

文章编号 1004-924X(2009)05-1033-06

Lamb 波压差式微流量传感器

贾宏光¹, 光玲玲^{1,2}, MANCEAU Jean-Francois³, BASTIEN Francois³, 刘 波¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;

3. 法国科学院 FEMTO-ST 研究所 MN2S 实验室, 法国 贝桑松 25044)

摘要: 为提高微流体系统中的流量检测灵敏度, 增大动态检测范围, 实现温度补偿, 提出了一种基于 Lamb 波的压差式微流量传感系统。该传感系统主要由两个 Lamb 波压力传感器和微通道组成, 它利用 Lamb 波薄膜内应力的敏感特性, 以频率计量的方式间接测量微通道两端的压力差, 并采用双 Lamb 波压力传感器构成差动式测量结构进行温度补偿。对长 20 mm, 宽 1 mm, 高 50 μm 的微通道进行了流量测试实验, 结果表明: 在流量测试范围内, 微通道两端的频率差与流量基本呈线性变化, 其线性相关系数为 0.999 9; 在微流量传感器未进行优化的前提下, 最小检测量为 0.627 $\mu\text{L/s}$ 。

关键词: 微流体系统; 微流量传感器; Lamb 波

中图分类号: TP212.12; TH814 **文献标识码:** A

Different pressure microflow sensors based on Lamb waves

JIA Hong-guang¹, GUANG Ling-ling^{1,2}, MANCEAU Jean-Francois³, BASTIEN Francois³, LIU Bo¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

3. *MN2S Department of the FEMTO-ST Institute, Besancon 25044, France)*

Abstract: With the aim to improve measuring sensitivity, enlarge dynamic detection range and to realize the temperature compensation of microflow sensors in microfluidic systems, a novel pressure microflow sensor based on Lamb waves is set up in this paper. The sensor mainly composed of two Lamb wave sensors connecting by a microchannel. Based on the sensitive properties of the film stress in the lamb sensors and the relationship between the frequency output and the pressure in a proportion, the sensing system measures directly the frequency output of each sensor to obtain the pressure difference between two ends of the microchannel and also construct a different frequency measurement structure between two Lamb wave sensors to realize the temperature compensation. For a microchannel with 20 mm in length, 1 mm in width and 50 μm in high, experimental results indicate the frequency difference between two Lamb wave sensors varies linearly with the flow, and the linear correlation coefficient is 0.999 9. Before optimization of the microflow sensor mentioned above, the minimum detectable flow is 0.627 $\mu\text{L/s}$.

Key words: microfluidic system; microflow sensor; Lamb wave

收稿日期: 2008-08-29; 修订日期: 2008-09-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60474055)

1 引言

微流体系统作为微机电系统(MEMS)的一个重要分支,在生物,医学,化学等领域有着巨大的应用前景^[1]。微流量传感器是微流体系统定标的核心问题^[2],几乎在每一个微流体系统中都有应用。在微流体系统精确分析及定量测试中^[3],高灵敏度、大动态范围的微流量传感器是必不可少的。

目前,在各种微流体系统发展的带动下,国内外开展了许多微流量测试的研究。按其测试原理可分为:热式和非热式^[4]。热式微流量传感器通过测量微通道某点的温度变化或两点温差推算出流量。此类传感器制作工艺相对简单,温度检测方法成熟,但由于层流作用的影响,流体温度均匀性差,增大了温度检测的随机性,不利于提高传感器的灵敏度,同时也限制了传感器的测试动态范围。另外,通过温度测量流量,需要进行温度补偿^[5]。非热式流量传感器主要通过测量微量应变将流体场内某些点的压力值或速度值转化成电信号,来达到检测流量的目的。这种测试方法不需要对被测流体进行加热,具有良好的生物兼容性,但由于采用应变敏感的检测方式,限制了传感器的灵敏度以及测试的动态范围。此外,由于运动部件的存在,此类传感器微结构工艺相对复杂,且绝大多数需要温度补偿^[6]。

为解决微流量传感检测灵敏度不高、动态范围小和需要温度补偿等问题,本文提出了一种基于 Lamb 波的压差式微流量测试方法。利用 Lamb 波传感技术本身的灵敏特性和薄膜内应力测量动态范围大的优点,使构造的微流量单元具有灵敏度高、动态范围大的特点;采用双 Lamb 波压力传感的探测方法,不仅克服了流体背压对传感器测试精度的影响,而且实现了温度补偿;同时不需对被测流体加热,具有良好的生物兼容性。

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波,分为对称和非对称模式,且具有多种传播模式^[7]。Lamb 波的零阶非对称模式(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;又由于 A_0 模式的 Lamb 波对薄膜的内应力和薄膜质量极其敏感,所以可用于流体特性的测量。

2.2 工作原理

基于 Lamb 波的压差式微流量测试方法的工作原理:当四周固定的薄膜一侧的介质压力发生变化时,薄膜的内应力发生相应的变化,这直接影响 Lamb 波在薄膜中的传播速度。通过在 Lamb 波的接收端和激励端之间构造正反馈谐振电路,将波速信号转变成频率信号进行计量,构成一种 Lamb 波压力传感器。基于此,提出一种新的微流量测试结构,如图 1 所示,采用双 Lamb 波压力传感器,中间以微通道相连,构成一种新形式的压差式微流量传感单元。

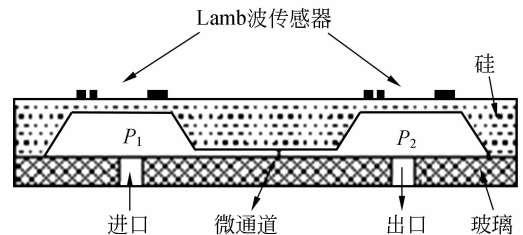


图 1 Lamb 波压差式微流量传感器的结构示意图
Fig. 1 Basic configuration of microflow sensor with two Lamb wave pressure detectors and one microchannel

当流体从进口流入,流经微通道时,由于流体的粘性作用,受到来自微通道侧壁的黏滞阻力,此黏滞阻力的大小与微通道的几何尺寸、流体本身的特性以及流体流动的流速有关。在黏滞阻力的影响下,两腔体之间必然产生一定的压力差以驱动流体顺利流动。实验采用 Lamb 波压力传感器,分别测量两腔体的压力,通过压力差获得流体的流动速度,最终得到流体在某时间段的流量。

在实际压力测试中,Lamb 波压力传感器谐振频率的变化不仅与压力有关,还受环境等其它因素的影响,尤其是温度的变化影响较大。Lamb 波谐振频率的变化与压力和温度之间的关系可表述为^[8]:

$$\Delta f = f_0 [S(p - p_0) + t_c(t - t_0)], \quad (1)$$

式中: f_0 为 Lamb 波的初始中心谐振频率; p 、 t 分别为输入压力和温度; p_0 、 t_0 分别为压力和温度的

初始参考值; S 、 t_c 分别为一阶压力和温度系数。

在微流量传感器中,为消除温度对测试精度的影响,采用两个 Lamb 波压力传感器构造差动式测试结构,其输出频率为:

$$\Delta f = \Delta f_1 - \Delta f_2 = S_1 f_{10} (p_1 - p_0) - S_2 f_{20} (p_2 - p_0) + t_{1c} f_{10} (t_1 - t_0) - t_{2c} f_{20} (t_2 - t_0), \quad (2)$$

式中, Δf_1 、 Δf_2 分别为两个传感器由压力和温度变化引起的频率变化量。实验中采用的两个 Lamb 器件尺寸、性能参数相同,故: $f_{10} = f_{20} = f_0$, $S_1 = S_2$, $t_{1c} = t_{2c}$; p_1 、 p_2 分别为微通道两端的压差;两个传感器相距很近,认为环境温度变化近似相等,即 $t_1 = t_2$,故式(2)中的温度项可抵消为0,实现传感器的温度补偿。式(2)可简化为:

$$\Delta f = S f_0 (p_1 - p_2). \quad (3)$$

3 Lamb 波的信号检测

Lamb 波器件的结构示意图如图 2 所示,结构从上到下包括:集成叉指换能器(IDT)、锆钛酸铅(PZT)压电层、金属铝地层、硅衬底,其制作工艺见参考文献[9]。叉指换能器的周期以及薄膜的厚度定义了 Lamb 的波长以及工作模式。本实验采用的 Lamb 器件的波长为 $400 \mu\text{m}$,膜厚为 $12 \mu\text{m}$,在 A_0 模式下工作。

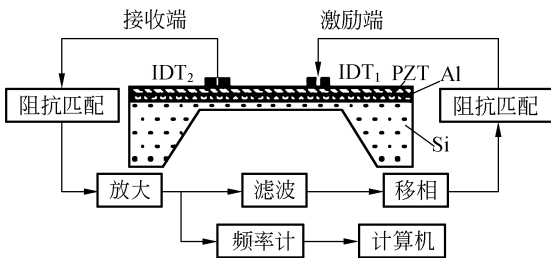


图 2 Lamb 波信号检测原理示意图

Fig. 2 Work principle of a PZT membrane Lamb wave sensor

Lamb 波器件工作时,交变电压加在激励端叉指换能器两端,叉指换能器与地层之间产生交变电场,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. Lamb 波的波动在薄膜中传播,当波动传到接收端叉指换能器时,由于正压电效应,将振动转变成电信号。将接收端的电信号进行阻抗匹配、放大、滤波、调相等电路处理

后,反馈到激励端构成正反馈谐振电路,直接输出频率^[10]。

在谐振电路中,只要开环电路的增益能补偿 Lamb 波器件的插入损耗,同时满足一定的相位条件,就可谐振。谐振条件为^[11]:

$$|A(\omega)| |B(\omega)| \geq 1, \quad (4)$$

$$\phi_{\text{loop}} = \phi_d + \phi_1 = 2n\pi, \quad (5)$$

式中: $|A(\omega)|$ 为 Lamb 波器件的插入损耗; $|B(\omega)|$ 为开环增益; ϕ_d 为 Lamb 器件的相移; ϕ_1 为开环电路的相移; n 为正整数。

4 标定系统

Lamb 波压差式微流量传感器的流量标定系统如图 3 所示。

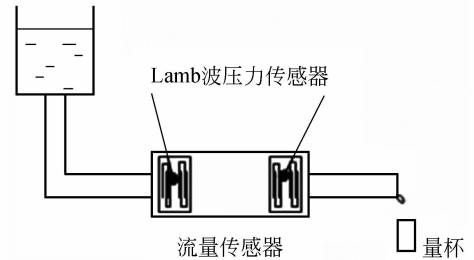


图 3 Lamb 波压差式微流量传感器标定系统

Fig. 3 Calibration system of differential pressure microflow sensor

在容器中装有一定的等离子水,上端液面与大气压相连。利用垂直方向上液面高度与压力成正比的原理,通过改变液面高度获得不同的压力,从而获得不同的流量。当液面高度高于出口高度时,液体在重力作用下流经微通道,从出口流出,流入量杯。实验所用的微通道利用微细加工工艺在硅片上制得,其尺寸为长 20 mm ,宽 1 mm ,深 $50 \mu\text{m}$ 。采用的容器相对于微通道足够大,故在短时间内的液面高度变化可忽略不计。因此,在液面高度不变时,可获得短时间稳定的压力,从而获得恒定的流量;液面高度变化时,即可改变微通道中流体的流量。利用电子天平和秒表分别测量流入量杯中的液体质量和所需的时间,计算出流体流量。在恒定高度条件下,当流体流过微通道时,通过两端的 Lamb 波传感器的频率变化间接测量微通道两端的压力,通过压力差计算出流量。

5 实验结果

在室温 20 ℃下,以等离子水为工质,测量高度为 0~1 m,步进高度为 20 cm,利用液面高度与压力成正比的关系 $p=\rho gh$,对 Lamb 波传感器进行了压力标定。实验测定了短时间内 Lamb 波压力传感器在不同高度下的频率输出响应,如图 4 所示。传感器能检测到的最小压力为 500 Pa,且响应时间为 1 s,频率稳定性为 7×10^{-6} 。

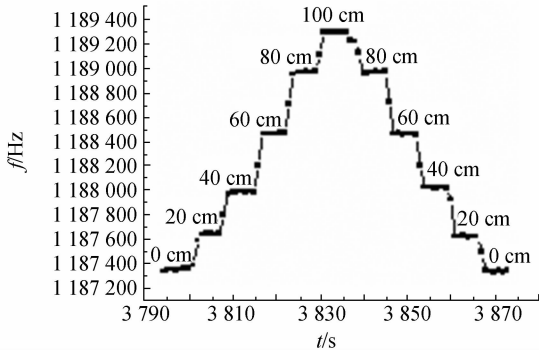


图 4 进、出口传感器在不同液面高度下的频率响应
Fig. 4 Frequency changes of inlets and outlets of sensor at different water pressures

利用高度与压力之间的关系,将高度转化为压力,图 5 给出了 Lamb 波器件的频率变化量与压力的对应关系。由图可知,压力与频率的变化量基本呈线性关系,其线性相关系数为 0.995,压力灵敏度为 0.206 6 Hz/Pa,上下行程的迟滞误差为 -1.91%。测试结果表明,以 Lamb 波为探测媒质的压力传感器具有灵敏度高、响应快、迟滞误差小等特点,适合于微小流量的测量。

在室温 20 ℃下,以等离子水为工质,通过改变液面与出口间的高度差,获得了不同的流体流量。利用 Lamb 波传感器测量不同流量时微通道两侧的压力,根据图 5 标定的频率变化量与压力之间的关系,求出频率变化量对应的进、出口压力。采用 Fluent 流体仿真软件,结合微通道结构尺寸以及流动特性,以进、出口压力为边界条件,仿真获得其对应的流速,再通过流速与流量之间的关系计算出流量^[12]。利用电子天平和秒表分别测量流入量杯中的流体流量和时间,计算出流量。将仿真获得的流量与实验所测的流量进行对比,验证了该方法的可行性。

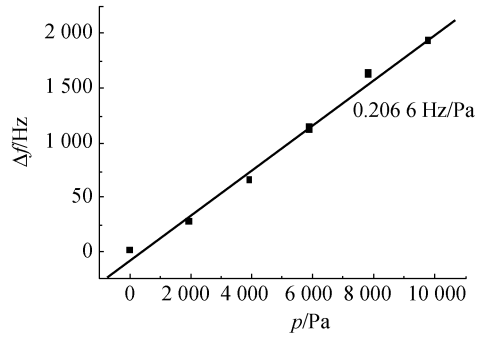


图 5 压力与频率变化量的对应关系
Fig. 5 Frequency changes vs of pressures

图 6 给出了微通道两端所测频率变化量与流量的关系曲线。随着流量的增加,进、出口频率变化差基本呈线性变化,其线性相关系数为 0.999 9,最小检测流量为 0.627 $\mu\text{L/s}$ 。

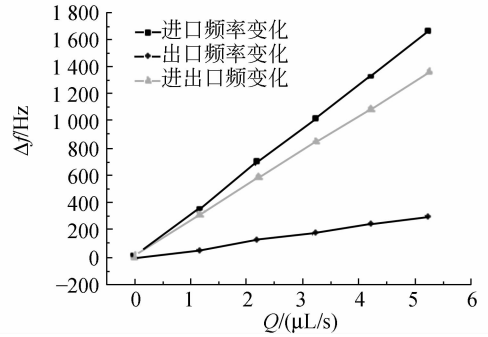


图 6 频率变化与流量的关系曲线
Fig. 6 Frequency changes vs flows

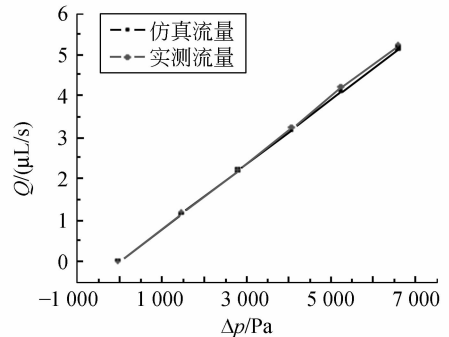


图 7 仿真流量与实测流量的对比
Fig. 7 Comparison between the simulated flows and the measured flows

图 7 为仿真流量与实测流量的对比图,从图可看出仿真流量与实测流量基本吻合。由公式(6)^[13]计算出仿真流量与实测流量之间的相对误

差为-2.7%,其误差主要来源于Lamb波器件的噪声。

$$\delta = \frac{Q_{\text{simul}} - Q_{\text{real}}}{Q_{\text{real}}} \times 100\% . \quad (6)$$

6 结 论

以上研究表明,基于Lamb波的压差式微流量检测方法是可行的。它利用Lamb波的敏感特性提高了流量传感器的灵敏度;通过构造谐振电

路检测信号,直接采用频率输出提高了测量精度;采用双Lamb波器件构造差动式测量结构,有效地补偿了温度变化引起的误差;另外,不需对被测流体加热,具有良好的生物兼容性。为进一步提高流量传感器的灵敏度和动态范围,还需提高Lamb波器件的灵敏度,分析其噪声来源及抑制措施,探讨进一步提高检测精度的方法和流量标定方法。

参考文献:

- [1] 尹执中,胡桅林,过增元. 微流动系统的发展概况[J]. 流体机械,2000,28(4):33-36.
YIN Z Z, HU W L, GUO Z Y. Review on micro-flow devices and systems[J]. *Fluid Machinery*, 2000,28(4): 33-36. (in Chinese)
- [2] BOILLAT M A, WIELA J, HOOGERWERF A C, *et al.*. A differential pressure liquid flow sensor for flow regulation and dosing systems [C]. *IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, 1995, MEMS'95, *Proceedings*: 350-352.
- [3] NGUYEN N T, WERELEY S T. *Fundamentals and Applications of Microfluidics* [M]. London: Artech House, 2002.
- [4] NGUYEN N T. Micromachined flow sensors—a review [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1997,8(1):7-16.
- [5] ELWENSPOEK M. Thermal flow micro sensors [J]. *IEEE, Semiconductor Conference*, 1999, 2(2):423-435.
- [6] 魏译文,秦明,黄庆安. 非热式微流量传感器[J]. 电子器件,2006,29(4):1065-1070.
WEI Z W, QIN M, HUANG Q A. Non-thermal micro flowmeters [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2006, 29(4):1065-1070. (in Chinese)
- [7] WENZEL S W, WHITE R M. Silicon-based ultrasonic Lamb-wave multisensors [J]. *IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, 1988:27-30.
- [8] BUFF W, RUSKO M, GOROLL E, *et al.*. Universal pressure and temperature SAW sensor for wireless applications [J]. *IEEE, Ultrasonics Symposium*, 1997:359-362.
- [9] JIA H, DUHAMEL R, MANCEAU J F, *et al.*. Improvement of Lamb waves sensors: temperature sensitivity compensation [J]. *Sensors and Actuators A*, 2005,121:321-326.
- [10] 胡友旺,贾宏光,李锋,等. 电容式Lamb波器件的信号接收方法[J]. 光学精密工程,2007,15(1):76-83.
HU Y W, JIA H G, LI F, *et al.*. Signal reception method of capacitive Lamb wave device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(1):76-83. (in Chinese)
- [11] VELLEKOOP M J, LUBKING G W, SARRO P M, *et al.* Integrated-circuit-compatible design and technology of acoustic-wave-based microsensors [J]. *Sensors and Actuators A, Physical*, 1994, 44:249-263.
- [12] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
WANG F J. *Computational Fluid Dynamics Analysis—Principle and Application of CFD Software* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [13] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
FEI Y T. *Error Theory and Data Process* [M]. Beijing: Machinery Industry Press,2004. (in Chinese)

作者简介:

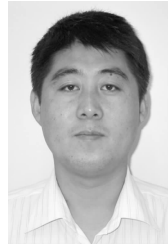


光玲玲(1985—),女,湖北仙桃人,硕士研究生,主要从事集成微光机电系统的研究。E-mail: gll20005@yahoo.com.cn.



刘波(1977—),男,黑龙江庆安人,助理研究员,博士,主要从事微机电系统方面的研究。E-mail: lb.mems@yahoo.com.cn

导师简介:



贾宏光(1971—),男,黑龙江五常人,工学博士,研究员,博士生导师,主要从事光机电系统微小化技术、复合制导及目标识别技术的研究。E-mail: jiahg@ciomp.ac.cn

MANCEAU Jean-Francois (1968—),男,法国人,教授,主要从事压电微马达、超声波液滴操控和微流体应用的研究。E-mail: jfmanceau@femto-st.fr

BASTIEN Francois(1944—),男,法国人,教授,主要从事微系统、声波传感器、压电材料、压电马达的研究。E-mail: fbastien@femto-st.fr

● 下期预告

发散形通道内的稳定电渗流动

王小章¹,王朝晖²,蒋庄德¹

(1. 西安交通大学 机械工程学院,陕西 西安 710049;

2. 西安交通大学 机械制造系统国家重点实验室,陕西 西安 710049)

电渗流通过外加电场来驱动液体通过微小通道,同时由于焦耳热效应的存在,也会在流体及通道表面形成热传导现象。应用计算流体力学数值计算方法,对矩形发散形微通道内电渗流动所产生的流场、温度场进行了数值模拟和研究。由于流体的介电常数、电导率、粘性、热导率等属性依赖于温度的变化,焦耳热效应产生的温度场会改变流体的多种属性,并影响到流动速度、压力分布等。计算结果表明,焦耳效应在微管道芯片上产生一个非均匀的热梯度场,并同时影响到液体流动。热梯度场在均匀截面通道内可以提高液体的流动速度,但在发散形通道内却不能产生相似的效果,此时的出口速度和体积流速都明显下降,分别达到约 16% 和 60 $\mu\text{l}/\text{min}$ 。焦耳热效应同时通过降低流速和流动压力来减弱发散形管道的电渗流泵送性能。