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(5): 914–919. doi: [10.1088/0960-1317/16/5/006](https://doi.org/10.1088/0960-1317/16/5/006).
- [7] CHEN Xianxiang, PENG Chunrong, TAO Hu, *et al.* Thermally driven micro-electrostatic fieldmeter[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 132(2): 677–682. doi: [10.1016/j.sna.2006.02.044](https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.02.044).
- [8] KOBAYASHI T, OYAMA S, MAKIMOTO N, *et al.* An electrostatic field sensor operated by self-excited vibration of MEMS-based self-sensitive piezoelectric microcantilevers[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 198: 87–90. doi: [10.1016/j.sna.2013.04.016](https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.04.016).
- [9] YANG Pengfei, PENG Chunrong, FANG Dongming, *et al.* Design, fabrication and application of an SOI-based resonant electric field microsensor with coplanar comb-shaped electrodes[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23(5): 1–8. doi: [10.1088/0960-1317/23/5/055002](https://doi.org/10.1088/0960-1317/23/5/055002).
- [10] RONCIN A, SHAFAI C, and SWATEK D R. Electric field sensor using electrostatic force deflection of a micro-spring supported membrane[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 123: 179–184. doi: [10.1016/j.sna.2005.02.018](https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.02.018).
- [11] CHEN T, SHAFAI C, RAJAPAKSE A, *et al.* Micromachined ac/dc electric field sensor with modulated sensitivity[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 245: 76–184. doi: [10.1016/j.sna.2016.04.054](https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.04.054).
- [12] WILLIAMS K, BRUYKER D, LIMB S, *et al.* Vacuum steered-electron electric-field sensor[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2014, 23(1): 157–167. doi: [10.1109/JMEMS.2013.2262924](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2013.2262924).
- [13] MOHAMMED Z, GILL W A, and RASRAS M. Double-comb-finger design to eliminate cross-axis sensitivity in a dual-axis accelerometer[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2017, 1(5): 1–4. doi: [10.1109/LENS.2017.2756108](https://doi.org/10.1109/LENS.2017.2756108).
- [14] 方奕庚, 彭春荣, 方东明, 等. 微型折叠式三维电场传感器[J]. *传感器与微系统*, 2016, 35(5): 67–69. doi: [10.13873/J.1000-9787\(2016\)05-0067-03](https://doi.org/10.13873/J.1000-9787(2016)05-0067-03).
FANG Yigeng, PENG Chunrong, FANG Dongming, *et al.* Micro 3-dimensional folding electric field sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(5): 67–69. doi: [10.13873/J.1000-9787\(2016\)05-0067-03](https://doi.org/10.13873/J.1000-9787(2016)05-0067-03).
- [15] 闻小龙, 彭春荣, 方东明, 等. 基于共面去耦结构的空间三维电场测量方法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(10): 2504–2508. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01921](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01921).
WEN Xiaolong, PENG Chunrong, FANG Dongming, *et al.* Measuring method of three dimensional atmospheric electric field based on coplanar decoupling structure[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(10): 2504–2508. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01921](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01921).
- [16] 李冰, 彭春荣, 凌必赟, 等. 基于遗传算法的三维电场传感器解耦标定方法研究[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(9): 2252–2258. doi: [10.11999/JEIT161277](https://doi.org/10.11999/JEIT161277).
LI Bing, PENG Chunrong, LING Biyun, *et al.* The decoupling calibration method based on genetic algorithm of three dimensional electric field sensor[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(9): 2252–2258. doi: [10.11999/JEIT161277](https://doi.org/10.11999/JEIT161277).
- [17] LING Biyun, WANG Yu, PENG Chunrong, *et al.* Single-chip 3D electric field microsensor[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2017, 12(4): 581–590. doi: [10.1007/s11465-017-0454-x](https://doi.org/10.1007/s11465-017-0454-x).
- 凌必赟: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为MEMS 3维电场传感器。
- 彭春荣: 男, 1979年生, 博士, 副研究员, 研究方向为MEMS电场传感器及系统。
- 任仁: 男, 1982年生, 博士, 副研究员, 研究方向为MEMS电场传感器标定和检测系统。
- 储昭志: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为MEMS电场传感器及制备技术。
- 张洲威: 男, 1993年生, 博士生, 研究方向为静电探测技术。
- 雷虎成: 男, 1993年生, 博士生, 研究方向为高灵敏MEMS电场传感器。
- 夏善红: 女, 1958年生, 博士, 研究员, 研究方向为微纳传感器与微系统技术。