

SOI 微型电场传感器的设计与测试

杨鹏飞^{*①②} 彭春荣^① 张海岩^{①②} 刘世国^① 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(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文研制了一种新型的基于 SOI (Silicon-On-Insulator) 微机械加工技术的高性能电场传感器敏感结构。为提高传感器的灵敏度和信噪比,该器件采用侧面屏蔽感应电极的独特设计方案,降低了传感器屏蔽电极的边缘效应;并基于有限元仿真,进一步优化了传感器敏感结构参数。在室温和室内大气压条件下,测试表明,测试量程 0~50 kV/m,传感器总不确定度优于 2%,分辨率为 50 V/m。

关键词: 电场微传感器;微机电系统(MEMS);绝缘体上硅(SOI);分辨率

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)11-2771-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01285

Design and Testing of a SOI Electric-field Microsensor

Yang Peng-fei^{①②} Peng Chun-rong^① Zhang Hai-yan^{①②} Liu Shi-guo^① Xia Shan-hong^①

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

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A novel and high-performance electric field microsensor is presented based on Silicon-On-Insulator (SOI) fabrication technology. In order to improve the sensitivity and SNR (Signal to Noise Ratio) of the sensor, the unique design of the shutter covering the side wall of the sensing electrodes is used, which reduces the effect of fringing fields of the shutter. Moreover, the electrode structure parameters of the sensor are optimized by Finite Element Simulation (FES). It is found that the new sensor had a resolution of 50 V/m at atmospheric pressure, a uncertainty of better than 2% in a electric field range of 0~50 kV/m.

Key words: Electric field microsensor; Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS); Silicon-On-Insulator (SOI); Resolution

1 引言

电场传感器在航空航天、智能电网、工业生产、气象以及环境监测等多个方面具有非常重要的应用。譬如,通过监测大气电场强度,可用于雷电预警和气象研究;通过监测输电导线、绝缘子等电力设施周围的电场分布,可用于电网中的高压输电线电压扰动监测^[1]、绝缘子缺陷探测^[2]、高压输电线结冰检测^[3]等。

目前国内外报道的基于 MEMS 技术的微型电场传感器主要有两种类型:静电激励微型电场传感器和热激励微型电场传感器,它们基本上都是采用表面多晶硅工艺制备,其敏感结构的屏蔽电极位于感应电极的上一层^[4-8]。受屏蔽电极边缘效应的影响,传感器感应电极上电荷感应效率偏低,导致它

的灵敏度难于进一步提高;这种上下屏蔽-感应的敏感结构也容易粘连。此外,热激励微型电场传感器的功耗比较大(几十毫瓦)。到目前为止,国内外已报道的热激励微型电场传感器和静电激励微型电场传感器的分辨率最好水平分别是 42 V/m^[4]和 100 V/m^[7],其中热激励微型电场传感器的分辨率最好水平测试是在 2.67 Pa 真空条件下完成的。

考虑到静电激励的稳定性与低功耗(<1 mW),本文提出了基于 SOI 微加工技术静电激励的电场传感器,传感器采用侧面遮蔽感应电极的独特设计方案,降低了传感器屏蔽电极的边缘效应对感应电极的影响;针对器件结构参数进行优化设计,进一步提高传感器的灵敏度。在室温和室内大气压条件下,SOI 微型电场传感器的精度优于 2%,分辨率为 50 V/m。

2 传感器的工作原理与结构设计

SOI 微型电场传感器的工作原理如图 1 所示,

2010-11-22 收到, 2011-08-19 改回

国家 863 计划项目(2011AA040405)资助课题

*通信作者: 杨鹏飞 yang330650591@126.com

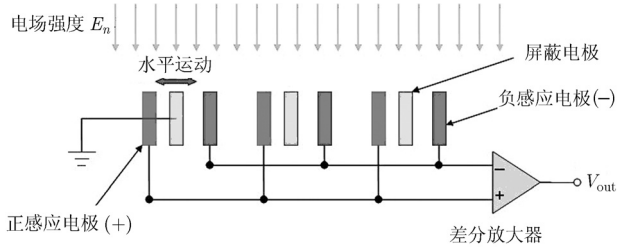


图 1 SOI 微型电场传感器的工作原理图

屏蔽电极与感应电极被设计在同一结构层，屏蔽电极接地。屏蔽电极水平周期振动时，使用其侧壁遮蔽感应电极，这种屏蔽方式与以往设计的感应结构相比降低了屏蔽电极边缘效应对感应电极的影响，提高了电极感应效率。当外加电场垂直于感应电极上方时，感应电极表面有感应电荷产生，根据高斯定理，感应电荷量为

$$Q = \epsilon |E| A_e \quad (1)$$

其中， ϵ 为真空介电常数， E 为外加电场值， A_e 为有效感应面积。

当传感器的屏蔽电极来回周期振动时，感应电极表面的电荷量发生周期性改变，产生与被测电场成正比的感应电流，然后经过跨阻放大器转化为与被测电场成正比的电压，因此可以通过测量输出电压反推出被测电场，从而达到测量被测电场的目的。为了减小共模噪声的影响，感应电极采用差分布置方式。

SOI 微型电场传感器的结构示意图如图 2 所示，传感器由激励电极、屏蔽电极、感应电极、支撑梁等部分构成。为了抑制激励电极与感应电极之间的耦合电容对传感器输出的影响，采用推挽式差分驱动方式。传感器的屏蔽电极和激励电极连接在一起，在激励电压 $V_d \pm V_a \sin(\omega t)$ 驱动下，屏蔽电极以频率 ω 水平周期振动^[9]，遮蔽左右两侧的感应电极。为提高传感器的灵敏度与信噪比，传感器需选择合适的激励频率，传感器的敏感结构也需优化分析，下面一节将详细介绍这两部分内容。

3 结构有限元仿真

(1) 可动结构模态仿真 为了降低激励电压，减

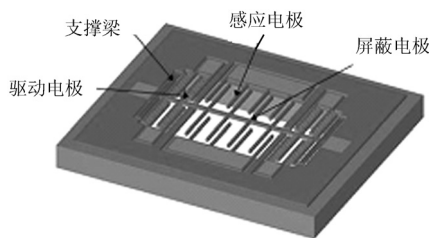


图 2 SOI 微型电场传感器的结构示意图

小传感器输出的本底噪声，获得比较高的信噪比，SOI 微型电场传感器需工作在谐振态。采用有限元仿真软件对传感器进行模态分析，选取水平振动的模态为传感器的工作模态，如图 3 所示，仿真所得谐振频率为 3.337 kHz。通过改变传感器屏蔽电极与折梁参数，使传感器的水平振动模态与其它模态频率间隔比较大，因此其它振动模态对传感器水平振动造成的干扰较小。

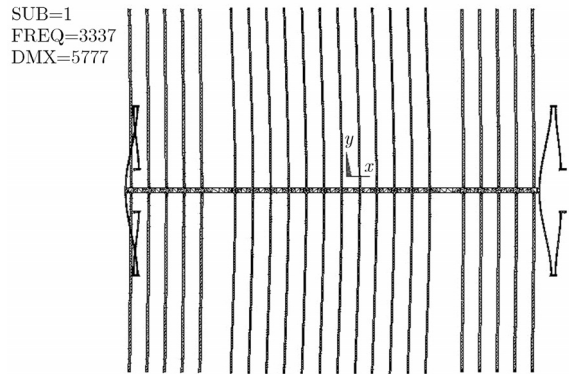


图 3 基于 SOI 微型电场传感器的水平振动模态

(2) 感应结构仿真 由于 SOI 微型电场传感器的灵敏度大小取决于感应电极上的电荷变化量，而电荷变化量与传感器敏感结构的电极尺寸及电极之间距离有很大关系，因此为了使传感器获得较高灵敏度，对器件的电极结构参数进行优化分析。采用有限元仿真软件，计算器件感应电极上的电荷改变量。在工艺规则容许的前提下，改变电极尺寸和电极之间距离，通过计算电荷改变量，选取电荷改变量最大时的电极尺寸和电极之间距离作为传感器感应结构设计参数，使传感器的灵敏度达到最优。

采用条状的电极结构作为器件的屏蔽电极和感应电极，在 10 kV/m 的匀强电场空间中，建立如图 4 所示的结构模型对传感器敏感结构进行局部仿真，其中 L 为感应电极长度， w_1 为屏蔽电极宽度， w_2 为感应电极宽度， x 为两感应电极之间距离。以中间

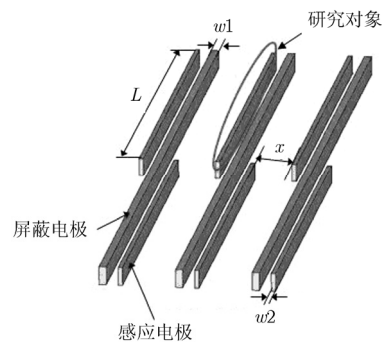


图 4 SOI 微型电场传感器感应部分有限元仿真结构示意图

位置的屏蔽电极及其左侧的感应电极作为研究对象，假设屏蔽电极左右振动，计算振动前后感应电极上的电荷改变量。传感器敏感结构主要有 3 个未定参数，它们分别是电极宽度 w_1 ， w_2 以及两感应电极之间距离 x ，下面将详细分析每一个未定参数。

电极宽度与传感器感应电极面电荷改变量 ΔQ 之间关系仿真结果如图 5 所示，从图中可以发现，电荷改变量 ΔQ 随着屏蔽电极和感应电极宽度的增加而减小，因此，当传感器的屏蔽电极和感应电极宽度越窄时，感应电极上的面电荷改变量 ΔQ 越大。这是比较容易理解的，因为当电极变窄时，终止在感应电极上表面的电场线逐渐减少，而终止在感应电极两侧壁的电场线则逐渐增加，因此在感应电极两侧壁的感应电荷量也随之增加。SOI 微型电场传

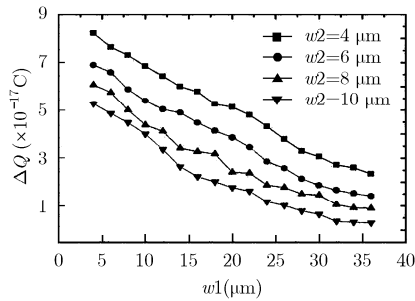


图 5 屏蔽电极、感应电极宽度与感应电极面电荷改变量之间关系曲线

感器的屏蔽电极主要是通过侧壁遮蔽感应电极的，所以，当器件的电极变窄时，在相同的振动幅值条件下，感应电极的电荷改变量 ΔQ 就会增大。

两感应电极之间距离 x 与电荷改变量密度 $\Delta Q/x$ 之间关系仿真结果如图 6 所示，由于传感器芯片的总面积 S 一定，选定电极长度 L 时，传感器感应结构部分的总宽度也被随之确定下来。随着两感应电极之间距离 x 的增加，传感器感应电极上的电荷改变量 ΔQ 可能也会增加，但由于感应结构的总宽度一定，所以布置在敏感结构上的感应电极条数就会减少，则传感器总的电荷改变量不一定增加，因此选择电荷改变量密度 $\Delta Q/x$ 作为分析对象比较合适。从图 6 可以看出，当两感应电极之间距离为 $20 \mu\text{m}$ 时，感应电极上的电荷改变量最大。

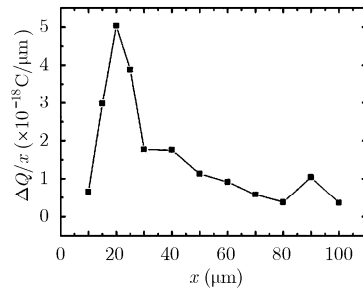


图 6 两感应电极之间距离与面电荷改变量密度之间关系曲线

在 SOI 微型电场传感器结构版图设计时，从传感器整体的布局考虑，在工艺规则容许的情况下，根据上述优化结果，选取优化后的屏蔽电极与感应电极参数 $8 \mu\text{m}$ 和电极之间距离 $20 \mu\text{m}$ 作为传感器感应部分的最终设计参数。

4 器件的制备、测试与分析

SOI 微型电场传感器采用标准化的 MEMS 加工工艺制作。由于器件结构层底部的衬底被完全刻蚀掉，所以，其屏蔽结构不会受到静电悬浮力的影响^[10]；也降低了器件的滑膜阻尼，提高了品质因数。图 7 为已加工的 SOI 微型电场传感器样机的 SEM 照片。

SOI 微型电场传感器输出的电流信号只有 0.1 pA 量级，而且有很强的本底噪声，为了提取有用信号，尽量避免噪声对测量带来影响，采用相关检测的方法对传感器输出信号进行解调。传感器系统框图如图 8 所示，驱动电极在外加激励下，驱动传感器的屏蔽电极水平周期振动，左右屏蔽正负感应电极，从而在传感器的正负感应电极上分别产生与外电场 E 成正比，相位差 180° 的交变电流信号 i_+ 和

i_- 。这两个交变电流信号在 I/V 转换器的作用下，变换为两个相位差 180° 的交变电压信号，然后在下一级增益中进一步差分放大，放大后的信号送入

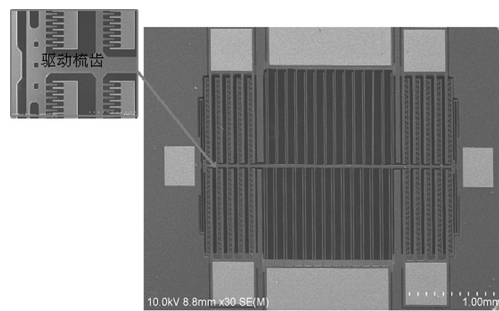


图 7 SOI 微型电场传感器 SEM 照片

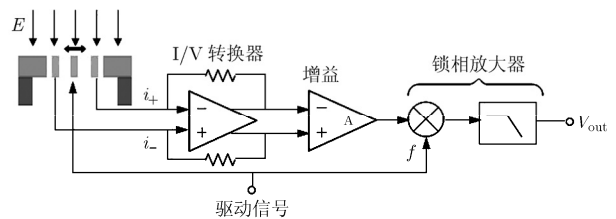


图 8 SOI 微型电场传感器系统框图

到锁相放大器中进行相关检测。

采用基于锁相放大器的微弱信号检测系统对 SOI 微型电场传感器进行标定测试^[8]。由于传感器要求工作在谐振态,因此首先对 SOI 微型电场传感器进行扫频测试,测试结果如图 9 所示,在室温和室内大气压条件下,传感器的谐振频率为 3.124 kHz,品质因数大约为 50。测试所得到的谐振频率比有限元仿真所得的结果小 213 Hz,谐振频率的变化占仿真值的 6.4%。这种差异主要是由空气阻尼以及直流偏置电压使传感器刚度软化^[11]造成的,因为空气阻尼,直流偏置电压都能使传感器的谐振频率降低,空气阻尼越大,所加的直流偏置电压越高,传感器的谐振频率降低越严重,而在器件模态仿真时没有考虑空气阻尼以及折梁刚度软化这方面因素的影响。

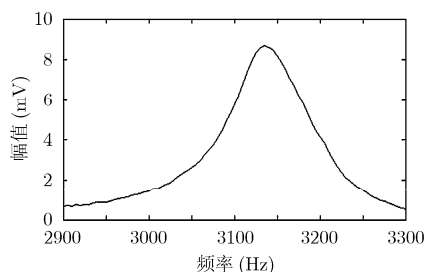


图 9 SOI 微型电场传感器的扫频曲线

图 10 是 SOI 微型电场传感器的电场响应曲线,测量的电场范围是 0~50 kV/m,往返 3 个行程,传感器的分辨率达到 50 V/m,灵敏度为 0.404 mV/(kV/m),精度优于 2%。

5 结论

本文设计并研制了一种 SOI 微型电场传感器初样器件,采用相关检测原理对该器件进行测试,测试结果表明,在室温和室内大气压条件下,传感器的品质因数为 50。在 0~50 kV/m 电场范围条件下,往返 3 个行程,×表示正行程,□表示反行程,传感器精度优于 2%,分辨率达到 50 V/m。目前,在进行 SOI 微型电场传感器优化设计及长期稳定性考虑的同时,已开展对该传感器应用的研究。

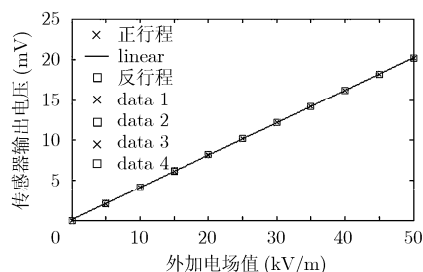


图 10 SOI 微型电场传感器的响应曲线

参考文献

- [1] Wijeweera G, Bahreyni B, Shafai C, *et al.* Micromachined electric-field sensor to measure AC and DC fields in power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, 24(3): 988-995.
- [2] Zeng S, Powers J R, and Newbraugh B H. Effectiveness of a worker-worn electric-field sensor to detect power-line proximity and electrical-contact[J]. *Journal of Safety Research*, 2010, 41(3): 229-239.
- [3] Barthod C, Passard M, Bouillot J, *et al.* High electric field measurement and ice detection using a safe probe near power installations[J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, 113(2): 140-186.
- [4] Bahreyni B, Wijeweera G, Shafai C, *et al.* Analysis and design of a micromachined electric-field sensor[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2008, 17(1): 31-36.
- [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.
- [6] Chen X, Peng C, Tao H, *et al.* Thermally driven micro-electrostatic fieldmeter[J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, 132(2): 677-682.

- [7] Peng C, Chen X, Bai Q, *et al.* A novel high performance micromechanical resonant electrostatic field sensor used in atmospheric electric field detection[C]. Proc. 19th IEEE MEMS, Istanbul, Turkey, Jan. 2006: 698-701.
- [8] Peng C, Yang P, Zhang H, *et al.* Design of a novel closed-loop SOI MEMS resonant electrostatic field sensor[C]. Proc. Eurosensors XXIV, Linz, Austria, Sep. 2010: 1482-1485.
- [9] Zhao T and Liang Y. New actuation method for push-pull electrostatic MEMS comb drive[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2003, 50(6): 1337-1339.
- [10] Tang W C, Lim M G, and Howe R T. Electrostatic comb drive levitation and control method[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1992, 1(4): 170-178.
- [11] Park Kyu-yeon, Lee Chong-won, Jang Hyun-suk, *et al.* Capacitive type surface-micromachined silicon accelerometer with stiffness tuning capability[J]. *Sensors and Actuators A*, 1999, 73(1-2): 109-116.

杨鹏飞: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为微型电场传感器、微弱信号检测等。

彭春荣: 男, 1979 年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为微型电场传感器、谐振式传感器和微系统等。

夏善红: 女, 1958 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为传感器与微系统技术。