光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023010202

# 自加热非晶锗热电阻MEMS流速传感器的制造与测试

赵韦良，崔　峰*

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

**摘　要：** 为扩大流速传感器的测量范围并降低功耗，制造并测试了一种基于自加热非晶锗薄膜热电阻的MEMS流速传感器，它是由嵌入氮化硅薄膜的四个非晶锗热敏电阻和一对环境测温补偿电阻组成。四个非晶锗热电阻同时作为自加热热源和测温元件，相互连接以形成惠斯通电桥。给出了MEMS工艺流程，微加工制造了尺寸为8.9 mm×5.6 mm×0.4 mm的流速传感器芯片。搭建了低流速和高流速气流通道实验装置，对传感器的惠斯通电桥施加50 μA的恒定电流(CCA)，实现了0～50 m/s范围内的流速测量。结果表明，传感器在低流速(0～2 m/s)时的灵敏度约为81.6 mV/(m/s)，在高流速(2～50 m/s)时的灵敏度约为51.9 mV/(m/s)，最大功耗仅约为1.03 mW。

**关键词：** MEMS；流速传感器；非晶锗薄膜热电阻；自加热；恒电流工作

**中图分类号：** TP212　**文章编号：** 1001－5868(2023)02－0175－06

## Fabrication and Testing of MEMS Velocity Sensor Based on Self-Heating Amorphous Germanium Thermistors

ZHAO Weiliang, CUI Feng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Micro/Nano Fabrication, Department of Micro/Nano Electronics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, CHN)

**Abstract:** In order to expand the measuring range of flow sensor and reduce power consumption of the sensor, a MEMS flow sensor based on self-heating amorphous germanium film thermistors was fabricated and tested. It was composed of four amorphous germanium thermistors and a pair of environmental temperature measurement compensation thermistors, which were embedded in a silicon nitride film. The four amorphous germanium thermistors acted as self-heating heat sources and temperature measuring elements at the same time, and were connected with each other to form a Wheatstone bridge. The MEMS fabrication process was given, and the size of 8.9 mm×5.6 mm×0.4 mm of the flow sensor chip was fabricated by micromachining. The low velocity and high velocity airflow pipeline experimental devices were built. With constant current (CCA) of 50 μA supplied to the Wheatstone bridge of the flow sensor, the flow velocity measurement of 0～50 m/s was realized by test. The results show that the sensitivity of the sensor is about 81.6 mV/(m/s) when measuring 0～2 m/s low flow velocity, and about 51.9 mV/(m/s) when measuring 2～50 m/s high flow velocity, and the maximum power consumption is only about 1.03 mW.

**Key words:** MEMS; flow velocity sensor; amorphous germanium thin film thermistors; self-heating; constant current operation

**收稿日期：**2023－01－02.

**基金项目：**航天科学技术基金项目(20C-JJ02-011)；上海市科委专业技术服务平台资助项目(19DZ2291103).

* **通信作者：**崔　峰　**E-mail：** sdcuifeng@sjtu.edu.cn

## 0 引言

近年来，测量气体或液体流速的流速传感器被应用于许多领域，如工业控制系统、航空航天、环境监测、医疗仪器和汽车发动机等。利用 MEMS 技术制造的流速传感器，具有小尺寸、低功耗、低惯性响应快、灵敏度高和高集成度等优点，已得到了越来越广泛的应用。

应用最广的 MEMS 流速传感器是热式流速传感器，主要基于两种工作原理：热损失风速计式原理和热温差量热式原理[1-3]。

基于热损失原理的流速传感器对于高速的测量灵敏度高，精度好，但因灵敏度低难以用于低速测量。而基于热温差原理的量热式流速传感器对微小流速灵敏度较高，但因输出信号饱和，其存在一个测速上限，难以用于高速的测量。为了扩大传感器的测速范围，所设计的流速传感器多结合了这两种测速原理，从而弥补单一测速模式的缺陷。

在传统的热式流速传感器中，热敏电阻材料通常采用 Pt，Ni 等金属[1-3]。由于金属的热阻系数(TCR)不高且电阻率较低，为实现宽量程的流速(高达几十米每秒)测量，传感器结构通常包含加热电阻和分布于加热电阻两侧的至少一对上下游测温热电阻[2]，以同时工作于热损失和热温差原理来分别测量更高流速和更低流速。尤其在高流速测量时，需要加热热电阻工作温度与流体温度之间保持较高的恒温差(30 K 以上)，所需功耗达上百毫瓦。

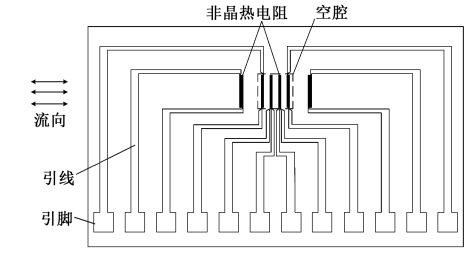
基于非晶态锗(a-Ge)半导体材料的热敏电阻的 TCR 约为 $-2\%/K$，这比大多数金属热敏电阻的 TCR 高约 5 倍[4]。这种热敏电阻表现出对温度的非线性依赖性，可以通过指数函数来很好地近似。此外，非晶锗材料的热导率约为 0.5 W/(m·K)，远低于多晶硅或热电偶材料的热导率，因此有利于实现传感器在更低的恒温差工作时获得宽量程的流速测量，并且降低功耗。采用非晶锗热敏电阻的流速传感器受到了国内外的重视[4-8]。已报道的基于非晶锗热敏电阻的流速传感器，其热敏结构多采用独立的金属加热器来提供热源[5-7]。

本文采用四个非晶锗热电阻同时作为自加热热源和测温元件，并组成一个惠斯通电桥来实现宽量程的流速测量和测向，不需要单独的金属加热器[8]。所设计制造的流速传感器采用硅作为基底材料，为了降低热量传导到基底，提高测温热电阻工作时的灵敏度，通过硅基底背面刻蚀空腔使热敏元件嵌入由氮化硅制成的悬空薄膜中。通过 MEMS 工艺流片，获得了尺寸为 8.9 mm×5.6 mm×0.4 mm 的微流速传感器芯片。搭建高流速、低流速气流通道实验装置，对传感器非晶锗热电阻组成的惠斯通电桥采用恒电流供电，实现了 0～50 m/s 范围内的宽流速测量，而传感器的最大功耗仅为 1.03 mW。

本文介绍了自加热非晶锗热电阻流速传感器的结构、微制造工艺，并搭建流速测量实验装置对所制造的流速传感器芯片进行实验测试和结果分析。

## 1 流速传感器的结构和工作原理

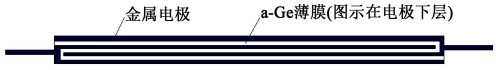
图 1(a)和(b)分别为 MEMS 流速传感器的整体结构俯视图和剖面图。传感器结构制作在硅衬底上，衬底背面刻蚀有隔热空腔，空腔的悬空氮化硅膜上嵌入四个 a-Ge 热电阻 $R_1$，$R_2$，$R_3$ 和 $R_4$；在隔热空腔左右两侧的硅衬底上设置两个 a-Ge 热电阻 $R_s$，用于测量环境流体温度的变化，以便于温度校正补偿。非晶锗热敏电阻结构为非晶锗薄膜与金属薄膜接触梳齿电极的复合结构，即每个 a-Ge 热电阻由长方形块状的 a-Ge 薄膜和金属叉指电极构成，如图 1(c)所示。这样非晶锗热阻就被梳齿电极分为三个并联的电阻，从而具有较好的温度灵敏度。这里将接触电极每个梳齿的宽度设计为 8 μm，叉指结构相邻齿宽间的间隙宽度也为 8 μm。使用以梳状方式彼此嵌合的两个电极，是为了在 a-Ge 薄膜内保证尽可能均匀的电流密度和温度分布。




(a) 传感器的整体结构俯视图




(b) 传感器的剖面示意图




(c) 非晶锗热电阻结构示意图

图 1 流速传感器结构示意图

该传感器只利用悬空膜上自加热的四个 a-Ge 热阻传感器组成的惠斯通电桥来实现宽量程的流速测量和测向[8]。如图 2 所示，传感器工作时靠近悬空膜中心的两个热电阻 $R_2$ 和 $R_3$ 形成电桥供电端之间的一个桥臂，而靠近流速入口和出口的两个热电阻 $R_1$ 和 $R_4$ 形成电桥供电端之间的另一个桥臂。它结合了风速计的热损失原理和质量流量量热计的热温差原理进行工作。

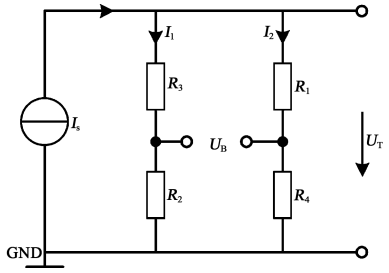



图 2　四个非晶锗热阻器构成的惠斯通电桥示意图

由于 a-Ge 热敏电阻是负温度系数，惠斯通电桥供电如果在恒定电压下工作若没有电流限制，则容易造成热电阻的热损坏。因此，电桥由恒定电流 $I_s$ 供电工作，则热电阻同时作为自加热热源和温度传感器，由于非晶锗的电阻率较大，只需施加几十微安培电流即可产生所需的工作功率（毫瓦级及以下）。在无流量时，四个热敏电阻生成的温度分布曲线相对于悬空膜中心对称，此时电桥处于平衡状态，电桥输出电压 $U_B$ 为零。当流速不为零时，对流热传输会使温度分布不再关于中心对称分布，则电桥的输出电压为：

$$U_B = I_s \cdot \frac{R_1R_2 - R_3R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \tag{1}$$

$U_B$ 的大小取决于热敏电阻的阻值即取决于流速，$U_B$ 的符号与流向有关，工作形式类似于量热计原理。由于当流速存在时，四个 a-Ge 热阻器都被冷却，电阻值都增加，因而随流速增大，整个电桥的总电阻也增大。由于恒流供电，桥路供电端的电压 $U_T$ 将是流速的单调函数，即可作为输出信号：

$$U_T = I_s \cdot \frac{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \tag{2}$$

式中，$U_T$ 与方向无关，类似于风速计的热损失工作原理，可测大流速。

## 2　流速传感器的微制造工艺

制造非晶锗流速传感器所使用的材料包括：硅、非晶锗、氮化硅等半导体材料，以及 Cr，Au 等金属材料。采用兼容多种材料的 MEMS 加工工艺，涉及薄膜材料制备、光刻图形转移、刻蚀等工序。首先在覆盖氮化硅薄膜的硅衬底上微加工制作非晶锗热敏结构、梳齿电极结构、引线和引脚结构，然后制作绝缘保护层，最后背面刻蚀硅片得到空腔结构。

由于非晶态锗的工艺温度超过 150 ℃，非晶结构将发生重结晶，导致其优异性能的损失。因此要求在非晶锗薄膜所有后续制造工艺的温度都限制在 150 ℃以下。

基于非晶锗热电阻的流速传感器的微加工制造工艺流程，如图 3 所示。

具体工艺步骤为：(a)准备双面抛光、厚度为 400 μm 的(100)硅片作为基底。硅片首先经双面热氧化生成厚度为 270 nm 的二氧化硅($SiO_2$)层，然后通过低压化学气相沉积(LPCVD)双面沉积厚度为 90 nm 的氮化硅($Si_3N_4$)层。

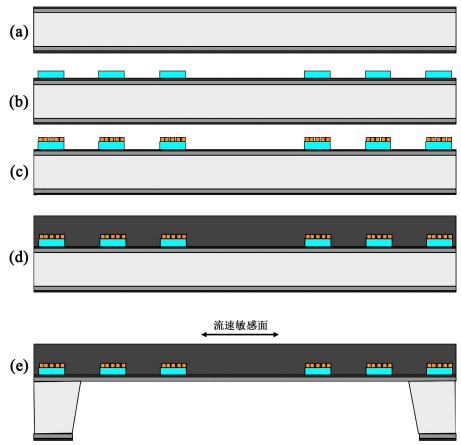



图 3　流速传感器的工艺流程图

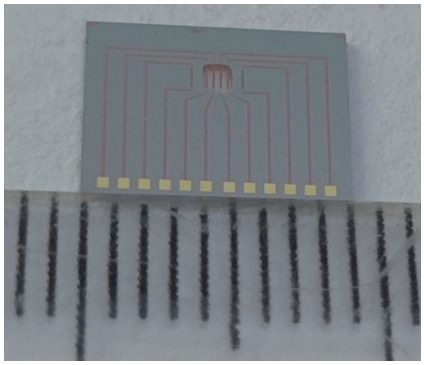
(b)第一次光刻得到沉积非晶锗薄膜的掩膜层。利用 Denton 多靶磁控溅射机沉积厚度为 250 nm 的非晶锗薄膜。最后，用 lift-off 工艺获得非晶锗薄膜图形，如图 3(b)所示。

(c)第二次光刻得到沉积 Cr/Au/Cr 复合薄膜的掩膜层。利用离子束溅射系统按顺序沉积得到 Cr，Au，Cr 薄膜，厚度分别为 50，200，50 nm 层，其中下层 Cr 层用来防止 Au 扩散到氮化硅中，上层 Cr 层增强与氮化硅层的粘合。最后用 lift-off 工艺获得传感器的接触电极、引线、引脚结构图形。如图 3(c)所示。为了确保非晶锗热敏电阻电阻率的长期稳定性，将硅片放入温控烘箱中进行退火处理：温度设置为 100，130，145 ℃，时间分别为 60，60，150 min。退火处理可以减少非晶锗的不饱和悬空键，使得热敏电阻的阻值永久增加。

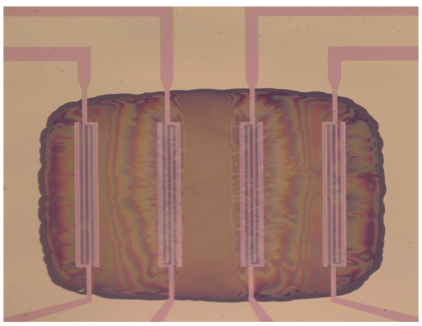
(d)利用电感耦合等离子体化学气相沉积设备沉积氮化硅薄膜,厚度为 1 μm,如图 3(d)所示。该沉积工艺温度约为 120 ℃,避免了非晶态锗的再结晶过程。然后进行第三次光刻,得到用于开刻蚀窗口以刻露出引脚的掩膜层。利用 ICP 反应离子刻蚀机刻蚀氮化硅至 Cr 金属层(露出引脚)。最后,在去铬液中刻露出 Au 引脚。

(e)第四次光刻在背面进行,用于氧化层开窗口作为硅片背面刻蚀硅空腔的掩膜层。利用 ICP 反应离子刻蚀机刻蚀氮化硅(90 nm)和氧化硅(270 nm)至硅层停止。接下来反应离子深刻蚀 400 μm 硅至正面的氧化硅层停止,如图 3(e)所示。

在工艺流片结束后,用激光切割机进行裂片,获得传感器芯片。图 4(a)为所制造的传感器芯片照片,尺寸为 8.9 mm×5.6 mm×0.4 mm。其中,传感器悬空热敏结构的显微镜照片,如图 4(b)所示。



(a) 传感器芯片照片



(b) 悬空敏感结构的显微镜图

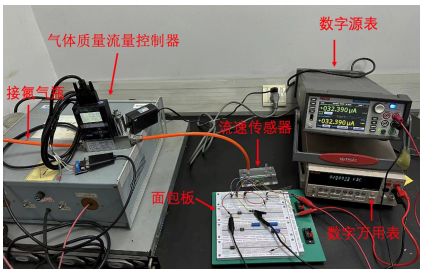
图 4 微制造的流速传感器芯片

## 3 流速传感器的流速实验测试

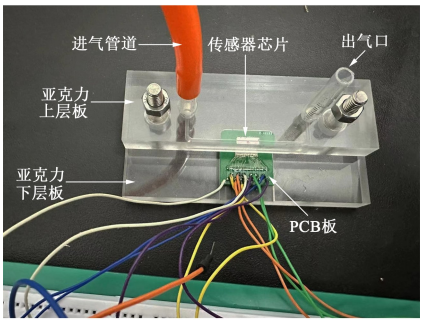
### 3.1 传感器的流速测量实验

在对传感器进行实验表征之前,必须设计合适的流速测量装置。本文设计的高流速的气流管道实验装置照片,如图 5 所示。

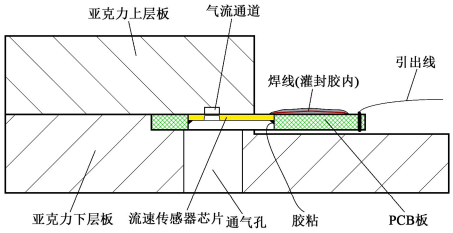
如图 5(a),所搭建的高流速测量整体装置包括自制的流速传感器气流通道装置、SLD-D 系列质量流量控制器(气源接氮气瓶,最大流量 5 SLM)、面包板(用于构建惠斯通电桥)、Keithley2450 数字源表、Keithley 六位半数字万用表。




(a) 测量实验整体装置图




(b) 自制的传感器气流通道装置照片




(c) 传感器悬空结构处的横切剖面示意图

图 5 高流速测量实验装置示意图

如图 5(b),自制的流速传感器气流通道装置,包括固定传感器的 PCB 板、亚克力下层板、亚克力上层板和紧固螺钉螺母。传感器悬空结构气流通道处的剖面示意图,如图 5(c)所示。传感器平齐胶粘在 PCB 板的方形孔内,并且二者焊线相连,焊线用环氧胶灌封。焊好线的 PCB 板放置在亚克力下层板的凹槽内,凹槽底部带有通气圆孔。亚克力上层板带有气流输入口、方形截面气流通道和气流出口。亚克力上层板和下层板通过螺钉螺母紧固。测流速的气流通道处于传感器热敏结构的正上方,气流通道截面为高 0.53 mm 宽 1.4 mm 的矩形。

因质量流量控制器对低于 1 m/s 的较低气流流速的控制灵敏度不足,这里采用了精密注射泵(型号 LSP02-1B)推动储气针管(储气筒直径 5 cm)来产生低流速气流,其他测量仪表不变。低流速的测量实

验装置如图 6 所示。

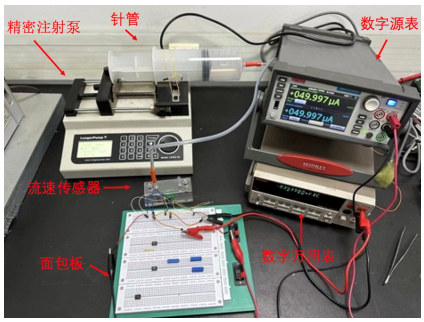



图 6　低流速测量实验装置图

气体流速通过调节注射泵或气体质量流量控制器的流量大小来产生，在已知管道横截面的情况下，通过简单的转换，可以得出管道内传感器处的平均流速。

如图 2，流速传感器的四个非晶锗热敏电阻组成的惠斯通电桥，由恒定电流 $I_s$ 供电。测量电桥的输出电压 $U_B$ 以及电桥供电端总电压 $U_T$ 分别作为传感器的低流速输出和高流速输出。

实验测试时，环境温度为 15 ℃左右，此时非晶锗热敏电阻的阻值约为 450 kΩ。通过数字源表输出恒定电流 $I_s=50\ \mu A$，记录 0～50 m/s 范围内不同流速下电桥输出的电压值。实验时，通过质量流量控制器控制输入流速范围为 1～50 m/s，其中流速范围为 1～5 m/s 时，取点间隔 1 m/s；流速范围为 5～50 m/s 时，取点间隔 5 m/s。较低流速范围 0～1 m/s 时，取点间隔 0.2 m/s，通过注射泵推动针管产生。通过交换输入输出口来改变流速方向。

### 3.2　实验结果及分析

传感器的输出信号 $U_B$ 和 $U_T$ 与输入流速 $v$ 的变化关系，分别如图 7 和图 8 所示。

从图 7 中可以看出，在较低的流速范围内（$v<2$ m/s），电压 $U_B$ 快速上升，随着流速的增加达到最大值，此后有一个微弱的单调下降的过程。它近似于是流速的奇函数，因此其符号可用于确定流向。

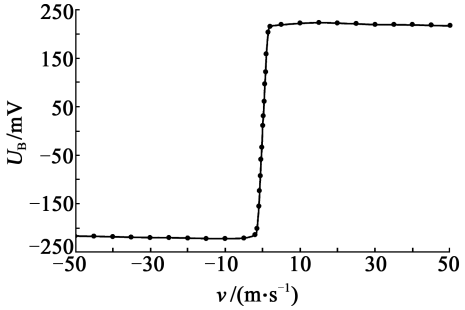



图 7　输出信号 $U_B$ 随流速变化的关系图

图 8 显示了流速为 0～2 m/s 时的输出信号 $U_B$，通过曲线拟合计算，传感器在 0～2 m/s 范围内的灵敏度约为 81.6 mV/(m/s)。

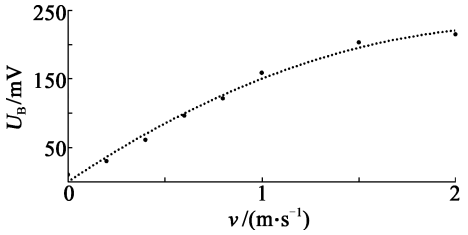



图 8　流速为 0～2 m/s 时输出信号 $U_B$ 的变化曲线

从图 9 可以看出，电桥两端的总电压 $U_T$ 在流速 $v>0$ 的测量范围内，呈单调增长。当流体反向流动时（$v<0$），$U_T$ 还是随着流速的增加不断增加，这是一个近似于对称的特性，其斜率随着流速的增加而减少。

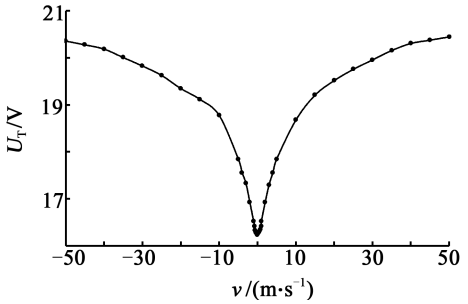



图 9　输出信号 $U_T$ 随流速变化的关系图

图 10 显示了流速为 2～50 m/s 时的输出信号 $U_T$，通过曲线拟合计算，传感器在 2～50 m/s 范围内的灵敏度约为 51.9 mV/(m/s)。

当流速为 50 m/s 时，电桥的总电压 $U_T$ 约为 20.55 V，此时传感器的最大功耗约为 1.03 mW。

因此，低流速范围（$v<2$ m/s）的测量和需要确定流动方向时，选择 $U_B$ 作为传感器的输出信号，否则选择 $U_T$ 作为传感器的输出信号。

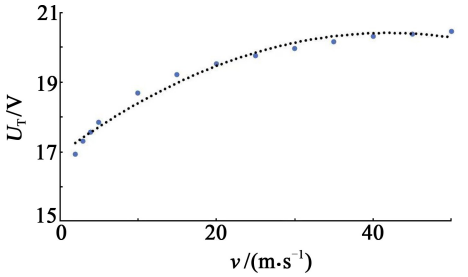



图 10　流速为 2～50 m/s 时输出信号 $U_T$ 随流速变化的关系图

## 4　结论

由非晶态锗制成的薄膜热敏电阻非常适合于小

型化流速传感器的构造，可以同时作为自加热热源和温度传感元件。本文设计的流速传感器，将悬空氮化硅薄膜上四个非晶锗热敏电阻相互连接以形成惠斯通电桥。采用恒电流供电，电桥输出电压 $U_B$ 的符号取决于流动方向，对低流速的变化非常敏感，作为低流速测量的输出信号；电桥总电压 $U_T$ 对高流速的变化非常敏感，作为高流速的输出信号。本文采用 MEMS 工艺流片制造了尺寸为 8.9 mm×5.6 mm×0.4 mm 的流速传感器芯片。搭建了高、低流速测量实验装置，采用数字源表对惠斯通电桥提供 50 μA 的恒电流，实现了 0～50 m/s 的宽量程、高灵敏度的流速测量。实验表明，低流速段(0～2 m/s)的灵敏度约为 81.6 mV/(m/s)，高流速段(2～50 m/s)的灵敏度约为 51.9 mV/(m/s)，传感器的最大功耗约为 1.03 mW。

因此，本文设计的基于自加热非晶锗热电阻的 MEMS 流速传感器不仅测速范围宽，还具有较高的灵敏度和较低的功耗。该流速传感器采用 MEMS 技术批量制造，成本低，在物联网等低功耗流速传感领域有广泛的应用前景。

后续工作将设计带温度补偿功能的测控电路，对输出信号进行滤波、二级放大等处理，从而进一步提高传感器的测量精度和灵敏度。

## 参考文献：


[1] Kuo J T W, Yu L, Meng E. Micromachined thermal flow sensors—A review[J]. Micromachines, 2012, 3(3): 550-573.

[2] 樊 冬，崔 峰，张卫平，等. 柔性 MEMS 流速传感器的测控电路设计与实验[J]. 仪表技术与传感器，2018，11：7-9，17.
Fan Dong, Cui Feng, Zhang Weiping, et al. Measurement and control circuit design and experiment of flexible MEMS flow sensor[J]. Instrument Technology and Sensor, 2018, 11: 7-9, 17.

[3] 张 元，李 辉. MEMS 热式微流量传感器发展综述[J]. 中国西部科技，2015，14(1)：13-15.
Zhang Yuan, Li Hui. Review of MEMS thermal micro flow sensor development[J]. Western China Science and technology, 2015, 14(1): 13-15.

[4] Cerimovic S, Talic A, Beigelbeck R. Bidirectional micromachined flow sensor featuring a hot film made of amorphous germanium [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(8): 084002.

[5] Yarali M, Khanna S K. Microfabrication of a variable range and multi-directionally sensitive thermal flow sensor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 220: 159-167.

[6] Kohl F, Beigelbeck R, Loschmidt P. FEM-based analysis of micromachined calorimetric flow sensors [C]// IEEE, Sensors, 2006: 1215-1218.

[7] Talic A, Cerimovic S, Beigelbeck R. FEM-analysis of 2D micromachined flow transduers based on aGe-thermistor arrays and a double bridge readout[J]. Sensors (Basel), 2019, 19(16): 3561.

[8] 冯剑玮，崔 峰，涂云婷，等. 基于非晶锗热电阻的柔性 MEMS 流速传感器的设计与仿真[J]. 半导体光电，2021，42(2)：168-173.
Feng Jianwei, Cui Feng, Tu Yunting, et al. Design and simulation of flexible MEMS flow sensor based on amorphous germanium thermistors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(2): 168-173.


## 作者简介：


**赵韦良**(1997－)，男，河南省洛阳市人，硕士研究生，主要研究方向为 MEMS 流速传感器；

**崔 峰**(1974－)，男，山东省日照市人，博士，副研究员，主要从事微机电系统方面的研究。