

文章编号 1004-924X(2017)01-0155-07

薄膜谐振 Lamb 波传感器测量液体流速矢量的方法

孔 慧^{1,2}, 李传宇², 周连群^{2*}, 姚 佳², 唐玉国², 郭 振², 张 威²

- (1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200000;
2. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163)

摘要:针对液体流速测量领域中微型流量传感器高品质因数、高灵敏度的性能要求。本文设计一种双端增强型薄膜谐振结构实现 Lamb 波传感器的高品质因数,利用传感器反对称模式(A_{01} 模式)在薄膜-液体界面处的消逝波实现液体流速矢量测量。所制作的双端增强型薄膜谐振 Lamb 传感器 A_{01} 模式的主峰品质因数为 703, A_{01} 模式的频率移动量与液体流速大小存在线性关系,频率移动方向与液体流动方向存在对应关系。流速实测灵敏度约为 270 Hz/mm/s,传感器稳定性噪声小于 0.2 Hz,流速最低检测极限值(LOD)为 2.2 $\mu\text{m/s}$,流量最低检测极限值(LOD)为 18.3 nL/min。结果表明,双端增强型薄膜谐振 Lamb 波传感器可以实现液体流速高灵敏度矢量测量。

关键词:薄膜谐振型 Lamb 波传感器;消逝波;反对称模式;流速矢量测量

中图分类号: TB853.29 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172501.0155

A method for fluid velocity vector measurement using thin film Lamb wave resonator

KONG Hui^{1,2}, LI Chuan-yu², ZHOU Lian-qun^{2*}, YAO Jia²,
TANG Yu-guo², GUO Zhen², ZHANG Wei²

- (1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 2000, China;
 2. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology,
Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China)
- * Corresponding author, E-mail: zhoulq@sibet.ac.cn

Abstract: The trend of further research of the micro flow sensor is higher quality factor and sensitivity in the field of velocity measurement. In this letter, a new type of double-ended enhanced film resonance structure was proposed to obtain high quality factor of the Lamb wave sensor. The vector measurements of the liquid flow velocity can be achieved by using the evanescent wave, which exists around the membrane-liquid interface of one antisymmetric mode(A_{01}) of this Lamb wave sensor. The quality factor for the prominent peak of the A_{01} mode reaches 703. There is a linear relationship between the phase frequency shifts of A_{01} mode and the value of fluid velocity, while the direction of flow velocity can be judged by the phase frequency shifts direction. Correspondingly, the sensitivity of flow velocity measurement is about 270 Hz/mm/s. As the maximum noises of A_{01} mode is less than 0.2 Hz, the limit of detection of the flow velocity(LOD) is 2.2 $\mu\text{m/s}$ and the flow rate(LOD) is

收稿日期:2016-08-20;修订日期:2016-09-17.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2015AA042603)

18.3 nL/min. The results demonstrate that the vector measurements of the liquid flow velocity can be actualized with high sensitivity by the double-ended enhanced Lamb wave sensor.

Key words: thin film Lamb wave resonator; evanescent waves; antisymmetric mode; liquid flow velocity measurement

1 引言

近年来,微流体流动的研究已成为流体动力学领域的热门话题之一^[1-2],微通道流动的研究不仅可以有效地简化生物化工装置的设计过程,而且可高效率的构成 MEMS 核心组件^[3],如微热交换器,微滤装置和燃料电池^[4-5]等,同时,微流量传感器是微流体系统标定的核心问题^[6],微尺度管道流体测量的相关研究对一些器件的设计和 optimization 具有重要作用,例如微型喷嘴、微型推进器、分析空气样本病菌的生物传感器、外太空相关仪器等^[3,7-8],从生物学到纳米技术制造,微管道流体测量越来越普遍^[9-10],这就迫切需要对微管道流体流量进行精确测量和控制。

目前,随着 MEMS 技术的发展,智能流体流量传感器不断涌现,促进了微纳米尺度下管道的流体测量技术的进步。1974 年,Putten 和 Middelhoek 首次提出基于硅加工技术的流量传感器。在之后的 30 多年里,微型流量计占据了 MEMS 市场的主导领域^[11-12]。根据其测量原理,微型流量传感器可分为热阻式和非热阻式^[13]。热式流量传感器包括 SU-8 热流量传感器、热模式流量传感器^[14]和 MEMS 热传感器^[15]等。非热阻式传感器可进一步分类为压差型、基于升力型、悬臂梁式^[14,16]、光学测量^[17]式。其中,热量式的传感器 SU-8 热流量传感器^[18],流量灵敏度为 $485 \mu\text{V}/\mu\text{L}/\text{min}$,最低检测极限(LOD)为 40 nL/min, MEMS 热传感器的最低检测极限可以达到 $0.05 \mu\text{L}/\text{min}$ 。但是这些基于温度测量的传感器,由于流体温度均匀性差,增大了流量检测的随机性,不利于提高传感器的灵敏度。此外,通过温度测量流量,需要进行温度补偿^[19],需要至少 2 个传感器进行同时测量。非接触式光学测量^[17]方法对测量管道无污染,具有良好的生物兼容性。该方法测的是管道内的平均流速,但是对

层流测量时不准确的。微观粒子图像测速仪(Particle Image Velocimetry, Miro-PIV)是一种利用跟踪粒子研究流体流动技术,但此方法需要特殊的跟踪粒子和较大的压力驱动,测试对象非真正流体流动,且容易造成系统污染,不适合低流量流体的测量^[3]。到目前为止,精确测量微尺度管道内低流量的局域流速是一个难题^[3],这就迫切需要采用新的原理或方法,基于此,研发了一种基于 Lamb 波的流量传感器针对流量进行精确测量的传感原理和方法研究具有重要意义。

基于 MEMS 技术制作的 Lamb 波传感器,具有体积小、灵敏度高、损耗低、模式多的特点,已经被广泛应用于介电常数测量、生物传感等领域。Francois 等对 Lamb 波的激励方法^[20]、温度补偿^[21]和消逝场测量^[22]等进行了研究,李峰等用 Lamb 波测量的生物/化学液体来解决一个芯片上的温度补偿问题^[23];贾宏光等提出了一种基于 Lamb 波的压差式微流量传感系统,通过测量微通道两端的压力差来计算气流量的大小^[24];2009 年周连群利用 Lamb 波传感器的消逝波及漏波对管道内气体进行量^[25],分析了气流与传感器薄膜的相互作用,为 Lamb 波传感器在流体传感方面的研究提供了理论和实验指导,2012 利用 Lamb 波的多模式对液体的浓度密度进行了解耦测量,进一步验证了 Lamb 波传感器对液体参数的灵敏性^[26]。2015 年 Teona Mirea 等理论分析^[27]和实验验证^[28]了在传感器的表面加载液体对于 Lamb 波传感器 S_0 模式的影响。但是,这些基于 Lamb 波传感器的品质因数都有待提高,且这些研究均未结合 Lamb 波进行微管道内液体流速的测量。

2 工作原理

2.1 Lamb 波的基本特性

Lamb 波是一种在薄膜中传播的弹性体波,根据薄膜中粒子的运动模式可将 Lamb 波的传播

模式分为对称模式 (S_0, S_1, S_2, \dots) 和反对称模式 (A_0, A_1, A_2, \dots)。对称模式和反对称模式存在不同的相位速度和应力分布等,当 Lamb 的波长远远大于薄膜的厚度时,仅存在两个基本振动模式^[29],分别为零阶对称模式 S_0 和零阶反对称模式 A_0 ,如图 1 所示。Lamb 波的零阶反对称模式即 A_0 模式在液体中的相速度小于声波在液体中的传播速度,不会向液体产生辐射因而能量损耗低,所以适合流体特性的测量。

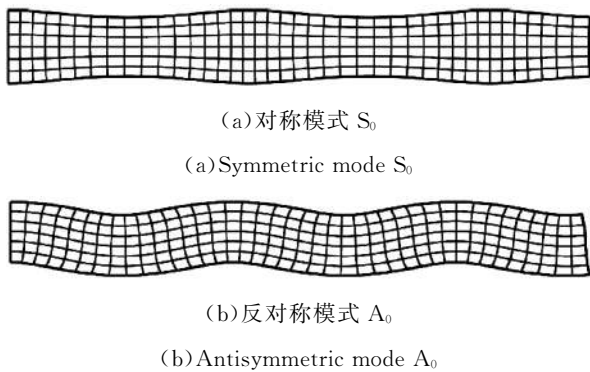


图 1 Lamb 波传感器的两种基本振动模式^[29]

Fig. 1. Two basic vibration modes of Lamb wave sensor^[29]

2.2 薄膜谐振型 Lamb 波传感器

Lamb 波的激励和接收通过探测到氮化铝 (AlN) 压电层的压电效应变化, Lamb 波器件工作时,交变电压加在激励端插指换能器两端,插指换能器与地电极之间产生交变电场,由于压电层的逆压电效应,在薄膜上产生伸缩振动,形成 Lamb 波。当波动传到接收端插指换能器时,由于正压电效应,将振动转变成电信号,经过谐振电路直接输出频率。为了满足单个器件实现微尺度管道的流速矢量的高品质因数、高灵敏度测量要求,延迟线型结构的传感器相比之前的 Lamb 波传感器^[25-26] 改进和优化了器件的结构,主要通过两端添加反射栅、增加插指电极对数、薄膜减薄的方法,如图 2 所示。通过添加反射栅,形成谐振腔,提高传感器的品质因数 (Q 值)。增加插指电极对数更加有利于 Lamb 波信号的激励和接收,获得更高的信号强度。薄膜越薄, Lamb 波传感器的灵敏度越高。

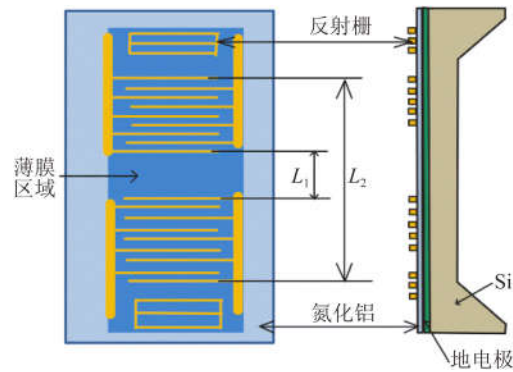


图 2 薄膜谐振型 Lamb 波传感器

Fig. 2. Lamb wave sensor with the structure of thin film resonator

2.3 Lamb 波流速矢量测量原理

Lamb 波传感器置于去离子水中, Lamb 波相速度小于液体声速时, Lamb 波将会在薄膜与液体交界处的液体一侧产生消逝波^[25],反之,则为漏波。当传感器的一侧加载去离子水,不同的频率,消逝波穿透深度会发生变化从 $\lambda/2\pi$ 到无穷,消逝波的理论穿透深度 δ_e 通过以下函数获得^[30-32]:

$$\delta_e = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{1 - (C_p/C_l)^2}}, \quad (1)$$

其中: λ 为 Lamb 的波长, C_p 为 Lamb 波的相位速度, C_l 为去离子水的声速。

基于 Lamb 传感器流速矢量测量原理:由消逝波的穿透深度可知,当周围介质流动时,对于薄膜-液体界面临界处,声速与流体速度会共同影响声波在消逝场内的声波传播^[33]。即界面处流体声速会随着流体流速变化而变化,流体流动的方向会造成流体声速的增减,从而可以测量周围流体流动的大小和方向。

3 器件制作

双端增强型 Lamb 波谐振器的外形尺寸长度为 8 mm,宽度为 5 mm,结构如图 3 所示,包含一个硅薄膜区域的长为 4 mm,宽为 1 mm,薄膜的厚度约为 $4 \mu\text{m}$,地电极 (Ti/Mo, 厚度约为 $0.2 \mu\text{m}$) 和一个压电层 (氮化铝, AlN 的厚度约为 $2 \mu\text{m}$)。在氮化铝层的上面为插指电极 (IDT) 的周期为 $80 \mu\text{m}$ 。相比本实验室制作延迟线型的 Lamb 波传感器^[25] 双端增强型 Lamb 波传感器做了如下的优化:插指电极对数由原来的 6 对变成了

24 对,薄膜的厚度由 $12\ \mu\text{m}$ 优化为 $2\ \mu\text{m}$, L_1 的长度由原来的 $2.94\ \text{mm}$ 优化为 $0.06\ \text{mm}$, L_2 的长度有原来的 $7.84\ \text{mm}$ 优化为 $3.86\ \text{mm}$ 。

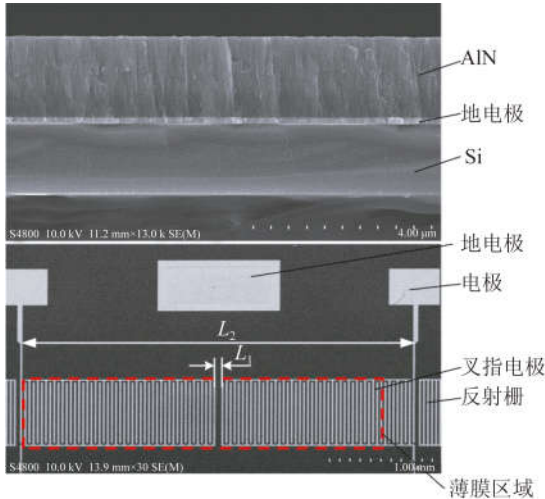


图 3 薄膜谐振型 Lamb 波传感器的扫描电镜图

Fig. 3 Scanning electron micrographs of Lamb wave sensor with the thin film resonator

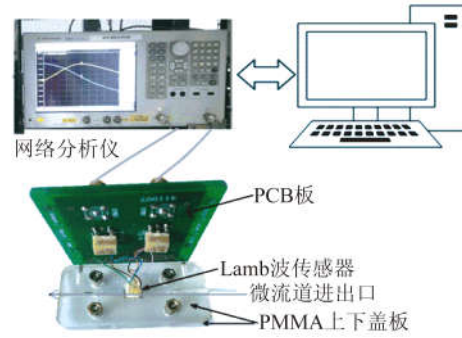
4 实验测试和讨论

4.1 实验装置及测试过程

实验装置如图 4(a)所示,传感器通过 PMMA 上下盖板密封在腔室内,其中在 PMMA 上板加工出微流道。上下盖板利用硅胶垫片进行密封,两端外接 PTFE 管,用于进出液体。Lamb 波传感器的信号采用探针引到 PCB 板,网络分析仪(E5061B)用来激发和接收 PCB 声波信号,并通过电脑程序进行数据采集。

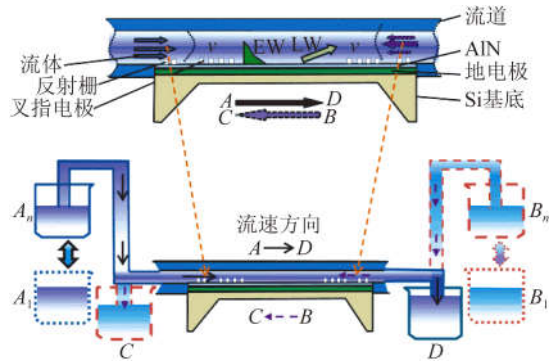
Lamb 波传感器的消逝波对微尺度管道内流体流速的矢量测量(如图 4(b)、4(c))。实验过程中,传感器工作在标准大气压下并且室温为 $25\ ^\circ\text{C}$ 。传感器的表面加载去离子水,压力和流体速度的测量原理图如图 4(b)所示。Lamb 波在薄膜中传播,传感器表面存在消逝波(EW)和漏波(LW)的传播。图 4(c)通过调整传感器左边和右边液体水位的高度产生水位高度差,使传感器表面液体流动,流速大小与两侧液体高度差成线性关系。首先将左侧水杯升高到高于传感器水平面如图 A_n 位置,同时右侧水杯水平面保持与传感器在同一水平线上 D 的位置,实现液体流动方向

如图 4(c)所标 A 到 D。反之,调节水杯至 B_n 的高度,保持水杯 C 的水平面与传感器同一高度,实现液体流动方向 B 到 C。



(a) 实验装置

(a) Experimental setup



(b)其中 EW:消逝波;LW:漏波, A-D; B-C 分别代表流速的两个方向;(c)实现流速矢量变化的示意图

(b) EW: evanescent wave, LW: leaky wave, A-D; B-C represent the two directions of flow rate; (c) Diagram on how to achieve the velocity vector changes

图 4 实验装置及测试原理图

Fig. 4. Experimental setup and schematics

4.2 薄膜谐振 Lamb 波器件响应测试

将 Lamb 波传感器薄膜置于空气和去离子水中用网络分析仪测得传感器的频率,如图 5 所示。其振动模式包括 A_{01} 模式、 A_{03} 模式、 S_0 模式。 A_{01} 、 A_{03} 是反对称模式 A_0 中为区分特定波峰及临界范围处的波形标注,代表 A_0 这种模式下诸多波峰处频率。 A_{01} 模式的振动频率为 $11.32\ \text{MHz}$,对于 A_{01} 模式,波长 λ 等于 IDT 的周期为 $80\ \mu\text{m}$ 。 A_{03} 的振动频率为 $89.45\ \text{MHz}$, A_{03} 模式的波长为 A_{01} 模式波长的 $1/3$ 约为 $26.7\ \mu\text{m}$ 。 S_0 模式的中心频率为 $108.75\ \text{MHz}$, S_0 模式的波长为 $80\ \mu\text{m}$,同为 IDT 的周期^[26]。

Lamb 波相位速度为:

$$C_p = \lambda f_n, \quad (2)$$

其中: λ 为 Lamb 的波长, f_n 为对应阶模式的谐振频率。 A_{01} 模式的相位速度由式 (2) 计算为 905.6 m/s, 去离子水的声速 C_1 为 1 497 m/s, 由于 A_{01} 模式的相位速度 C_p 小于去离子水的声速 C_1 , 所以在薄膜与液体界面产生消逝波。对于 A_{01} 模式的频率有微小的移动, 这是消逝波内流体密度的增加引起的。同理 A_{03} 模式相速度为 7 156 m/s, 大于去离子水的声速, 所以在薄膜与液体界面产生漏波。因为声波的能量从薄膜周围介质泄漏, 所以 A_{03} 模式在液体中几乎没有振幅响应, 如图 5 所示。 S_0 模式的相位速度约为 8 700 m/s, 远大于液体声速, 满足传统的漏波模式, 但是 S_0 模式与传统的剪切波有所不同, 因其薄膜中粒子运动轨迹为椭圆运动, 且椭圆运动的长轴平行于薄膜表面, 由 S_0 模式在液体中的损耗计算^[34]表明, S_0 模式的振幅在液体中几乎没有变化, 属于低损耗泄漏模式。

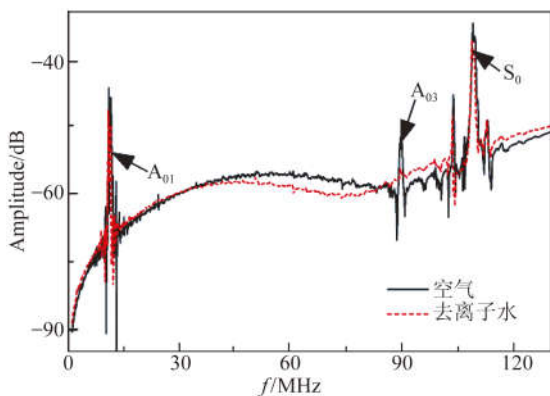


图 5 薄膜谐振型 Lamb 波传感器在空气和去离子水幅值曲线响应对比

Fig. 5 Amplitude curve response of Lamb wave sensor with the thin film resonator in the air compared with in the deionized water

4.3 实验结果讨论

根据 4.2 的分析, 在 A_{01} 模式下, Lamb 波薄膜与介质表面的消逝波的传播的方向及消逝波的穿透深度对流速矢量测量。图 6 所示为 A_{01} 模式的幅频特性响应对比, 薄膜置于空气中 A_{01} 模式中心频率 11.25 MHz 点插入损耗负 30 dB, 频率 10.15 MHz 点插入损耗负 96 dB, 相对幅值为 66 dB, 薄膜一侧加载去离子水传感器的两点的相对幅值也能达到

60 dB 以上。薄膜谐振型 Lamb 波传感器相比常规 Lamb 波传感器的振幅提高了 20 dB^[26] 以上。薄膜置于空气中 A_{01} 模式的品质品质因数是最高峰对应的中心频率除以峰值下降负 3 dB 对应的频率宽度得到的, 可达到 703, 该薄膜谐振 Lamb 波传感器品质因数比常规 Lamb 波传感器提高 400^[25] 以上。 A_{01} 模式频率有微小左移和振幅微小减少是由于去离子水的质量引起的。 A_{01} 模式下, 经过水杯移动调节流速的大小, 采集到 Lamb 波传感器的相位频率移动曲线如图 7 所示。由相位频率移动图可以得出: 流速大小的不同 Lamb 波传感器的相位频率移动不同; 不同流速方向 Lamb 波传感器的相位频率移动方向不同。

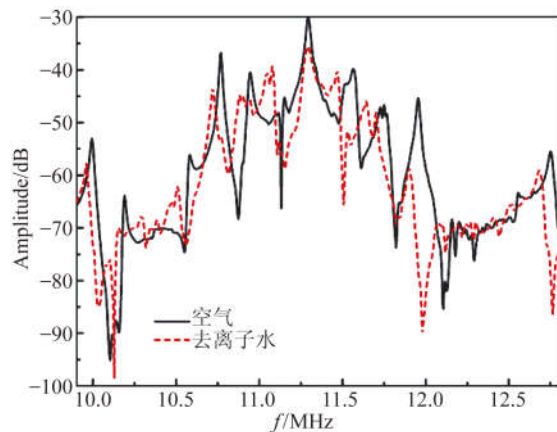
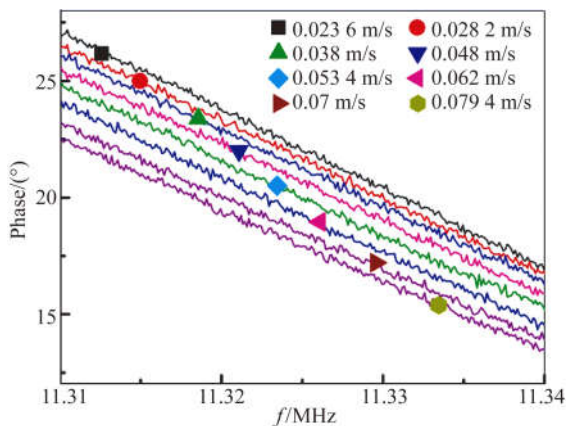


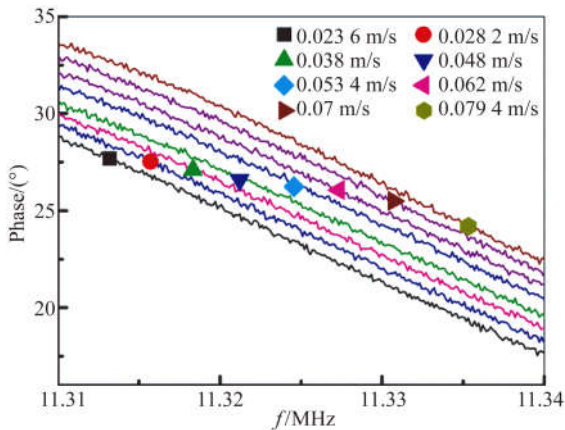
图 6 薄膜谐振型 Lamb 波传感器的 A_{01} 模式在空气与去离子水幅值响应对比

Fig. 6 Amplitude response of Lamb wave sensor with the thin film resonator of A_{01} mode in air compared with in deionized water



(a) 流速方向 B 到 C 的相位频率移动

(a) Phase frequency change at the direction of flow B to C



(b) 流速方向 A 到 D 的相位频率移动

(b) Phase frequency change at the direction of flow A to D

图 7 不同流速的传感器的相位频率移动图

Fig. 7 Phase frequency change at different flow rates sensors

在 A_{03} 模式下,由幅值频谱响应对比得到 A_{03} 在漏波模式,不能进行流速测量,对于 S_0 模式进行流速测量,传感器表面加载不同流速的液体, S_0 模式相位频率几乎没有变化,实验结果如图 8 所示。

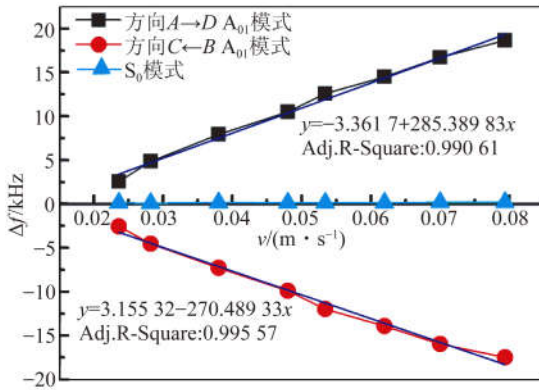


图 8 谐振频率变化量和流速矢量关系图,圆形和正方形分别代表不同的流速方向

Fig. 8 Relationship between the resonance frequency and the amount of change of velocity vector; Red and black lines representing the different directions of flow, Blue is fitted line

实验过程中,流量经过标定,除以 Lamb 波传感器的表面微管道尺寸的横截面积,借此标定流速的大小。微流道的横截面积为 S 为 0.5 mm^2 ,由式(3)得到:

$$v = \frac{Q}{S}. \quad (3)$$

流量是通过单位时间内流经传感器表面的体积。由采集到的相位频率移动跟踪幅值对应相位点的频率移动,得到 A_{01} 模式的 Δf 与流体速度的变化的关系如图 8 所示。幅值对应的 A_{01} 模式的相位的频率移动与流速大小的变化有一个良好的线性关系。流速 B 到 C 方向的线性相关系数为 0.999 557,流速方向 A 到 D 的线性系数 R 是 0.990 61,测量流速的灵敏度较小的约为 270 Hz/mm/s 。

为研究传感器的检测极限,在测得的 0.5 h 的恒温下跟踪相位的漂移,采集薄膜谐振型 Lamb 传感器空载时稳定性如图 9 所示,时长为 0.5 h,测得传感器的稳定性最大噪声为 0.2 Hz,由检测极限可以计算,式(4)可以得到 Lamb 波传感器的检测极限(LOD):

$$\text{LOD} = \frac{3N}{S} = 2.2 \text{ } \mu\text{m/s}, \quad (4)$$

其中: N 和 S 分别表示 Lamb 波传感器的噪声和测量流速的敏感性。根据流经传感器表面的横截面积,推算出体积的检测极限为 18.3 nL/min 。经测试计算结果表明,以 Lamb 波为探测的流速传感器对流速大小具有高的测试灵敏度,适合微通道流体的测量。

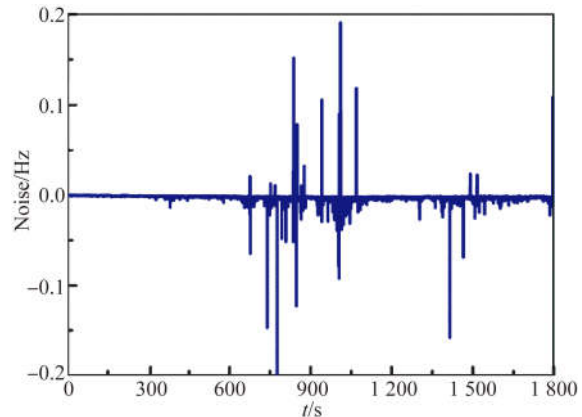


图 9 薄膜谐振型 Lamb 波传感器的稳定性测试

Fig. 9 Measurement of Lamb wave sensor with the thin film resonator stability

5 结 论

以上研究表明,基于薄膜谐振型 Lamb 波传感器对流速矢量测量方法是可行的。利用 Lamb 传感器在薄膜-液体界面处的消逝波的穿透深度

和传播的方向性实验分析完成了流体大小和方向的测试。所制作的双端增强型薄膜谐振 Lamb 波传感器 A_{01} 模式的主峰品质因数为 703, A_{01} 模式的频率移动量与液体流速大小存在线性关系, 频率移动方向与液体流动方向存在对应关系。流速实测灵敏度约为 270 Hz/mm/s, 传感器噪声稳定性小于 0.2 Hz, 流速最低检测极限值 (LOD) 为

2.2 $\mu\text{m/s}$, 流量最低检测极限值 (LOD) 为 18.3 nL/min。由于 Lamb 波传感器有多个振动模式 A_{01} 、 A_{03} 和 S_0 , 理论上可以在同一时刻达到多参数测试效果, 如何在同一时刻得到流速和其他的参数的工作正在继续。另外, Lamb 波传感器在其他生物应用的流量测量正在研究, 如尿液、血液等。

参考文献:

- [1] CHONG Z Z, TOR S B, LOH N H, *et al.*. Acoustofluidic control of bubble size in microfluidic flow-focusing configuration [J]. *Lab on a Chip*, 2015, 15(4):996-999.
- [2] ZHANG L, YU X, YOU S, *et al.*. Highly sensitive microfluidic flow sensor based on aligned piezoelectric poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) nanofibers [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(24):242901.
- [3] MORINI G L, YANG Y, CHALABI H, *et al.*. A critical review of the measurement techniques for the analysis of gas microflows through microchannels [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011, 35(6):849-865.
- [4] SCHULER G A, WOKAUN A, BÜCHI F N. Local online gas analysis in PEFC using tracer gas concepts [J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(6):1647-1656.
- [5] KHADEM M, SHAMS M, HOSSAINPOUR S. Numerical simulation of roughness effects on flow and heat transfer in microchannels at slip flow regime [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, 36(1):69-77.
- [6] ZHANG L, YU X, YOU S, *et al.*. Highly sensitive microfluidic flow sensor based on aligned piezoelectric poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) nanofibers [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(24):242901.
- [7] AGRAWAL A. A comprehensive review on gas flow in microchannels [J]. *International Journal of Micro-Nano Scale Transport*, 2011, 2(1):1-40.
- [8] HO C M, TAI Y C. Micro-electro-mechanical-systems(MEMS) and fluid flows [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1998, 30(1):579-612.
- [9] ZHANG Z, ZHANG H, YE H. Pressure-driven flow in parallel-plate nanochannels [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(15):154101.
- [10] WERELEY S T, MEINHART C D. Recent advances in micro-particle image velocimetry [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2010, 42:557-576.
- [11] NGUYEN N. Micromachined flow sensors [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1997, 8(1):7-16.
- [12] LÄNGE K, RAPP B E, RAPP M. Surface acoustic wave biosensors;a review [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2008, 391(5):1509-1519.
- [13] WANG Y H, CHEN C P, CHANG C M, *et al.*. MEMS-based gas flow sensors [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2009, 6(3):333-346.
- [14] MATSUDA Y, MISAKI R, YAMAGUCHI H, *et al.*. Pressure-sensitive channel chip for visualization measurement of micro gas flows [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2011, 11(4):507-510.
- [15] WU C H, KANG D, CHEN P H, *et al.*. MEMS thermal flow sensors [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 241:135-144.
- [16] QIAN M, NIU L, WANG Y, *et al.*. Measurement of flow velocity fields in small vessel-mimic phantoms and vessels of small animals using micro ultrasonic particle image velocimetry(micro-EPIV) [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2010, 55(20):6069.
- [17] LUCCHETTA D E, VITA F, FRANCESCANGELI D, *et al.*. Optical measurement of flow rate in a microfluidic channel [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2016, 20(1).
- [18] VILARES R, HUNTER C, UGARTE I, *et al.*. Fabrication and testing of a SU-8 thermal flow sensor [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 147(2):411-417.
- [19] KUO J T, YU L, MENG E. Micromachined ther-

- mal flow sensors [J]. *Micromachines*, 2012, 3 (3):550-573.
- [20] WU Y, DE LABACHELERIE M, BASTIEN F. Investigations on excitation and detection methods for Lamb wave sensors [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2002, 100(2):214-222.
- [21] JIA H, DUHAMEL R, MANCEAU J F, *et al.*. Improvement of Lamb waves sensors: Temperature sensitivity compensation [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 121(2):321-326.
- [22] LI F, MANCEAU J F, WU Y, *et al.*. Measurements of evanescent wave in a sandwich Lamb wave sensor [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(17):174101.
- [23] LI F, WU Y, MANCEAU J F, *et al.*. Temperature compensation of lamb wave sensor by combined antisymmetric mode and symmetric mode [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(7):4101.
- [24] 贾宏光, 光玲玲, 刘波. Lamb 波压差式微流量传感器 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5):1033-1038.
- JIA H G, GUANG L L, LIU B. Different pressure microflow sensors based on Lamb waves [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1033-1038. (in Chinese)
- [25] ZHOU L, MANCEAU J F O, BASTIEN F O. Influence of gases on Lamb waves propagations in resonator [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(22):223505.
- [26] ZHOU L, WU Y, XUAN M, *et al.*. A multi-parameter decoupling method with a Lamb wave sensor for improving the selectivity of label-free liquid detection [J]. *Sensors (Basel)*, 2012, 12(8):10369-80.
- [27] MIREA T, YANTCHEV V. Influence of liquid properties on the performance of S₀-mode Lamb wave sensors: A theoretical analysis [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 208:212-219.
- [28] MIREA T, YANTCHEV V, OLIVARES J, *et al.*. Influence of liquid properties on the performance of S₀-mode Lamb wave sensors II: Experimental validation [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 229:331-337.
- [29] WILLBERG C, DUCZEK S, VIVAR-PEREZ J M, *et al.*. Simulation methods for guided wave-based structural health monitoring: a review [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2015, 67(1):010803.
- [30] MORONEY R, WHITE R, HOWE R. Microtransport induced by ultrasonic Lamb waves [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 59(7):774-776.
- [31] NGUYEN N, WHITE R. Design and optimization of an ultrasonic flexural plate wave micropump using numerical simulation [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1999, 77(3):229-236.
- [32] SAYAR E, FAROUK B. Acoustically generated flows in microchannel flexural plate wave sensors: Effects of compressibility [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 171(2):317-323.
- [33] ZHOU L, MANCEAU J F, BASTIEN F. Interaction between gas flow and a Lamb waves based microsensor [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 181:1-5.
- [34] OSBORNE M, HART S. Transmission, reflection, and guiding of an exponential pulse by a steel plate in water. I. Theory [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1945, 17(1):1-18.

作者简介:



孔 慧(1990—),女,山东济宁人,2014年攻读中国科学院苏州生物医学工程技术研究所与上海大学的联合培养学生,主要从事 Lamb 波传感器的设计、制作与流体相互作用研究。E-mail: 1017882997@qq.com

通讯作者:



周连群(1981—),男,山东金乡人,中法双博士,研究员,博士生导师,主要从事微纳生物传感器及系统研究。E-mail: zhoulq@sibet.ac.cn