

微流芯片

温维佳[†] 沈平

(香港科技大学物理学系 香港九龙清水湾 香港)

摘要 介绍了基于电流变液控制的微流芯片的工作原理和制作过程. 由于电流变液的粘度随外加电场的增加而增大, 且这种改变是可逆的, 响应时间也极快(毫秒量级). 利用此特性, 作者设计制成了电流变液数值型微流阀. 基于此类微流阀, 作者制成了一系列微流器件, 例如: 微流混合装置、微减震器以及微流泵.

关键词 微流控制, 电流变液, 微流混合

Microfluidic chips

WEN Wei - Jia[†] SHENG Ping

(Department of Physics, The Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, China)

Abstract We report the design and fabrication of microfluidic chips based on the electrorheological (ER) fluid mechanism. An ER fluid has a viscosity that increases as the applied field strength increases, is reversible, and has a fast response time on the order of 1—10 ms, making it an ideal material for microfluidic valves with digital-control characteristics. With such a valve we have successfully fabricated a series of microfluidic devices, such as a microfluidic mixer, micro-damper and micro-pump.

Keywords microfluidic control, electrorheological fluid, microfluidic mixer

近几年, 微流(microfluid)及其控制是物理学和生物科学界极为重要的研究领域之一^[1-3]. 通常微流装置的尺寸一般在微米及亚微米的范围. 在这种微小尺寸中流动的液体具有异于一般所言的宏观流体的物理行为. 比如, 在大尺度管道中流动的不同液体, 在经历一定时间的流动后, 可以相互渗透而混合(mixing). 然而, 两种液体以微流束的尺度在微米管中流动时, 不管流经的路径多长, 这两束微流却永远无法混合. 这是由于微小尺度下流体的雷诺数(Reynolds number) $Re \ll 1$, 此时其粘滞流(viscous flow)或层流决定了两种流体的动力学行为. 即, 除了两种液体之间的界面层有少量的分子层扩散外, 两种微流总是以分离的形式流动(见图1). 随着芯片高集成化的发展趋势, 如何将两种或多种微流液体在越来越小的器件中实现流体混合既是微流芯片制作与发展的一项挑战, 也是目前物理学和生物学的热点研究课题.



图1 微流管中流动着的两种液体

当前微流混合的研究方法主要集中在“被动”(passive)混合方式. 比如, 在微流装置中嵌入一些非对称的结构, 使液体的流动呈螺旋型方式前进, 其目的是产生三维混沌流(chaotic flow), 以期达到两流体之间相互混合、扩散等效果^[4]. 然而, 这种“被动”型微流混合需要流体有一定的混合长度, 通常达十几厘米以上, 从而加大了微流芯片制作工艺的难度, 同时也难以实现芯片微型化. 另一种微流混

本文内容涉及多人合作的结果. 合作人有 牛西泽, 刘立宇, Y. K. Lee
2006 - 08 - 04 收到

[†] 通讯联系人. Email : phwen@ust.hk

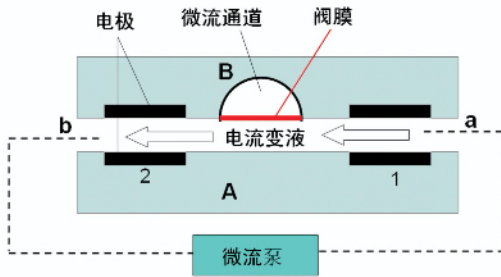


图2 电流变液微阀系统

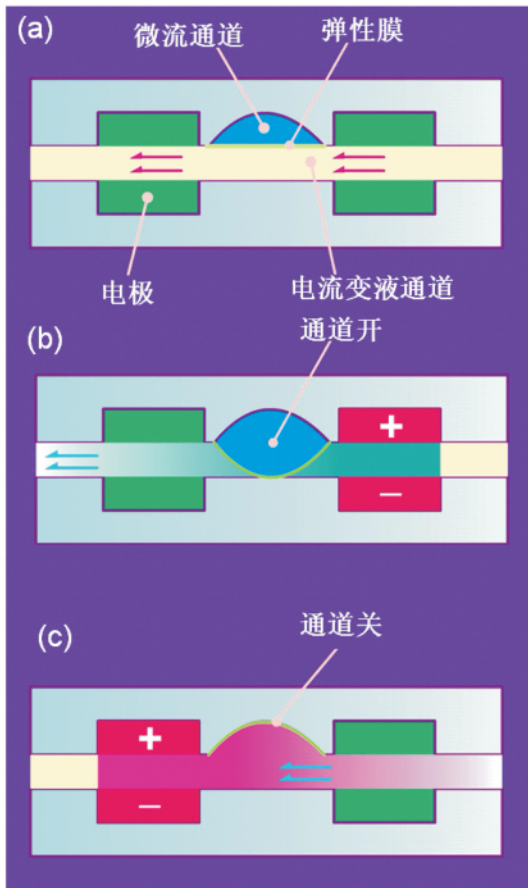


图3 电流变液微阀工作原理图

合采用了“主动”(active)式混合方式。其设计原理是在微流主管道(腔)的垂直方向上增加一些辅助腔(也称为边管道),且它们是相通的。这些辅助腔内流体的规则振动,可以引起主管道中的两微流束的规则扰动。在一定的振幅和频率下,主管道中的两种流体产生混沌流而实现混合^[5,6]。上述“主动”式混合方式的控制也有其局限性,主要是由于这些边辅助腔振动是外加气阀的“开”或“关”方式来完成。由于气阀的机械效应,其“开”、“关”频率受到一定限制,当微流以高速流经管道时,混合效果会明显减弱。

香港科技大学物理系智能材料研究小组在发明

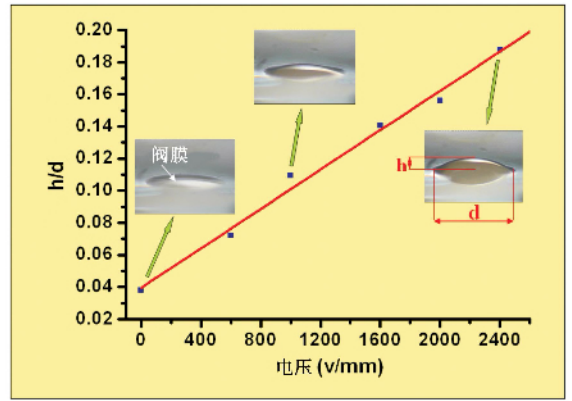


图4 电流变液微阀工作状态与电极电压的关系

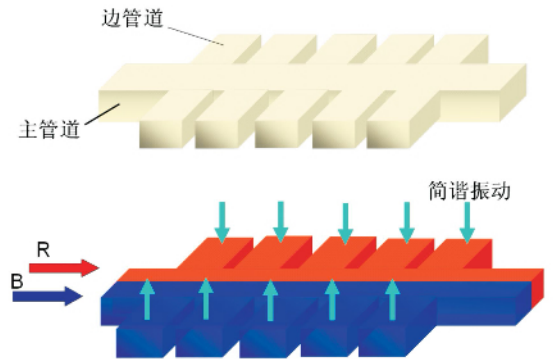


图5 电流变液主动微流混合器示意图

巨电流变液的基础上^[7,8],利用电流变液在电场作用下其粘度可调的特性,成功制成一种微阀系统。图2为微阀的设计示意图。微阀采用 Polydimethylsiloxane (PDMS) 材料,利用软光刻技术制备而成。微阀设计由电流变液通道、电极、阀膜和控制微流体通道等几部份组成。即在 PDMS 材料上制备宽为微米量级的电流变液管道,管道上分别嵌入两对软电极^[9]。在电流变液通道层 A(图2的纸平面内)和微流通道层 B(垂直于纸平面)之间是厚度为几十微米的 PDMS 薄层,此薄层用作为阀膜片。阀膜上层是被控微流通道。阀膜工作原理如下:电流变液由一微泵从 a 端注入,经通道由 b 端吸出形成一循环流。当电极 1 和电极 2 无电压作用时,电流变液在通道内无阻力流动,即 a 和 b 端的压强相等,如图 3(a) 所示。如果在电极 1 加上电压,电流变液通过此电极时粘度会增加,流速减慢,a-b 两端出现压力差,阀膜开始向下膨胀,从而引起微流通道开启,微流管截面增大(见图 3(b))。反之,如果只在电极 2 上加电压,这时,a-b 端的压强差使阀膜向上膨胀。随着电极上电压的增加,阀膜膨胀逐渐加大,微流管

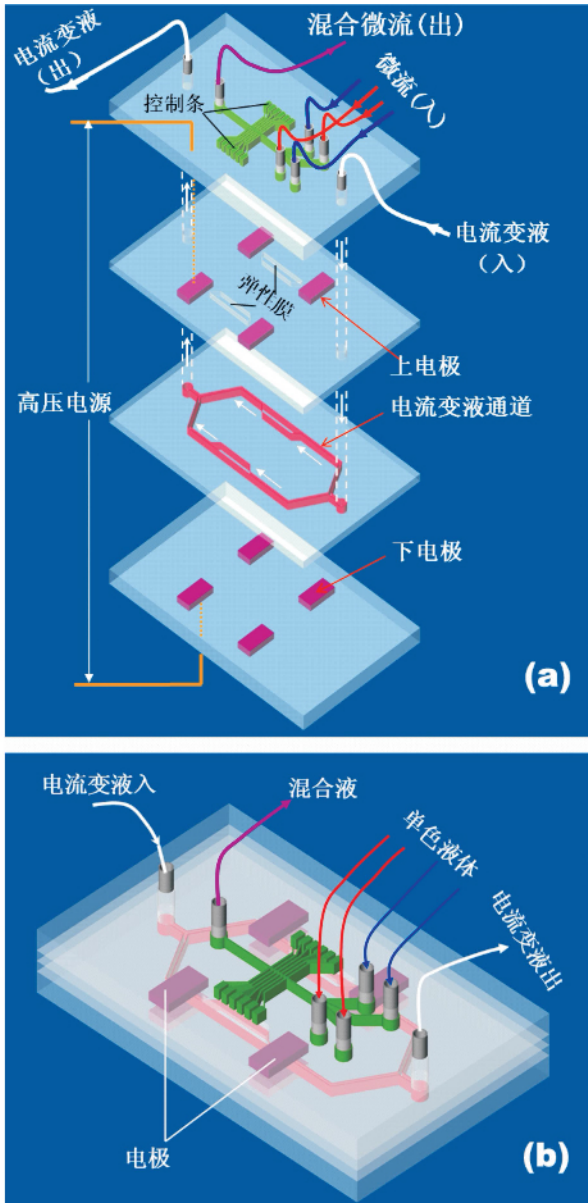


图6 (a)电流变液控制的微流混合芯片的层状组装结构 (b)微流混合芯片的工作示意图

截面逐渐减小,微流通道内流束也随之减小.当外加电压足够大时,阀膜完全阻断了微流通道的截面,微流管道中的流动随之停止.图4是实验上观察到阀膜随电极上电压增加时的膨胀变化关系.可以看到,随着电极上电压的增加,其阀膜膨胀高度逐渐增大.由此可见,阀膜的膨胀程度和膨胀方向完全由加在电极上的电压决定,外加电压实际控制着微阀的运作.因此可以借助于数值电压信号控制微流阀的开关行为.电流变液微阀的应用是设计制造一系列微流器件,例如:微流混合装置、微减震器以及微流泵的基本单元^[10-12].

作为例子,下面介绍如何利用电流变液微阀制

造主动式微流混合器件(microfluidic mixer).首先介绍微流混合器的管道设计.在设计主动微流混合器时,在微流主通道两边分别制备一些对称分布的边管道,如图5(a)所示,其端口被密封.没有扰动情况时,两种不同流体在微流管中呈分离流动状态(图中用不同颜色表示),如图5(b)所示.为使其均匀混合,可在对称分布的边管道上施加一简谐力,此时边通道中流体与主通道中流体的运动方向相互垂直,其结果导致主管道的中间部分两种液体会互相混合.实验发现,如果适当控制简谐振动的频率和振幅可产生混沌流,在经过多级作用后,两种流体可被均匀混合.

其次,电流变液微阀主动微流混合器件是由多层微流芯片组合而成.图6(a)是电流变液微阀控制的微流混合芯片的层状组装结构.有关结构细节和工作原理请参见文献[10].它由下电极(第一层),电流变液通道(第二层),上电极及阀膜(dia-phragm)(第三层),和微流通道(第四层)组合而成.所有层结构均由PDMS材料为基体,分别在其上嵌入电极或管道.在一定温度和压力下,其层间紧密结合形成一个多层结构的三维微流芯片^[13].

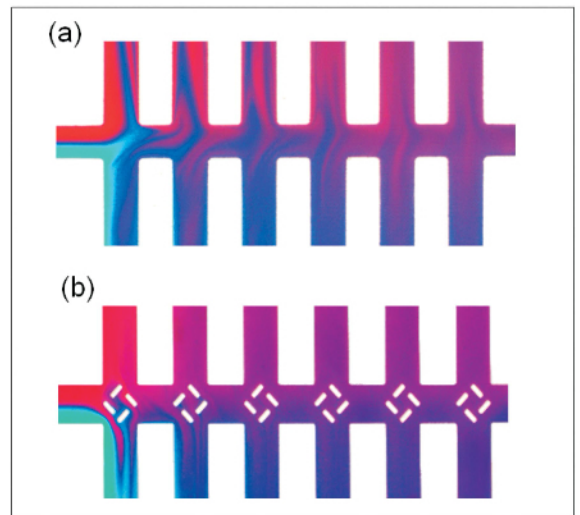


图7 复杂微流混合示意图

电流变液微阀主动微流混合器如图6(b)所示.电流变液由微型泵注入,经控制通道后被泵出形成循环流.需要被混合的多种液体由各个微流通道注入,在经过电流变液控制主动微流混合器混合后以混沌流形式流出.具体工作过程是,当多种微流在微流管中流动时,在电流变液控制通道中两对电极施加一反相电压,电流变液在通道中的流动特性发生变化,引起通道中的弹性膜(阀膜)上下膨胀运动.

由于弹性膜与上层中的微流管的边通道相连接, 阀膜的运动使边通道中的流体产生类似于简谐振动的运动. 其运动方向垂直于主通道, 从而扰动主通道中的两色流体. 在一定的控制频率和幅度下, 微流经多级扰动后被均匀混合成混沌流. 两色流体即可均匀混合, 见图 7 (a) 所示.

除此之外, 最新的实验结果发现, 如果在通道中加上一个旋转结构, 如图 7 (b) 所示, 其混合效果会更明显. 在此情况下, 两色流体即使在高速流动下, 也能很快被均匀混合. 我们称这种结构为“复杂微流混合芯片”(hybrid mixer). 其工作原理参见文献 [13].

参 考 文 献

[1] Lee C C , Sui G D , Elizarov A *et al.* Science , 2005 , 310 : 1793
 [2] Eijkel J C T , Bomer J G , Berg A. Appl. Phys. Lett. , 2005 , 87 : 114103
 [3] Acharya B R , Krupenkin T , Ramachandran S *et al.* Appl.

Phys. Lett. 2003 , 83 : 4912
 [4] Stroock A D , Dertinger S K W , Ajdari A *et al.* Science 2002 , 295 : 647
 [5] Bottausci F , Mezic I , Meinhart C D *et al.* Phil. Trans. R. Soc. Lond. 2004 , 362 : 1001
 [6] Okkels F , Tabeling P. Phys. Rev. Lett. 2004 , 92 : 038301
 [7] Wen W , Huang X , Yang S *et al.* Nature Material 2003 , 2 : 727
 [8] 温维佳 , 黄先祥 , 杨世和等. 物理 , 2003 , 32 : 777 [Wen W J , Huang X X , Yang S H *et al.* Wuli (Physics) , 2003 , 32 : 777 (in Chinese)]
 [9] Niu X , Wen W , Lee Y K. Appl. Phys. Lett. , 2005 , 87 : 243501
 [10] Niu X , Liu L , Wen W *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2006 , 88 (15) : 153508
 [11] Liu L , Niu X , Wen W *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2006 , 88 : 173505
 [12] Liu L , Chen X , Niu X *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2006 , 89 : 083505
 [13] Niu X , Liu L , Wen W *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2006 , 97 : 044501

.....
 · 书评和书讯 ·

科学出版社物理类新书推荐

书 名	作(译)者	定 价	出版日期	发行号
亚稳金属材料	胡壮麒	140 估计	2006 年 10 月	暂无
半导体异质结物理(第二版)	虞丽生	¥52.00	2006 年 5 月	0-2443
高等原子分子物理学(第二版)	徐克尊	¥54.00	2006 年 9 月	0-2488
辐射和光场的量子统计理论	曹昌祺	¥60.00	2006 年 3 月	0-2463
实验物理中的概率和统计(第二版)	朱永生	¥72.00	2006 年 3 月	0-2464
物理学中的群论(第二版)	马中骥	¥68.00	2006 年 2 月	0-2421
微分几何入门与广义相对论(上册,第二版)	梁灿彬, 周彬	¥59.00	2005 年 12 月	0-2363
液晶光学与液晶显示	王新久	¥59.00	2005 年 12 月	0-2424
量子信息物理原理	张永德	¥59.00	2005 年 12 月	0-2347
相互作用的规范理论(第二版)	戴元本	¥68.00	2005 年 6 月	0-2148
计算物理学	马文淦	¥37.00	2005 年 5 月	0-2147
物理学家用微分几何(第二版)	侯伯元, 侯伯宇	¥98.00	2005 年 3 月	0-1976
数学物理方程及其近似方法	程建春	¥58.00	2005 年 2 月	0-1952
量子力学系统控制导论	丛爽	¥46.00	2006 年 1 月	0-2369
计算电磁学要论	盛新庆	¥32.00	2005 年 3 月	0-1900
窄禁带半导体物理学	褚君浩	¥120.00	2005 年 5 月	0-2093
半导体量子器件物理	傅英, 陆卫	¥50.00	2005 年 1 月	0-2004
准晶物理学	王仁卉	¥45.00	2004 年 8 月	0-1802
软 X 射线射线与极紫外辐射的原理和应用	张杰	¥59.00	2003 年 9 月	0-1682
拉曼布里渊散射——原理及应用	程光照	¥48.00	2003 年 5 月	0-1301
广义相对论和引力场理论	胡宁	¥15.00	2003 年 3 月	0-1157

欢迎各界人士邮购科学出版社各类图书. 如果您有出版意向, 请和我们联系. 凡购书者均免邮费, 请按以下方式和我们联系:

电 话 : 010 - 64017957 64033515 电子邮件 : mlhukai@yahoo.com.cn 或 dpyan@esp.g.net

通讯地址 : 北京东黄城根北街 16 号 科学出版社 邮政编码 : 100717 联系人 : 胡凯 鄢德平

欢迎访问科学出版社网址 <http://www.sciencep.com>