MEMS 和 MOEMS 技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022061802

基于 MEMS 技术的仿生纤毛风速传感器的设计和仿真

卢建勋[1,2]，周南彦[1,2]，刘　武[1*]

（上海交通大学 1. 微米/纳米加工技术国家级重点实验室；2. 微纳电子学系，上海 200240）

摘　要： 设计了一种可以实现二维风速测量的电容式纤毛传感器，其特点为通过差分电容检测流速，传感器运动结构所对应的背硅被完全刻蚀。采用有限元分析软件，通过流体-固体-静电场的多物理场仿真，分析得到了传感器的差分电容与风速的变化关系。结合电容传感器 AD7746 的理论精度，计算得出传感器的风速灵敏度为 0.25 mm/s。此外，设计了基于 SOI 硅片的传感器微加工制备的工艺流程。

关键词： MEMS；流速传感器；仿真；差分电容；纤毛

中图分类号： TP212.1　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1075－05

Design and Simulation of Bioinspired Flow Sensor Based on MEMS Technology

LU Jianxun[1,2], ZHOU Nanyan[1,2], LIU Wu[1]

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Micro/Nano Fabrication;
2. Dept. of Micro/Nano Electronics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, CHN)

Abstract: A capacitive artificial hair sensor that enables two-dimensional wind velocity measurement was designed. The sensor detected flow velocity by differential capacitance, and the handle layer of wafer corresponding to the sensor motion structure was completely etched. The relationship between the differential capacitance of the sensor and the wind velocity was analyzed and obtained by multi-physics field simulation of fluid-solid-electrostatics field using finite element analysis software. With the theoretical accuracy of the capacitance sensor AD7746, the wind velocity sensitivity of the sensor is calculated to be 0.25 mm/s. In addition, a process flow for the microfabrication of the sensor based on SOI wafer was designed.

Key words: MEMS; flow sensor; simulation; differential capacitance; artificial hair

0　引言

流体的运动蕴含着丰富的信息，在自然界中，动植物可以依靠纤毛类传感器感受到气流和水流的变化，获取环境中的信息，为捕食或逃避天敌提供依据[1]。这些性能卓越的生物传感器为仿生纤毛传感器的研究提供了参考。目前，对于仿生纤毛传感器，按照制备方法分类有：精密机械加工和微电子机械系统（MEMS）加工。精密机械加工方式是先采用精密机械加工或 3D 打印制作独立组件，然后再组装构成完整的传感器[2]。MEMS 加工方式是采用微加工技术，通过光刻、刻蚀、淀积等工艺组合在基片上一体化制备出传感器。

典型的仿生纤毛微传感器有：仿生纤毛加速度计、仿生纤毛应力传感器和仿生纤毛流速传感器等。

Droogendijk 等[3]提出了一种基于 MEMS 微加工的仿生加速度计。他们在 SOI 片上刻蚀出电容结构，使用 SU-8 光刻胶制作仿生纤毛结构，用铝作为电极传导信号。该传感器的检测阈值为 0.10 m/s，动态范围大于 35 dB。

张东光等[2]采用类似捕蝇草的纤毛结构制作了一种仿生应力传感器。外界应力通过改变液体金属

收稿日期：2022－06－18.

基金项目：国家自然科学基金项目（61871266）；上海市科委专业技术服务平台项目（19DZ2291103）.

* **通信作者：**刘　武　　**E-mail：** liuwu@sjtu.edu.cn

介质层的形状，进而影响介电系数来改变电容的值。该传感器灵敏度可达 1.061 kPa^{-1}，电容初值为 2.57 pF，电容变化范围为 2.73 pF。

Dagamseh 等[4]设计了一种硅基差分电容式人工纤毛流速传感器阵列。阵列中每个传感器单元都拥有独立的纤毛和差分电容结构，可将流速的变化转化成差分电容的变化，在 3 kHz 带宽时可以达到 1 mm/s 的检测阈值。通过同时用独立的数据通路采集多个传感器的信号，然后进行数据的处理和分析，能够进行流场图的测量和绘制。陆城富等[5]提出了一种谐振式仿生流速传感器，使用纤毛结构和杠杆的放大作用提升灵敏度，最后将流速变化体现为双端音叉结构的频率变化进行检测。当流速范围在 0～6 m/s 时，测量速度的精度为±0.6 m/s。通过四传感器阵列计算得到的信号入射角度的精度为±7°。Maschmann 等[6]开发了一种压阻的仿生气流传感器，利用碳纳米管(CNT)的压阻特性，将流场的速度转化为测量电路中电阻的变化，测量范围为 0～10 m/s。Tucker 等[7]制作了一种仿生压阻流速传感器，该传感器的纤毛固定在硅悬臂梁上，悬臂梁在气流作用下发生形变，通过将硅悬臂梁的形变转化成电阻大小的变化，检测压敏电阻的阻值变化来表征流速。这种单传感器在空气中具有高达 2.16°的角度分辨率，在水中的检测流速分辨率达到 0.7 mm/s。

本文提出了一种可以测量二维流速的仿生纤毛传感器，当纤毛受到流场作用时，带动动梳齿在平面内移动，将流速信号转化为差分电容变化。该传感器正面有两个方向的差分电容结构，通过折叠梁和直梁与锚点连接，运动结构整体浮空，背面为十字形空槽。通过有限元仿真证明其在量程达到 90 m/s 时灵敏度为 0.25 mm/s。

1 结构设计和原理

为实现二维风速测量，本文设计了如图 1 所示的一种电容式传感器。传感器第一层是半径为 50 μm、高度为 500 μm 的纤毛[8-9]，通过紫外胶粘接固定在器件正中心。第二层是(20 nm/200 nm)铬/金电极，这一层的功能是实现与外部测量电路的电气连接。第三层是器件的核心结构层，包括 X/Y 方向的两组差分电容、连接纤毛的底座、连接梳齿的直梁和折叠梁等。电容采用不对称梳齿结构，每组差分电容由五十对梳齿组成，一侧间隙为 5 μm，另一侧间隙为 25 μm。第四层为二氧化硅 BOX 层，结构上连接上下两层硅结构，电气上起到隔离电流的作用。第五层是由支撑层硅刻蚀得到的传感器底座。

当传感器受 X/Y 方向风速作用时，纤毛带动传感器动梳齿沿 X/Y 方向移动，一侧梳齿间隙变小，引起电容值增大；另一侧梳齿间隙变大，电容值相应减小。

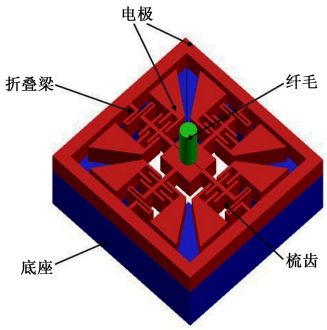


图 1 传感器结构示意图

2 仿真分析

有限元仿真技术将整个求解域划分成许多网格单元，在各个单元顶点处求解方程组，再通过插值法求解单元内部任一点的值。这种方法可以在加工前对器件的受力情况和变化过程进行仿真，帮助调整器件设计时的尺寸选择；对量程和灵敏度进行预估。本文传感器的仿真包括流体、固体力学和静电三个物理场多场耦合。

在仿真中，流场满足基于动量守恒的纳维-斯托克斯方程和基于质量守恒的连续性方程：

$$\begin{cases}\rho(u\cdot\nabla)u=\nabla\cdot[-pI+K]+F\\ \rho\nabla\cdot u=0\end{cases}\tag{1}$$

式中，ρ 为物质的密度，F 为施加的外力，u 为流体的速度，p 为流体压力。

固体力学场分析采用连续介质力学公式：

$$\begin{cases}0=\nabla\cdot(FS)^{\mathrm{T}}+Fv\\ F=1+\nabla\vec{u}\end{cases}\tag{2}$$

式中，F 为物体所受的力，ρ 为质量密度，u 为位移。

静电场分析中使用标量电势作为因变量，求解电场的高斯定律。

$$\begin{cases}\nabla\cdot\vec{D}=\rho_v\\ E=-\nabla v\end{cases}\tag{3}$$

式中，E 为电场强度，v 为电势，ρ 为极化电荷密度，D 为电位移场。

流固耦合分析中使用结构力学和单相流的接口，在固体和流体的边界上使用任意拉格朗日欧拉

方法将两个物理场耦合。

2.1　传感器关键尺寸分析

器件层硅的厚度、硅梁的宽度，以及梳齿间隙对传感器的量程和灵敏度有很大的影响。本节对这些因素进行分析。

梳齿电容的大小正比于极板面积，反比于极板间距，电容的变化主要是由于电容极板间距变化引起。极板面积为器件层厚度和梳齿长度的乘积。结合实际工艺考虑，本节将器件厚度分别设置为 15，30，40 和 50 μm 进行仿真分析。当器件层厚度减少时，单端电容近似线性减小。流速传感器输出为两组差分电容值 C，减薄器件层的厚度 h 会改变梳齿电容的极板面积，同时也会通过影响形变进而影响极板间距的变化。因此需要综合分析，选取合适的器件层厚度。图 2 为在不同流速、不同器件层厚度情况下，传感器差分电容的仿真计算结果，可见，随着厚度的增加，差分电容变化值也变大。由于流速较小时，30 μm 厚度的传感器差分电容相比 50 μm 厚度的器件相差不大，加工精度更高，因此选择 30 μm 厚度。

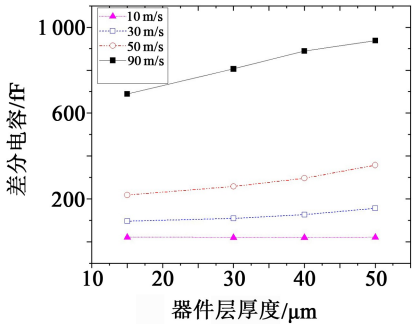


图 2　传感器差分电容与厚度关系

传感器受力和形变最大的地方发生在四周折叠梁处。结合以往加工经验，我们选取梁宽为 10 和 20 μm 的情况进行仿真。位于 X 轴负半轴的梳齿电容为 C_1，位于 X 轴正半轴的梳齿电容为 C_2，两者之差为 X 方向的差分电容。当流速设置为 10 m/s 时，具有 10 μm 宽度折叠梁的传感器更灵敏。

表 1　梁宽与差分电容

宽度/μm	10	20
单端电容 C_1 初值/fF	2 748.5	2 733.5
10 m/s 时 C_1/fF	2 738.7	2 722.8
10 m/s 时 C_2/fF	2 696.9	2 704.5
10 m/s 时差分电容/fF	41.8	18.3

对于变间隙电容传感器而言，梳齿间隙越小，其电容检测性能越好，然而梳齿间隙越小，微加工越困难。为此，结合工艺条件综合考虑，最后确定梳齿最小间隙为 5 μm，器件层厚度为 30 μm，梳齿对数为 50 对。如无说明，本文后续分析中均选取以上参数。

2.2　传感器流场和应力分析

本节首先对纤毛传感器进行流场分析，图 3 为传感器在 30 m/s 风速中经流场分析所得的流线分布，从中可以看到，单根纤毛结构基本没有改变流场的分布，为其应用于不干扰流场的测量提供了可能。

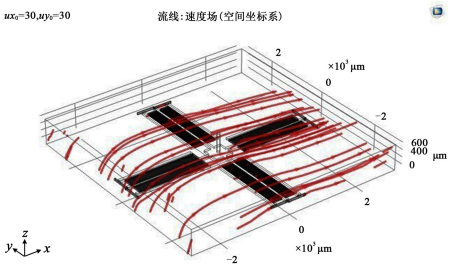


图 3　传感器周围流线图

然后，本文考虑到传感器所受重力和流场作用，进行了传感器应力分析。图 4 为在风速为 90 m/s 流场中传感器应力分布情况。可见，传感器的最大应力出现在折叠梁的弯曲处，其值为 20 MPa，小于硅的断裂应力 1 GPa；对于纤毛结构，其最大应力为 0.3 MPa，小于纤毛材料与基底的剪切结合力，小于紫外胶断裂强度 24 MPa。上述分析证明了传感器结构强度可以支撑其实现 90 m/s 的风速测量。

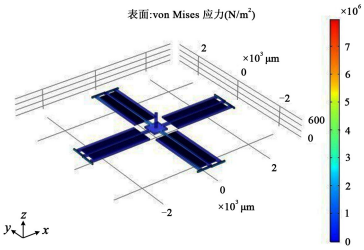


图 4　传感器应力分布图

2.3　传感器形变位移分析

为确定传感器的运动情况，设置仿真流速方向为 X 轴正方向。如图 5 所示，传感器上位移最大处为折叠梁弯曲处，直梁上各个点的位移基本相同，差分电容梳齿位移方向沿 X 轴方向。传感器动梳齿、直梁和纤毛底座位移大小和方向基本保持一致，基本为平行移动。

图 6 为仿真风速为 0～90 m/s 时，传感器动梳齿的位移情况。仿真结果表明，流速越大，梳齿的位移越大。当流速设置为 90 m/s 时，X 方向的位移

变化最大值为 1 μm，相当于 5 μm 梳齿间隙的 20%。由此可知即使当传感器发生较大幅度的变化，梳齿也不会相互碰撞，保证了结构良好的稳定性，流速的量程可以大于 90 m/s。

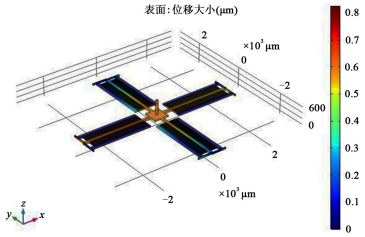


图 5 传感器位移变化图

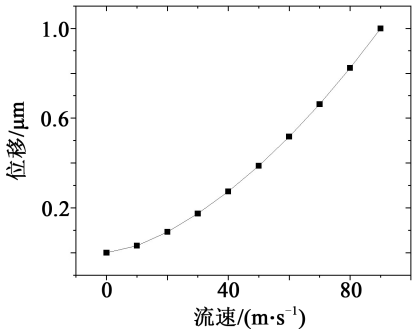


图 6 传感器梳齿位移流速关系图

2.4 传感器 *XY* 耦合性分析

为减少 *XY* 方向的耦合影响，设计了两组互相垂直的差分电容结构。结合上节分析，*X* 轴方向的梳齿主要敏感方向为 *X* 方向，位移主要由 *X* 方向流速决定，*Y* 方向流速对其影响不大。为判断 *Y* 方向的位移对差分电容变化的影响，本节对 *Y* 方向的电容进行了仿真。如图 7 所示，当 *X* 方向气体流速从 0 m/s 增加到 90 m/s 的过程中，*Y* 方向的差分电容变化也在增加，但数值远小于 *X* 方向的电容变化量。上述分析证明了传感器可以测量 *XY* 方向的变化，单向的输入并不会在另一个方向造成显著的影响。由于器件为对称结构，*Y* 方向变化趋势和 *X* 方向相同，证明器件在两个方向的耦合性较低。

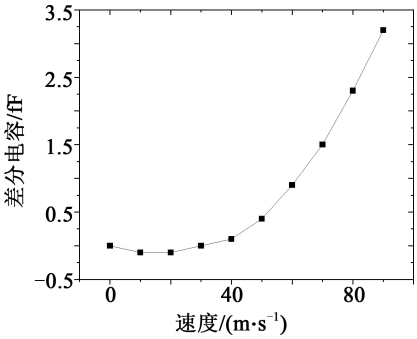


图 7 传感器 *Y* 方向差分电容变化

2.5 传感器差分电容分析

传感器检测电容是在器件层低阻硅上刻蚀的动梳齿和静梳齿组成的差分电容。通过多物理场耦合仿真可以得到传感器的电容。如图 8 所示，当仿真流速为 0～90 m/s，差分电容值随速度增大而增大。按此条件计算，当采用电容采集芯片 AD7746 对电容传感器进行测量时[10]，以 AD7746 的灵敏度 0.004 fF 为基准进行计算，可得单向灵敏度为 0.25 mm/s。

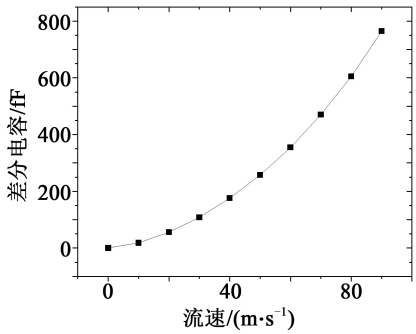


图 8 传感器流速和电容关系

当流体的流速沿 *X* 轴正向保持 90 m/s 时，将器件沿着 *Z* 轴旋转，随着器件和 *X* 轴所夹角度的增大，*X* 轴方向受到的力逐渐减小，动梳齿的位移也逐渐减小，形成的差分电容值逐渐减小，*Y* 方向受到的力逐渐增大，动梳齿产生的相对位移也随之增大，形成的差分电容值逐渐变大。仿真结果如图 9 所示。由此可见，传感器的输出电容信号包含输入流场方向的信息，可以被检测出来。结合两组差分电容的变化，可以得出输入流速的大小及方向。

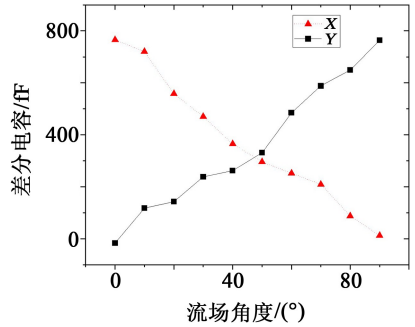


图 9 流场角度与差分电容变化

3 工艺设计

电容传感器的梳齿结构存在很多细小的间隙，通常采用的牺牲层释放制备方法存在加工过程中牺牲层释放效果不好，或引入一些灰尘，容易卡住梳齿，造成器件失灵的问题。为克服这一弊端，本文设

计将传感器运动结构对应的背硅层刻蚀掉，既可以降低间隙被卡死的风险，提升器件的可靠性，同时可以减少底部寄生电容的影响。

微加工采用 10.16 cm(4 inch)的 SOI 硅片作为基底，SOI 硅片的器件层硅厚度为 30 μm，电阻率为 0.001 Ω·cm，中间氧化层二氧化硅厚度为 2 μm，支撑层背硅厚度为 400 μm。

图 10 为设计的传感器制备工艺流程，具体为：(a)准备基底，清洗 SOI 硅片；(b)制备电极，在器件层表面磁控溅射 Cr 和 Au 金属层，并通过光刻、离子束刻蚀制备金属电极；(c)刻蚀器件层硅结构，通过深反应离子刻蚀(DRIE)刻蚀器件层硅，制作梳齿和悬臂梁等运动结构；(d)背硅刻蚀，采用深反应离子刻蚀刻蚀背面支撑层硅和中间的二氧化硅，形成下方的空腔结构；(e)连接纤毛，用紫外固化胶将纤毛粘在器件的中心位置。

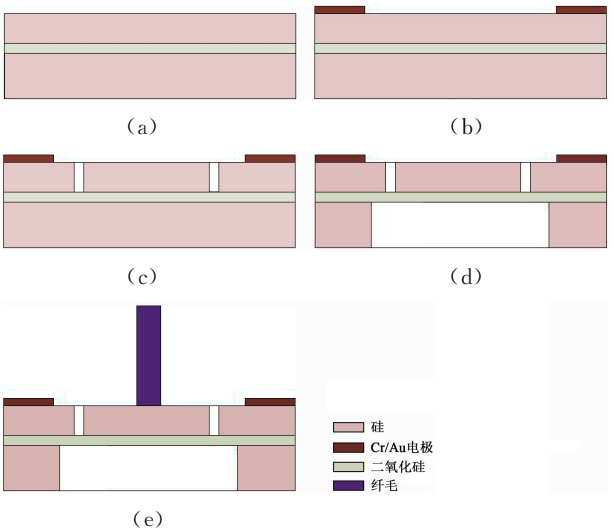


图 10　工艺流程图

4　总结

本文提出一种基于 SOI 工艺的二维流速传感器。通过多物理场仿真，确定了该传感器的关键尺寸，计算了差分电容变化与流场流速、角度的关系。为提升传感器的可靠性，设计了传感器运动结构下面的支撑硅被刻穿的微加工制备工艺流程。

参考文献：

[1] Triantafyllou M S, Weymouth G D, Miao J M, et al. Biomimetic survival hydrodynamics and flow sensing [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2016, 48(1): 1-24.

[2] Zhang Dongguang, Zhong Yaqi, Wu Yali, et al. Liquid metal elastomer with flytrap-inspired pillar structure for stress sensing[J]. Composities Science and Technol., 2021, 216: 109066.1-109066.7.

[3] Droogendijk H, de Boer M J, Sanders R G P, et al. A biomimetic accelerometer inspired by the cricket's clavate hair [J]. J. of Royal Society Interface, 2014, 11: 20140438.

[4] Dagamseh A M K, Wiegerink R J, Lammerink T J, et al. Towards a high-resolution flow camera using artificial hair sensor arrays for flow pattern observations[J]. Bioinspiration Biomimetics, 2012, 7(4): 046009.1-046009.12.

[5] 陆城富. 仿生毛发传感器控制和信号检的测电路关键技术研究[D]. 南京：东南大学，2019.
Lu Chengfu. Research on key technology of control and signal detection circuit of bionic hair sensor[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.

[6] Maschmann M R, Ehlert G J, Dickinson B T, et al. Bioinspired carbon nanotube fuzzy fiber hair sensor for air-flow detection[J]. Advanced Material, 2014, 26(20): 3230-3234.

[7] Chen N, Tucker C, Engel J M, et al. Design and characterization of artificial haircell sensor for flow sensing with ultrahigh velocity and angular sensitivity [J]. J. of Microelectromechanical Systems, 2007, 16(5): 999-1004.

[8] 严中稳，刘　武，梁贺龙，等. 仿生纤毛 MEMS 矢量流速传感器的结构设计及仿真分析[J]. 航空科学技术，2020，31(2)：72-76.
Yan Zhongwen, Liu Wu, Liang Helong, et al. Structural design and simulation analysis of biomimetic hair MEMS vector flow sensor[J]. Aeronautical Science & Technol., 2020, 31(2): 72-76.

[9] 梁贺龙，刘　武，许海军，等. 基于双稳态势能调节的仿生纤毛流速传感器[J]. 半导体光电，2021，42(1)：30-34.
Liang Helong, Liu Wu, Xu Haijun, et al. Biomimetic hair flow sensor based on bistable potential energy adjustment [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(1): 30-34.

[10] 许海军，刘　武，梁贺龙，等. 基于 STM32 和 ZigBee 的微电容在线检测系统[J]. 电子器件，2020，43(5)：1133-1137.
Xu Haijun, Liu Wu, Liang Helong, et al. Microcapacitance online detection system based on STM32 and ZigBee [J]. Chinese J. of Electron Devices, 2020, 43(5): 1133-1137.

作者简介：

卢建勋(1997—)，男，硕士研究生，主要研究方向为仿生微传感器设计；

刘　武(1976—)，男，博士，副研究员，主要研究方向为微机电系统、测控电路设计及信号处理、自动控制算法和微型无人机等。