基于 MEMS 的微泵研究进展 *

王沫然, 李志信
(清华大学 工程力学系,北京 100084)

摘　要: 主要介绍了基于 MEMS 的微泵 10 年来的研究成果和研究现状。微泵是微电子机械系统(MEMS)中重要的执行器件,在系统中占有很重要的地位。微泵可以分为有阀泵和无阀泵两大类,一般来说,有阀泵的制造工艺和应用技术比较成熟,但存在加工尺寸限制和使用寿命的问题;无阀泵的原理新颖,结构相对简单,更适合微型化发展,是目前研究的热点。

关键词: 微泵; 微电子机械系统; 有阀泵; 无阀泵
中图分类号: TH137.51; TP271^{+}.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000 - 9787(2002)06 - 0059 - 03

Investigation process of micropump based on MEMS

WANG Mo-ran, LI Zhi-xin
(Dept of Engin Mech, Tsinghua University, Beijing100084, China)

Abstract: The research on the micropump in the past decade is reviewed. Micropump, as an important executive device of MEMS, plays a very important role in micro systems. They are divided into two types that are pumps with valves and those without them. In general, the manufacture and the application of the valved micropumps are ripe, however the size limitation of fabrication and the problem of short operating life have always been trouble. The valveless micropump is novel in mechanism, simple in structure, and suitable for micromation. And now it has been a hot research field.

Key words: micropump; MEMS; valved micropump; valveless micropump

0　引　言

微电子机械系统(MEMS)是 20 世纪末兴起并得到迅猛发展的军民两用的交叉性的高技术领域,欧美及日本等发达国家对此都投入了相当多的人力和财力进行研究[1],据美国国防部的相关部门估计,进入 21 世纪以来,全球对 MEMS 的投资将以近乎成倍的速度递增[2]。具体来说,MEMS 是指基于(但不限于) IC 工艺设计并制造、可批量生产、集电子元件与机械器件于一体的微小系统。

MEMS 主要具有如下的优点:尺寸小,质量轻,响应快;准确度高,性能好;可以集成控制、感应和执行等多种功能;生产成本低,生产周期短,能耗低;对环境的损害小等。基于以上优点,MEMS 在发展不到 20 年的时间里已经广泛应用于化工工业、能源动力、信息通讯、国防产业、航空航天和医药及生物工程等领域,而且在家庭服务、人体研究及环境治理等方面也有巨大的应用前景,因此甚至有人把 MEMS 称为"机械复兴"。

微流动系统是 MEMS 的一个重要分支,近年来已经成为热门的研究领域。微泵作为一个重要的微流动系统的执行器件,是其发展水平的重要标志。微型泵根据其有无可动阀片可分为有阀型微泵和无阀型微泵。有阀型微泵往往基于机械驱动,原理简单,制造工艺成熟,易于控制,是目前应用的主流;无阀型微泵则常常利用流体在微尺度下的新特性,原理比较新颖,更适于微型化,具有更大的发展前景。

1　有阀型微泵

有阀型微泵一般是利用腔体容积的周期性变化和单向阀门的作用进行工作的,典型的往复式薄膜泵的基本原理性结构如图 1 所示[3]。

收稿日期:2002 - 01 - 16
* **基金项目**:国家重大自然科学基金项目(59995550 - 2);
国家重点基础研究发展规划项目(G1999033106)

© 1995-2003 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

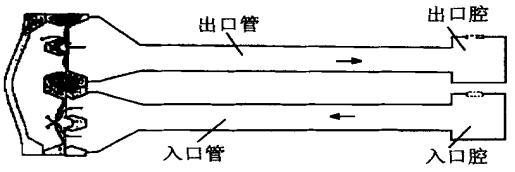

图1 往复式薄膜泵基本结构

Fig 1 Structure of reciprocating membrane pump

通常情况下,体积变化是通过压电振动薄膜产生的,泵的最大输出压力取决于所用驱动器的驱动能力。根据驱动薄膜振动方式的不同,有阀型微泵可以分为压电驱动微泵、静电驱动微泵等。

1.1 压电驱动微泵

压电驱动器有压电片式和压电块式两种,其原理是基于晶体的压电特性来驱动薄膜振动的。例如,荷兰 Twente 大学研制的压电片驱动微型泵[4]驱动膜直径为 12.5 mm,工作电压在 100 V,流量小于 10 μl/ min,在 125 V 电压驱动下,最高背压为 2 mH_2O,工作频率不高。日本东北大学研制的压电块驱动微型泵[5],泵体基片尺寸为 20 mm ×20 mm × 10 mm,最大流量为 40 μl/ min,最高背压为1 mH_2O,驱动电压约为 100 V。其它比较典型的还有球形阀的压电片驱动微型泵和压电驱动的蠕动泵等。(注 1 mH_2O = 9.806 65 kPa)

压电驱动微型泵的结构简单,易于实现,但后续装配工艺不利于微型化和批量生产,而且驱动电压偏高,限制了其应用范围。

1.2 静电驱动微型泵

静电驱动是微驱动的一种有效方式。静电驱动微泵的制作工艺与 IC 工艺的兼容性好,但电极间距一般较小,驱动电压较高,不利于应用。

1.3 热驱动微泵

热气驱动微型泵利用气体腔内气体的膨胀和收缩来驱动膜片。例如,荷兰 Twente 大学研制的热气驱动微泵[6],其驱动输入电压和功率分别小于 10 V和 2 W,在驱动频率为 5 Hz 时,可以实现输出流量为 0～50 μl/ min。清华大学研制的双金属驱动微型泵[7],当驱动电压为 16 V,驱动频率为 0.9 Hz 时,输出流量为 43 μl/ min。

热驱动微泵的制作工艺与 IC 工艺兼容性好,但驱动电压低,同时驱动频率较低,限制了输出流量和背压。

2 无阀型微泵

尽管有阀型微泵的工作原理比较简单,易于控制,制造工艺比较成熟,但由于整个泵体中存在阀片等机械可动部件,因此就必然受到加工工艺和加工准确度的限制,不利于微型化的发展趋势,而且由于阀片的频繁开关,泵的可靠性和使用寿命也不高。相比之下,无阀型微泵由于其结构相对简单、制造工艺要求不高,因而有着独特的发展优势。无阀型微泵通常利用了流体在微尺度下的新特点,因此一般原理非常新颖。

2.1 收缩 - 扩张型微泵

收缩 - 扩张型微泵是比较典型的无阀型微泵,是近年研究的热点。它以收缩和扩张的不同形状通道代替了单向阀,利用因流道不对称所引起的压力损失的不对称性来实现流体的泵送,但这类泵的反向止流性能较差。图 2 为收缩 - 扩张型微泵的原理图[8,9]。

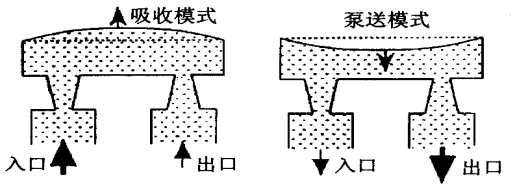

图2 收缩 - 扩张型微泵的原理

Fig 2 Principle of nozzle-diffuser micropump

当可动薄膜向上运动时,两端的流体同时进入腔内,但由于出口端的阻力较大,导致入口端流入腔体的流体较多;当薄膜向下运动时,流体从两端同时流出腔体,但与向上运动时相反,这时入口端的阻力较大,从而出口处流出的流体较多。这样就实现了流体从入口到出口的泵送。驱动频率的限制也是有阀微型泵的缺点之一,而这种泵的驱动频率可达几百赫兹。若利用气泡来驱动收缩 - 扩张型微泵,其最大流量为 5 μl/ min,驱动频率为 250～400 Hz,最大泵压为 377 Pa。

2.2 电液动力微泵(EHD 泵)

电液动力泵的原理是通过诱导液体中的电荷运动而产生动量,带动流体运动。微型电液动力泵按其驱动电压类型可分为两种,一种是在平行电极间施加直流电压的 EHD 泵,另一种是在电极阵列上施加不同相位行波电压的 EHD 泵。

EHD 泵的原理比较新颖,但这种泵对液体的导电特性有特殊的要求,往往还需要在液体中注入离子,这使其应用受到很大限制。

2.3 热驱动型微泵

热驱动微泵是利用流体的热特性,例如热胀冷缩或者相变来驱动工作流体。热气驱动的无阀蠕动

© 1995-2003 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

泵主要由加热基片、膜基片和管道基片组成。膜片与管道之间的间隙处于常开状态,加热驱动将使间隙关闭,膜片的顺序动作促使流体定向流动。其加热部分也可不用电加热,而改用激光加热,成为激光热驱动微泵。图 3 所示为利用流体受热相变来实现泵送的新型微泵[10]。

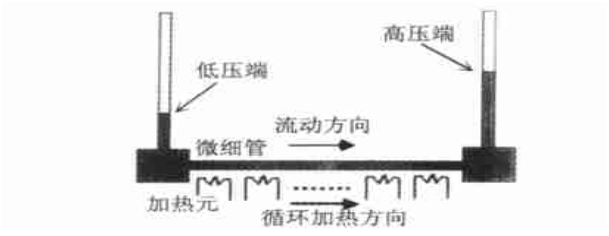

图 3　相变型微泵结构

Fig 3　Structure of phase-change micropump

通过对微细管内液体进行循环周期性加热,利用流体周期性的相变可以使流体沿热源移动的方向泵送。对于特征尺度为 200 μm 的微泵,其泵送流量可达 34 μl/ min,最大泵压可达 20 kPa 以上。

2.4　基于粘性的微泵

由于尺度减小,流体的粘性特性也会发生变化,可以利用这一点来实现定向泵送。图 4 所示为一种新型的粘性泵[11],这种泵利用由于旋转轴与上下两端壁面的距离不同所造成的粘性力的不同从而实现定向的净流量。这种泵常常应用在两端压差很小的情况下。

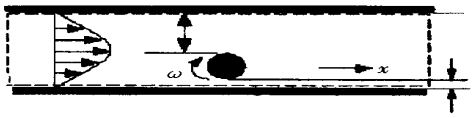

图 4　新型粘性泵

Fig 4　A novel micropump driven by viscosity

另一种利用粘性作用来实现定向泵送的微泵是利用液体粘度随温度变化而发生改变的特点,当膜片挤压流体时,加热出口处流体,使之粘性阻力下降,使流体更易从出口流出,当膜片复原吸入流体时,加热入口处流体,使流体更易从入口处流入,这样就实现了流体的定向泵送。此微泵的测试泵送流量最大可达 5.5 μl/ min。

2.5　双膜泵

这里的双膜泵不同于前面介绍的双金属膜微泵,它是利用在两个膜的不同位置开孔,由于开孔的位置不同而造成的阻力不同,从而实现定向泵送,此泵不仅原理新颖,而且效率很高,对于体积为1.5 cm × 1.5 cm ×0.1 cm 的微泵,流量可达30 ml/ min。

3　结束语

MEMS 技术的进步为微泵的发展提供了机遇和很大的发展空间。在微尺度下,流体的流动与常规尺度存在许多不同之处,因此出现了许多基于不同新原理的新型微泵,除了本文介绍的之外,还有凝胶驱动微型泵、电渗透微型泵[12]、超声波驱动微型泵、磁动力微泵(MHD)[13]、电润湿微泵、离子动力微泵[14]等。

参考文献:

[1]　王立鼎,刘　冲. 微机电系统科学与技术发展趋势[J]. 大连理工大学学报,2000,40:508 - 511.

[2]　Michalicek M A. Introduction to microelectromechanical systems [R]. New Mexico: Air Force Research Laboratory,2000.

[3]　尹执中,胡桅林,过增元. 微流动系统的发展状况[J]. 流体机械,2000,28:33 - 36.

[4]　Van Lintel HTG, Van De Pol FCM, Bouwstra S. A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon[J]. Sensors and Actuators,1988,15:153 - 167.

[5]　Esashi M, Shoji S, Nakano A. Normally closed microvalve and micropump fabricated on a silicon wafer[J]. Sensors and Actuators, 1989,20:163 - 169.

[6]　Van de Pol FCM, Van Lintel HTG, Elwenspoek M. A thermopneumatic micropump based on micro-engineering techniques[J]. Sensors and Actuators A,1990,21 - 23:198 - 202.

[7]　杨　岳,周兆英,叶雄英,等. 双金属热致动微型泵[J]. 仪器仪表学报(增刊),1996,17(1):341 - 345.

[8]　Olsson A. Diffuser-element design investigation for valve-less pump[J]. Sensors and Actuators A,1996,57:137 - 143.

[9]　Olsson A, Stemme G, Stemme E. Numerical and experimental studies of flat-walled diffuser elements for valve-less micropumps [J]. Sensors and Actuators A,2000,84:165 - 175.

[10]　李志信,王沫然,谭立彦. 相变型热驱动微泵泵送特性的实验[J]. 科学通报,2001,46(22): 1927 - 1930.

[11]　Sen M, Wajerski D, Gad-el-Hak. A novel pump for MEMS applications[J]. J of Fluids Engineering ASME, 1996, 118: 624 - 627.

[12]　Manz A, Effenhauser C S, Burggraf N, *et al*. Electroosmotic pumping and electrophoretic separations for miniaturized chemical analysis systems[J]. J Micromech Microeng,1994,4:257 - 265.

[13]　Jaesung Jang, Seung S Lee. Theoretical and experimental study of MHD micropump[J]. Sensors and Actuators A,2000,80:84 - 89.

[14]　Ahn Si-Hong, Kim Yong-Kweon. Fabrication and experiment of a planar micro ion drag pump[J]. Sensors and Actuators A, 1998,70:1 - 5.

作者简介:

王沫然(1977 -),男,吉林省吉林市人,博士,研究领域为 MEMS 及微流体的内部机理分析,目前主要从事微泵、微喷等内部流动和换热问题的研究。

© 1995-2003 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd.　All rights reserved.