

基于声表面波热膨胀微阀研究

章安良¹,王新彪²,付相庭²,查 燕²

(1. 常州工学院 电气学院,江苏 常州 213002; 2. 宁波大学 微纳电子系统研究所,浙江 宁波 315211)

摘 要:研制了一种新的声表面波控制开关的微阀。在 128°YX-LiNbO₃ 基片上光刻叉指换能器,其激发的声表面波加热微槽内石蜡油,熔融其上方微腔内固体石蜡,石蜡由于相变化而体积膨胀,使得微腔顶部的聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜发生形变,微阀由开态转变为关态。红色染料溶液微流体为实验对象进行微阀操作实验,结果表明,声表面波可有效实现微阀的控制,且微阀开关时间随所加电信号功率增加而减少,在 32 dBm 电信号功率作用下,微阀关闭时间为 3 min。

关键词:微阀;热膨胀;声表面波;微通道;微流器件

中图分类号:TN371 **文献标识码:**A

Study on Thermal Expansion Micro-valve Based on Surface Acoustic Wave

ZHANG Anliang¹, WANG Xingbiao², FU Xiangting², ZHA Yan²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;

2. Lab. of Micro and Nano Electronic System, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: A new micro-valve controlled by surface acoustic wave is presented. An interdigital transducer is fabricated on a 128°YX-LiNbO₃ substrate for exciting surface acoustic wave used to heat paraffin oil in a microgroove. Solid paraffin in a micro-cavity is melted due to heating transmission. The volume of paraffin in the micro-cavity is increased by phase change, leading to the shape change of PDMS film, and then the micro-valve is switched off. Red dye solution is used to demonstrate the operation of the micro-valve. Results show that surface acoustic wave can control the state of the valve, and the switching time is decreased with the power of electric power. Three minutes of switching time is obtained when the electric signal power is 32 dBm.

Key words: micro-valve; thermal expansion; surface acoustic wave; micro-channel; micro-fluidic device

0 引言

微流控系统自从发明以来,在国内外得到广泛重视,并日益成为生化分析领域的研究热点^[1-4],在 DNA 测序、蛋白质分析、单细胞分析、毒品检测和食品安全等得到应用^[5-7]。微阀是微流系统一个重要的组成部分,它是工作于连续流模式的微流系统进行微流操作不可或缺的组成部分。根据有无动力源来分,微阀可分为无源微阀和有源微阀两大类。无源微阀^[8]是通过特殊的微通道几何结构或微通道表面特性实现微流输运,无需外加动力源,其优点是微阀尺寸小,易集成于微流系统中,但它难以控制微流体在微通道中输运,有一定局限性。有源微阀根据提供动力源的方式来分,主要有气动微阀^[9]、电动微

阀^[10]、电化学微阀^[11]、静电微阀^[12]、电磁微阀^[13]、相变微阀^[14]、混合微阀^[15]和热膨胀微阀^[16]等。热膨胀微阀是应用微腔内气体或石蜡等材料在加热时发生体积变化而实现微阀的控制,该类微阀结构简单,无需外加气泵等优点而受到重视。如 Feng^[17]报道了采用微机械和光刻工艺制作一种常闭型热膨胀微阀, Takao^[18]提出了加热腔与执行腔分离的热膨胀微阀,它减少了加热器与微通道间直接热转换,提高了热效率。但这些微阀滞后现象较严重,有待改进,同时,它们均无法直接应用于压电微流器件上。为此,本文提出了一种新的、适用于压电微流器件的微阀,并对所提出微阀的工艺、原理和性能进行了研究。

收稿日期:2014-03-18

基金项目:浙江省科技厅基金资助项目(2009R50025);浙江省重点学科基金资助项目(Xkl11077)

作者简介:章安良(1968-),男,浙江临海人,副教授,博士,主要从事压电微流器件的研究。E-mail: nbuzhang@sohu.com

1 实验

1.1 基于声表面波热膨胀微阀的制作

基于声表面波热膨胀微阀制作工艺如图1所示。

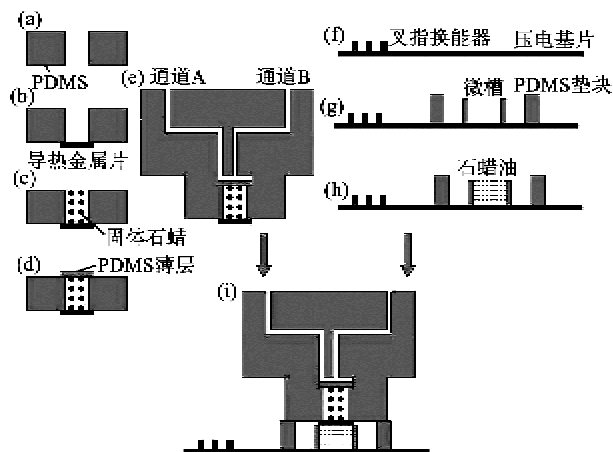


图1 微阀工艺流程

采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)制作环形微腔,适当调节PDMS单体和固化剂的比例,使得微腔硬度较高,如图1(a)所示,其底部涂覆PDMS单体和固化剂混合液,粘合金属导热片(薄铜片),并100℃固化1h(见图1(b)),微腔内填充固体石蜡(见图1(c)),微腔尺寸为直径 $\varnothing 4$ mm,高为4 mm的圆柱体,其上覆盖PDMS薄层,制作PDMS薄层时调节单体比例,使PDMS薄层柔软性较好,PDMS薄层厚为270 μm (见图1(d)),采用软光刻工艺制作PDMS微通道,微通道内径为 $\varnothing 155$ μm ,并与微腔结合(见图1(e)),PDMS薄膜与微通道底间距为200 μm 。在 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 基片上制作中心频率为27.5 MHz叉指换能器(见图1(f)),其上采用PDMS混合液固定PDMS垫块和微槽(见图1(g)),在微槽内充填石蜡油(见图1(h)),微槽直径 $\varnothing 3$ mm,高1 mm。石蜡油体积为7.5 μL ,略大于微槽容量,便于热量充分传递。最后,将金属导热片放置于存有石蜡油的微槽上,并与垫块粘合(见图1(i))。

1.2 实验装置

基于声表面波热膨胀微阀操作的实验装置如图2所示。图中,叉指换能器和反射槽采用微电子工艺制作在 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 基片上。叉指换能器的指对数为35,孔径为 $\varnothing 4.32$ mm,周期为144 μm ,微阀贴合于压电基片上。

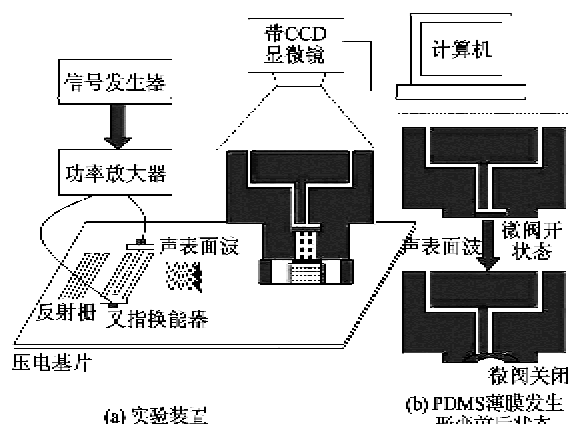


图2 基于声表面波热膨胀微阀开关操作的实验装置

信号发生器(SP1461, EPRE, China)提供射频正弦波信号,该信号可由功率放大器(TSA002A, TSH, China)放大,功率放大器的功率增益为48 dB,最大不饱和输出功率为30 W。带高灵敏度电荷耦合器(DCE-2, Novel, China)的显微镜用来观察微通道内微流体输运,并储存于计算机中。MDVNT软件(Novel, China)用来摄像控制和图像处理。

为便于观察微阀内微流体的输运,采用红色染料溶液微流体作为实验对象,进行微阀打开时微通道内微流体的输运实验。信号发生器产生的电信号经功率放大器放大后加到叉指换能器上,激发声表面波,辐射入PDMS微槽内石蜡油,并加热其上PDMS微腔内固体石蜡,当固体石蜡完全熔化后,膨胀的体积使得微腔顶部的PDMS薄膜发生形变,关断微通道,实现微阀关闭。PDMS薄膜发生形变前后状态示意图如图2(b)所示。

2 实验结果与讨论

当压电基片上的叉指换能器未加电信号时,微阀呈开态,两微通道导通。图3为20 kPa压力下微通道内微流体输运状况。由图可知,微通道内微流体在0.133 s时间内输运了2.9 mm,结合微通道直径为 $\varnothing 155$ μm ,可得微流体在20 kPa压力下流速为0.411 $\mu\text{L/s}$ 。

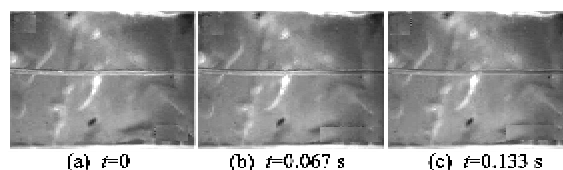


图3 微阀开态时,红色染料溶液微流体在微通道内输运

当叉指换能器上加电信号激发声表面波,加热微槽内石蜡油,使得微腔内固体石蜡发生熔化,体积

膨胀而是其上的 PDMS 薄膜向上弯曲形变,使得微阀关闭。由于难以直接观察微阀关闭过程,故将微通道移去后,留下微腔和微槽,观察微腔内固体石蜡熔化过程和其上 PDMS 薄膜形变。图 4 为微腔内固体石蜡和其上 PDMS 薄膜在声表面波作用下状态发生变化的视频截图。

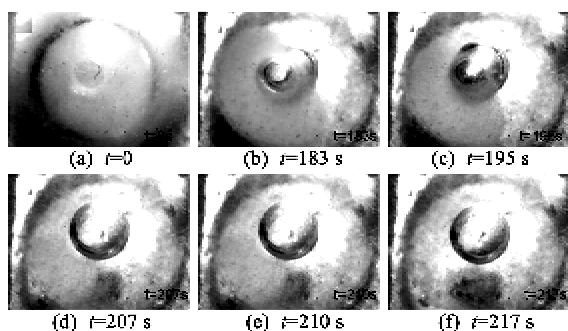


图 4 微腔内固体石蜡和其上 PDMS 薄膜在声表面波作用下状态发生变化的视频截图

图 4(a)为未加声表面波时微腔内固体石蜡和其上的 PDMS 薄膜状态,图 4(b)~(f)为微腔内固体石蜡在 30.8 dBm 电信号功率下,微腔内固体石蜡逐渐熔化,并使其上的 PDMS 薄膜出现明显的上弯形变。由图可知,在 217 s 内微腔内固体石蜡完全熔化,因此微阀关闭时间小于 4 min。增加电信号功率到 32 dBm,微腔内固体石蜡完全融化时间减少到 3 min,因此微阀关闭时间随电信号功率增加而减少。

固体石蜡从固态转变为液态时,其体积将增大 10%~30%^[19],根据微腔尺寸(直径 $\varnothing$ 4 mm,高 4 mm 的圆柱体)可计算固体石蜡体积为 50.24 mm³,以体积变化 10%来计算,则固体石蜡从固态变化为液态后,体积增加了 5.0 mm³。同时,假设 PDMS 薄膜按最坏情形的圆柱体形式向上形变,则 PDMS 薄膜向上弯曲高为 0.398 mm,足以使微通阀关闭。此时,在微通道入口注入红色染料溶液微流体,逐渐增加液压,当液压增加到 42 kPa 时,微阀开始泄漏微流体。

3 结论

在压电基片上设计和制造了一种新的微阀,它采用声表面波实现微阀状态的控制,以红色染料溶液为实验对象,对微阀进行了操作,验证了微阀的性能。本文工作可得如下结论:

1) 声表面波可有效控制微阀操作。

2) 加到压电基片上叉指换能器的电信号功率影响微阀关闭时间,并随电信号功率增加而减少。

参考文献:

- [1] MAHMOOD G, AMIR S N, CARLOS G A, et al. Microfluidic positioning of pollen grains in lab-on-a-chip for single cell analysis[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2014, 117(4): 504-511.
- [2] FU L M, JU W J, LIU C C, et al. Integrated microfluidic array chip and LED photometer system for sulfur dioxide and methanol concentration detection [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 243(1): 421-427.
- [3] EVANDRO P, DAVIDE F, PAOLO S, et al. Generation of water-in-oil and oil-in-water microdroplets in polyester-toner microfluidic devices [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 196(6): 525-531.
- [4] MINGLU H, RUTAO L, HAO Z, et al. Detection of glutathione within single mice hepatocytes using microfluidic chips coupled with a laser-induced fluorescence system[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2014, 125(1): 7-11.
- [5] MARA M, MASSIMO G, ELISA M. Recent advancements in chemical luminescence-based lab-on-chip and microfluidic platforms for bioanalysis[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2014, 87(1): 36-52.
- [6] LORENZO C, DARIO C, STEFANIA M, et al. Microfluidic and lab-on-a-chip preparation routes for organic nanoparticles and vesicular systems for nanomedicine applications[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2013, 65(11/12): 1496-1532.
- [7] MAHMOOD G, AMIR S N, CARLOS G A, et al. Microfluidic positioning of pollen grains in lab-on-a-chip for single cell analysis[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2014, 117(4): 504-511.
- [8] JITA K, HORACIO K, ROGER H R, et al. Passive flow switching valves on a centrifugal microfluidic platform[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 128(2): 613-621.
- [9] LISEC T, KREUTZER M, WAGNER B. A bistable pneumatic microswitch for driving fluidic components [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1996, 5(1/3): 746-749.
- [10] KIRBY B J, SHEPODD T J, HASSELBRINK E F. Voltage-addressable on/off microvalves for high-pressure microchip separations[J]. *Journal of Chromatography A*, 2002, 979(1): 147-154.
- [11] AITOR E, LUIS J F, KEPA M, et al. A microvalve for lab-on-a-chip applications based on electrochemically actuated SU8 cantilevers[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 155(2): 505-511.

(下转第 887 页)