

文章编号 1004-924X(2013)04-1011-06

## 基于 SU-8 胶的新型被动式微型阀

张丛春\*, 郭泰, 丁桂甫

(上海交通大学微纳科学技术研究院微米/纳米加工技术重点实验室, 上海 200240)

**摘要:**为了在微流体控制系统中实现对流体流速的控制和流体的单向流动, 借鉴人体心脏瓣膜的结构, 设计了新型被动式微型阀。选用 SU-8 作为被动式微型阀的结构材料, 用 ANSYS 仿真了不同厚度(10, 15, 20  $\mu\text{m}$ )的阀门膜片在不同压力作用下的挠度与应力, 进而确定了合适的阀门膜片厚度。利用微细加工技术, 集成加工了微型阀, 并由此确定和优化了微型阀的加工工艺。用去离子水作为介质测试了微型阀的过流特性, 在正向压力为 11.7 kPa 的压力作用下, 测得 A、B 型被动式微型阀的正向流速分别为 1.66 ml/min 和 1.35 ml/min。对测试数据的分析表明, 设计的微型阀有线性控制的潜能。以 SU-8 胶作为结构材料的微型阀不仅性能较好, 同时具有生物兼容性, 可扩展微型阀的应用范围。

**关键词:**微电机系统; 微流控; 被动式微型阀; SU-8

**中图分类号:** TH134.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132104.1011

## Passive micro-valve based on SU-8

ZHANG Cong-chun\*, GUO Tai, DING Gui-fu

(Key Laboratory of Nano/Micro Fabrication Technology, Research Institute of Micro/Nano Science and Technology; Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhcc@sjtu.edu.cn

**Abstract:** To control the velocity and one-way flow of fluid in a micro-fluidic system, a novel passive micro-valve was designed base on Micro-electrical-mechanical System(MEMS) technology. By drawing lessons from a human heart valve structure, the deflections and stresses of a valve membrane under different pressures were analyzed with ANSYS by using SU-8 as the passive micro-valve structural materials, then the thickness of the valve membrane was optimized. The valve was fabricated with integrated processing of MEMS technique, so that the process technology for the valve membrane was determined. The performance of the passive valve was tested using deionized water as media and the forward flow velocities obtained are 1.66 ml/min for type A and 1.35 ml/min for type B under a forward pressure of 11.7 kPa. The tested analyzing data indicate that the designed passive valve has the potentiality of linear control, which means that the passive micro-valve made by SU-8 has not only better performance but also better bio-compatibility and can extend the applications of passive micro-valves.

**Key words:** Micro-electro-mechanical System(MEMS); micro-fluid control; passive-micro-valve; SU-8

收稿日期: 2012-10-24; 修订日期: 2012-11-27.

基金项目: 教育部创新基金资助项目(No. 708037); 上海市创新平台资助项目(No. 11DZ2290)

## 1 引言

微流体控制系统是由微米尺度的通道构成的,可以完成进样、混合、分离等多功能的流动网络。微阀门在微米尺度的流动控制中起着非常重要的作用,它的可靠性、集成度以及加工成本对整个微流体控制系统具有很大的影响<sup>[1]</sup>。作为微流体控制系统的关键执行部件,微阀门是对微通道内流体流动起控制限流作用的器件,可以实现流体通道的开、关与流体流向的切换<sup>[2]</sup>。被动式微阀是一种重要的微阀,它可以控制液体、气体或气液混合物沿指定的方向流动,并阻止液体、气体或气液混合物向相反方向流动,也称为止回阀。止回阀只在正向压力作用下才会开启,这一点类似于集成电路中的发光二极管<sup>[3]</sup>。

大多数被动式微阀集成在往复式微泵的进口或出口处作为控制流体进出的部件,止回阀的好坏对微泵的性能有很大的影响,如果其发生泄漏会降低微泵的输出效率。早些时候一些学者用双面刻蚀硅的方法制作的被动式微阀在微流体控制系统中已得到运用,但是硅的物理性能和由其制作的微阀不易封装,并且生物兼容性不好,使得这种被动式微阀的性能欠佳,也限制了其应用范围。随着 MEMS 技术的发展,聚合物微器件的出现很好地解决了这一难题。聚合物材料成本低、性能好而且具有很好的生物兼容性<sup>[4]</sup>,聚二甲基硅氧烷(PDMS)、Parylene C、SU-8 等聚合物材料已相继在微流体控制领域得到了应用<sup>[5]</sup>。但文献中报导的微阀的阀膜和支撑层一般用了不同材料,其制造时需要组装阀膜和支撑层,加大了制造的难度,且生物兼容性不好。被动式微阀都存在一些共同的问题需要进一步解决,如自吸、流速的精确控制以及可靠性等。与其他聚合物材料相比,用 SU-8 胶制造的止回阀具有开启压力小、反向泄漏小、弹性模量和弹性系数都很低及响应时间短等特点<sup>[6]</sup>。

本文完全用 SU-8 作为结构材料,设计了新型的被动式微阀(止回阀),对设计的止回阀进行了仿真、制造与测试。

## 2 被动式微阀结构设计

被动式微阀的结构主要有悬臂梁型和薄膜

型,2 种类型的被动式微阀各有优点<sup>[7]</sup>。本文设计的微阀借鉴了心脏瓣膜结构。人体心脏的瓣膜有两瓣膜和三瓣膜的功能,结合实际问题与可行性,初步选择了将阀膜三等分或四等分;微阀的理论基础是悬臂梁微阀,但又有薄膜型微阀的特点(薄),是两者很好的结合。如图 1 所示,微阀的结构主要由两层 SU-8 薄片组成:上层为微阀门的支撑层,采用 Micro-Chem 公司厚胶 SU-8 2100 制作;下层为阀门膜片,采用 Micro-Chem 公司薄胶 SU-8 2015 制作。选用 SU-8 胶作为结构材料的一个重要考虑是多层 SU-8 工艺提高了 MEMS 技术制造三维复杂微型结构的能力,同时又缩短了工艺时间<sup>[8]</sup>。表 1 列出了 SU-8 相关的物理参数。

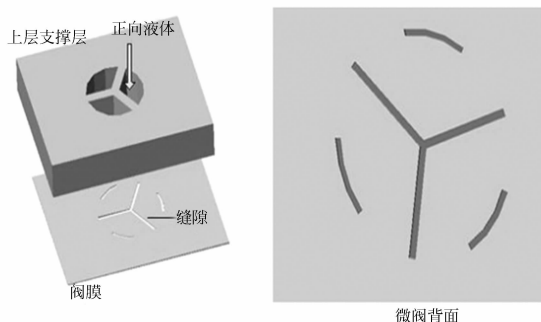


图 1 微阀的结构

Fig. 1 Structure of micro-valve

表 1 SU-8 的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of SU-8

材料	密度 /(g·ml <sup>-1</sup> )	拉伸强 度/MPa	最大延 展率/%	杨氏模 量/GPa	热稳定 /°C
SU-8 2015	1.20	60	6.5	2.0	315
SU-8 2100	1.23	60	6.5	2.0	315

阀门膜片分为三或四等分,圆周上留有缝隙以增加阀门膜片的可动性,以减小开启压力。用铜作为牺牲层使圆周内部分与上层分离,是阀门膜片的可动部分。通过设计不同形状的支撑层与阀门膜片来组成不同的新型被动式微阀,表 2 为所设计的 2 种被动阀及其相应的尺寸。

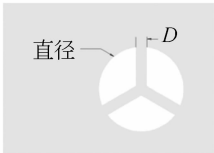
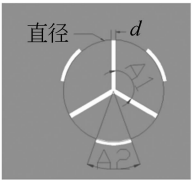
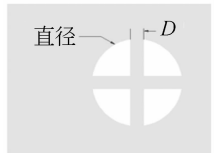
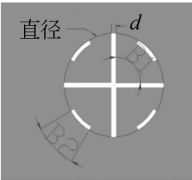
在液体压力作用下,阀门膜片会发生形变,且不同液体压力作用下阀门膜片的形变量不同,即阀门膜片可动部分开启的程度不同,从而实现对流速的调节。当输送液体沿正向流过微阀时,在液体压力作用下阀门膜片发生形变,此时微

阀开启,液体容易流过微阀。而当阀门膜片在反向液体压力作用下,上层支撑层可以阻挡阀门膜片发生变形,因为此时阀门膜片与支撑层接触,随

液体压力的增大,阀门膜片与支撑层的接触将越紧密,微型阀关闭,液体将很难反向流过。相比与正向流量,反向流量明显小于正向流量。

表 2 被动式微型阀的类型

Tab. 2 Types of designed passive micro valves

类型	上层支撑层	下层阀膜层	尺寸数据
A			支撑层直径 1 000 $\mu\text{m}$ $D: 200 \mu\text{m}$ 阀膜层直径 1 300 $\mu\text{m}$ $d: 60 \mu\text{m}$ $A_1: 120^\circ$ $A_2: 40^\circ$
B			

### 3 仿 真

微流体器件的仿真一般分为两部分,一部分是对微流体器件的力学分析,包括形变、应力、谐振频率等;另一部分是对器件的流体特性分析。ANSYS 作为结构分析的有力工具,其功能和作用是强大的。借助 ANSYS 分析微型阀的受力变形和应力分布情况,可以得到阀门膜片的厚度、变形、应力与受力之间的关系,从而优化微型阀的结构参数。

图 2 和图 3 是不同厚度的微阀门膜片的挠度和应力随压力变化情况的分布情况,从两幅图中可以看出,在一定的压力范围内挠度和应力都与压力有线性关系,随压力增大挠度也增大。膜片厚度是影响其变形与承受应力的关键因素。阀门膜片厚度从 10  $\mu\text{m}$  增加到 15  $\mu\text{m}$ ,在同等压力下形变与应力显著减小;厚度从 15  $\mu\text{m}$  增加到 20  $\mu\text{m}$ ,同等压力下形变和应力减小的幅度不大。

被动式微型阀通常应用在微泵的出入口处,因此被动式微型阀的可靠性和安全性是非常重要的因素。为了防止在过大作用下膜片形变与应力超出弹性范围,选择膜片的厚度为 20  $\mu\text{m}$ 。

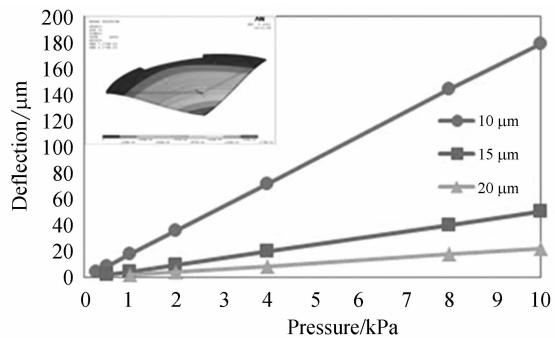


图 2 挠度与厚度、压力的关系

Fig. 2 Relationship among deflection, thickness and pressure

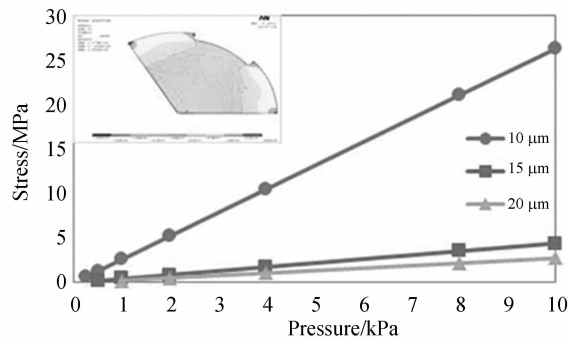


图 3 应力与厚度、压力的关系

Fig. 3 Relationship among stress, thickness and pressure

#### 4 微型阀的加工工艺流程

图 4 是用 SU-8 制造微型阀的工艺流程图。制造工艺采用了细微加工技术, 阀门膜片和支撑层是集成制造, 从而减少阀门组装的工艺步骤, 同时也减小了微型阀组装失败的可能。制作工艺主要分为四个阶段, 第一阶段采用 1 mm 厚的玻璃作为基体, 在基体上溅射 Ti, 用湿法氧化的方法将 Ti 氧化成二氧化钛。

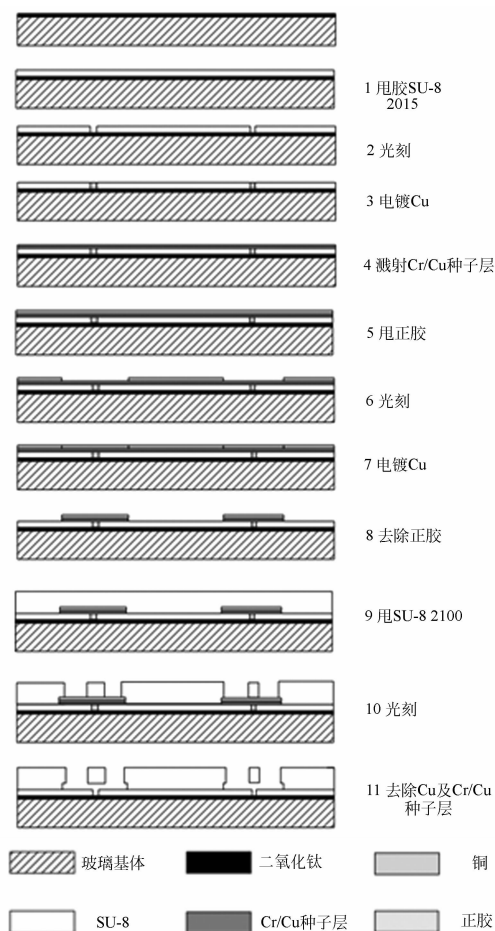


图 4 微型阀的工艺流程

Fig. 4 Fabrication process of micro-valve

甩第一层 SU-8 2015, 厚度  $20\ \mu\text{m}$ , 前烘后紫外线光刻出阀门膜片的结构图形, 如图 1 中微型阀背面图形。由于阀门膜片上缝隙线宽较小, 显影时用 50W 兆声振荡, 使缝隙中的光刻胶完全溶解在显影液中。电镀之前最好用离子反应刻蚀机将基片活化, 在第一层阀门膜片上的缝隙中电镀 Cu 并平整化。电镀时要严格控制电镀的厚度, 使

电镀的厚度与阀门膜片的厚度刚好相同。

第二阶段制作膜片与支撑层之间的牺牲层。溅射一层 Cr/Cu 种子层后甩厚为  $10\ \mu\text{m}$  的正胶, 光刻出牺牲层图形, 电镀 Cu 将其填平, 之后去除正胶及 Cr/Cu 种子层。第三阶段是制造微型阀的第二层结构, 为了保证支撑层与阀门膜片不运动部分结合力好, 同时还要提高微型阀的平整度。依次用丙酮、酒精去除基片上可能的杂质及油渍, 接着在去离子水中超声  $6\sim 8\ \text{min}$ , 在  $120^\circ\text{C}$  烘箱中烘  $2\sim 3\ \text{h}$  后甩 SU-8 2100, 厚  $200\ \mu\text{m}$ , 经前烘、光刻、中烘, 显影出支撑层结构。最后, 用氨水与双氧水的混合物去除牺牲层中的 Cu 及种子层中的 Cr, 用铁氰化钾溶液去除 Cr/Cu 种子层中的 Cr。完成制备的微型阀如图 5 所示。



图 5 微型阀的图片

Fig. 5 Pictures of micro-valve

第四阶段是释放微型阀。先将基片沿预留的空隙切割成小方块, 再用 HF 酸溶解玻璃基体, 便释放出来了制造好的微型阀, 经释放后的微型阀如图 5 所示。溶解玻璃基体时控制 HF 水溶液的温度到  $45\ ^\circ\text{C}$  左右<sup>[9]</sup>, 并适当地搅拌, 从而提高溶解速度, 这样可以减小微型阀弯曲或分层可能。

#### 5 过流特性测试

对于微型阀的过流特性测试主要有两种方

式,一种是用一定压力的氮气作为气源,驱动液体流动,通过调整气压的大小来改变作用在阀门膜片上的压力;另一种使用液体静压力作为动力源,通过改变液体液面高度差的方法来调节作用在阀门膜片上的压力。相比较下,第二种方法较为简便,在实验室中也容易行得通。

试验中通过改变作用在阀门膜片正、反向上的压差来决定它的开启程度,由前面 ANSYS 仿真的结果可知,阀门膜片开启的大小,在弹性范围内与作用在阀膜上的正反向压力差正相关。本实验采用第二种方法测试微型阀的过流特性,测试原理如图 6 所示。由于阀膜层很薄,容易损坏,为了测试组装时不损坏微型阀,测试时在微型阀两侧用密封胶粘一层保护结构,然后在微型阀的两侧用密封胶固定进出口的导管。

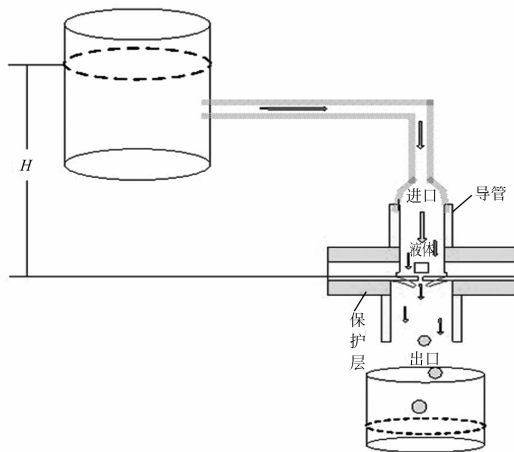


图 6 微型阀的组装和测试

Fig. 6 Assembly and test of micro-valve

试验中采用去离子水作为液体介质,容器上方与大气相通,微型阀出口处也与大气联通,改变容器中液面与阀门膜片的高度差  $H$  就可以改变作用在其上的压力,液面高度差  $H$  保持一定时间  $S$ ,因为流入小烧杯中的液体即为流过微型阀的流量,用精密天平称量烧杯中液体的质量即可换算出体液在一定压力下流过微型阀的流速。改变液面高度差  $H$ ,进而得到在不同压力下液体流过微型阀的流速。

图 7 为测试得到的数据,可以看到在  $0\sim 12$

#### 参考文献:

[1] 崔海航,李战华,靳刚.一种 PDMS 薄膜微型阀的制

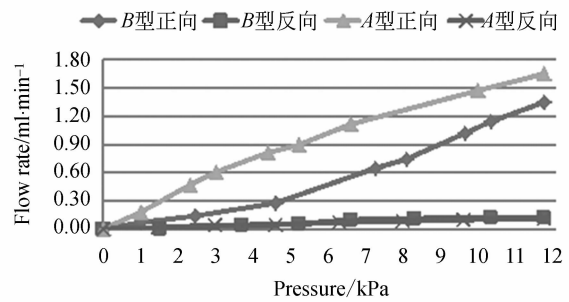


图 7 微型阀的正反向流速与压力的关系

Fig. 7 Relationship between forward/backward flow rate of micro-valve and pressure

kPa 压力下,通过所设计微型阀的流速与压力基本上有正相关的线性关系,正向流速显著大于反向流速,且反向流速在压力增大到一定程度后不再增大。A 型阀的正向流速比 B 型的大,而反向泄漏差别不大。由测试数据可以看出,这种微型阀有线性控制能力,也具有一定的反向截流能力,但其线性控制能力和反向截流能力还有待改善。分析所设计微型阀的结构,认为阀膜与阻挡层之间  $10\ \mu\text{m}$  的空隙和阻挡层结构是影响反向截流能力的主要因素。

## 6 结 论

设计了一种阀膜和支撑层全用 SU-8 作为结构材料的微型阀,这种阀具有很好的生物兼容性。通过 ANSYS 仿真分析,可知阀门膜片厚度是影响其变形与可承受应力的主要因素。采用三维非硅微加工技术,成功地制造了微型阀。微型阀在  $11.7\ \text{kPa}$  的压力作用下,A、B 型微型阀的正向流速分别为  $1.66\ \text{ml/min}$  和  $1.35\ \text{ml/min}$ ;在同样的反向压力作用下,反向流速分别为  $0.108\ \text{ml/min}$  和  $0.126\ \text{ml/min}$ 。

理想的被动式微型阀应该具备良好的线性控制能力、反向截流能力强和可靠工作等特性,而设计的微型阀线性控制和截留效果还不是很理想,因此微型阀还需要进行结构上的优化。例如,减小阀膜与阻挡层间的空隙,设计新型阻挡层结构使阀膜在同样的反向作用力下变形更小等。

备与性能分析[J]. 细微加工技术,2004,(3):70-75.

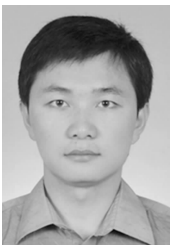
CUI H H, LI ZH H, J G. Thin films micro-valve'

- preparation analysis and performance analysis made by PDMS [J]. *Fine Processing Technology*, 2004, (3):70-75. (in Chinese)
- [2] 倪俊辉, 李蓓智, 杨建国, 等. 基于微流控技术的新型 PDMS 平面微阀 [J]. *仪表技术与传感器*, 2011, (3):85-87.
- NI J H. LI P ZH. YANG J G. Based on the novel PDMS planar micro valve [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2011, (3):85-87. (in Chinese)
- [3] KWANG W O, CHONG H A. A review of microvalves [J]. *Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16:R13-R39.
- [4] NGUYEN N T, TTUONG T Q, WONG K K, *et al.*. Micro check valves for integration into polymeric microfluidic devices [J]. *Micromechanics and Microengineering*, 2004, 14:69-75.
- [5] JONGHYUN O, GYUMAN K, FRANCIS K, *et al.*. Design and fabrication of a PDMS/Parylene microvalve for the treatment of hydrocephalus [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2011, 20(4):33-36.
- [6] 耿照新, 崔大付, 马小玲. 基于 MEMS 技术的 SU-8 胶被动微阀片的设计与研制 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2008, 6(5):343-348.
- GENG ZH X. CUI D F. MA X L. Design and development of SU-8 check microvalve base on MEMS Technology [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2008, 6(5):343-348. (in Chinese)
- [7] EZKERRA A, JOSE L, MAYORA K, *et al.*. A microvalve for lab-on-a-chip applications based on electrochemically actuated SU8 cantilevers [J]. *Sensor and Actuators*, 2011, B 155:505-511.
- [8] MATA A, FLEISCHMAN A J, ROY S. Fabrication of multi-layer SU-8 microstructures [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16:276-284.
- [9] 崔峰, 肖奇军, 吴校生, 等. Pyrex 玻璃金属化凹坑的湿法腐蚀 [J]. *功能材料与器件学报*, 2008, 14(1):236-240.
- CUI F. XIAO Q J. WU X SH. Wet etching pits of Pyrex glass for metallization [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2008, 14(1):236-240. (in Chinese)

#### 作者简介:



张丛春(1973—),女,湖北,博士,副教授,2002年于华中科技大学(原华中理工大学)获得微电子学与固体电子学博士学位,2004年于上海交通大学微纳科学技术研究院博士后出站后留校工作,主要从事薄膜电子材料与元器件, MEMS 微执行器和微流体器件。E-mail: zhcc@sjtu.edu.cn



郭泰(1985—),男,甘肃,研究生,2009年于华东理工大学机械设计制造及其自动化专业获得学士学位,主要研究微流控器件。E-mail: guotai@sjtu.edu.cn



丁桂甫(1963—),男,山东,博士,教授/博导,1980年于复旦大学化学系获得学士学位,1987年硕士毕业后进入上海交通大学微纳科学技术研究院,任“微米/纳米加工技术”国家级重点实验室副主任,主要从事微机械加速度传感器、电热微驱动器方面的研究。E-mail: gfding@sjtu.edu.cn

(本栏目编辑:马健)  
(版权所有 未经许可 不得转载)