文章编号:1004-2474(2017)01-0153-04

# 基于声表面波形状记忆合金微阀研究

李向莉[1],钱显毅[2]
(1.苏州信息职业技术学院 通信与信息工程系,江苏 苏州 215200;2.常州工学院 电气与光电子工程学院,江苏 常州 213002)

**摘 要**:研制了一种声表面波控制的形状记忆合金微阀。在128°YX-$LiNbO_3$基片上光刻叉指换能器,其激发的声表面波加热压电基片上石蜡油,使弯曲的形状记忆合金线伸展,促使与其连接的聚二甲基硅氧烷微通道壁发生形变,截止微通道,实现微阀从开态向关态转变。撤除电信号,形状记忆合金线温度下降,恢复软性,在硬质塑料薄片的恢复力作用下,微阀重新由关态转为开态。以流体输运为实验对象进行微阀开关实验,结果表明,声表面波可有效控制形状记忆合金微阀的开关操作,在28.5 dBm电信号功率作用下,微阀关闭时间为40.4 s。

**关键词**:微阀;形状记忆合金;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 A Shape Memory Alloy Micro-valve Based on Surface Acoustic Wave

**LI Xiangli[1], QIAN Xianyi[2]**
(1. Dept. of Communication and Information Engineering, Suzhou College of Information Technology, Suzhou 215200, China;
2. School of Electrical and Photo-electronic Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China)

**Abstract**: A new shape memory alloy (SMA) microvalve controlled by surface acoustic wave is presented in this paper. An IDT is fabricated on a 128°YX-$LiNbO_3$ substrate for exciting surface acoustic wave, which is used to heat paraffin oil on the piezoelectric substrate. A bent shape memory alloy wire is then expended due to the heat exchange of paraffin oil, and leads the wall of the polydimethylsiloxane microchannel to have a deformation and the microvalve is closed, thus can realize the transition from on to off. When the electric signal is removed, the shape memory alloy wire is become soft due to temperature reduction. The microchannel is open again by the recovery force of a plastic sheet, and the microvalve is then in on state. The fluid transportation is used to demonstrate the operation of the SMA microvalve. The results show that the surface acoustic wave can control the on-off operation of SMA valve effectively. The switching off time of the SMA microvalve is 40.4 when the electric signal power is 28.5 dBm.

**Key words**: microvalve; shape memory alloy; surface acoustic wave; microchannel; microfluidic device

## 0 引言

微流分析系统因具有体积小,分析速度快,试剂消耗量少等优点,日益成为分析领域的研究热点[1-4],在细胞工程、蛋白质分析、环境监测、毒品检测和食品安全等领域获得广泛应用[5-7]。微阀是工作在连续流模式的微流系统不可缺少组成单元,它控制微流的流向及输运。根据微流驱动原理来分,微阀可分为有源微阀和无源微阀两大类。有源微阀需要外接动力源,实现微流在微通道内输运。而无源微阀无需外加动力源,它可通过微通道表面特性或特殊的微通道几何结构来实现微流驱动[8],因此,无源微阀几何尺寸小,易集成,但它难以实现微流体在微通道中逆向输运,因而,无源微阀无法有效实现微流的流向控制和输运控制,且微阀开启和关闭操作时间相对较长,有一定局限性。针对无源微阀存在的缺点,微流控专家提出了有源微阀,并发明了不同动力源的微阀结构。其中,典型的动力源主要有气动[9]、电动[10]、电化学势[11]、静电[12]、电磁[13]、相变[14]、热膨胀阀[15]及多种动力源的混合源[16]等。这些动力源用于微阀的控制具有其各自的优点,也存在一些由其特点所带来的缺点。如气动微阀工艺及结构均较简单,但需要外加气泵及气泵的控制电路,体积较大,无法集成,抵消了微流分析系统的小尺寸优点。静电微阀易集成,它仅需在微流基片上

**收稿日期**:2016-05-07
**基金项目**:常州工学院科研基金资助项目(YN1404);江苏省创新基金资助项目(201511055039X)
**作者简介**:李向莉(1980-),女,山东潍坊人,讲师,硕士,主要从事通信材料及微流器件的研究。钱显毅(1962-),男,湖北随州人,教授,主要从事敏感电子学及压电微流器件的研究。

淀积两个电极，但电极加电后，易电解微通道中的工作流体，应用受限。根据热膨胀原理研制的热膨胀微阀应用微腔内气体或石蜡等材料加热时体积变化来实现微阀控制，其优点是结构简单，相对于气动微阀，它无需外加气泵，微阀尺寸相对较少，但一般热膨胀微阀开关时间较长，需要若干分钟。其他几类微阀，如电磁微阀、电化学微阀和混合微阀等各有优缺点，并应用于特定场合。

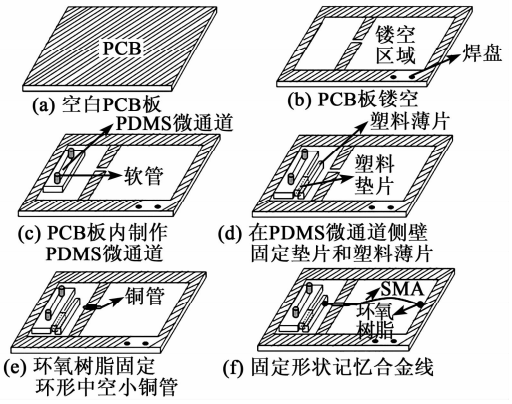
形状记忆合金(SMA)微阀是一种有源微阀，它采用记忆合金在温度变化时形状发生变化的原理来实现微阀的开启和关闭，它具有较大的驱动力，因而为微流控专家所重视[17]。但报道的形状记忆合金微阀需要外部较大电流产生热源来改变形状记忆合金线的温度[18]，应用有一定局限性，且不能直接应用在压电微流器件上，不能充分发挥压电微流器件强大微流操控能力。

压电器件由于具有工艺成熟、简单，成本低等优点，不仅广泛应用于通信领域，也为微流控学专家所重视，尤其是它具有强大的微流操控能力而广泛应用于微流分析领域。为解决形状记忆合金微阀上述提及的需要大电流缺点，同时，又能充分发挥压电微流器件强大微流操作能力，本文提出了一种新的形状记忆合金微阀，它无需在形状记忆合金线上加电流，采用声表面波(SAW)辐射微液来控制微阀动作。由于采用 SAW 来控制微阀，所提出的形状记忆合金阀可充分发挥压电微流器件的微流操控能力强的优点，具有较大的研究价值。

## 1 实验

### 1.1 基于 SAW 形状记忆合金微阀的制作

基于 SAW 形状记忆合金微阀制作工艺如图 1 所示。



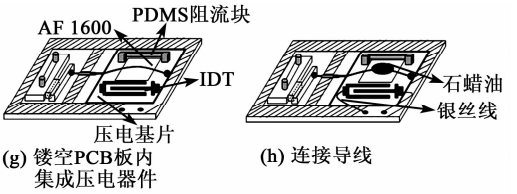




图 1 形状记忆合金微阀工艺流程

图 1 中，采用电路板镂空技术，在空白 PCB 板(见图 1(a))上镂空特定形状区域，并制作两焊盘，用于连接叉指换能器(IDT)汇流条(见图 1(b))，采用软光刻工艺制作聚二甲基硅氧烷(PDMS)微通道(见图 1(c))，微通道两端连接软管，用于微流入口和出口，在 PDMS 微通道右侧壁粘贴塑料垫片和薄片，并采用胶带与微通道一起固定于 PCB 板上(见图 1(d))。在镂空的中间间隙采用环氧树脂胶粘贴环形中空小铜管(见图 1(e))，SMA 线穿过铜管，一端通过环氧树脂胶与塑料细薄片粘结，另一端通过环氧树脂胶固定于 PCB 板上(见图 1(f))。在 128°*YX*-$LiNbO_3$ 基片上采用微电子工艺制作中心频率为 27.5 MHz 的 IDT，在声路径上涂覆 Teflon AF1600 薄膜，压电基片嵌入于镂空的 PCB 内，并在声传播方向侧端贴合 PDMS 阻流块，压电基片表面略低于 SMA 线，压电器件通过环氧树脂胶固定于 PCB 板上(见图 1(g))，采用导电银胶将 IDT 的汇流条与 PCB 板的焊盘进行银丝线连接，放置石蜡油微流体于压电基片上，用于加热 SMA 线(见图 1(h))。

### 1.2 实验装置

基于 SAW 形状记忆合金微阀的实验装置如图 2 所示。

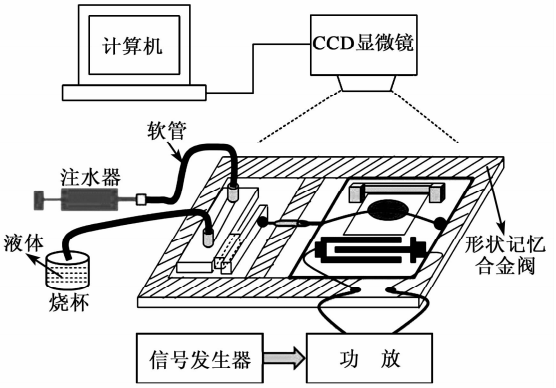



图 2 基于 SAW 形状记忆合金微阀的实验装置

图 2 中，IDT 采用微电子工艺制作在 128°*YX*-$LiNbO_3$ 基片上。IDT 的指对数为 35，孔径为 ∅4.32 mm，周期为 144 μm，微通道出入口采用软

管分别连接进样器和玻璃容器。SAW 辐射石蜡油微流体,用于加热 SMA 线,使其发生形变,进而控制微阀动作。

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,采用微流体输运作为实验对象,进行微阀开关实验。信号发生器产生的电信号经功率放大器放大后加到 IDT 上,激发 SAW,辐射入声路径上石蜡油微流体,并加热其上 SMA 线,当温度超过 30 ℃时,SMA 线开始膨胀伸长,当温度达到 60 ℃时,SMA 线变为直线。SMA 线伸长,驱动微通道发生形变,而阻止微流输运,微阀关闭;温度下降为小于 30 ℃后,SMA 线恢复相对软性状态,SMA 线长度在硬性塑料片恢复力作用下发生恢复形变,微通道恢复导通状态,实现微阀开启操作。

## 2　实验结果与讨论

为了了解形状记忆合金线在 SAW 辐射石蜡油微流体时形状变化,在压电基片上进样 18 μL 石蜡油,包覆弯曲的形状记忆合金线,IDT 加 28.5 dBm 连续正弦波电信号,形状记忆合金线尺寸变化如图 3 所示。

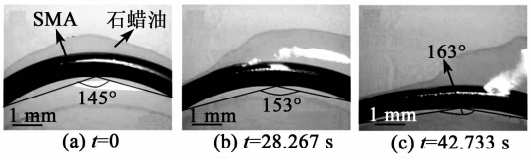



图 3　形状记忆合金线 SAW 作用下尺寸变化

图 3(a) 为弯曲的形状记忆合金线放置于压电基片上,18 μL 石蜡油包裹形状记忆合金线。为验证形状记忆合金线在未固定情况下,受热变化时尺寸及位置变化,形状记忆合金线两端都不固定。图 3(b)、(c)表示在 28.5 dBm 电信号作用下,SAW 辐射石蜡油,加热形状记忆合金线,形状记忆合金线受热分别经过 28.267 s 和 42.733 s 时的伸展状况。为定量衡量形状记忆合金线伸展程度,测量了形状记忆合金线下侧顶端到下侧两端间夹角。由图 3 可知,该夹角从开始的 145°增加到 163°,在加热形变过程中,形状记忆合金线位置发生移动。由此可见,必须固定形状记忆合金线一端,确保形状记忆合金线总体中心位置基本不变,为微阀工作提供条件。

当压电基片上的 IDT 未加电信号时,微阀呈开态,微通道导通。图 4 为微阀开态时,进样泵通过微通道输运微流体视频截图。

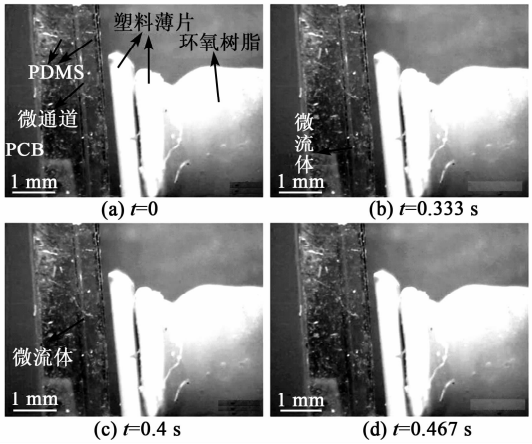



图 4　微阀开态时,微流体在微通道内输运

由图 4 可知,微阀开态状态时,微流体可在微通道内自由输运。从图 4(b)、(c)进一步可知,微流体前端在 0.067 s 内移动了 1.66 mm,结合微通道直径为∅155 μm,可得微流体流速为 0.467 μL/s。

当在 IDT 上加电信号时,其激发 SAW 辐射入基片上石蜡油,使弯曲的 SMA 线温度升高而伸展,推动与 SMA 线相接的塑料薄片,迫使 PDMS 微通道发生形变而关闭微通道。此时,微通道内微流体无法输运,微阀关闭。图 5 为 28.5 dBm 电信号作用下,PDMS 微通道受 SMA 线伸展而形变,实现微阀动作的视频截图。

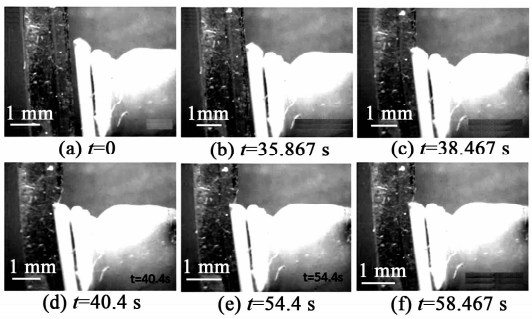



图 5　电信号功率为 28.5 dBm 时,SMA 驱动微通道壁,使其发生形变,实现微阀关闭的视频截图

图 5(a)为未加 SAW 时微通道保持畅通,微阀为开阀状态,图 4(b)～(d)为 28.5 dBm 电信号加到 IDT,激发的 SAW 加热 18 μL 石蜡油,使得弯曲的 SMA 线伸展而驱动 PDMS 微通道壁,迫使微通道

发生形变，直到微通道截止，微阀变为关闭状态。图5(e)、(f)为电信号撤除后，经过 14 s 和 18.067 s 后，SMA 线由于温度冷却，转为相对柔性，在硬性塑料片的恢复力作用下微通道发生部分恢复，微通道基本恢复导通状态，但恢复力较有限，因此，PDMS 微通道未能完全恢复初始状态，恢复力的研究将在后续工作中开展。

实验表明，增加电信号功率，SMA 线温度上升速度加快，可减少微阀关闭时间。

## 3 结束语

以印刷电路板为基板，集成压电器件和形状记忆合金线，制作了一种声表面波控制的 SMA 微阀，阐述了微阀的制作工艺和工作原理，以微流体输运为实验对象，对所研制的微阀进行了开关操作，验证了微阀的性能。本文工作可以得到如下结论：

1）声表面波可有效控制形状记忆合金微阀的开关操作。

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] CEDRIC F A F, VINCENT J S, BRUCE A M, et al. Determination of boron concentration in oilfield water with a microfluidic ion exchange resin instrument[J]. Talanta, 2016, 154(6): 304-311.

[2] JIANG H, JIANG D, ZHU P, et al. A novel mast cell co-culture microfluidic chip for the electrochemical evaluation of food allergen[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2016, 83(9): 126-133.

[3] ONELIA G, NICOLA E, CAMILLA L. Microfluidic technology enhances the potential of human pluripotent stem cells[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2016, 473(3): 683-687.

[4] FARAMARZ H B, ALI H Z, VAHID G. Transient molecular diffusion in microfluidic channels: Modeling and experimental verification of the results [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 233(10): 646-653.

[5] GIORGIA C, CONCETTA D N, FILIPPO C, et al. Functionalized poly(ethylene glycol) diacrylate microgels by microfluidics: In situ peptide encapsulation for in serum selective protein detection[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2016, 145(9): 21-29.

[6] ALEXANDRA D T, GERALD H W, KYLE K M, et al. Simultaneous analysis of vascular norepinephrine and ATP release using an integrated microfluidic system[J]. Journal of Neuroscience Methods, 2016, 266(6): 68-77.

[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] JITAE 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.

[12] ENDER Y, ARIKAN M A S, HALUK K. A normally closed electrostatic parylene microvalve for micro total analysis systems[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 181(1): 81-86.

[13] RAJESH L, SANIYA L, JEMMY S B, et al. Simulated and experimental dynamic response characterization of an electromagnetic microvalve Original[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 143(2): 399-408.

[14] YANG Y, LIN Q. A latchable microvalve using phase change of paraffin wax[J]. Sensors and Actuators, 2007, 134(1): 194-200.

[15] KIM J H, NA K H, KANG C J, et al. A disposable thermopneumatic-actuated microvalve stacked with PDMS layers and ITO-coated glass[J]. Microelectronic Engineering, 2004, 73/74(6): 864-869.

[16] JOSEPH A P, KENSALL D W. A Hybrid thermopneumatic and electrostatic microvalve with integrated position sensing [J]. Micromachines, 2012, 3(2): 379-395.

[17] SAURABH V, SURESH S, SUJITHA M, et al. Electronic control of elastomeric microfluidic circuits with shape memory actuators[J]. Lab on a Chip, 2008, 8(9): 1530-1535.

[18] LIN G, CAROLYN L R. Exploration and evaluation of embedded shape memory alloy(SMA) microvalves for high aspect ratio microchannels[J]. Sensors and Actuators A, 2011, 168(1): 155-161.