

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107630

新型双模热感微流量传感器的研究*

吴 慰, 关镐强, 李金贝奇, 王瑞金, 朱泽飞
(杭州电子科技大学机械工程学院 杭州 310016)

摘要:微流量传感器是有着功耗低、响应快、精度高等优点,在汽车工业、航空航天、生物研究、临床诊断等多个领域有广泛的应用。量热微流量传感器是通过测量加热器上下游温差来确定流速的,然而当流速超过一定范围后温差响应将不会随流速的增大,限制了流量传感器的量程。本文首先数值模拟了在大流率跨度下(0~160 SCCM)下温差对流速的响应,发现当扩散作用占主导时温差对流速的响应几乎是线性的;随着流速的增大,温差的响应逐渐降低,呈非线性;当流速进一步增加时温差的响应趋于饱和,量热工作模式失灵。然后,在数值模拟基础上提出了在大流速下采用热线工作模式,而中小流速下依然采用量热模式的双模式微热流量传感器。最后,采用0.18 μm CMOS-MEMS的工艺制作了微传感器,并以灵敏度为准则划定了工作模式的切换阈值,与标准流量计比较后发现误差在2%之内,符合实际应用要求,但量程扩大了一倍。

关键词:热感式;微流量传感器;双模;量热模式;热线模式

中图分类号: TH7 TH814 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Research on a novel dual-mode thermal microflow sensor

Wu Wei, Guan Haoqiang, Lijin beiqi, Wang Ruijin, Zhu Zefei
(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310016, China)

Abstract: Due to the advantages of low power consumption, fast response and high measurement accuracy, Micro flowmeter have a wide application in the fields of automotive industry, aerospace engineering, biological research, clinical diagnosis and so on. Calorimetric micro flowmeter determines the flow velocity value by measuring the temperature difference between the upper and lower reaches of heater. However, when the flow velocity exceeds a certain threshold, the temperature difference will not increase with the flow velocity, which limits the measuring range of the micro flowmeter. In this paper, numerical simulations for a wide range of flowrates (0.01-160 SCCM) are firstly carried out to investigate the response of temperature difference to flowrate. It is found that the response of temperature difference to flow velocity is almost linear when diffusion is dominant. With the increase of flow velocity, the response of temperature difference decreases gradually and is nonlinear. As the flow rate increases further, the response of temperature difference becomes saturated and the calorimetric operation mode fails. Secondly, on the basis of numerical simulation, a dual-mode micro-heat flow sensor is proposed, which adopts hot wire operation mode at high flow rate and calorimetric mode at medium and small flow rate. Finally, a micro flowmeter is manufactured by 0.18 μm CMOS-MEMS technology, and the threshold for mode-switch is defined by the sensitivity in experiments. Compared with standard flowmeter, the error is less than 2%, which is in line with the practical application requirements, but the range is doubled.

Keywords: thermosensitive; micro flow sensor; dual-mode; calorimetry mode; hot-wire mode

0 引 言

随着微机电系统(micro electro mechanical systems,

MEMS)的诞生和发展,各种微传感器,如压力传感器、声波传感器、应力传感器、生物传感器、流量传感器、热传感器等也有了高速的发展。微流量传感器是计量科学技术中应用非常广泛的一种传感器,可以分为热传感器、压电

收稿日期:2021-03-18 Received Date: 2021-03-18

* 基金项目:国家自然科学基金(11572107)项目资助

传感器和压阻传感器3种类型^[1],此外还有一些如超声波传感器等^[2],其中最经典的还是热式传感器。根据加热控制方法和评估模式的不同,热式传感器可以分成:1)热线式传感器,是通过恒定温度下加热功率的变化来测定流量;2)热膜式传感器,通过恒定加热功率下温度的变化来测定流量^[3];3)量热式传感器,它通过测量加热器周围温度变化来测定流量;4)飞渡式传感器,通过测量距离加热器一定距离的热脉冲来测定流量^[4]。

Tabata^[5]在1986年就制造了一个热感式流量传感器。发展到现在,经过众多研究人员的努力,解决了一系列的难题。

微流量传感器容易受到外界条件干扰而影响测量结果。基于此,Dong等^[6]提出了一种在加热气体传感器上增加障碍物以减小气体流量对传感器的影响的方法,得到了不同台阶下敏感组分附近气体流量的分布。Valizadeh等^[7]研究了具有隔离特性的热量热气体流量计。基于流体在微纳米尺度下的热传感,Yang等^[8]讨论了降低系统噪声、提高信噪比以及使被测对象的实测数据与实际温度之间的差异最小化的可行方法。

微流量传感器不是一开始就具有功耗低、响应快、测量准等优点的,都是通过前人的不断改进才达到。Lee等^[9]使用非对称位置的温度传感器改进了微热流量传感器的性能。Xu等^[10]对热阻式微量热流量传感器进行了改进,成功地设计制作了薄膜式传感器以及带有温度补偿的热阻微量热流量传感器^[11]。Lammerink等^[12]研发了一种恒功率微通道液体流量计。Yi等^[13]提出了一种基于恒功率模式的封装式风传感器的建模方法,并建立了在CP模式下运行的盒式风传感器模型。

随着新技术的不断出现,微流量传感器与之融合,诞生出了一些新的技术成果。Zhu等^[14]提出了一种基于玻璃回流工艺的鲁棒、低功耗和宽量程MEMS热风传感器。Que等^[15]的新式热线二维流量计使用了数据融合算法。Han等^[16]基于生物毛发细胞的原理开发了一款高宽比睫毛结构机械式受力感测器的流动计。Sturm等^[17]研究了柔性衬底上基于膜的热流传感器,提出了一种灵活的热流传感器方法。Xue等^[18]使用硅玻璃基微制备宽量程热分布气体流量计。Wang等^[19]进行了基于温度平衡模式的陶瓷MEMS热风传感器温度效应研究。贾振安等^[20]还研制出了光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)热式液体流量传感器。

通过前人的不断努力,目前量热式微流量传感器具有功耗低、响应快、精度高等优点,但其输出信号在大流量下会趋于饱和,从而降低灵敏度,甚至完全失灵^[21]。为此,提出了一种双模式微流量传感器,小流量时用量热式工作模式,而大流量时用热线工作模式,二者有机地结合,以拓宽量程。

1 微流量计的建模

1.1 几何模型

图1为热式流量传感器的几何模型,流体微通道由上部的MEMS晶圆和下部的互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)晶圆键合后得到,微通道进出口高度 $d_1 = 52 \mu\text{m}$,进出口部分长度各为 $200 \mu\text{m}$ 。微通道的中部设置有1个加热器(heater)和二个对称分布的探测器(detector),中部微通道高度 $d_2 = 80.2 \mu\text{m}$,长度 $l_m = 400 \mu\text{m}$,高度扩展比 $d_2/d_1 = 1.54$ 。整个计算域总长度为 $800 \mu\text{m}$,垂直纸面(z 轴)方向为 $400 \mu\text{m}$,计算是三维的。加热器和探测器所在的固体域长度 $2L = 180 \mu\text{m}$,其中加热片横向尺寸 $2W = 31.2 \mu\text{m}$,加热器端侧到探测器中心距离为 $D = 32 \mu\text{m}$ 。加热片产生热量向上游和下游扩散,通过测量上下游的温差可以计算出经流速度。

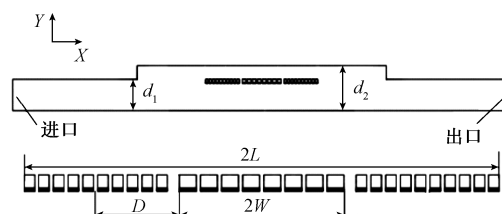


图1 流量传感器的结构

Fig. 1 Flow sensor structure

1.2 数值模型

当空间尺度缩小到了微米甚至是纳米时,需要考虑流体连续性问题^[22]。一般可以用克努森(Knudsen)数来评估:

$$Kn = \frac{\lambda}{D_h} \quad (1)$$

其中, λ 流体平均自由程; D_h 是特征长度尺度,根据图1的几何模型,特征长度 $200 \mu\text{m}$,空气在 1 atm 下的平均自由程约为 $65 \mu\text{m}$, Kn 远大于 0.01 ,可以认为介质是连续的。

数值模型包含连续性方程、动量方程和能量方程,其中连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = S_m \quad (2)$$

其中, ρ 是密度; \vec{U} 是速度矢量; S_m 就是质量源项。不考虑体系的加速度,动量守恒方程可为:

$$\frac{\partial (\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

其中, ∇p 表示压强梯度矢量; \vec{g} 表示重力加速度矢

量; \vec{F} 为力源项; $\vec{\tau}$ 表示应力张量, 能量方程为:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau} \cdot \vec{U})) + S_h \quad (4)$$

其中,

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{U^2}{2} \quad (5)$$

式中: E 表示内能与动能之和; h 表示比焓; J 表示组分的扩散通量; K 表示导热系数; T 表示温度。等式左边第一项表示的是有限体内内能与动能随时间变化,第二项表示流体输运引起的内能与动能变化,第三项表示压力梯度做功;等式右边括号内第一项表示导热,第二项表示浓度梯度引起的质量扩散,第三项表示的是粘性耗散。

1.3 模型验证

为了验证数值模型,模拟计算了一维流动模型,计算结果如图 2 所示。与一维理论模型相比的仿真数据结果偏差很大,这是因为采用了积分平均的边界层^[23],上游边界层的扩散作用被高估,从而使温度对输运的线性响应区域扩大。引入修正因子后结果与仿真一致^[24],验证了模型的有效性。

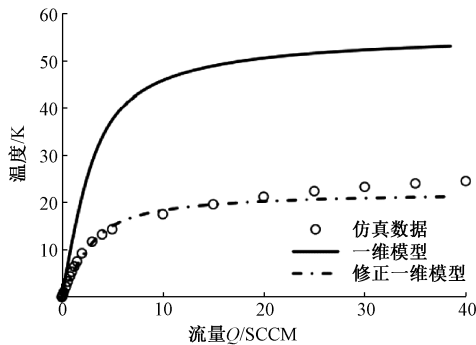


图 2 仿真与一维模型比较

Fig. 2 Comparison of numerical results and theoretical results

2 数值模拟结果与讨论

流率的单位使用的是标况毫升每分钟(standard-state cubic centimeter minute, SCCM) 模拟计算了 0.01 ~ 160 SCCM 流率下上游和下游探测器的温度及其温差,图 3 可见,上游探测器温度随流率增大而下降,随后下降趋势趋缓,在大流率时因粘性耗散增大而略有上升;下游探测器温度随流率快速升高,而中大流率时温度升高趋缓。综合两者,上下游温差在小流率时随流率增大而增大,当流率超过一定数值后温差不再随流率增加,甚至有所下降。如果定义灵敏度:

$$S_T = \frac{\Delta T_{diff}}{\Delta Q} \quad (6)$$

图 3 显示温度灵敏度 S_T 随流率 Q 的变化,从图 3 可以看出,灵敏度随着流速的增大而减小,在 60 SCCM 之前探测器的响应较为灵敏,但在约 70 SCCM 后由灵敏度出现了负值,这表明探测器失灵。从图 4 可以看出,温差响应可以划分三个区域:小流率时的线性响应、中等流率的非线性响应和大流率时的负响应。

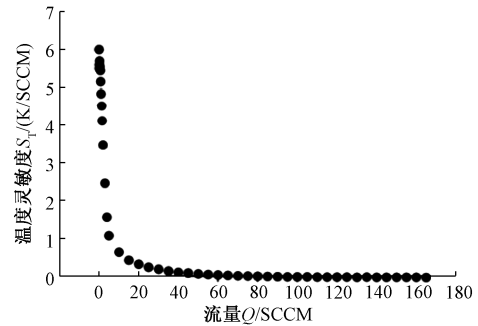


图 3 温差灵敏度与流量的关系

Fig. 3 Relationship between temperature sensitivity and flow rate

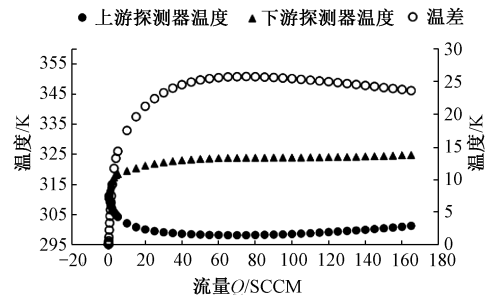


图 4 温度、温差与流量的关系

Fig. 4 Relationship between temperature, temperature difference and flow

2.1 小流率时的线性响应

如图 5 为 0~2 SCCM 时温差对流量的响应,可以看出温差响应几乎是线性的。图 6 显示,小流率时流率对温度分布的干扰不明显,这时可以将它视为线性的,称为“线性区”。理论方面,Elwenspoek 与 Wiegink 根据一维泊松方程,应用摄动理论,忽略二阶扰动情况下,得到小 Re 下温度分布的近似关系解和上下游温差与 Re 的线性关系^[25]。

2.2 中等流率时的非线性响应

如图 7 为流率 2~70 SCCM 时温差对流率的非线性响应。当 $Q > 30$ SCCM 时,温差增速明显放缓,此时已达最大温差的 90%,称为“减缓区”。随着流率的增大温差

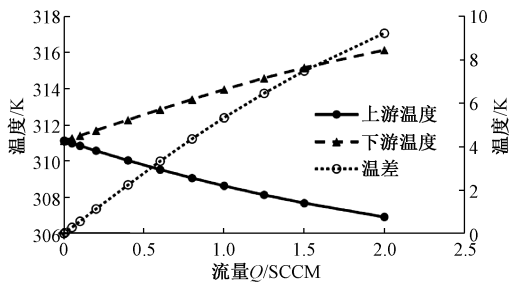


图5 小流量下温度、温差的线性响应

Fig. 5 Linear responses of temperatures and temperature differences at lower flowrate

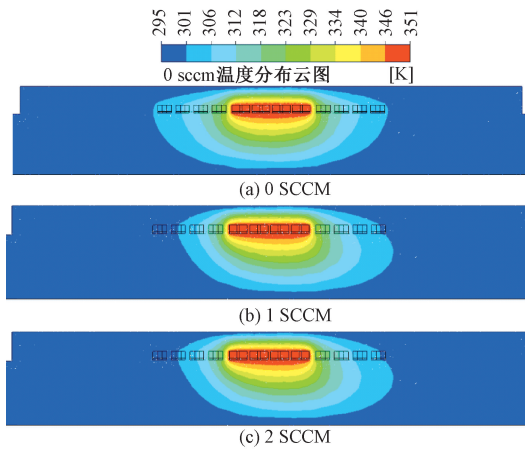


图6 不同流量下的温度分布云图

Fig. 6 Temperature clouds at various flowrates

也是增大的,接近于指数函数,可以使用层流下等温平板流动的局部换热来解释^[26]:

$$Nu_x = 0.332Pr^{0.33}Re_x^{0.5} \quad (7)$$

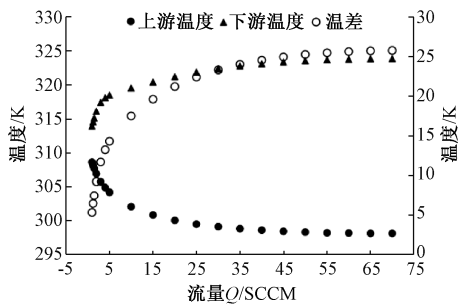


图7 中等流率下温度和温差响应

Fig. 7 Responses of temperatures at moderate flowrate

2.3 高流速时温差的响应

图8为70~165 SCCM时温差对流率的响应,图8表明,温差会随着进口流率的增加反而下降,称为“反升区”。为探究其反升机理,考察60、70、75 SCCM 3种流率下(即从“减缓区”到“反升区”临界流率下)的温度分布。

从图9可见,流率为60 SCCM时近一半的探测器所在区域温度为293 K,而流率增加到75 SCCM时温度全部高于298.9 K;相反,下游探测器的区域的温度变化则没有那么明显。原因应该是流率大于某一个临界值时,上游探测器区域的粘性耗散产生热比加热器热的对流扩散更占主导。图10给出了固体域($y = -7.2 \mu\text{m}$ 和 $y = 1 \mu\text{m}$)周围粘性耗散 φ 的沿程分布($x = -100 \sim 100 \mu\text{m}$)。由于固体壁面非滑移的特性, φ 在上游探测器的前端($x = -90 \mu\text{m}$)有一个突跃,因为气体在很大的粘性力下产生压缩形变。总体来说探测器下表面($y = -7.2 \mu\text{m}$)的粘性耗散比上表面($y = 1 \mu\text{m}$)的大(图10中圈出了各个条件下粘性耗散的最大值);但是在探测器前翼处的粘性耗散在不同流率时有所不同,当 $Q = 65 \text{ SCCM}$ 时下表面粘性耗散大于上表面,而 $Q = 75 \text{ SCCM}$ 时则上表面粘性耗散更大。即当流率超过一定值时,上游探测器前翼,特别是上表面的粘性耗散的急剧增大是引起上下游温差反升的根本原因。

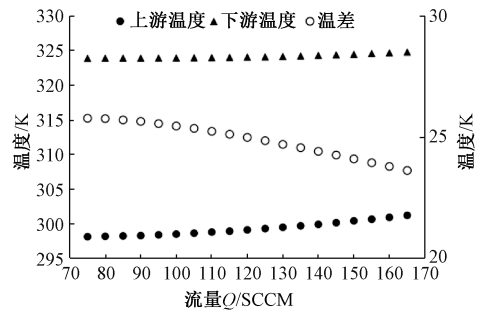


图8 反升区探测器对流率的温度响应

Fig. 8 Temperature responses at greater flowrate

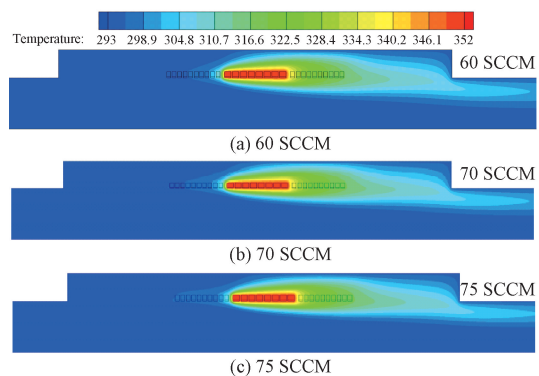


图9 不同流量下的温度分布云图

Fig. 9 Temperature clouds at various flowrates

此外,可以使用布林克曼数(Brinkman number)来评估粘性耗散的影响,经过计算可得75 SCCM下的Br数接近0.7,说明粘性与扩散作用的大小同阶,不可忽略。

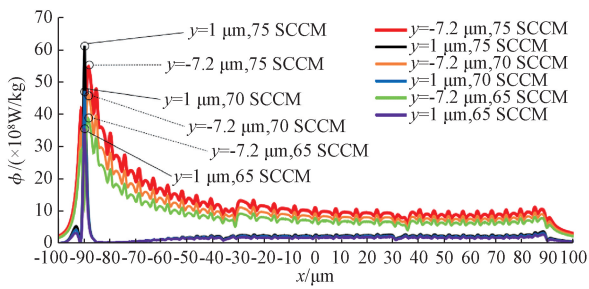


图 10 不同流率下的粘性耗散

Fig. 10 Viscous dissipation for various flowrates

2.4 三个区的流场分析

为了进一步分析不同流率下的温差的响应,计算了 1、10、120 SCCM 3 种情况下的流场,图 11 为 3 种流速下的流线图。从图可以看出:由于通道中部的热感流量传感器将流动分为上下两个区域,下部的区域大、流速快;另外由于进出口区域中间区域有一个“骤扩区”,由于骤扩区回引起流动分离,产生涡流^[27]。小流率时由于涡流对探测区流场和温度没有影响,因此温差的响应是线性的。中等流率时由于涡旋的逐渐增大,对探测区的流场和温度的影响逐渐加大,破坏了温差的线性响应,进入了“非线性”响应区。大流率时涡旋已经扩展到探测区,此时在上游探测器前端的上部产生一个小的涡流区,会增加此处的流动阻力,加大粘性耗散,从而使该区域的温度会随流率的增大,反而升高,使温差进入“反升区”。

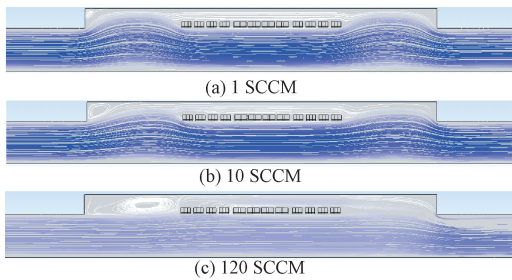


图 11 不同流量下的流线图

Fig. 11 Streamlines at various flowrates

为了更清晰显示结构对流动的影响,图 12 显示 x 轴向速度云图(减去平均流速),非红区域是存在负速度的,即存在与主流相反的流动。流率为 1 SCCM 时,负流区域很小,流动很快能重新达到充分发展,也不会影响探测区。流率为 10 SCCM 时,负流区域增大,流动重新充分发展区域可以到达探测区域,会影响探测区的流动和温度。流率 120 SCCM 时,负流区域到达探测区,在上游探测器的前不会额外产生脱流,将会弱化局部的换热,致使上游探测区的温度会随流率增大反而

有所增大,产生了“反升”现象,此现象与前期粘性耗散分析结果一致,在高流率时,会在上游探测器上表面产生粘滞区。

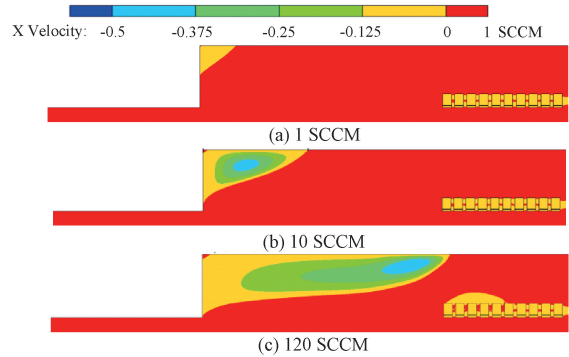


图 12 不同流量下的速度云图

Fig. 12 Velocity cloud at various flowrates

2.5 加热器功率对流量的响应

由 2.3 和 2.4 可知,大流率下探测器的上下游温差对流量响应的响应产生了“负升”现象,温差工作模式由于上游探测器前翼的粘

性耗散急剧增加而失效。幸运的是加热器的功率依然随流量增大而增大如图 13 所示。大流量下,加热片的热耗散依然在增加,额外的响应量程能够得到实现,尽管曲线趋于平缓,但在 10~165 SCCM 范围内的拟合度很好, $P=0.868 2 Q^{0.4667}+2.204 0$ 。所以,小流率下采用更灵敏的上下游探测片温差,而大流率下则可以选择加热片的功率,采用双模的工作方式。

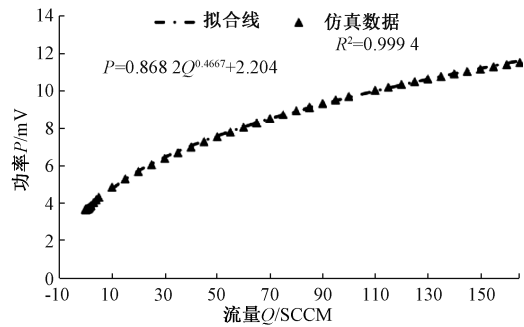


图 13 加热器对流量的功率响应

Fig. 13 Power response of heater to flowrate

3 实验研究

3.1 流量传感器制作

流量传感器芯片采用 0.18 μm CMOS- MEMS 工艺加工而成。具体步骤为:以经氧化处理的绝缘硅晶圆为衬

底,沉淀一层绝缘硅层 SOI,再依次沉积厚为 50 nm 的氮化铝 (AlN) 籽晶层、200 nm 的钼 (Mo) 层、1 μm 的 AlN,构成了压电叠层如图 14 (a) 所示。最底端是二氧化硅 (SiO₂) 层,用作 AlN 层与 Mo 层图案的掩膜。接着进行深层反应离子刻蚀,除去位于掩膜外的压电叠层与 SOI 层,然后沉积铝 (Al) 层与锗 (Ge) 层,并形成图案。Al 层将作为 MEMS 晶圆的电极接头,Ge 层则用于 MEMS 与 CMOS 晶圆之间的键合。图 14 (b) 所示是由此得到的 MEMS 晶圆。其后,把 CMOS 晶圆和 MEMS 晶圆通过 M6:Al 层与 Ge 层键合在一起如图 14 (c) 所示。最后在 MEMS 晶圆上开 510 μm 的圆孔作为流体的进出口如图 14 (d) 所示。

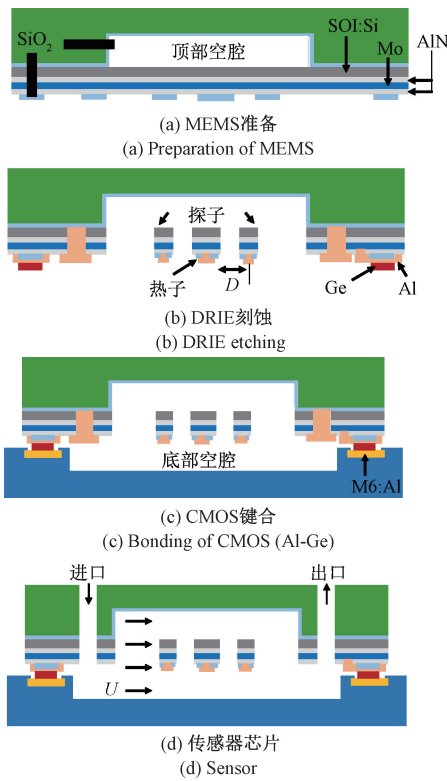


图 14 传感器制造过程
Fig. 14 Manufacture process of sensor

3.2 实验台搭建

实验装置由液氮罐、阀门、管道、参考流量计和双模热感流量计组成如图 15 所示,测试温度 22℃,测试气体微氮气。氮气经流量控制阀后,通过两个参考流量计后流入双模式热感流量计。参考流量计选用 Honeywel 的 HAFBLF 0050CAAX5 (5 V DC, 2.5%, 50 SCCM) 和 HAFBLF 0200C4AX5 (±2.5%, 200 SCCM)。前者能在小流率下的提供精准的模拟信号,而 0200C4AX5 则用于大流率情况,Arduino Yun 的数字信号接口相连。

0050 CAAX5 则与 34401A (Agilent 公司) 数字万用表串联。双模流量计芯片输出的模拟信号在经过放大后传给 Arduino Yun 的模拟信号端口,最后从微控制单元 (MCU) 读取信号,其模拟信号端口有 10 bits 的分辨率,在 3.3 V 参考电压下,能达到近 3 mV 的精度。

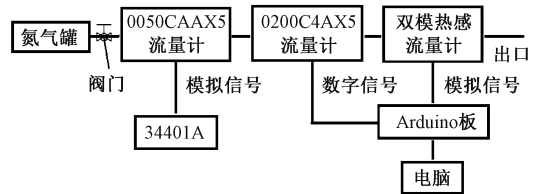


图 15 双模式热感流量传感器实验台
Fig. 15 Dual mode thermal flow sensor test bench

3.3 实测结果与比较

首先对双模流量计进行校准^[28],同时读取探测器和加热器的输出电压,将它们与参考流量计进行对比,并拟合出曲线。

如图 16 所示,在 0~49 SCCM 时,探测器输出的信号灵敏度高,但在 64 SCCM 之后灵敏度会随流量的增大而降低,直至彻底失灵,但是加热器电压则一直在增加。从图 16 可知,以 49 SCCM 为临界流率 Q_c ,在 49 SCCM 前采用探测器温差响应模式,49 SCCM 之后采用加热器的功率响应模式。Arduino 在流速小于 Q_c 时输出探测器温差来衡量流率,大于 Q_c 时则输出加热器功率来衡量流率。温差模式是根据 50 SCCM 以下的校准点分段线性插值得到如图 17 所示,而功率模式则根据 48 SCCM 以上的校准点用指数函数拟合得到如图 18 所示,由此两者之间的过渡区会被很好的涵盖。通过与参考流量计参考流量 Q_r 比较可知,双模式热感流量计偏差可以小于 2% 如图 19 所示,满足实际工程应用的要求。

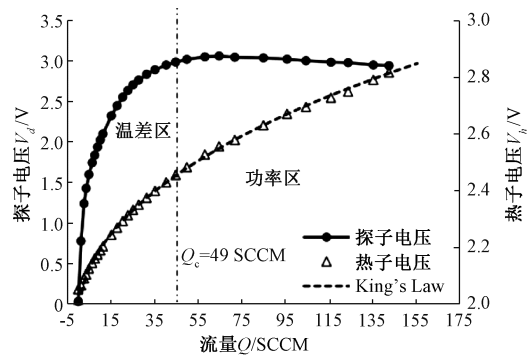


图 16 校准曲线
Fig. 16 Calibration curves

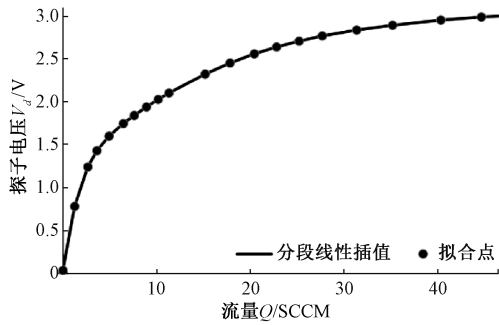


图 17 温差区拟合曲线

Fig. 17 Fitting curve of calorimeter modes

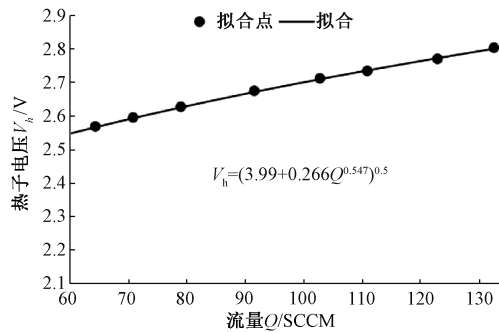


图 18 功率区拟合曲线

Fig. 18 Fitting curves of hotline modes

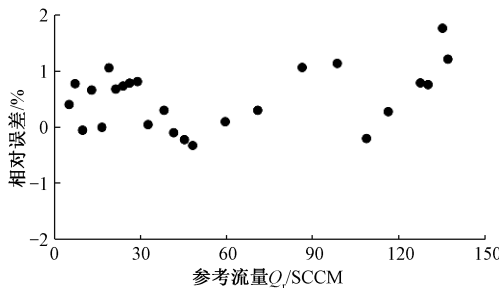


图 19 参考流量的相对误差

Fig. 19 Relative error of reference flowrates

4 结 论

本文在数值模拟基础上提出了一种新型双模热感微流量计,在小流率时采用温差响应的量热模式,而大流率时则采用功率响应的热线模式,通过数值模拟和微流量传感器的实测,得出了以下结论:

- 1) 在小流率下,扩散作用占据主导地位,输运对其产生的扰动是线性的,温差对流速的响应也是线性的。
- 2) 随着流率的增大,通道台阶处产生的脱流涡越来越大,局部换热降低,温差对流速的响应非线性增大。

3) 流率更大时,粘性耗散起非常重要的影响,温差对流率可能产生负响应,这时应采用功率模式。

4) 经过实验验证说明,双模热感微流量计的模式切换方式是合理的,与标准流量计的误差在 2% 以内,双模切换方式可以拓宽一倍以上。

参考文献

- [1] FATEMEH E, SHOHREH A, AMIR R, et al. Design and applications of MEMS flow sensors; A review [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019 (295): 483-502.
- [2] 罗浩. 基于优化模糊控制器的超声波流量传感器智能标定技术 [J]. 水利科技与经济, 2021, 27(1): 49-52. LUO H. Intelligent calibration technology of ultrasonic flow sensor based on optimized fuzzy controller [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2021, 27(1): 49-52.
- [3] GARDNER L W, VINCENT T A, JONES R G, et al. MEMS thermal flow sensors— An accuracy investigation [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(8): 2991-2998.
- [4] HAMMERSCHMIDT U, BENKERT A, SOSNA C, et al. A novel single-short-pulse MEMS upstream thermal flow sensor for gases also measuring thermal conductivity and thermal diffusivity [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019. (295): 23-30.
- [5] TABATA O. Fast-response silicon flow sensor with an on-chip fluid temperature sensing element [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1986, 33(3): 361-365.
- [6] DONG L, XU Z, XUAN W, et al. A Characterization of the performance of gas sensor based on heater in different gas flow rate environments [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(10): 6281-6290.
- [7] VALIZADEH YAGHMOURALI Y, AHMADI N, ABBASPOUR-SANI E. et al. A thermal-calorimetric gas flow meter with improved isolating feature [J]. Microsystem Technologies, 2017, 23(6): 1927-1936.
- [8] YANG F, YANG N, HUO X, et al. Thermal sensing in fluid at the micro-nano-scales [Z]. United States; 2018; 12, 41501.
- [9] LEE J, KIM T G, KIM D, et al. Improvements in the performance of a microthermal flow sensor using asymmetrically located temperature sensors [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18(2): 227-231.
- [10] XU W, WANG X Y, CHIU Y, et al. High sensitivity and wide dynamic range thermoresistive micro calorimetric flow sensor with CMOS MEMS technology [J]. IEEE Sensors Journal, 2020. 20(8): 4104-4111.
- [11] XU W, MA S H, WANG X Y, et al. A CMOS-MEMS

- thermoresistive micro calorimetric flow sensor with temperature compensation [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2019, 28(5): 841-849.
- [12] LAMMERINK T S J, TAS N R, ELWENSPOEK M, et al. Micro-liquid flow sensor[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2017, 37-38(93):45-50.
- [13] YI Z X, YE Y ZH, QIN M, et al. Modeling of packaged MEMS thermal wind sensor operating on CP mode[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(5): 2375-2381.
- [14] ZHU Y, QIN M, YE Y, et al. Modelling and characterization of a robust, low-power and wide-range thermal wind sensor [J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(12):5571-5585.
- [15] QUE R, ZHU R. A two-dimensional flow sensor with integrated micro thermal sensing elements and a back propagation neural network[J]. *Sensors*, 2014, 14(1): 564-574.
- [16] HAN J S, CHI Y K, JOH C, et al. Design fabrication and characterization of micro flow sensor inspired by biological hair cell [J]. *Microsystem Technologies*, 2016, 22(9):2329-2339.
- [17] STURM H, AND W, LANG. et al. Membrane-based thermal flow sensors on flexible substrates [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, (195): 113-122.
- [18] XUE N, YAN W P. A silicon-glass-based microfabricated wide range thermal distribution gas flow meter[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 173(1): 145-151.
- [19] WANG S, YI Z X, MING Q. Temperature effects of a ceramic MEMS thermal wind sensor based on a temperature-balanced mode [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(17): 7254-7260.
- [20] 贾振安, 杨凯庆, 赵显锋, 等. 一种新型 FBG 热式液体流量传感器[J]. *光子学报*, 2021, 50(2):45-51.
- JIA ZH AN, YANG K Q, ZHAO X F, et al. A new FBG thermal liquid flow sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(2):45-51.
- [21] NGUYEN N T, KIEHNSCHERF R. Low-cost silicon sensors for mass flow measurement of liquids and gases[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 1995, 49(1):17-20.
- [22] SATISH G, KANDLIKAR, WILLIAM J, et al. Evolution of microchannel flow passages thermohydraulic performance and fabrication technology [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2003, 24(1):3-17.
- [23] XU W, SONG K, MA S, et al. Theoretical and experimental investigations of thermoresistive micro calorimetric flow sensors fabricated by CMOS MEMS technology [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2016, 25(5):954-92.
- [24] XU W. Micromachined thermal flow sensor based on CMOS MEMS technology [D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2017.
- [25] ELWENSPOEK M, WIEGERINK R. Mechanical microsensors[M]. *Measurement Science & Technology*, 2001, 12(9):1608.
- [26] HOLMAN J P. Heat transfer[M]. McGraw-Hill, 10th Edition, 2001:215-313.
- [27] SALIM N. An overview of heat transfer phenomena[M]. InTech, 2012:498-518.
- [28] 李金贝奇. 一种新型双模式热感微流量计及其共轭传热仿真[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2019.
- LIJIN B Q. A novel dual-mode micro thermal flow sensor with conjugated heat transfer simulation[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2019.

作者简介



吴慰, 2019 年于衢州学院获得学士学位, 现为杭州电子科技大学研究生, 主要研究方向为流体力学。

E-mail: weiwu@hdu.edu.cn

Wu Wei received his B. Sc. degree from Quzhou University in 2019. He is currently a graduate student at Hangzhou Dianzi University. His research interest is fluid mechanics.



王瑞金 (通信作者), 1987 年于浙江工业大学获得学士学位, 1990 年于浙江工业大学获得硕士学位, 2005 年于浙江大学获得博士学位, 现为杭州电子科技大学机械工程学院教授, 主要研究方向为纳米流体技术、微流控技术及微机电系统技术。

E-mail: wangrj@hdu.edu.cn

Wang Ruijin (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Zhejiang University of Technology in 1987 and 1990, and received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2005. He is currently a professor in the School of Mechanical Engineering at Hangzhou Dianzi University. His research interests include nanofluid technology, microfluidic technology and MEMS technology.